

FACULTAD DE INGENIERÍA

Escuela Académico Profesional de Ingeniería Ambiental

Tesis

**Modelamiento hidrodinámico de dispersión de
contaminantes utilizando la dinámica computacional
de fluidos en el río Yanamarca, Jauja 2021**

Estefani Kenia Ccente Lucas
Dagoberto Darwin Garcia Enrique
Jordy Gustavo Esteban Carhuapoma

Para optar el Título Profesional de
Ingeniero Ambiental

Huancayo, 2021

Repositorio Institucional Continental
Tesis digital



Esta obra está bajo una Licencia "Creative Commons Atribución 4.0 Internacional" .

AGRADECIMIENTO

A través de estos párrafos expresamos nuestro agradecimiento a todas las personas que hicieron posible la realización de nuestro proyecto de investigación, por su apoyo incondicional y sincero, por brindarnos sus consejos, enseñanzas y formarnos. Siempre deseando nuestro crecimiento personal y profesional.

En primer lugar, nuestro profundo agradecimiento a la Mg. Blga. Verónica Nelly Canales Guerra, asesora del presente trabajo de investigación, quién orientó nuestros pasos y guio nuestro óptimo desempeño. Mencionar el gran compromiso, dedicación y su calidad académica para la investigación, demostrando su profesionalidad que la define como un excelente referente para la carrera.

A nuestras madres, padres, hermanos y a todos nuestros familiares por brindarnos su cariño, apoyo y estima, que nos impulsaron a seguir adelante. A las personas que nos aconsejaron día a día, nos orientaron y animaron a seguir adelante.

Por otro lado, agradecemos a la Escuela Académico Profesional de Ingeniería de la Universidad Continental, nuestra querida universidad, a la que representaremos en lo profesional y pondremos su nombre en alto, demostrando y aplicando los conocimientos que adquirimos y a todos los docentes de ingeniería que guiaron nuestro aprendizaje durante los 5 años de carrera universitaria.

DEDICATORIA

Agradecer a Dios por haberme otorgado a una familia extraordinaria, quienes han creído en mí siempre, dándome el ejemplo de superación, humildad y sacrificio; enseñándome a valorar todo lo que tengo. En segundo lugar, agradecer, aquellas personas que han fomentado en mi persona, el deseo de superación y el éxito. Por último agradecer a mis amigos y docentes quienes inspiraron a la consecución de este logro. Espero contar siempre con su valioso e incondicional apoyo.

Jordy Esteban

Quiero agradecer a Dios por haberme apoyado en mis momentos más difíciles y a mi familia por ser las personas que nunca me abandonaron durante mi proceso de formación profesional. En particular agradecer a mis padres quienes me enseñaron el valor de todo. Por último, agradecer a todos mis amigos, tutores, docentes quienes aportaron con sus conocimientos para tener una mejor educación.

Dagoberto Darwin

A Dios porque está conmigo a cada paso que doy, a mi Ángel Guardián por cuidar de mí, a mi madre por sus consejos, apoyo incondicional y sincero, que guió mis pasos y cuidó de mí, siempre pendiente de mi bienestar y salud. A mi Padre que me brindó su apoyo y aconsejó durante los años de estudio. A mis hermanas que fueron consejeras y amigas, quienes fueron un pilar muy importante para la culminación de mi carrera profesional.

Kenia Ccente

ÍNDICE

| | |
|---|------|
| AGRADECIMIENTO | ii |
| DEDICATORIA | iii |
| ÍNDICE | iv |
| ÍNDICE DE TABLAS | vii |
| ÍNDICE DE FIGURAS..... | viii |
| RESUMEN | x |
| ABSTRACT..... | xi |
| INTRODUCCIÓN | 12 |
| CAPÍTULO I | 13 |
| PLANTEAMIENTO DEL ESTUDIO | 13 |
| 1.1 Planteamiento y formulación del problema | 13 |
| 1.1.1. Problema general. | 14 |
| 1.1.2. Problemas específicos..... | 14 |
| 1.2. Objetivos..... | 14 |
| 1.2.1. Objetivo General..... | 14 |
| 1.2.2. Objetivos Específicos..... | 14 |
| 1.3. Justificación e importancia | 15 |
| 1.3.1. Justificación | 15 |
| 1.3.2. Importancia..... | 15 |
| 1.4. Limitaciones de la presente investigación | 16 |
| 1.5. Descripción de las variables..... | 16 |
| 1.5.1 Variable Independiente | 16 |
| 1.5.2. Variable dependiente | 16 |
| CAPÍTULO III..... | 35 |
| METODOLÓGIA | 35 |
| 3.1. Método, tipo o alcance de la investigación | 35 |
| 3.1.1. Método | 35 |

| | |
|--|----|
| Tipo de Investigación..... | 35 |
| Nivel de la Investigación | 35 |
| Diseño de la Investigación | 35 |
| 3.2. Materiales y métodos | 36 |
| 3.2.1. Materiales..... | 36 |
| 3.2. Población y muestra..... | 37 |
| 3.2.1. Población..... | 37 |
| 3.2.2. Muestra | 37 |
| CAPÍTULO IV | 39 |
| RESULTADOS Y DISCUSIÓN | 39 |
| 4.1. Delimitación y desarrollo de la geometría para la modelización hidrodinámica capaz de describir la dispersión de contaminantes utilizando simulación numérica computacional de fluidos CFD en el río Yanamarca – Jauja 2021 | 39 |
| 4.1.1. Descripción del área de estudio | 39 |
| 4.1.2. Delimitación del área de estudio..... | 39 |
| 4.1.3. Definición y desarrollo de la geometría del canal del río | 40 |
| 4.1.4. Edición de la geometría y definición de los materiales trabajados | 44 |
| 4.1.5. Desarrollo del proceso de Mallado para optimizar el método de elementos finitos | 45 |
| 4.2. Ecuaciones específicas de masa y momento consideradas en CFD para su correspondiente edición e implementación en la simulación del río Yanamarca – Jauja 2021 | 49 |
| 4.2.1. Definición de las condiciones y parámetros operacionales CFD- Ansys fluid Flow (Fluent)- VOF | 49 |
| 4.2.2. Generación de actividades de cálculo de resultados | 59 |
| 4.2.3. Configuración del inicio iterativo del cálculo de la simulación..... | 59 |
| 4.2.4. Análisis de las soluciones calculadas..... | 60 |
| 4.3. Nivel de validez y sensibilidad de la simulación en CFD respecto a los datos dispersivos de contaminantes experimentales del río Yanamarca – Jauja 2021 | 61 |
| 4.4. Comportamiento del vector gradiente de velocidades de descarga contaminante y su interacción con la corriente principal simulada en CFD, en el río Yanamarca- Jauja 2021 | 62 |

| | |
|---|----|
| 4.5. Sectores de mayor energía cinética de turbulencia responsable de la disipación caótica del contaminante simulado en CFD, en el río Yanamarca – Jauja 2021..... | 64 |
| 4.6. Flujo másico advectivo espacial del contaminante simulado en CFD, en el río Yanamarca – Jauja 2021 | 66 |
| 4.7. Discusiones | 69 |
| CAPÍTULO V..... | 71 |
| CONCLUSIONES | 71 |
| RECOMENDACIONES..... | 73 |
| REF ERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS..... | 74 |
| ANEXOS | 78 |

ÍNDICE DE TABLAS

| | |
|---|----|
| Tabla 1 Operacionalización de las variables..... | 17 |
| Tabla 2 Características de flujo en los sectores del canal simulado del río Yanamarca..... | 44 |
| Tabla 3 Compendiado de modelos ejecutados por el ANSYS- fluid Flow (Fluent)..... | 49 |
| Tabla 4 Compendiado de modelos ejecutados por el ANSYS- fluid Flow (Fluent)- VOF..... | 53 |
| Tabla 5 Modelos de energía cinética y disipación utilizados por ANSYS- fluid Flow (Fluent)- VOF | 54 |
| Tabla 6 Resultados del proceso de validación y confiabilidad | 62 |
| Tabla 7 Estadísticos de fiabilidad del instrumento de simulación | 62 |

ÍNDICE DE FIGURAS

| | |
|--|----|
| Figura 1 Volumen De Control De Flujo Para Las Ecuaciones De Navier..... | 28 |
| Figura 2 Interacción de fuerzas de superficie sobre un volumen de control Quarteroni, 2017. | 30 |
| Figura 3 Interacción de fuerzas de superficie sobre un volumen de control Quarteroni, 2017 | 31 |
| Figura 4 Diseño de la Investigación..... | 36 |
| Figura 5 Definición del sector y área de estudio..... | 40 |
| Figura 6 Seccionamiento del rio Yanamarca-tramo para simulación - ANSYS-Space Clean. | 41 |
| Figura 7 Perfil de anchuras naturales del lecho del rio Yanamarca-tramo para simulación- ANSYS-Space Clean | 41 |
| Figura 8 Perfil de profundidades promedio del canal del Rio Yanamarca-Tramo para simulación-ANSYS-Space Clean | 42 |
| Figura 9 Modelo final para simulación-ANSYS-Space Clean | 42 |
| Figura 10 Geometría 3D rio Yanamarca Jauja-Junín -margen derecha-tramo para simulación- ANSYS-Space Clean | 43 |
| Figura 11 Geometría 3D rio Yanamarca Jauja-Junín -margen izquierda-tramos para simulación- Space Clean..... | 43 |
| Figura 12 Importación De La Geometría Trabajada, Modelado Propio-ANSYS- WORKBENCH 2020 R2 | 45 |
| Figura 13 Definición de las características del material del modelo 3D, Modelado Propio- ANSYS-Desing Modeler | 45 |
| Figura 14 Edición del modelo con Mesh- ANSYS, Modelado Propio-ANSYS-WORKBENCH 2020-R2. | 46 |
| Figura 15 Edición del modelo con Mesh- ANSYS, Modelado Propio-ANSYS-WORKBENCH 2020-R2. | 46 |
| Figura 16 Selección operacional de entradas y salidas de simulación, Modelado Propio- ANSYS-Mesh. | 47 |
| Figura 17 Resultados de fase y áreas definidas de simulación. | 47 |
| Figura 18 Selección operacional de entradas y salidas de simulación ANSYS-Mesh..... | 48 |
| Figura 19 Mallado estructural del modelo-ANSYS-Mesh..... | 49 |
| Figura 20 Mallado estructural del modelo-ANSYS Workbench-2020 - R2..... | 51 |
| Figura 21 Configuración General del modelo-ANSYS fluent..... | 51 |
| Figura 22 Configuración del volumen de fluido Multifase (VOF) -ANSYS fluent | 53 |
| Figura 23 Configuración del flujo turbulento-ANSYS fluent..... | 55 |
| Figura 24 Edición del material a usar en la simulación (VOF) del río Yanamarca | 55 |
| Figura 25 Configuración del volumen de fluido Multifase (VOF) -ANSYS fluent. | 56 |

| | |
|---|----|
| Figura 26 Configuración de las condiciones de la entrada general de flujo para el río Yanamarca. -ANSYS fluent..... | 57 |
| Figura 27 Configuración de las condiciones del afluente contaminante al río Yanamarca- ANSYS fluent. | 57 |
| Figura 28 Configuración de las condiciones del afluente contaminante al río Yanamarca- fracción volumétrica para la fase 3-ANSYS fluent | 58 |
| Figura 29 Configuración de las condiciones de salida-ANSYS fluent..... | 58 |
| Figura 30 Edición de las actividades de cálculo de la simulación-ANSYS fluent | 59 |
| Figura 31 Edición de las actividades de cálculo de la simulación-ANSYS fluent | 60 |
| Figura 32 Soluciones iteradas-ANSYS fluent | 60 |
| Figura 33 Análisis de las soluciones-ANSYS fluent | 61 |
| Figura 34 Velocidades del flujo contaminante -ANSYS fluent-VOF | 63 |
| Figura 35 Gradiente de velocidades en la descarga del contaminante-ANSYS fluent-VOF... .. | 64 |
| Figura 36 Sectores de turbulencia- energía cinética de turbulencia-ANSYS fluent-VOF..... | 65 |
| Figura 37 Viscosidad de turbulencia o de remolino-ANSYS fluent-VOF | 66 |
| Figura 38 Flujo másico por sectores del río Yanamarca-ANSYS fluent-VOF..... | 67 |
| Figura 39 Fracción volumétrica simulada para el río Yanamarca-ANSYS fluent-VOF | 68 |

RESUMEN

El agua como recurso vital del planeta ha sido constantemente afectado por la diversidad de contaminantes de origen antrópico que son vertidos en los sistemas hídricos naturales. Los ríos como parte de estos ecosistemas vivos son los principales afectados. Uno de ellos es el Río Yanamarca, mantiene un riesgo ecológico real que está generando por el continuo arrastre de sustancias contaminante al humedal de Tragadero. Nuestra investigación aporta precisamente conocimientos sobre el movimiento dispersivo del contaminante. La metodología empleada para la generación de los datos de dispersión de contaminantes en nuestra investigación es la simulación, desarrollando la herramienta CFD (Mecánica de fluidos Computacional)-ANSYS. Su gran versatilidad de modelización, diseño 3D, configuración y desarrollo numérico de modelos (Navier- Stokes, Reynolds RANS, VOF) nos permitió el análisis de los flujos contaminantes simulados turbulentos en el río y estudiar así sus relaciones directas con las gradientes de sus campos vectoriales de velocidad y energía cinética dispersiva. Finalmente, como resultado de la investigación se determinó las velocidades de flujo del contaminante, flujo turbulento y viscosidad, flujo másico, fracción volumétrica y la validación. La simulación permitirá identificar posibles causas que ocasiona el contaminante para poder prevenirlo, no solo en el río Yanamarca sino los demás ríos que se encuentren en situaciones desfavorables.

Palabras Clave: Simulación, hidrodinámica, mallado, turbulencia, advectivo, tripolifosfato, contaminante.

ABSTRACT

Water as a vital resource of the planet has been constantly affected by the diversity of pollutants of anthropogenic origin that are discharged into natural water systems. Rivers as part of these living ecosystems are the main affected. One of them is the Yanamarca River, which maintains a real ecological risk that it is generating due to the continuous dragging of polluting substances to the Tragadero wetland. Our research precisely provides insights into the dispersive movement of the pollutant. The methodology used to generate the contaminant dispersion data in our research is simulation, developing the CFD (Computational Fluid Mechanics)-ANSYS tool. Its great versatility in modeling, 3D design, configuration and numerical development of models (Navier-Stokes, Reynolds RANS, VOF) allowed us to analyze the simulated turbulent pollutant flows in the river and thus study their direct relationships with the gradients of their fields. vectors of velocity and dispersive kinetic energy. Finally, as a result of the investigation, the flow velocities of the contaminant, turbulent flow and viscosity, mass flow, volumetric fraction and validation were determined. The simulation will allow the identification of possible causes caused by the contaminant in order to prevent it, not only in the Yanamarca river but also in the other rivers that are in unfavorable situations.

Keywords: Simulation, hydrodynamics, meshing, turbulence, advective

INTRODUCCIÓN

Jauja es conocido como “La perla del Valle del Mantaro” tiene varios atractivos naturales. El río Yanamarca, recorre en dirección de este a oeste, presentando una longitud de 15 kilómetro por 7 kilómetro de ancho aproximadamente y se vierte en la laguna de Chocón.(1) Desafortunadamente la población contamina sus aguas, alterando el ecosistema acuático. El constante desarrollo de la sociedad humana en las ciudades cerca de ríos y la sobreexplotación de la naturaleza ha causado frecuentes problemas ambientales (2). Se ha encontrado objetos flotantes en la superficie del río Yanamarca, amenazando el equilibrio de su ecosistema.

Unos de los objetivos fue determinar la modelación hidrodinámica capaz de describir la dispersión de contaminantes, utilizando simulación numérica computacional de fluidos con el programa Computational Fluid Dynamics (CDF), este se expresa en términos de ecuaciones diferenciales ordinarias e integrales combinadas. También se abordó los problemas de calidad de agua, su respectiva evolución en el espacio, tiempo de transporte y dispersión de contaminantes, estudiando la masa, el momento, comportamiento de vector gradiente, su interacción con la corriente principal y los sectores de mayor energía cinética ocasionado por la disipación caótica del contaminante.

En el primer capítulo se describe el planteamiento del problema, seguido del objetivo y la justificación. El segundo capítulo presenta los referentes o antecedentes y las bases teóricas. En el tercer capítulo se describe la metodología y el diseño de la investigación, también se delimita el terreno de estudio. En el cuarto capítulo se presentan los resultados de la simulación según los objetivos planteados. En el capítulo de Discusiones se pone en contexto los resultados obtenidos. Finalmente se muestran las conclusiones y recomendaciones derivadas de la investigación.

CAPÍTULO I

PLANTEAMIENTO DEL ESTUDIO

1.1 Planteamiento y formulación del problema

Actualmente el crecimiento desproporcionado de las grandes y pequeñas urbes ha ocasionado el consumo excesivo de materias primas y el incremento de demandas productivas por parte de la industria (agroindustria, ganadería, química, etc.). Esto ha generado daños colaterales al medio ambiente por la generación indeseada y a veces inevitable de todo tipo de residuos provenientes de la acción antropogénica. Los efluentes que arrastran este tipo de contaminantes afectan inevitablemente las aguas subterráneas, lagos, lagunas y ríos, perjudicando al ecosistema que se sustenta de los mismos (flora y fauna). Esto provoca la alteración hídrica del medio y un desequilibrio ecosistémico que perjudica al medio ambiente local (3).

Se ha considerado el agua como un recurso escaso pero disponible, orientándonos formas de cuidarlo y preservarlo de diversos contaminantes manteniendo su calidad (4). Muchos tipos de contaminantes como los que emergen y otros que son vertidos a los sistemas acuáticos, tienen características dispersivas e implicancias difíciles de estudiar por su alta dependencia del entorno y de los fenómenos influyentes del medio donde son vertidos (fenómenos de los tipos fisicoquímicos y biológicos) (5). Estos fenómenos generan altas temperaturas en la corrientes, evitando el crecimiento de las plantas a los alrededores del río, siendo su promedio para evitar deformaciones de 5°C (6).

Según Suarez et. al (7), el río Yanamarca presenta altos niveles de contaminación por exceso de fósforo y nitrógeno encontrados en sus aguas, posiblemente originados de los fertilizantes con otros fosfatos y de los detergentes vertidos de forma excesiva en sus aguas.

Como se puede observar, la problemática de los residuos contaminantes en los ríos ocasiona un gran impacto en la vida ecológica. Por otro lado, los sistemas ambientales, y en especial los sistemas hídricos, presentan fenómenos de gran complejidad, de naturaleza variante y aleatoria. La característica multifactorial compleja imposibilita el abordaje eficaz del problema en un único entorno. Estas implicancias crean la necesidad de buscar métodos de estudio innovadores que promuevan el uso de alternativas tecnológicas facilitadoras del análisis hídrico(8) . Es tan importante un sistema hídrico de dinámica de fluidos computacional (CFD) para entender y predecir la contaminación dispersiva en sus aguas y su impacto en la calidad del medio ambiente.

1.1.1. Problema general.

¿Cuál es la modelización hidrodinámica capaz de describir la dispersión de contaminantes utilizando simulación numérica computacional de fluidos CFD en el río Yanamarca – Jauja 2021?

1.1.2. Problemas específicos.

- ¿Cómo delimitar y desarrollar la geometría para desarrollar la modelización hidrodinámica capaz de describir la dispersión de contaminantes utilizando simulación numérica computacional de fluidos CFD en el río Yanamarca – Jauja 2021?
- ¿Qué ecuaciones específicas de masa y momento deben ser consideradas en CFD para su correspondiente edición e implementación en la simulación del río Yanamarca – Jauja 2021?
- ¿Cuál es el nivel de validez y sensibilidad de la simulación en CFD respecto a los datos dispersivos de contaminantes experimentales del río Yanamarca – Jauja 2021?
- ¿Cuál es el comportamiento del vector gradiente de velocidades de descarga contaminante y su interacción con la corriente principal simulada en CFD, en el río Yanamarca- Jauja 2021?
- ¿Cuáles son los sectores de mayor energía cinética de turbulencia responsable de la disipación caótica del contaminante simulado en CFD, en el río Yanamarca – Jauja 2021?
- ¿Cuál es el flujo másico advectivo espacial del contaminante simulado en CFD, en el río Yanamarca – Jauja 2021?

1.2. Objetivos

1.2.1. Objetivo General.

Determinar la modelización hidrodinámica capaz de describir la dispersión de contaminantes utilizando simulación numérica computacional de fluidos CFD en el río Yanamarca – Jauja 2021

1.2.2. Objetivos Específicos.

- Delimitar y desarrollar la geometría para la modelización hidrodinámica capaz de describir la dispersión de contaminantes utilizando simulación numérica computacional de fluidos CFD en el río Yanamarca – Jauja 2021

- Identificar que ecuaciones específicas de masa y momento serán consideradas en CFD para su correspondiente edición e implementación en la simulación del río Yanamarca – Jauja 2021
- Determinar el nivel de validez y sensibilidad de la simulación en CFD respecto a los datos dispersivos de contaminantes experimentales del río Yanamarca – Jauja 2021
- Determinar el comportamiento del vector gradiente de velocidades de descarga contaminante y su interacción con la corriente principal simulada en CFD, en el río Yanamarca- Jauja 2021
- Determinar los sectores de mayor energía cinética de turbulencia responsable de la disipación caótica del contaminante simulado en CFD, en el río Yanamarca – Jauja 2021
- Determinar el flujo másico advectivo espacial del contaminante simulado en CFD, en el río Yanamarca – Jauja 2021

1.3. Justificación e importancia

1.3.1. Justificación

El problema emerge del escaso conocimiento de los procesos hidrológicos, que no permiten el entendimiento sobre el destino y disposición final de los diversos contaminantes que afectan a un medio hídrico, generando vacíos investigativos sobre el comportamiento de los contaminantes en sus medios de transporte y sus variantes de transformación de bioquímica en el medio (9) La necesidad de realizar estudios para conocer la dispersión de la contaminación y poder tener un entendimiento del sistema, nos lleva a utilizar los modelos de la dinámica de fluidos computacionales (CFD). Los modelos son sensibles a los contaminantes, al ser desarrollados en el software ANSYS FLUENT, potencian el desarrollo de procesos hídricos simulados. Nos permiten evaluar el vertimiento difusivo de contaminantes y entender la dinámica del comportamiento hídrico con el objetivo de planificar y gestionar integralmente en el futuro.

1.3.2. Importancia.

El agua es el elemento esencial para la supervivencia de los seres vivos, en su estado puro tiene una disponibilidad no más de 1% de volumen para el consumo, por lo tanto es de importancia mantener la calidad del agua principalmente en sus manantiales y ríos para preservar la vida (4). Por ello, la investigación radica específicamente en el empleo de un nuevo método de estudio del comportamiento hídrico usando CFD para proponer soluciones que ahorren costos mediante la implementación de modelos en búsqueda de

una adecuada estimación y optimización del sistema en estudio. Este modelo también nos ayudará a anticipar y reconocer las causas y comportamientos de los contaminantes. También podrá ser de utilidad en un futuro proyectando un método idóneo del agua para otros ríos o caudales. Además, la investigación podrá ser tomada en cuenta para plantear soluciones públicas para el Río Yanamarca y crear así un desarrollo sostenible.

1.4. Limitaciones de la presente investigación

Como limitaciones se consideró que el sistema CFD modela solo una sección del río. Por otro lado, las limitaciones del programa pasan por el límite de datos que se pueda alimentar al modelo (10). Tampoco es posible conformar condiciones iniciales con precisión para la velocidad y las turbulencias, ya que principalmente se desconocen.

1.5. Descripción de las variables

1.5.1 Variable Independiente

Modelamiento Hidrodinámico CFD

Dimensiones:

- Modelos de Navier y Stokes
- Modelo de Reynolds promediado RANS
- Modelos de Energía y turbulencia

1.5.2. Variable dependiente

Dispersión de contaminante

Dimensiones:

Flujo advectivo contaminante simulado

Tabla 1 Operacionalización de las variables

| Tipo de variable | Definición | Dimensiones | Indicadores | Unidad de medida |
|-------------------------------------|---|--|---|--------------------------------|
| Variable Independiente | | | | |
| Modelamiento Hidrodinámico CFD | Corresponde al proceso de modelizado hidrodinámico numérico, con fines de revisión, inspección, adecuación, modificación y edición para su correspondiente utilización en la dinámica de fluidos computacional CFD. | <ul style="list-style-type: none"> • Modelos de Navier y Stokes • Modelo de Reynolds promediado RANS • Modelos de Energía y turbulencia | Velocidad de Entrada | m/s |
| | | | Velocidad de la descarga | m/s |
| | | | Viscosidad de entrada | kg/m-s |
| | | | Viscosidad de la descarga | kg/m-s |
| | | | Presión de entrada | atm |
| | | | Gravedad | m/s ² |
| | | | Simetría | Adimensional |
| | | | Mallado del modelo | Adimensional |
| | | | Intensidad de turbulencia | % |
| Variable Dependiente | | | | |
| Dispersión simulada de contaminante | Definida como el análisis simulado del arrastre o estudio del transporte de un contaminante en un flujo de agua. | <ul style="list-style-type: none"> • Flujo advectivo contaminante simulado | Velocidad de flujo del contaminante | m/s |
| | | | Energía cinética turbulenta | m ² /s ² |
| | | | Viscosidad Turbulenta | Pa.s |
| | | | Fracción volumétrica del contaminante | Adimensional |
| | | | Flujo Másico Advectivo del contaminante | $\frac{kg}{S.m^2}$ |

CAPITULO II

MARCO TEÓRICO

2.1. Antecedentes de la investigación:

2.1.1. Antecedentes Internacionales

En la investigación de Zelada (11) comenta sobre un modelo matemático, que permita entender la dinámica de mareas rojas y capaz de predecirlos. Realizando un estudio teórico de las ecuaciones de Navier- Stokes calculando la velocidad y la concentración de microalgas usando la ecuación de transporte de contaminantes de convección difusión para estudiar la concentración de microalgas que emiten un nivel alto de toxicidad dañando la salud pública de quienes consumen mariscos.

Nakaya (12) menciona sobre la interacción que presenta los seres humanos y la corrientes superficiales en zonas de montaña donde se presentan descargas de residuos, que afectan la vida acuática y generan problemas de salud pública, limitando el uso del agua y afectando la ecología. Modelando el rio con el programa CFD, considerando que es de mucha utilidad para solucionar problemas complejos donde la solución analítica no alcanza. Concluyendo que el modelo predice correctamente el transporte de soluto en ríos para modelaciones que sobrepasaron un R^2 de 0.95.

En la investigación realizada por Apey (13) titulado, Simulación mediante dinámica de fluidos computacional (CFD) de un intercambio de flujo cruzado. Resolvió el flujo a través de un canal para familiarizarse con el programa y hacerlo más sencillo, seguidamente resolvió el intercambio de calor de las dos corrientes. Con el objetivo de comprobar si el intercambio fue razonable en comparación con un experimento de laboratorio previo. Encontrando cierta asimetría a lo largo del canal; en lo que concluye que el modelo usado para resolver los problemas simplifica muchísimo el régimen turbulento.

En la investigación desarrolla por Marusic (14), utilizó la técnica CFD para la investigación de los problemas de calidad de agua y su respectiva evolución en el espacio-tiempo en el análisis de transporte y dispersión de contaminantes en el rio Prut de la localidad de Giurgiulesti- Ucrania. Como resultados de la simulación determinaron que después de cuatro horas la concentración del contaminante alcanza un valor de 0.7/mg/ L, variando su valor en el área de confluencia a 0.16 y después de 10 horas bajo a 0.03 mg/Concluyeron enfáticamente que los resultados provenientes de la simulación

y trabajados mediante modelación numérica, calibrada son aplicables en los escenarios de contaminación del río Prut con un nivel de confiabilidad del 98% en situaciones diversas y ocasionales.

Rani (14) analizó las turbulencias (remolinos) y la predicción de las características de flujo en el canal de un río serpenteante como su influencia en la dispersión de ciertos compuestos. Estudiaron el índice de sinuosidad para las diferentes morfologías del sistema. Concluyeron que las curvas de nivel de velocidad baja tienen ocurrencia en la esquina inferior del canal y la concentración dispersiva aumenta con el aumento de la profundidad de flujo sobre sus respectivas llanuras de inundación.

En la investigación realizada por Grazon (15) de dinámica de fluidos computacional (CFD) simulada para un tramo del río Arzobispo en Colombia, implemento las ecuaciones de Navier-Stokes su conservación de masa y Momento para obtener una herramienta útil en la simulación - ANSYS. Esta investigación desarrolló el modelado, simulación de flujo y turbulencias usando la metodología de elementos finitos para una aproximación aproximada de las ecuaciones de Reynold promediadas (RANS), realizó un modelo matemático numérico del orden tridimensional bifásico en CFD de ANSYS para el sistema urbano, estos incluyeron modelos multifase de volumen también llamados (VOF) para el sistema en estudio. Esta investigación concluyo que la discretización espacial es de primer orden y que el proceso de mallado y geometría cobran relevancia en la ejecución del modelo.

Bao et al. (16) en su investigación indica que intercambio hidrológico es un mecanismo crítico que da forma a los procesos hidrológicos y biogeoquímicos a lo largo de un río. Se abordó este problema, desarrollando una superficie acoplada unidireccional y subsuperficie agua modelo de flujo utilizando el software comercial de dinámica de fluidos computacional (CFD) STAR-CCM+ y lo aplicó para simular HEF en un tramo de 7 km de largo a lo largo del tallo principal del río Columbia en los Estados Unidos. El modelo ha sido validado contra mediciones de velocidad de flujo de un perfilador de corriente acústico Doppler en los ríos, HEF verticales estimados a partir de un conjunto de perfiladores de temperatura instalados en el lecho del río y simulaciones de un modelo de transporte reactivo. Luego, el modelo validado se empleó para investigar sistemáticamente cómo los HEF podrían verse influenciados por la superficie agua dinámica de fluidos, estructuras del subsuelo y propiedades hidrogeológicas. Obteniendo de resultados que los HEF a escala de alcance están dominados principalmente por el espesor de la capa de aluvión del lecho del río, y luego por la permeabilidad del aluvión, la profundidad de la capa impermeable subyacente y la condición límite de presión. También aclaran la dependencia de escala de los HEF en la dinámica de fluidos que solo

pueden capturarse mediante modelos CFD tridimensionales. Es decir, mientras que los HEF netos en todo el dominio de 7 km no están significativamente influenciados por la superficie agua -presión dinámica, la presión dinámica inducida por la dinámica de fluidos puede conducir a más del 15% en HEF netos para la sección de un río en unos cientos de metros.

Soares de Oliveira (4) ha demostrado cómo la dispersión de la contaminación se ve afectada cuando el caudal principal del río cambia debido a la geometría del río también con aportes provenientes de los afluentes. El río elegido es Paraíba do Sul porque atraviesa dos importantes estados de Brasil, Río de Janeiro y Sao Paulo, y suministra agua para diversos fines, como agricultura, bebida, energía, disolución de aguas residuales domésticas, pesca, etc. Se dio el estudio a través de una única simulación numérica bidimensional (Mecánica de fluidos computacional—CFD) del software comercial COMSOL Multiphysics. Como resultado indica que la absorción por parte de las plantas en realidad ocurre, sin embargo, en pequeña escala. Además, el cambio de velocidad del afluente 1 varía como resultado de la concentración de nitrógeno amoniacal en los puntos B y C a lo largo del curso del río; de hecho, las velocidades más altas tienen mayores influencias en la salida. En cuanto a la concentración de nitrógeno amoniacal, debido a la disposición del afluente 1, el nitrógeno amoniacal disminuye rápidamente con el tiempo a lo largo del curso del río por su gran tamaño.

2.1.2. Antecedentes Nacionales

En la investigación hecha por Suarez (16) genero modelos de simulación de dispersión en características hidrodinámicas mediante el uso de solubles vertidos en dos cursos de agua el primero con variables irregulares y el segundo tramos con variables regulables para luego ser utilizado como herramientas predictivas. Hallando los coeficientes de dispersión longitudinal. Hallando para cada tramo unos valores de coeficientes de dispersión en $0.177 \text{ m}^2/\text{s}$ y $2.05 \text{ m}^2/\text{s}$ respectivamente.

En la investigación ejecutada por Gurrero (17) evaluó la dispersión de contaminantes por la ecuación de advección-difusión unidimensional con coeficiente constante en el río Huaura. Esta investigación de flujo uniforme lo realizó en los periodos de estiaje utilizando como soluto un colorante del tipo alimentario (E-132) Concluyendo la influencia del caudal en la dispersión del contaminante con un error medio de 0.44998.

En la investigación hecha por Torres (18), desarrollaron una investigación de simulación del transporte de contaminantes recurrentes de un efluente corredor industrial de

Barranquilla, estos investigadores trabajaron en la implementación de un modelo numérico bidimensional estructurado modularmente en dos unidades y con resolución mediata de dos tiempos. Utilizaron el módulo hidrodinámico Euleriano - Lagrangeano para la solución de ecuaciones de Saint Venant y las ecuaciones de Navier Stokes Reynolds.

En la investigación realizada Zarate (18), simularon el proceso complejo ambiental del transporte del arsénico en el Río Tambo-Arequipa. Los investigadores modelaron y simularon el transporte de fluidos en el río desde una concentración conocida del metal hasta un punto donde se tengan las concentraciones dentro de los límites máximos permisibles. Este estudio permitió encontrar los perfiles de concentración y analizar las variables que influyen en la contaminación mediante los fenómenos de advección, dispersión, difusión y adsorción en el software MATLAB. Esta investigación concluyó en que el río aguas abajo (15 km) logra mitigar la contaminación, encontrándose los niveles de arsénico dentro de los LMP y que las ecuaciones que describen esta modelación son de carácter logarítmico

Savedra (20) desarrolló el análisis simulativo del flujo de relaves mineros, utilizando la simulación fluido dinámica computacional (CFD), usaron como modelo un cajón del tipo dissipador de canaleta y determinaron el flujo y su incidencia directa con el desgaste en las paredes. Para realizar este trabajo de investigación utilizaron el software comercial ANSYS CFX 14.0, el cual se encargó de modelar la estructura en 3D para su respectivo mallado y simulación. La investigación concluyó que existe una correlación entre las zonas de concentración de esfuerzos altos y zonas de impacto generando daños en el fondo y paredes de la estructura simulada.

Espejo y Zabaleta (20) en su investigación trataron sobre la influencia de la inclinación de pozas dissipadoras en la pérdida de energía en ríos de alta pendiente. Por ello, se tomó como caso de estudio la bocatoma San Pedro (Ayacucho, Perú). Presentando el modelamiento numérico de la bocatoma en el software de dinámica de fluidos computacional, IBER, con la finalidad de obtener resultados hidráulicos en la estructura: tirante, velocidad, energía, Froude y tensión de fondo. Utilizaron metodologías como la recopilación de información del caso de estudio, la cual fue validada con los resultados de los modelamientos en los programas HEC-RAS e IBER. Del mismo modo, se diseñaron 5 bocatomas con pozas dissipadoras de distintas pendientes: 0%, 1.52%, 3.04%, 4.56% y 6.08%. Modelando en el software IBER y se exportaron los resultados a Excel. Estos modelos numéricos fueron validados mediante el Análisis de Sensibilidad empleando una comparación en distintas pozas propuestas. Concluyendo que la poza dissipadora de 3.04% es la más apropiada para el río San Pedro, pues pierde un 30% de

energía más con respecto a la poza horizontal y reduce la velocidad en 4.9% en comparación a la poza de inclinación de 6.08%.

2.2. Bases teóricas

2.2.1. Simulación por computadora

En la investigación elaborada por Bao et al. (16), Se entiende específicamente como el uso sistemático de un ordenador con el objetivo de replicación, reproducción y estudio de un fenómeno (químico, físico, biológico, psicológico, económico, sociológico, etc.). Tiene como objetivo central encontrar y producir información para comprender las diversas respuestas encontradas del sistema físico, con condiciones de frontera iniciales impuestas, estas pueden ser cargas, condiciones iniciales, condiciones de contorno y otras. La información recopilada es utilizada en la fase siguiente, que es la toma de decisiones, para la optimización gestión y desarrollo del sistema en estudio, ya que nos permite conocer y estudiar en totalidad las variables que interactúan en todo el fenómeno y sobre todo permiten la determinación de la influencia en un determinado diseño o sistema sin necesidad de estudiar el sistema o construir el objeto real.

2.2.1.1 CFD

Computational Fluid Dynamics, mejor conocida como dinámica de fluidos computacional, es una técnica de modelamiento de fluidos que se expresa en término de ecuaciones diferenciales ordinarias e integrales combinadas con diferenciales, son extremadamente complicadas de resolver por medios analíticos, con excepción de casos aislados y concretos de poca utilidad práctica. Este método utiliza soluciones aproximadas al problema mediante procedimientos de discretización de las ecuaciones diferenciales en ecuaciones algebraicas, las cuales quedan simplificadas en resolución mediante algoritmo numérico que son ejecutados secuencialmente por ordenadores. El CFD ofrece el beneficio del bajo costo y otros que benefician la investigación ingenieril (17)

2.2.1.2 ANSYS

Es un paquete de software comercial de dinámica de fluidos computacional, que se utiliza para desarrollar modelos del orden 2D y 3D con el objetivo específico de simulación de flujo de fluidos. Hace uso de computadores de última generación para modelar geometrías complejas, necesarias para calcular una solución y mostrar los resultados en ANSYS (18)

- **ANSYS WORKBENCH**

Ha evolucionado durante años, madurando lo suficiente en los últimos años, se ha utilizado ANSYS Classic, hoy en día denominado APDL mecánico. El APDL hostil impone restricciones innecesarias, lo que dificulta el uso del software. Como resultado, los estudiantes o ingenieros a menudo se limitan a ciertas aplicaciones; por ejemplo, trabajar en simulación de componentes en lugar de simulaciones de ensamblaje. Workbench agrega amabilidad a la parte superior del poder de APDL, liberando muchas restricciones innecesarias (21).

- **ANSYS DESING MODELER**

La geometría para el estudio de Flujo de fluido (fluido) se crea en Desing Modeler u otra alternativa, usando Space Claim. DesingModeler es un modelador paramétrico diseñado para dibujar bocetos en 2D y modelar piezas en CAD en 3D. Además, las cajas de herramientas de dibujo en el modelador de diseño incluyen dibujar, modificar, dimensiones, restricciones y configuraciones (22).

- **ANSYS MESHING**

Produce la malla utilizando métodos y controles como: hexaédrico, tetraédrico, superficie con controles globales y locales (22).

- **ANSYS FLUENT**

Es un paquete de software de dinámica de fluidos computacional que está escrito en lenguaje C. Fluent tiene numerosas capacidades para la simulación, existen once módulos adicionales disponibles en ANSYS, también incluye la vista de esquema y la página de tareas que incluye configuración, solución, resultado y parámetros y personalización (22).

2.2.1.3 VOF

Es un modelado multifásico de volumen de fluido, estos se calculan mediante procesos numéricos utilizando los métodos de Euler-Lagrange o el método de Euler-Euler. El VOF en contexto es un procedimiento iterativo de Euler-Euler y uso de ecuaciones de energía, se utiliza específicamente como técnica de seguimiento de superficie (19)

2.2.1.4 SSPS STATISTICS

Trabaja con varios tipos de archivos de computadora, archivos de datos, archivos de salida y archivos de sintaxis. Los archivos de datos son aquellos archivos informáticos que contienen la información que el usuario pretende analizar. Los archivos de salida contienen el análisis estadístico de sata, a menudo se muestran como tablas, gráficos y diagramas. Los archivos de sintaxis son instrucciones informáticas que le indican al software SPSS Statics qué hacer (23).

2.2.5 Modelización matemática

Corresponde al proceso racional de elaboración secuencial de modelos matemáticos, con el único objetivo de poder traducir y expresar los fenómenos de un sistema real. Para esto se toma la libertad de presuponer que dicho fenómeno está regido por una ley que determina las posibles consecuencias a partir de las causas iniciales, expresándose esto en terminología matemática que puede ser el resultado de una corriente reduccionista y determinista. En el caso del determinismo el fenómeno que se pretende estudiar está regido por una ley que determina las consecuencias a partir de sus causas. Mientras tanto el reduccionismo estudia el fenómeno cercenado por partes y concluye que esto es suficiente para su comprensión total (20)

2.2.6. Algoritmo

Definido como un grupo finito de operaciones y procesos organizados cuyo fin es el de solucionar un problema. Son instrucciones especificadas en reglas, que por medio de una sucesión de etapas confluyen al resultado real (21)

2.2.7. Hidrodinámica

Es el estudio de los fluidos en movimiento teniendo en cuenta las causas que inciden y la producen, también pone especial atención a las fuerzas actuantes del medio. Este estudio se lleva a cabo en entornos cuyos movimientos se dan en régimen permanente o estacionario. Lo que genera que su velocidad sea constante (22)

2.2.8. Calidad del agua

Corresponde al límite fijado de variación o para su inminente alteración de su estado, este estudio es juzgado por expertos teniendo como referencias normas y estándares de cumplimiento obligatorio y sobre todo en base a datos científicos. El consumo de un agua de calidad inocua no genera ningún tipo de efecto adverso, ni tampoco su uso genera daño al hombre o para los organismos que la requieran (23)

2.2.9. Dispersión de contaminantes

Por la ley de Fick se define como la tendencia específica de un contaminante cualquiera a propagarse por un medio físico y espacio, de tal forma que ocupa dicho espacio de la manera más regular posible, este movimiento se caracteriza por tener una dinámica de mayor concentración a menor concentración (24)

2.2.10 Microcuenca

Las cuencas hidrográficas se definen como zonas geográficamente delimitadas en las cuales se desarrollan actividades, ambientales, agrícolas, económicas y sociales, cuyos elementos naturales principales y básicos como el agua, el suelo, la vegetación y el clima –y sus interacciones- deben ser conocidos con la finalidad de entender los diferentes procesos biofísicos que en ella se desarrollan (24).

2.2.11 Flujo Turbulento

Henríquez (25) define como el estado del movimiento que se caracteriza por un comportamiento aparentemente (cuasi) caótico con altos niveles de vorticidad tridimensional, cuando los fenómenos turbulentos se encuentran presentes en un flujo, provocando aumento de la tasa de disipación de energía cinética turbulenta, difusión, transferencia de calor y/o arrastre.

2.2.12 Problemáticas en el manejo de los recursos hídricos

El manejo de los recursos hídricos es uno de los pilares del desarrollo económico y aspecto social que permite el uso y manejo racional del agua dulce. Este manejo usualmente puede entrar en contraposición mediata con el mantenimiento y sostenibilidad del recurso hídrico en el medio ambiente.

La hidrología, hidráulica y la ecología son ciencias que construyen las bases necesarias para un manejo consensuado e idóneo del ambiente, cuyo objetivo central es el desarrollo auto sostenible del mismo. Existen problemáticas asociativas entre las necesidades sociales y las ambientales que un adecuado manejo debería salvaguardar:

- Carencia de conocimientos concernientes a los procesos físico-biológicos y ecológicos.
- Criterios erróneos e inadecuados en la evaluación de impactos ambientales.
- Estructuras institucionales inadecuadas para la toma de decisiones.

Todos estos problemas provenientes del desarrollo autosostenible son encarados a través de enfoques sistémicos, de forma que el cuerpo de agua y el medio ambiente se constituyan por un gran número de elementos interrelacionados (25)

2.2.13 Hidrodinámica Ambiental

Una consecuencia directa de la revolución industrial, el crecimiento de la población y la explotación indiscriminada de los recursos naturales es la denigración de la calidad y estado de agua de muchos de los sistemas hídricos del mundo. Se ha vuelto común encontrar gran cantidad de lugares que poseen sedimentos de lechos de lagos y ríos altamente contaminados. Esta contaminación proviene de muchas actividades industriales, en especiales las mineras que extraen gran cantidad de minerales y como subproducto emiten al medio ambiente restos de compuestos tóxicos al medio, un ejemplo de esto se da en el río Amazonas de la parte Brasil, donde se estima que por cada kilogramo de oro extraído, se emiten al río 2 kg de mercurio que termina formando parte de los sedimentos, así como este gran problema también en Sudamérica y América del norte existen lugares donde el sedimento de los lagos se encuentran en saturados de metales pesados como el plomo. Es aquí donde cobra importancia la hidrodinámica ambiental, ya que nos da los conocimientos y bases teóricas necesarias para poder establecer el destino final de partículas contaminadas en el cuerpo de agua, bajo condiciones hidráulica en las que interactúa el sedimento contaminado con la erosión y reincorporación al medio acuático. Estos problemas netamente ambientales son tratados por esta ciencia incluidas las turbulencias en sus proximidades de lecho y su estimación del riesgo en el lugar (26)

La ingeniería ambiental está inmersa dentro de la resolución de problemas relacionados con el transporte de contaminantes en los flujos de agua, también en la transferencia gaseosa en el medio aire-agua en toda la superficie libre de ambientes acuáticos, con la transferencia de masa en la interfase agua-sedimento en el fondo de canales aluviales, lagos y océanos, con la difusión y mezcla de fluidos estratificados en estuarios, lagos, y cuerpos de agua en general (27)

2.2.14 Procesos de Transporte en ambientes acuáticos

Corresponden a los procesos de transferencia de masa, calor y momento en el sistema de agua en análisis y están altamente relacionados con la turbulencia de los flujos considerados. Por ejemplo, en los entornos próximos a la superficie libre en flujos abiertos a la atmósfera, el fenómeno de las turbulencias gobierna en muchos casos la transferencia de la interfase aire-agua, incluida la reaireación como proceso natural, encargado del mantenimiento de los niveles adecuados de oxígeno del sistema hídrico. La reaireación se encuentra controlada por una gran cantidad de parámetros hidráulicos que inciden sobre la turbulencia del flujo, estos son las pendientes del cauce, turbulencias, la irregularidad de las secciones de escurrimiento, la

rugosidad del fondo, etc. Se ha logrado demostrar mediante la hidrodinámica ambiental que, en los lagos y océanos en sus lechos y canales aluviales, el fenómeno de turbulencia es el encargado de controlar los procesos de transporte e intercambio de sedimentos a través de la interfase sólido-líquida. (28)

2.2.15 Proceso de mezcla en ambientes acuáticos

Generado por la interacción del fenómeno de turbulencia y una interfase de densidad, esta genera inevitablemente la mezcla de dos fluidos juntamente con el proceso de incorporación, desarrollándose los procesos de transporte de un fluido en el seno del otro. La mezcla de dos fluidos que presentan una estratificación estable (por ejemplo, agua fresca sobre agua salada) demanda un aporte externo de energía. Esta energía de orden natural es originaria del entorno como las mareas y el viento, también inciden la transferencia térmica y la gravedad entre otras. La característica física del proceso depende naturalmente de la turbulencia inmersa en el sistema (29)

2.2.16 Ecuaciones de Navier - Stokes y conservación de momento

Son ecuaciones de la mecánica de fluidos las cuales se caracterizan por tratar de representar comportamiento hidrodinámico del fluido. Están conformadas por las siguientes ecuaciones de conservación:

- Conservación de masa o ecuación de continuidad
- Conservación de momento cinético o cantidad de movimiento
- Conservación de la energía

Se entiende por flujo al paso de una magnitud en una unidad de tiempo a través de un contorno, donde existen flujos debido al transporte convectivo y por el flujo molecular dependiente del fluido en reposo (transporte difusivo). Como se muestra en la Figura 1:

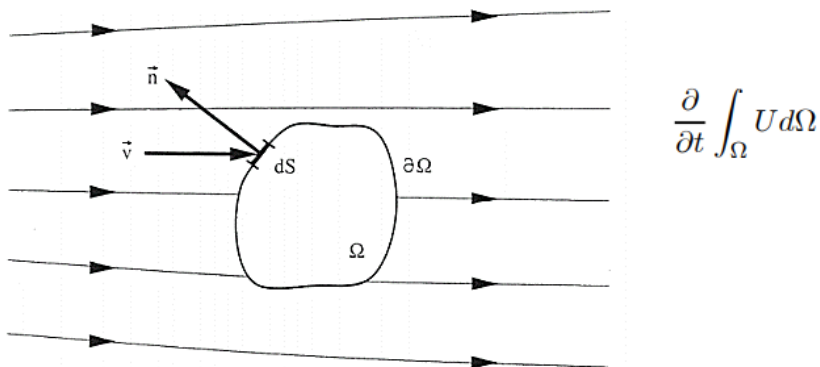


Figura 1 Volumen De Control De Flujo Para Las Ecuaciones De Navier

Fuente: Stokes Quarteroni ()

Donde:

- $\partial\Omega$: representa la superficie cerrada
- Ω : Volumen de control
- dS : Elemento diferencial de la superficie
- \vec{n} : Vector normal a la superficie
- \vec{v} : Vector velocidad de flujo de la magnitud cualesquiera U

El incremento de la magnitud U debido al flujo convectivo que entra al volumen de control Ω se representa mediante:

$$-\oint U (\vec{v} \cdot \vec{n}) dS \quad (1)$$

Y las del flujo difusivo de la ley de fick's generalizada se representan:

$$\oint_{\partial\Omega} k\rho \left[\nabla \left(\frac{U}{\rho} \right) \cdot \vec{n} \right] dS \quad (2)$$

Donde k es la constante de difusividad térmica. Entonces las fuerzas de contorno y volumen quedan representadas:

$$\oint_{\Omega} Q_V d\Omega + \oint_{\partial\Omega} (\vec{Q}_S \cdot \vec{n}) dS \quad (3)$$

En la expresión anterior se tiene que Q_V son las fuentes del volumen y \vec{Q}_S son las fuerzas de superficie. Las contribuciones al sumarse quedan:

$$\frac{\partial}{\partial t} \oint_{\Omega} U d\Omega + \oint_{\partial\Omega} [U(\vec{v} \cdot \vec{n}) dS - k\rho(\nabla U \cdot \vec{n}) dS] = \oint_{\Omega} Q_V d\Omega + \oint_{\partial\Omega} (\vec{Q}_S \cdot \vec{n}) dS \quad (4)$$

Donde:

U^* Es la magnitud estudiada, expresada por unidad de masa $\frac{U}{\rho}$

La ecuación anterior esta expresada en forma vectorial conservativa, esta también puede ser expresada tensorialmente respecto al flujo convectivo ($-\vec{F}_C$) y difusivo (\vec{F}_D) como:

$$\frac{\partial}{\partial t} \oint_{\Omega} \vec{U} d\Omega + \oint_{\partial\Omega} [\vec{U}(\vec{F}_C - \vec{F}_D) dS - k\rho(\nabla U^* \vec{n}) dS] = \oint_{\Omega} \vec{Q}_V d\Omega + \oint_{\partial\Omega} (\vec{Q}_s \vec{n}) dS$$

Ecuación conservativa de continuidad integral de Navier Stokes

Para la ecuación de continuidad la magnitud que se conserva U es la densidad ρ , entonces la ecuación (4) quedaría expresada como:

$$\frac{\partial}{\partial t} \oint_{\Omega} \rho d\Omega + \oint_{\partial\Omega} [\rho(\vec{v} \vec{n}) dS - k\rho(\nabla \rho^* \vec{n}) dS] = \oint_{\Omega} Q_V d\Omega + \oint_{\partial\Omega} (\vec{Q}_s \vec{n}) dS \quad (6)$$

En estado estacionario conservativo, no existen fuerzas de volumen o de superficie que inciden sobre el dominio trabajado, entonces la ecuación (6) se puede escribir:

$$\frac{\partial}{\partial t} \oint_{\Omega} \rho d\Omega + \oint_{\partial\Omega} [\rho(\vec{v} \vec{n}) dS - \overset{0}{k\rho(\nabla \rho^* \vec{n})} dS] = \overset{0}{\oint_{\Omega} Q_V d\Omega} + \overset{0}{\oint_{\partial\Omega} (\vec{Q}_s \vec{n}) dS} \quad (7)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} \oint_{\Omega} \rho d\Omega + \oint_{\partial\Omega} [\rho(\vec{v} \vec{n}) dS] = 0 \quad (8)$$

La ecuación (8) es conocida como la forma integral de la ecuación de continuidad o también llamado principio de conservación de la masa.

Ecuación conservativa de la cantidad de movimiento

Por la segunda ley de Newton se tiene que la variación del momento es el resultado del sumatorio total de fuerzas que actúan sobre un elemento. Entonces el momento para un elemento infinitesimal dentro de cierto volumen de control queda expresado por:

$$\rho \vec{v} d\Omega \quad (9)$$

Entonces la variación temporal para esta magnitud queda representada por:

$$\frac{\partial}{\partial t} \oint_{\Omega} \rho \vec{v} d\Omega \quad (10)$$

De la ecuación (10) se identifica que las magnitudes conservativas son la densidad ρ por velocidad \vec{v} , expresando para cada eje cartesiano ($x = \rho u \vec{i}, y = \rho v \vec{j}, z = \rho w \vec{k}$) se tiene:

$$\rho \vec{v} = [\rho u, \rho v, \rho w]^T \quad (11)$$

La ecuación por contribución del tensor de flujo convectivo queda expresada como:

$$- \oint_{\partial\Omega} \rho \vec{v} (\vec{v} \cdot \vec{n}) dS$$

Para analizar las fuerzas (\vec{f}_e) en el momento de flujo difusivo en reposo se tienen las fuerzas de volumen (gravedad, coriolis, etc.) y superficie (tensiones normales y tangenciales resultantes de la interacción con el fluido).

Entonces las fuerzas de volumen se pueden expresar:

$$\oint_{\Omega} \rho \vec{f}_e d\Omega \quad (13)$$

Las fuerzas de superficie también se pueden expresar en forma del tensor unitario \bar{I} , de los esfuerzos viscosos $\bar{\tau}$ y de la tensión isotrópica de la presión p:

$$\bar{Q}_S = -p\bar{I} + \bar{\tau} \quad (14)$$

El volumen de control queda representado por el esquema visto en la siguiente Figura 2:

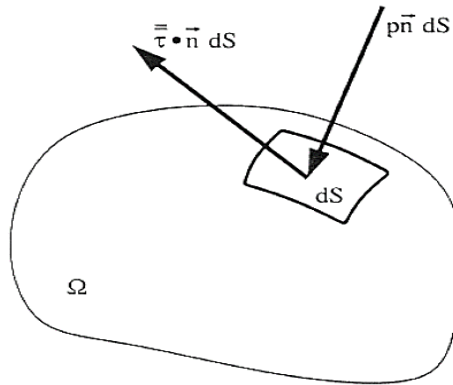


Figura 2 Interacción de fuerzas de superficie sobre un volumen de control Quarteroni, 2017.

Entonces si queremos expresar las sumatorias de las ecuaciones de conservación de movimiento teniendo como referencia la ecuación (7) tenemos:

$$\frac{\partial}{\partial t} \oint_{\Omega} \rho \vec{v} d\Omega + \oint_{\partial\Omega} [\rho \vec{v} (\vec{v} \cdot \vec{n}) dS] = \oint_{\Omega} \rho \vec{f}_e d\Omega - \oint_{\partial\Omega} p \vec{n} dS + \oint_{\partial\Omega} (\bar{\tau} \cdot \vec{n}) dS \quad (15)$$

De la ecuación (14) los esfuerzos viscosos originados de la interacción del fluido y la superficie de un elemento se expresan en tres dimensiones:

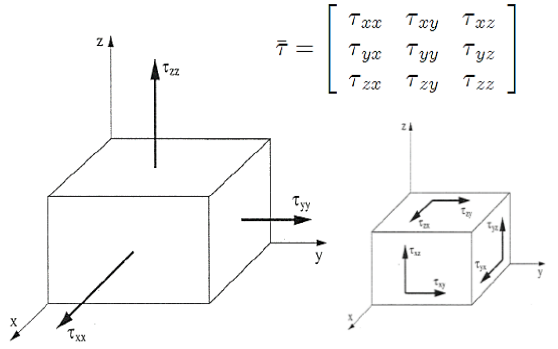


Figura 3 Interacción de fuerzas de superficie sobre un volumen de control Quarteroni, 2017

Los fluidos newtonianos se pueden expresar de la siguiente manera respecto a los componentes del tensor de esfuerzo viscoso.

$$\tau_{xx} = \lambda \left(\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} \right) + 2\mu \frac{\partial u}{\partial x}$$

$$\tau_{yy} = \lambda \left(\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} \right) + 2\mu \frac{\partial v}{\partial y}$$

$$\tau_{zz} = \lambda \left(\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} \right) + 2\mu \frac{\partial w}{\partial z}$$

$$\tau_{xy} = \tau_{yx} = \mu \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right)$$

$$\tau_{xz} = \tau_{zx} = \mu \left(\frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x} \right)$$

$$\tau_{yz} = \tau_{zy} = \mu \left(\frac{\partial v}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial y} \right) \quad (16)$$

Este conjunto de expresiones se expresa de forma resumida en función del segundo coeficiente de viscosidad (λ), del coeficiente de viscosidad dinámico (μ) y en función de la viscosidad cinemática (ν), que a su vez se encuentra expresada por $\nu = \frac{\mu}{\rho}$:

$$\tau_{ij} = \lambda \nu_{k,k} \delta_{ij} + \mu (\nu_{i,j} + \nu_{j,i})$$

Ecuación conservativa para la conservación energética (17)

Para iniciar se toma en cuenta el primer principio de la termodinámica, la cual expresa la variación temporal energética en cierto volumen de control, equivalente al trabajo de las fuerzas

que actúan sobre un determinado volumen adicionado el flujo de calor a través del contorno del volumen, expresándose:

$$E = e + \frac{|\vec{v}|^2}{2} = e + \frac{u^2 + v^2 + w^2}{2} \quad (18)$$

Donde la E es la energía total por unidad de masa de un fluido, e es la energía parcial por unidad de masa y $\frac{|\vec{v}|^2}{2}$ es la energía cinética por unidad de masa.

También se modela la magnitud conservativa de la energía por unidad de volumen, expresándose:

$$\frac{\partial}{\partial t} \int_{\Omega} \rho E d\Omega \quad (19)$$

A esta también se le agrega la contribución del término convectivo energético:

$$- \oint_{\partial\Omega} \rho E (\vec{v} \cdot \vec{n}) dS \quad (20)$$

Se procede también a incluir el flujo difusivo \vec{F}_D que es un término nuevo a comparación de la ecuación de continuidad y cantidad de movimiento, esta expresión basada en la ley de Fick's se expresa:

$$\vec{F}_D = -\gamma \rho k \nabla e \quad (21)$$

De la ecuación (21) se tiene la relación de calores específicos $\gamma = \frac{c_p}{c_v}$ y k que representa el coeficiente de difusividad térmica. Se tiene que tener presente que el flujo difusivo es la representación del flujo de calor en el volumen de control, este fenómeno se presenta gracias a la conductividad térmica intermolecular mejor conocida como transferencia de calor por gradiente térmico (∇T). Esta ecuación se simplifica en:

$$\vec{F}_D = -k \nabla T$$

También es necesario expresar el flujo de calor neto (\vec{Q}_V) por unidad de volumen debido al fenómeno de absorción, radiación y reacciones químicas netas. Esta ecuación depende del flujo de calor por unidad de masa (q_h) y la variación de trabajo por las fuerzas de volumen \vec{f}_e , quedando:

$$Q_V = \rho \vec{f}_e \cdot \vec{v} + q_h \quad (23)$$

Para concluir este balance energético se tiene la ecuación final:

$$\frac{\partial}{\partial t} \int_{\Omega} \rho E d\Omega + \oint_{\partial\Omega} \rho E (\vec{v} \cdot \vec{n}) dS = \int_{\Omega} (\rho \vec{f}_e \cdot \vec{v} + q_h) d\Omega + \oint_{\partial\Omega} k (\nabla T \cdot \vec{n}) dS + \oint_{\partial\Omega} (\vec{\tau} \cdot \vec{v}) \cdot \vec{n} dS \quad (24)$$

Expresando la ecuación (24) en función de la entalpía:

$$H = h + \frac{|\vec{v}|^2}{2} = E + \frac{p}{\rho} \quad (25)$$

Tenemos:

$$\frac{\partial}{\partial t} \int_{\Omega} \rho H d\Omega + \oint_{\partial\Omega} \rho H (\vec{v} \cdot \vec{n}) dS = \int_{\Omega} (\rho \vec{f}_e \cdot \vec{v} + q_h) d\Omega + \oint_{\partial\Omega} k (\nabla T \cdot \vec{n}) dS + \oint_{\partial\Omega} (\vec{\tau} \cdot \vec{v}) \cdot \vec{n} dS \quad (26)$$

Según (30) se deben de tener en cuenta que todas estas expresiones mediante la transformación de gauss pueden ser transformadas de su forma integral a su forma diferencial, obteniéndose el sistema completo de ecuaciones de NAVIER-STOKES.

Ecuaciones globales de Navier Stokes

Estas ecuaciones son el resultado de la agrupación de las ecuaciones de conservación de masa, cantidad de movimiento y energía analizadas anteriormente. Estas ecuaciones son el resultado del análisis vectorial del vector gobernante del comportamiento del fluido (\vec{W}), vector transporte convectivo del fluido (\vec{F}_C), vector de flujos viscosos (\vec{F}_v) y el vector de fuerzas de volumen y generación de calor (\vec{Q}). Resultando:

$$\frac{\partial}{\partial t} \int_{\Omega} \vec{W} d\Omega + \oint_{\partial\Omega} (\vec{F}_C - \vec{F}_v) dS = \int_{\Omega} \vec{Q} d\Omega \quad (27)$$

Estas ecuaciones se representan en 3 dimensiones, comprenden un sistema de cinco ecuaciones con cinco variables a calcular: $\rho, \rho u, \rho v, \rho w$ y ρE . También contienen 7 constantes independientes: ρ, u, v, w, E, p y T , a las cuales se deben añadir dos ecuaciones que comprenden y abarcan a las relaciones termodinámicas de las variables de estado y la energía interna o la entalpía en función de la presión y temperatura del sistema.

Por último (31) de determina también los coeficientes de viscosidad μ y la conductividad térmica k como requisito de operación del sistema.

Finalmente, la ecuación (27) puede ser expresada en su forma diferencial:

$$\frac{\partial \vec{W}}{\partial t} + \vec{\nabla} \cdot (\vec{F}_c - \vec{F}_v) = \vec{Q}$$

CAPÍTULO III

METODOLÓGIA

3.1. Método, tipo o alcance de la investigación

3.1.1. Método

La investigación recurrió al método científico como método general, ya que lleva análisis con procedimientos estandarizados como: la observación detallada y sistemática de la simulación CFD (32), Permitted también la delimitación, valorándola, diagnosticándola, planificándola y ejecutándola para su correspondiente evaluación.

3.1.1.1. Método de Investigación Bibliográfica

Este método permitió hacer uso de técnicas y estrategias para compilar, resumir, analizar y localizar todos los marcos bibliográficos teorizados que dan soporte a la investigación (33)

3.1.1.2. Método Inductivo-deductivo

Este método permitió intervenir deliberadamente en la simulación para producir los datos que interesan mediante herramientas lógicas y observativas de la simulación del río Yanamarca. Permitted desarrollar un análisis general de resultados que devienen del análisis numérico computacional, para así construir inferencias y conclusiones (34).

3.1.2. Tipo de Investigación

La investigación es del tipo de enfoque cuantitativo y un alcance descriptivo, se generó en un escenario virtual de simulación que tiene como ventaja la no aplicación de unidades muestrales y produciendo la eliminación de las fuentes de variabilidad para el río Yanamarca-Jauja (35).

3.1.3. Nivel de la Investigación

El nivel es descriptivo exploratorio por que se describe la situación del río Yanamarca y se realiza una propuesta de acuerdo con un modelamiento virtual.

3.1.4. Diseño de la Investigación

Es no experimental de corte transversal como se muestra en la figura 04.

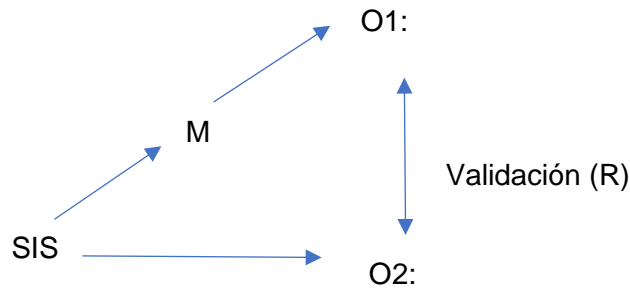


Figura 4 Diseño de la Investigación

- M: sistema Modelado y simulado
- O1: observación y análisis Post simulación
- O2: = Observación de expertos
- R: Coeficiente de Validación

3.2. Materiales y métodos

3.2.1. Materiales

3.2.1.1. Para la determinación de parámetros de flujo

- Crónometro
- Correntómetro
- Distanciometro
- Wincha de 50 m
- Estacas
- Barra Sonda
- Plumones y rotuladores
- Botas de plástico
- 5 baldes de plástico
- Guantes

3.2.1.2. Para el proceso de simulación computacional CFD

- Laptop Gamer I7 de octava generación

- Software ANSYS WORKBENCH- Fluent solver: Commonly used in consulting and industry, Formely Called Fluent, Finite volume method
- Google Heart

3.3. Población y muestra

3.3.1. Población

Comprende todo el comportamiento hídrico dispersivo de contaminantes en las aguas del río Yanamarca-Jauja.

3.3.2. Muestra

Corresponde al análisis del comportamiento dispersivo de contaminantes para 2 tramos del río Yanamarca-Jauja. Para determinar la muestra se realizó mediante el método de muestreo no aleatorio por conveniencia, debido a la accesibilidad de los tramos y muestras de fácil trabajo topográfico en el río a analizar.

3.4. Procedimiento

1. Delimitación y desarrollo de la geometría para la modelización hidrodinámica capaz de describir la dispersión de contaminantes utilizando simulación numérica computacional de fluidos CFD en el río Yanamarca – Jauja 2021
 - a) En primer lugar, se describe el área de estudio con datos del distrito y el río Yanamarca
 - b) Se utilizo la simulación en CFD para delimitar el área estudiada.
 - c) Luego se utilizó el Ansys WorkBench para el mallado encontrando sus perfiles.
 - d) Después se determino y verifico las consideraciones dinámicas.
 - e) Se procede determinando la geometría y definición de los materiales trabajados.
 - f) Finalmente se determinó el proceso de mallado optimizando el método de elementos finitos.
2. Ecuaciones específicas de masa y momento consideradas en CFD para su correspondiente edición e implementación en la simulación del río Yanamarca – Jauja 2021
 - a) Primero se definió las condiciones y parámetros operacionales en CFD- Ansys Fluid Flow- VOF.
 - b) Con el modelo multifase VOF se llevó a cabo la selección y configuración.

- c) Después las condiciones de flujo turbulento.
 - d) Para la simulación tuvo lugar a la selección de materiales.
 - e) Luego tuvo lugar a la definición de fases para los materiales trabajados en la simulación.
 - f) También la definición de las condiciones de fronteras para el modelo del trabajo.
 - g) Seguidamente se obtuvo el cálculo de resultados.
 - h) Se dio lugar a la configuración del inicio iterativo del cálculo de la simulación.
 - i) Finalmente hubo un análisis de soluciones calculadas.
3. Nivel de validez y sensibilidad de la simulación en CFD respecto a los datos dispersivos de contaminantes experimentales del río Yanamarca – Jauja 2021
- a) En primer lugar, se dio la validación por cuatro profesionales.
 - b) Después se mostró los resultados aprobatorios.
 - c) Finalmente se recalco los rangos de validez.
4. Comportamiento del vector gradiente de velocidades de descarga contaminante y su interacción con la corriente principal simulada en CFD, en el río Yanamarca- Jauja 2021
- a) Volvió a utilizarse la simulación de Ansys Fluent-VOF.
 - b) Se hallo los perfiles de vectores gradientes.
 - c) Para finalizar se verifico los datos.
5. Sectores de mayor energía cinética de turbulencia responsable de la disipación caótica del contaminante simulado en CFD, en el río Yanamarca – Jauja 2021
- a) Tuvo lugar a la utilización de las ecuaciones de Navier-Stokes
 - b) Se hallo los sectores de energía cinética de turbulencias
 - c) Finalmente se valido los resultados
6. Flujo másico advectivo espacial del contaminante simulado en CFD, en el río Yanamarca – Jauja 2021
- a) El Ansys Fluent analizo el flujo masico advectivo espacial.
 - b) Para finalizar se validaron los datos.

CAPÍTULO IV

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1. Delimitación y desarrollo de la geometría para la modelización hidrodinámica capaz de describir la dispersión de contaminantes utilizando simulación numérica computacional de fluidos CFD en el río Yanamarca – Jauja 2021

4.1.1. Descripción del área de estudio

El río Yanamarca se encuentra en promedio a 3 460 msnm, se encuentra ubicado en la microcuenca del mismo nombre. Es un río de carácter perenne con un caudal promedio anual de 2 m³/s que abastece del recurso hídrico a todo el Valle de Yanamarca, siendo los pobladores de los distritos de Acolla, Tragadero, Marco y el anexo de Pachascucho entre otros los que se sirven de sus aguas en sus actividades diarias. El Río Yanamarca desagua en la laguna **Tragadero**, perdiéndose sus aguas en el sumidero al lado noreste del humedal.

Nuestra zona de trabajo sectorizada para simulación presenta características climáticas subhúmedas con tendencias lluviosas por periodos estacionales. Las aguas del río poseen una temperatura media de 11.9 °C, variando ligeramente de acuerdo con la estacionalidad presentada.

La zona también presenta una precipitación anual de 704 mm [41].

4.1.2. Delimitación del área de estudio

El área de estudio para nuestro trabajo de simulación CFD en el río Yanamarca comprenderá un área de 1240.5337 m², con un tramo total longitudinal de 98.9748 m. Los datos topográficos de la sectorización se visualizan en anexos y la ubicación se logra apreciar en la figura 5.



Figura 5 Definición del sector y área de estudio

4.1.3. Definición y desarrollo de la geometría del canal del río

Se trabajó el Space Clean, el cual es un software CAD con características de complementos ANSYS. La sección modelada del río Yanamarca correspondió a 100 metros de sección total, siendo subseccionado longitudinal, transversal y mediante perfiles de anchuras y alturas de sección. La sección por modelar se verificó en el área de estudio de la figura 5.

El Space Clean nos proporcionó grandes utilidades de diseño y nos hizo permisible del diseño técnico de la geometría de la sección del río Yanamarca para simulación. Para el diseño de la geometría se realizó un levantamiento topográfico de la zona con procesos de seccionado para 36 secciones con perfiles longitudinales, transversales y de profundidad, estos valores se presentan en anexos, y cuyas gráficas producto del modelado en Space Clean se muestran en la figura 6.

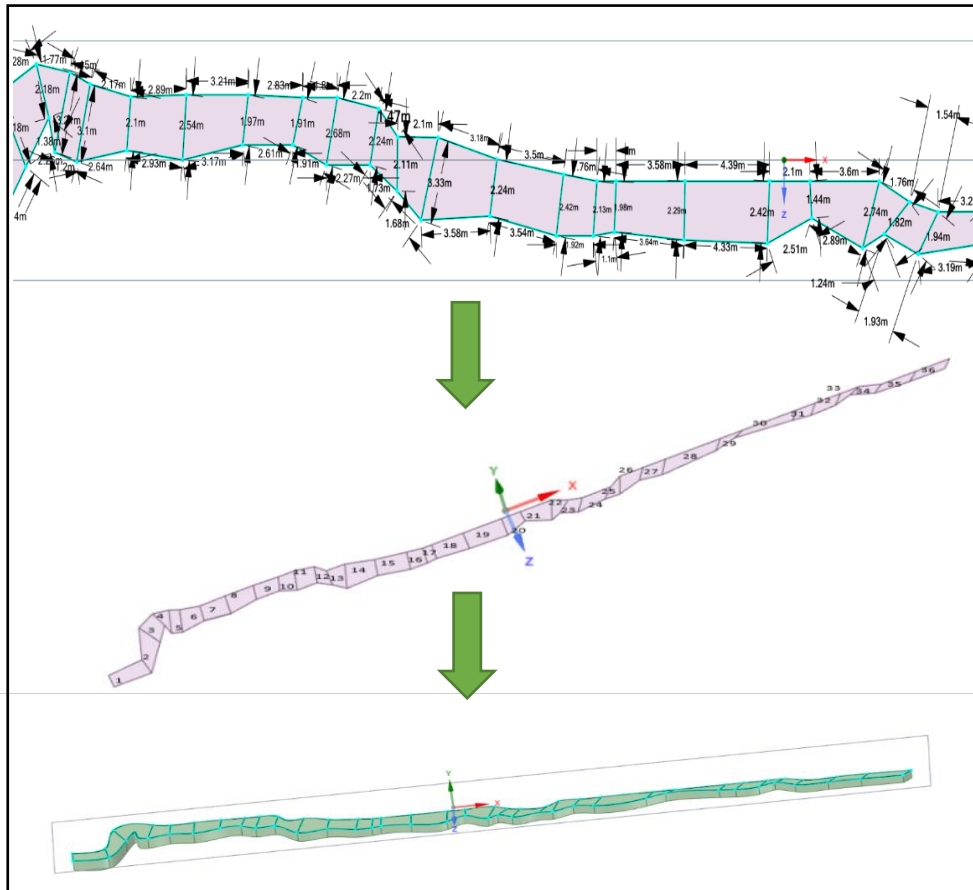


Figura 6 Seccionamiento del rio Yanamarca-tramo para simulación - ANSYS-Space Clean

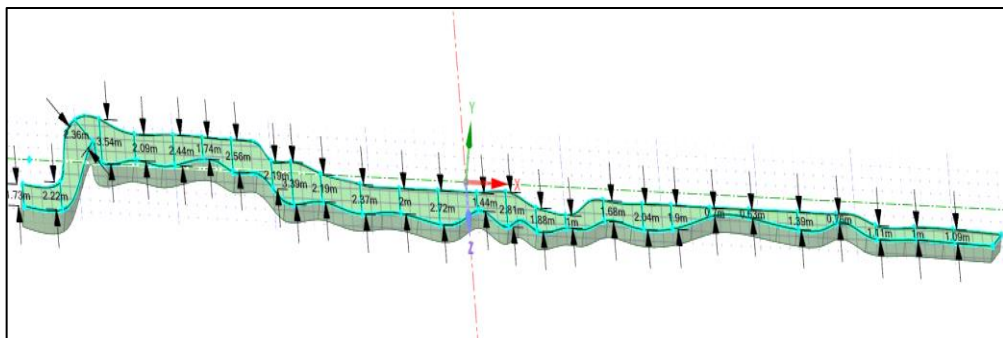


Figura 7 Perfil de anchuras naturales del lecho del rio Yanamarca-tramo para simulación- ANSYS-Space Clean

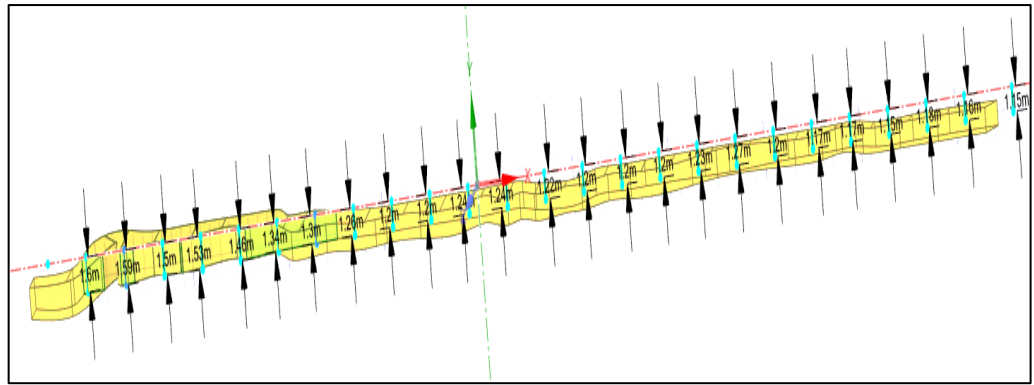


Figura 8 Perfil de profundidades promedio del canal del Rio Yanamarca-Tramo para simulación-ANSYS-Space Clean

En la figura 9 se muestra el modelo final trabajado en el Space Clean, que tiene características funcionales propias de un modelado 3D, este modelo fue desarrollado con fines multipropósito de simulación, siendo diseñado por fases y sólidos independientes. Se corrigieron también en el proceso problemas de geometría y operacionalización CAD para una adecuada importación al ANSYS WORKBENCH y su posterior edición en el Desing Modeler. El modelo presenta características de versatilidad y flexibilidad para un adecuado mallado y definición de fases del modelo CFD-VOF.

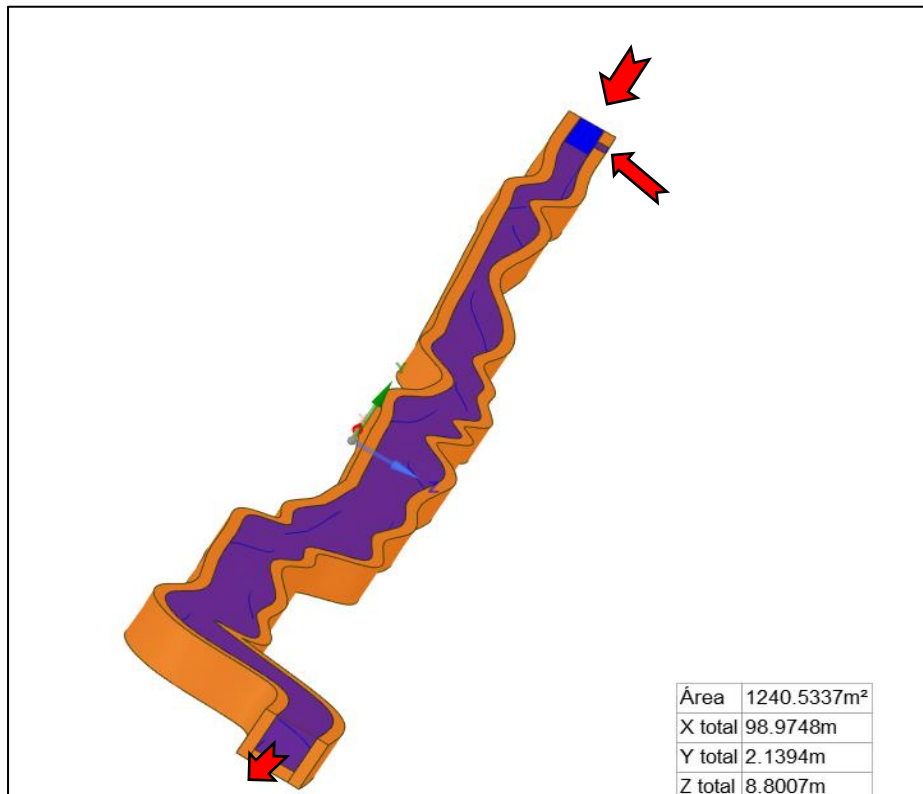


Figura 9 Modelo final para simulación-ANSYS-Space Clean

En las figuras 9 y 10 se muestran las áreas, perímetros y curvaturas de las márgenes del canal del río Yanamarca a trabajar, estos son importantes para definir las condiciones de frontera y operacionalización del modelo ANSYS FLUENT-VOF.

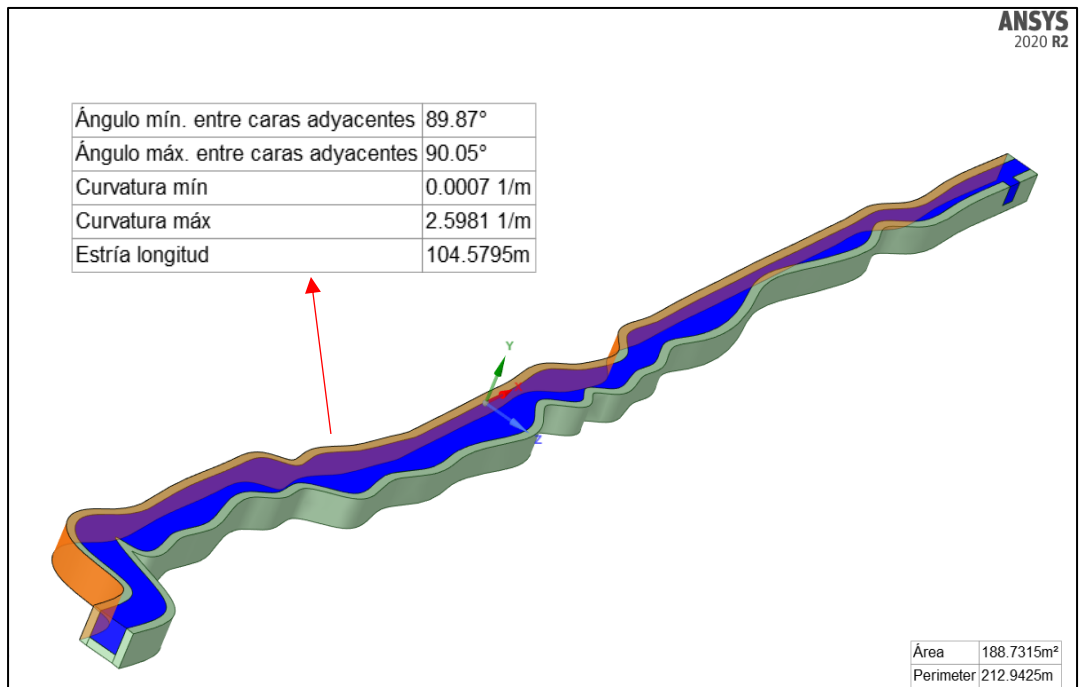


Figura 10 Geometría 3D rio Yanamarca Jauja-Junín -margen derecha-tramo para simulación- ANSYS-Space Clean

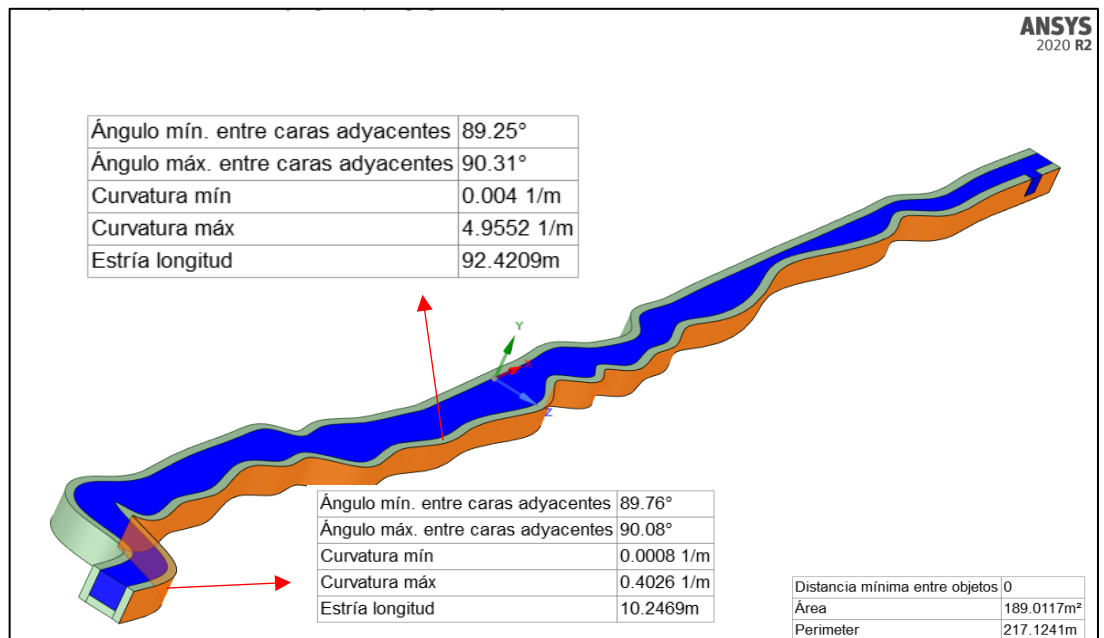


Figura 11 Geometría 3D rio Yanamarca Jauja-Junín -margen izquierda-tramos para simulación- Space Clean

También se determinó y verificó las consideraciones dinámicas del sistema de flujo del fluido contaminante en la corriente principal del río Yanamarca, estas se verifican en la tabla 2.

Tabla 2 Características de flujo en los sectores del canal simulado del río Yanamarca

| Sección | Coordenada | Velocidad media (m/s) | Área transversal(m ²) | Caudal (m ³ /s) |
|---------------------|---|-----------------------|-----------------------------------|----------------------------|
| Entrada del río | UTMX: 440885.5 UTMY: 8699859.9 Z: 18 H: S | 1.75 | 1.1716 | 2.0608 |
| Sección de salida | UTMX: 440897.8 UTMY: 8699759.8 Z: 18 H: S | 0.83 | 2.8388 | 2.35620 |
| Sección de descarga | UTMX: 440887.0 UTMY: 8699854.1 Z: 18 H: S | 0.58 | 1.1627 | 0.6744 |

4.1.4. Edición de la geometría y definición de los materiales trabajados

En esta etapa del acondicionamiento del modelo 3D trabajado, se muestran los resultados de la operabilidad con el Desing modeler, este complemento Software del ANSYS nos permitió definir los materiales de los componentes del modelo a trabajar en nuestra simulación, siendo consideradas las regiones de pared y lecho como sólidos y los sectores internos del modelo como fluidos. El procedimiento para importar nuestra geometría del Space Clean y editarlo en el Desing Modeler se aprecia en la figura 12 y la definición del material trabajado en la figura 13.

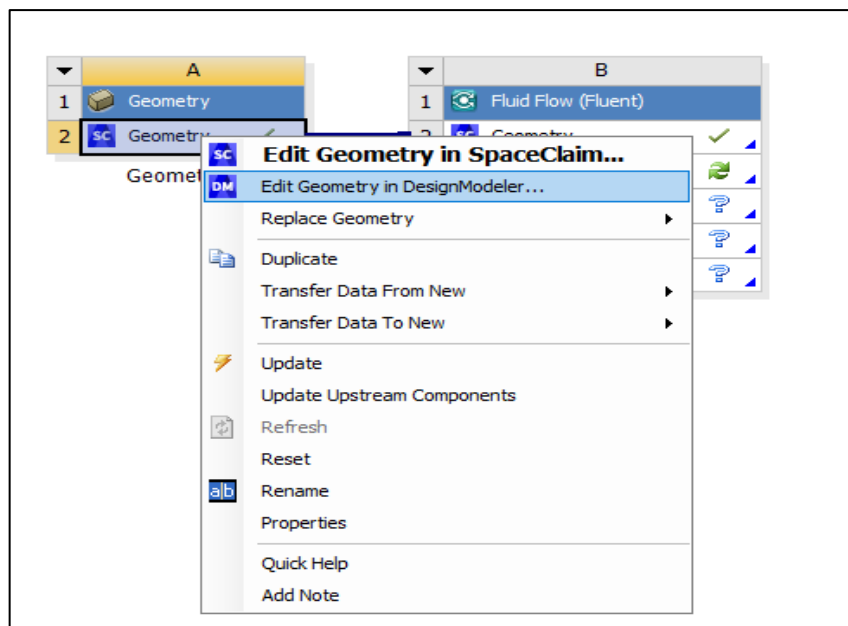


Figura 12 Importación De La Geometría Trabajada, Modelado Propio-ANSYS-WORKBENCH 2020 R2

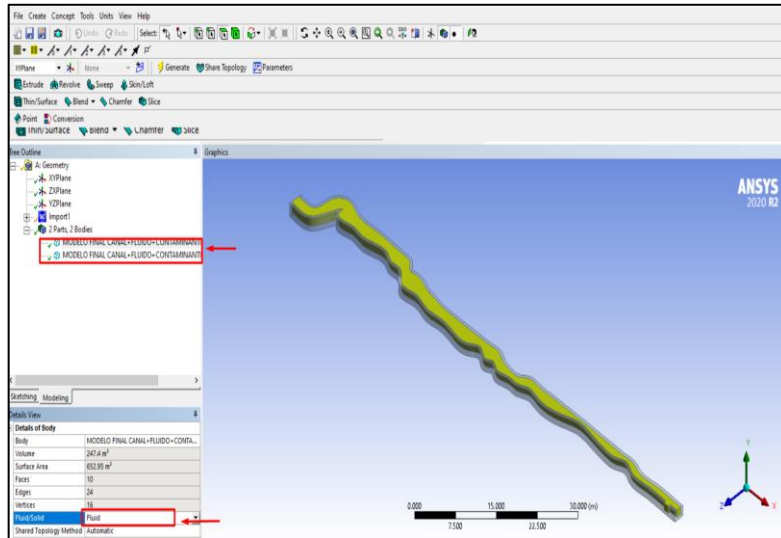


Figura 13 Definición de las características del material del modelo 3D, Modelado Propio-ANSYS-Desing Modeler

4.1.5. Desarrollo del proceso de Mallado para optimizar el método de elementos finitos

En esta etapa de nuestra investigación simulativa se procedió a discretizar la malla de nuestro modelo 3D del canal del río Yanamarca, la dificultad de nuestro modelo influye grandemente en la estructura de nuestra malla debido a sus diversas curvaturas y lechos irregulares. Este proceso de mallado es de vital importancia ya que influencia trascendentalmente en los resultados de nuestra simulación y en su nivel de significancia y precisión (37). Nuestra malla nos permitió que la solución de las ecuaciones gobernantes de Navier Stokes en los elementos finitos se genere de manera convergente y adecuada. Para iniciar el proceso si inicia el software Mesh de ANSYS, escogiéndose la edición del modelo antes cargado, este proceso se verifica en la figura 14.

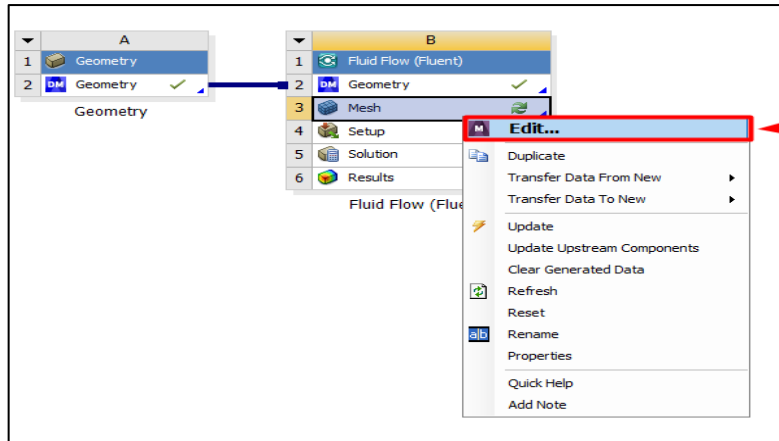


Figura 14 Edición del modelo con Mesh- ANSYS, Modelado Propio-ANSYS-WORKBENCH 2020-R2.

Una vez abierto nuestro modelo en el Mesh Fluid Flow Fluent procedimos a seleccionar y definir las fronteras de operación del modelo 3D, esto nos permitió definir la adecuación de la malla de trabajo. Se definieron las entradas y salidas del río Yanamarca, las entradas del flujo contaminante, el lecho y pared del Río y la superficie de flujo correspondiente. Este proceso de edición se observa en las figuras 15 y 16.

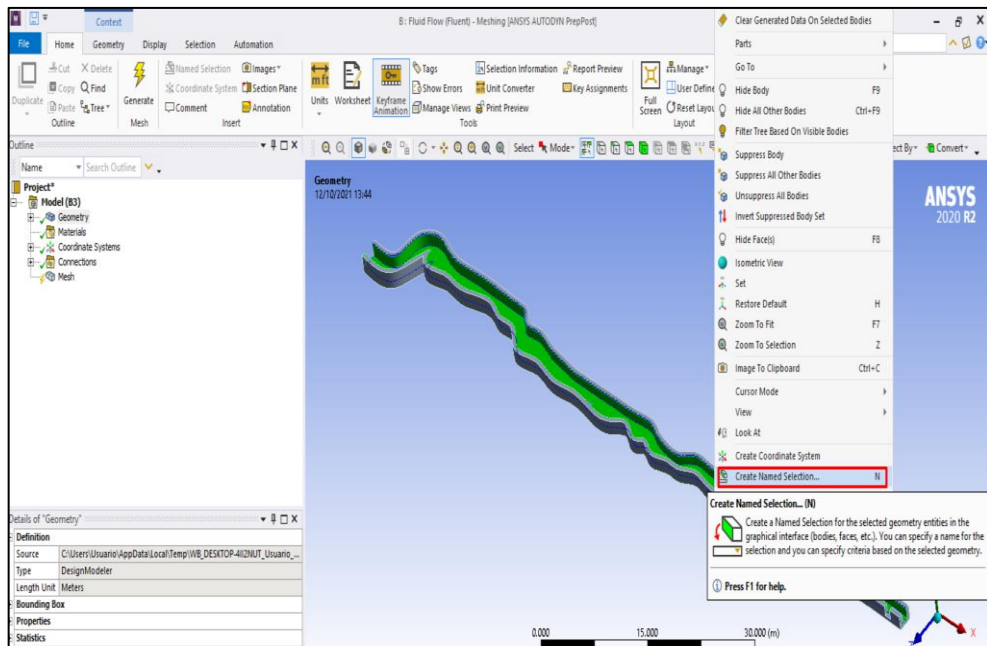


Figura 15 Edición del modelo con Mesh- ANSYS, Modelado Propio-ANSYS-WORKBENCH 2020-R2.

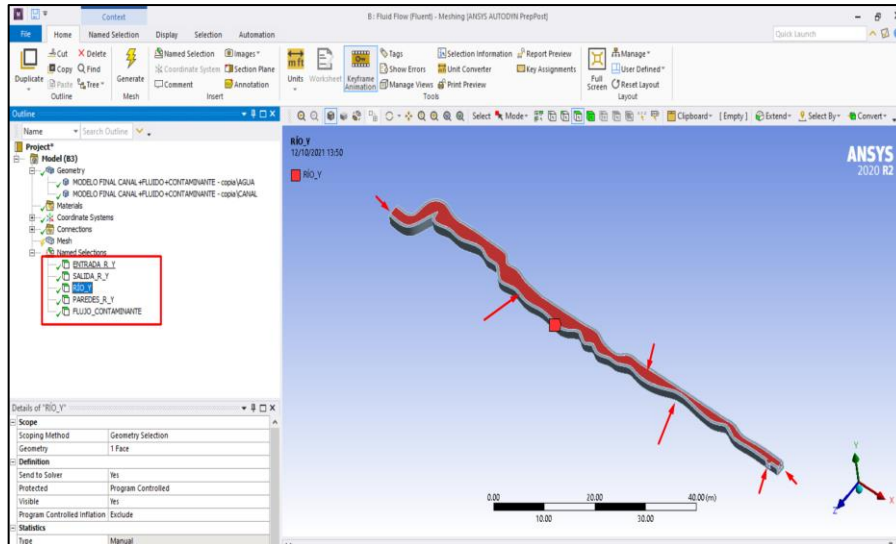


Figura 16 Selección operacional de entradas y salidas de simulación, Modelado Propio-ANSYS-Mesh.

La definición de las entradas y salidas generaron resultados en cuanto a dimensiones de fase y áreas operacionales de simulación, estos datos podemos observarlos en la gráfica 17, tanto para la entrada de flujo de agua en el río Yanamarca, para la salida y desembocadura en la laguna Tragadero, para la sección de flujo contaminante, para la superficie del Río y sus correspondientes

| Boundary Name | Geometry | Surface Area (m²) |
|--------------------|----------|-------------------|
| ENTRADA_R_Y | 1 Face | 1.1716 |
| SALIDA_R_Y | 1 Face | 2.8388 |
| FLUJO_CONTAMINANTE | 1 Face | 1.1628 |
| RIO_Y | 1 Face | 196.02 |
| PAREDES_R_Y | 3 Faces | 458.03 |

Figura 17 Resultados de fase y áreas definidas de simulación.

Como se explicó anteriormente el mallado es una operación gravitante para la convergencia de soluciones del modelo, nuestra malla trabajada define un número finito de partes o sectores, a los cuales se le asociarán los parámetros del modelo trabajado, quedando asociados a los puntos propios del mallado comúnmente conocidos como nodos de proceso y que a su vez colindan con otros que también generan soluciones finitas. El modelo CFD FLUID FLOW FLUENT-VOF Trabajado, nos genera soluciones discretas mediante ensamblajes de sus elementos finitos, permitiendo al simulador hacer uso iterativo de las ecuaciones gobernantes y sus funciones de interpolación y de forma para la generación de resultados. Nuestro modelo trabajado para el río Yanamarca presenta una malla que cumple con el estándar recomendado por especialistas como (38), teniendo un refinado medio alto con tiempos de cálculo iterativo medios, estos valores se aprecian en la figura 18.

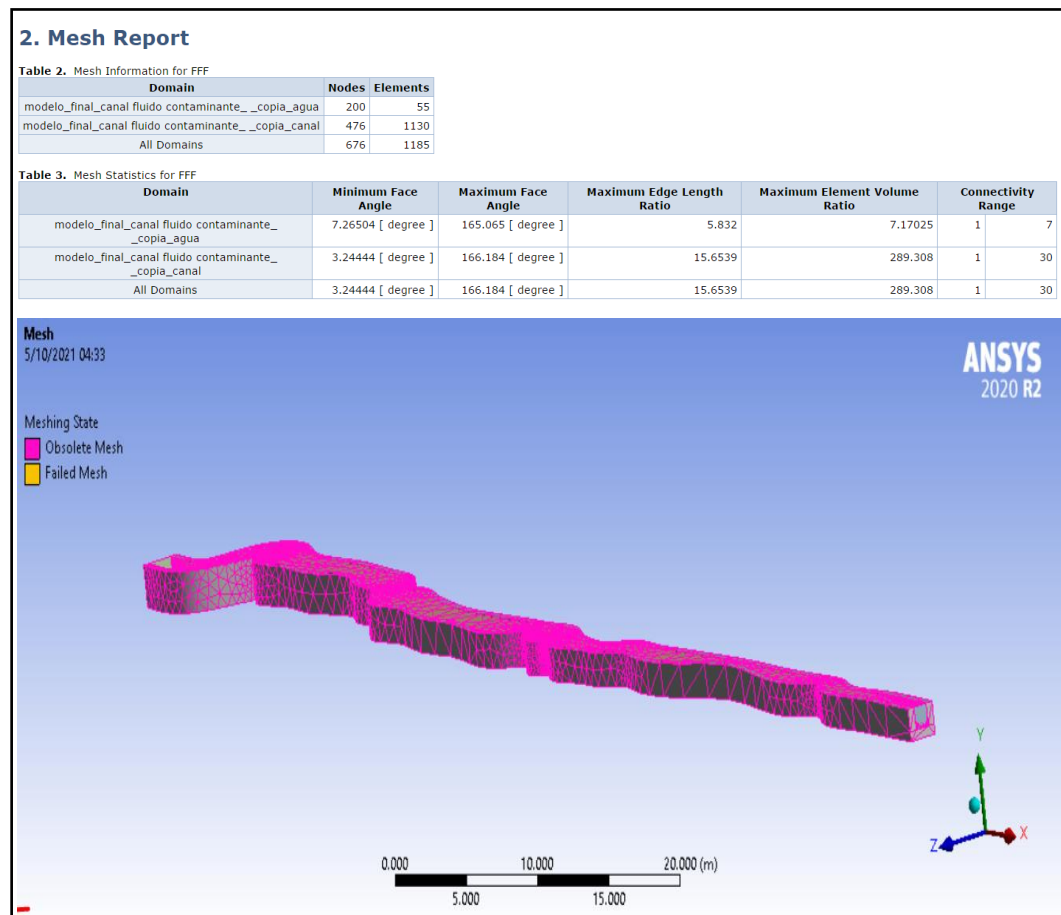


Figura 18 Selección operacional de entradas y salidas de simulación ANSYS-Mesh

Cabe señalar también que para el correspondiente mallado se usó el Adaptive Sizing del tipo Fine, generando los resultados vistos en la figura 19.

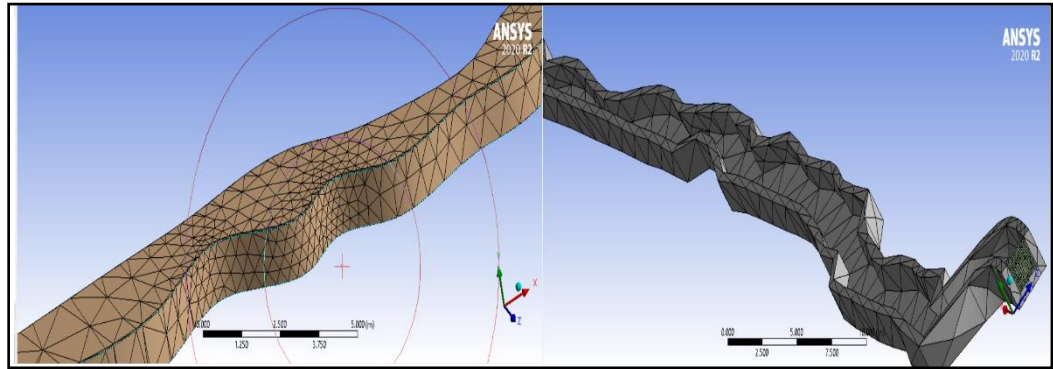


Figura 19 Mallado estructural del modelo-ANSYS-Mesh

4.2. Ecuaciones específicas de masa y momento consideradas en CFD para su correspondiente edición e implementación en la simulación del río Yanamarca – Jauja 2021

4.2.1. Definición de las condiciones y parámetros operacionales CFD- Ansys fluid Flow (Fluent)- VOF

En esta etapa se definieron las condiciones de frontera para el modelo de simulación utilizado por ANSYS CFD- fluid Flow fluent del tipo volumen de fluido multifase (VOF), el cual modeló el flujo de vertimiento de un contaminante (detergente líquido) en el flujo del río Yanamarca, este modelo tuvo la capacidad de poder rastrear la fracción de volumen del contaminante comprometido en todo el dominio a través del canal del río. También nos simula el seguimiento de la velocidad constante o transitoria de los fluidos a lo largo del canal del río Yanamarca.

Cabe indicar que ANSYS fluent trabaja con el método RANS (Reynolds Averaged Navier Stokes), este método promedia las ecuaciones de Navier-Stokes para obtener valores medios y fluctuantes, estos son ideales para flujos con característica de variación temporal. El resumen de la modelación y modelos compendiados para nuestra simulación en el río Yanamarca se puede verificar en la tabla 2.

Tabla 3 Compendiado de modelos ejecutados por el ANSYS- fluid Flow (Fluent)

| |
|--|
| Ley de conservación de masa |
| $\frac{\partial \rho}{\partial t} + \text{div}(\rho \vec{U}) = 0$ |
| Ley de la conservación de momento (Conocida como la ecuación de Navier-Stokes) |

$$\frac{\partial \rho u}{\partial t} + \text{div}(\rho u U) = \frac{\partial \rho}{\partial x} + \text{div}(u \text{grad}(u)) + S_{Mx}$$

$$\frac{\partial \rho u}{\partial t} + \text{div}(\rho u U) = \frac{\partial \rho}{\partial y} + \text{div}(u \text{grad}(u)) + S_{My}$$

$$\frac{\partial \rho u}{\partial t} + \text{div}(\rho u U) = \frac{\partial \rho}{\partial z} + \text{div}(u \text{grad}(u)) + S_{Mz}$$

Modelos de Turbulencia CFD-ANSYS-Número de modelos

| Modelo | Número de ecuaciones que la componen |
|------------------------------|--------------------------------------|
| Spalart-Almaras | 1 |
| $k - \varepsilon$ | 2 |
| $k - \omega$ | 2 |
| Transición $k - kl - \omega$ | 3 |
| Transición SST | 4 |
| Reynolds Stress | 7 |

Transporte de Energía Cinética de turbulencia (k)

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \text{div}(\rho k U) = \text{div} \left[\left(u + \frac{ut}{\sigma_k} \right) \text{grad}(k) \right] + P_k - \beta * \rho k \omega^2$$

$$P_k = (2u_t S_{ij} - \frac{2}{3} \rho k \frac{\partial U_i}{\partial x_j} \delta_{ij})$$

Transporte de la frecuencia Turbulenta (ω)

$$\frac{\partial(\rho \omega)}{\partial t} + \text{div}(\rho \omega U) = \text{div} \left[\left(u + \frac{ut}{\sigma_{\omega_1}} \right) \text{grad}(\omega) \right] + \gamma_2 P_\omega - \beta_2 \omega^2 + 2 \frac{\rho}{\sigma_{\omega^2} \omega} \frac{\partial k}{\partial x_k} \frac{\partial \omega}{\partial x_k}$$

$$P_\omega = (2u_t S_{ij} - \frac{2}{3} \rho \omega \frac{\partial U_i}{\partial x_j} \delta_{ij})$$

Ecuación de Transporte de especies

$$\frac{\partial}{\partial x} (\rho Y_i) + \nabla \cdot (\rho \vec{v} Y_i) = -\nabla \cdot \vec{J}_i + R_i + S_i$$

Ecuación de la Energía

$$\frac{\partial}{\partial t} \int_{\Omega} \rho H d\Omega + \oint_{\partial\Omega} \rho H (\vec{v} \cdot \vec{n}) dS = \int_{\Omega} (\rho \vec{f}_e \cdot \vec{v} + q_h) d\Omega + \oint_{\partial\Omega} k (\nabla T \cdot \vec{n}) dS + \oint_{\partial\Omega} (\vec{\tau} \cdot \vec{v}) \cdot \vec{n} dS$$

Para resolver estas ecuaciones modeladas Ansys fluid Flow fluent -VOF utilizó los métodos de solución numérica avanzada, específicamente el método basado en la presión del fluido (Pressure-based), este es ideal para los fluidos incompresibles como el elemento agua. El simulador ANSYS utilizó métodos de discretización para las gradientes de las ecuaciones, siendo los métodos de Green- Gauss de celdas y nodos y los mínimos cuadrados de celdas los que generaron el procesamiento (27).

Para iniciar la configuración de nuestra simulación se procedió con la edición del Fluent Launcher, el procedimiento se verifica en la figura 20, en la cual se aprecia la elección de “Double Precisión” para la mejora de la precisión de resultados y el “Display Mesh After Reading”, para la convergencia adecuada de resultados en nodos del mallado.

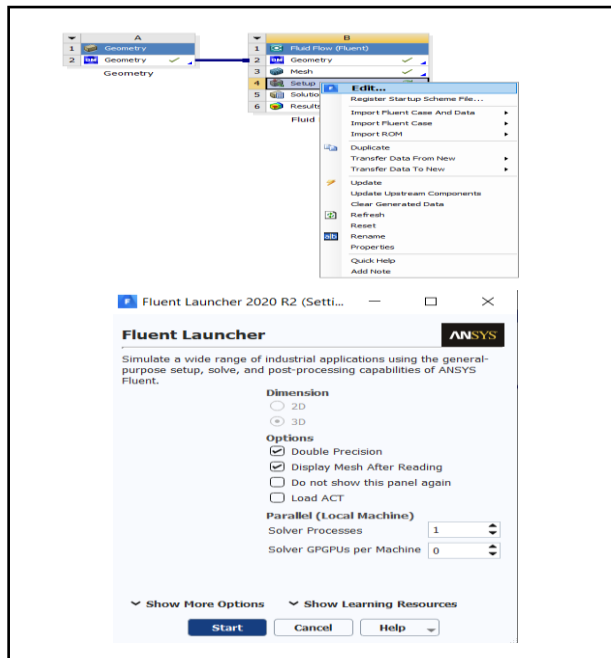


Figura 20 Mallado estructural del modelo-ANSYS Workbench-2020 - R2

Como parte inicial de la configuración se procedió a establecer el valor de la gravedad en el eje y y con elecciones del modelo basado en la presión del fluido (Pressure-Based), con velocidad absolute y de tiempo transitorio (Transient). Estas configuraciones generales las apreciamos en la figura 21

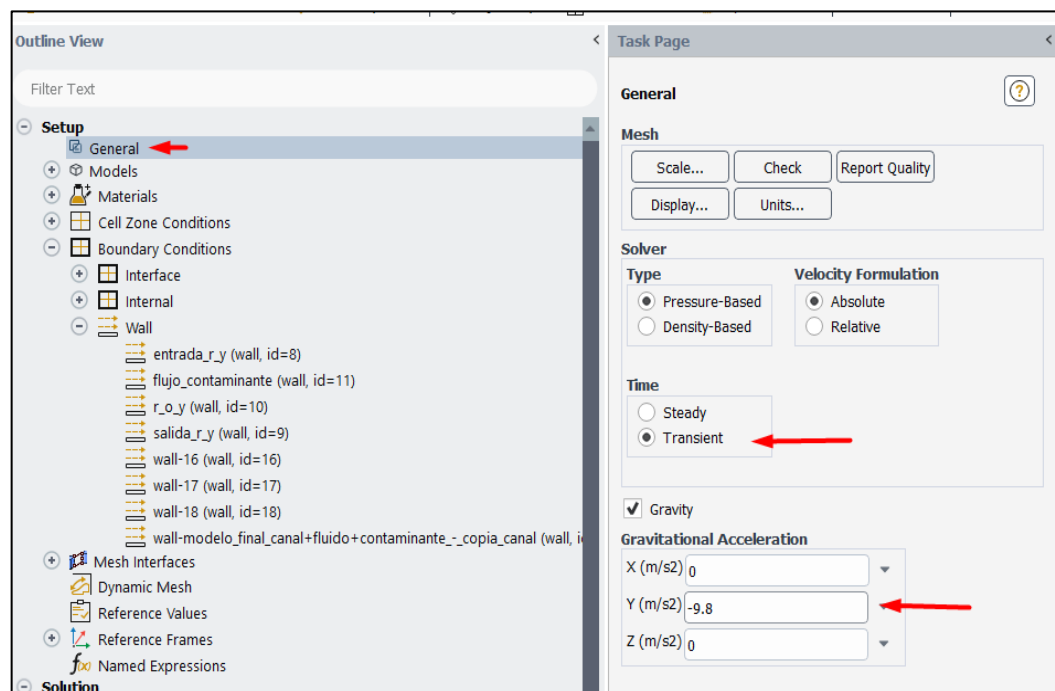


Figura 21 Configuración General del modelo-ANSYS fluent

4.2.1.1. Selección y configuración del modelo Multifase VOF

Para la elección idónea de métodos procedimos a la configuración del método por volumen del fluido (VOF), Este método multifase nos permitió hacer el seguimiento transitorio de la dispersión contaminante en el canal simulado del río Yanamarca, el VOF simula la tensión superficial con tendencia elástica. El seguimiento difusional se hace mediante la solución de la ecuación de continuidad para la fracción de volumen de una o más fases, en nuestro caso la fase contaminante en la fase del agua del río Yanamarca. Esta ecuación y sus alternas se pueden verificar en la tabla 2.

Tabla 4 Compendiado de modelos ejecutados por el ANSYS- fluid Flow (Fluent)- VOF

| |
|--|
| Ley de conservación de masa |
| $\frac{1}{\rho q} \left[\frac{\partial}{\partial t} (\alpha_q \rho_q) + \nabla \cdot (\alpha_q \rho_q \vec{v}_q) = S_{\alpha_q} + \sum_{p=1}^n (\dot{m}_{pq} - \dot{m}_{qp}) \right]$ |
| Condicionante de la ley de conservación de masa para la fase primaria |
| $\sum_{q=1}^n \alpha_q = 1$ |
| Forma Implícita |
| $\frac{\alpha_q^{n+1} \rho_q^{n+1} - \alpha_q^n \rho_q^n}{\Delta t} + \sum_f (\rho_q^{n+1} U_f^{n+1} \alpha_q^{n+1}) = \left[S_{\alpha_q} + \sum_{p=1}^n (\dot{m}_{pq} - \dot{m}_{qp}) \right] V$ |
| Forma Explícita |
| $\frac{\alpha_q^{n+1} \rho_q^{n+1} - \alpha_q^n \rho_q^n}{\Delta t} + \sum_f (\rho_q U_f^n \alpha_q^n) = \left[\sum_{p=1}^n (\dot{m}_{pq} - \dot{m}_{qp}) + S_{\alpha_q} \right] V$ |

Los modelos VOF compendiados se muestran en la configuración del ANSYS fluent, al utilizar los modos explícitos de discretización temporal, estos cumplen un algoritmo de interpolación mediante la reconstrucción de la interfaz con discretización esquematizada por volúmenes finitos.

En nuestra simulación CFD se optó por la opción multifase y se seleccionó “Volumen of fluid” con 3 fases (aire, agua y contaminante), también se escogió la forma explícita del VOF con características de “Implicit Body Force” para consideración de las fuerzas naturales aplicadas al sistema. Estos procedimientos de configuración se pueden observar en la gráfica 22.

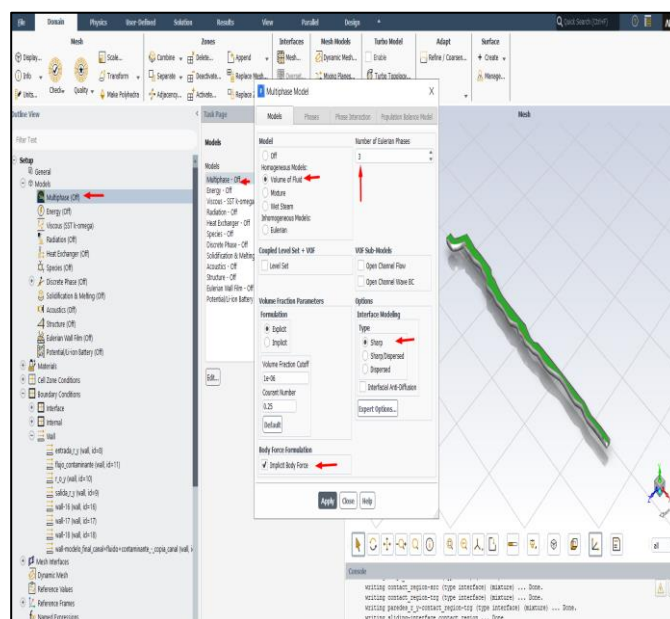


Figura 22 Configuración del volumen de fluido Multifase (VOF) -ANSYS fluent

4.2.1.2. Condiciones de flujo Turbulento

Una vez configurado el modelo multifase se procedió a elegir las condiciones de la fluidodinámica del flujo turbulento, para ello se elige el modelo viscoso k-epsilon (2eqn), el cual hace uso iterativo de dos ecuaciones de transporte que toman las condiciones de muro y pared del río y definen límites y condiciones para las variabilidades diversas del flujo del fluido, incluso también consideran que en el lecho y paredes los coeficientes de rugosidad varían por tramos. Cabe precisar que la viscosidad de nuestro río Yanamarca fue definida como flujo turbulento, considerando las mezclas de fluido en diversas capas del mismo, esto induce la generación de velocidades diferentes en direcciones varias respecto al flujo general, estas consideraciones se apoyan en estudios similares de investigadores reconocidos como Toapanta-Ramos [32]. Las ecuaciones del modelo k-epsilon (2eqn) se pueden observar en la tabla 5.

Tabla 5 Modelos de energía cinética y disipación utilizados por ANSYS- fluid Flow (Fluent)- VOF

| |
|---|
| Ecuación de energía cinética turbulenta |
| $\frac{\partial}{\partial x} \int \Omega(t) \rho k d\Omega + \int \sigma \rho ((v - v_\sigma) \cdot n) k d\sigma = \int \sigma (u + \frac{u_t}{u_k}) (\nabla k \cdot n) d\sigma + \int \Omega (G_t - \rho \epsilon) d\Omega$ |
| Velocidad de disipación turbulenta |
| $\frac{\partial}{\partial x} \int \Omega(t) \rho \epsilon d\Omega + \int \sigma \rho ((v - v_\sigma) \cdot n) \epsilon d\sigma = \int \sigma (u + \frac{u_t}{u_k}) (\nabla \epsilon \cdot n) d\sigma + \int \Omega \left(C_1 G_t \frac{\epsilon}{k} - C_2 \rho \frac{\epsilon^2}{k} \right) d\Omega$ |

Nota: Fuente: Fórmulas basadas en Launder, B.E& Spaldig, D.B (1974) "The numerical computation of turbulent flows", Computer Methods, Applied Mechanics and Engineering, vol. 3, p. 269-289. Donde ϵ es la velocidad de disipación de la energía cinética turbulenta, $C_1 = 1.44$, $C_2 = 1.92$, $\sigma = 1$ es el número de Prandt, u es la viscosidad, n es el paso del tiempo y Ω corresponde al Volumen de control.

La elección y selección de la configuración de los modelos para la simulación del río Yanamarca se aprecian en la figura 23.

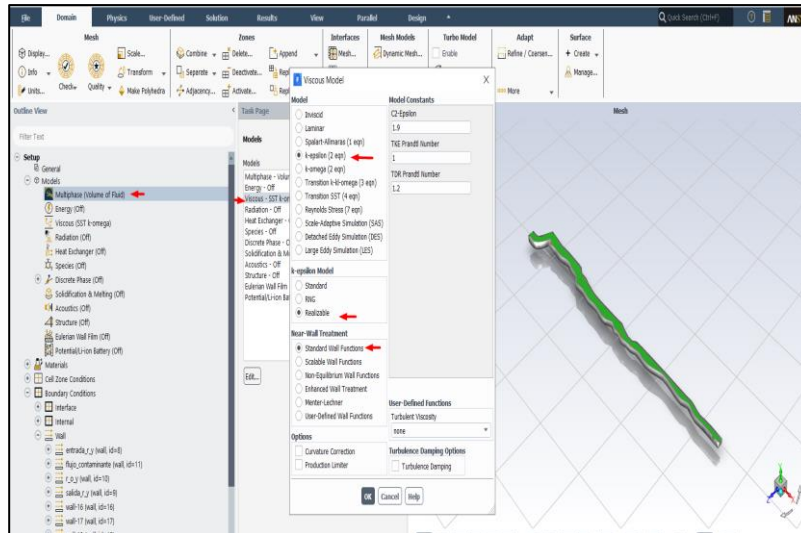


Figura 23 Configuración del flujo turbulento-ANSYS fluent.

4.2.1.3. Selección de materiales para la simulación

Nuestro modelado considera tres fases, las cuales estarán compuestas por tres materiales que son el aire (material por defecto del sistema) en la superficie, agua del río Yanamarca y el contaminante que estará compuesto por un material contaminante a base de detergente líquido (1040 kg/m³ y 0.65 kg/m-s) y agua. La edición de los materiales principales de agua líquida y detergente líquido (Contaminante considerado) se registraron haciendo uso del menú edición, las propiedades químicas y físicas de los mismos fueron editados usando fluent data, es proceso se verifica en la figura 24

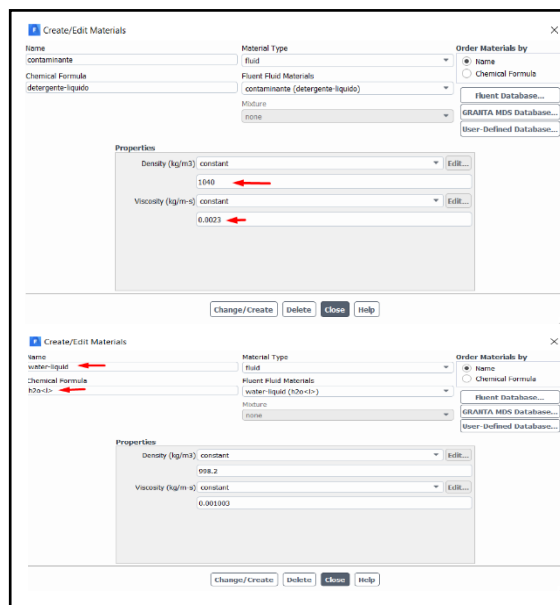


Figura 24 Edición del material a usar en la simulación (VOF) del río Yanamarca

4.2.1.4. Definición de fases para los materiales trabajados en la simulación

Los materiales a trabajar en nuestra simulación ya editados y configurados en la sección anterior deben también estar determinados por la presencia y definición de fases para cada volumen de control estudiado, con esta definición de fases se hará posible el rastreo de las fracciones volumétricas de nuestro material contaminante. La simulación del río Yanamarca consideró tres fases vistas en la figura 25.

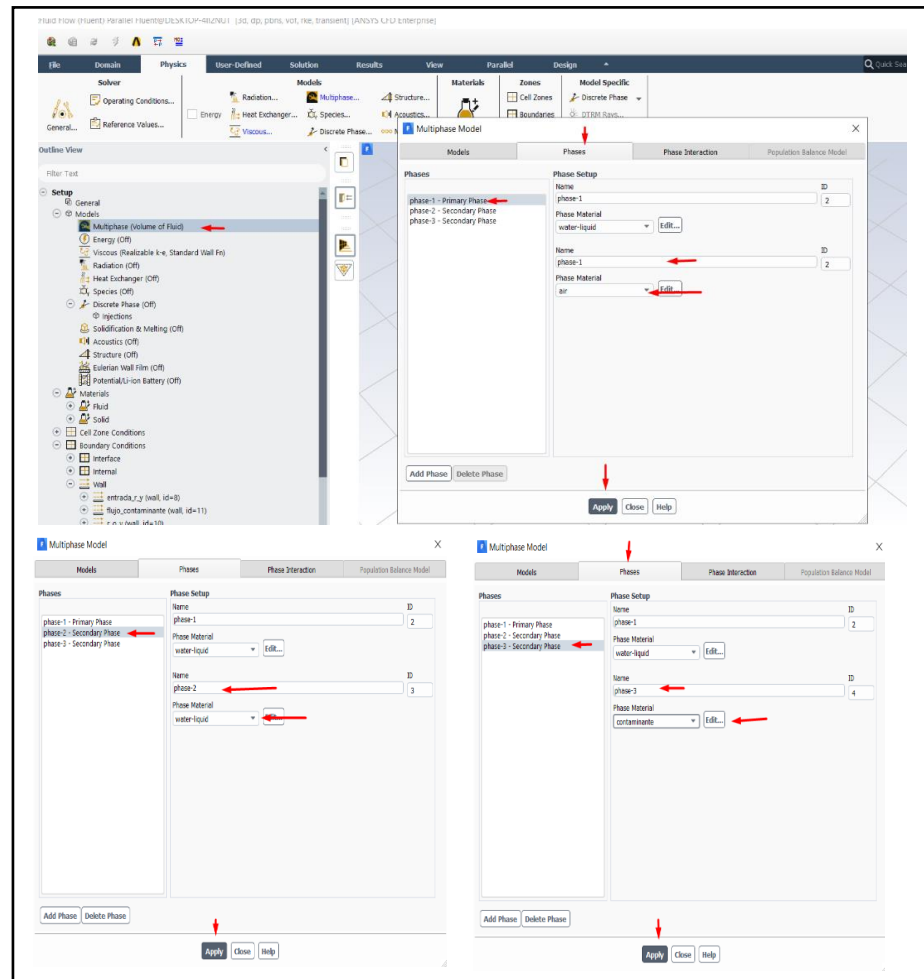


Figura 25 Configuración del volumen de fluido Multifase (VOF) -ANSYS fluent.

4.2.1.5. Definición de las condiciones de frontera para el modelo trabajado

Se procedió a configurar las condiciones de frontera con “Boundary Conditions”, en esta pestaña se editó las condiciones de entrada y salida del sector del río Yanamarca a Simular. Nuestro sistema de trabajo y análisis estuvo compuesto por dos entradas: la primera estuvo compuesta por agua líquida del curso de agua principal del río Yanamarca y la segunda definida

por el afluente contaminante al caudal de este. También se definieron las características de los flujos de salida, de las paredes y de la superficie del agua.

Para la condición de entrada general se consideró la velocidad media de entrada correspondiente a 1.75 m/s (velocity Inlet) con un 5% de intensidad estándar de turbulencia. La edición se muestra en la figura 26.

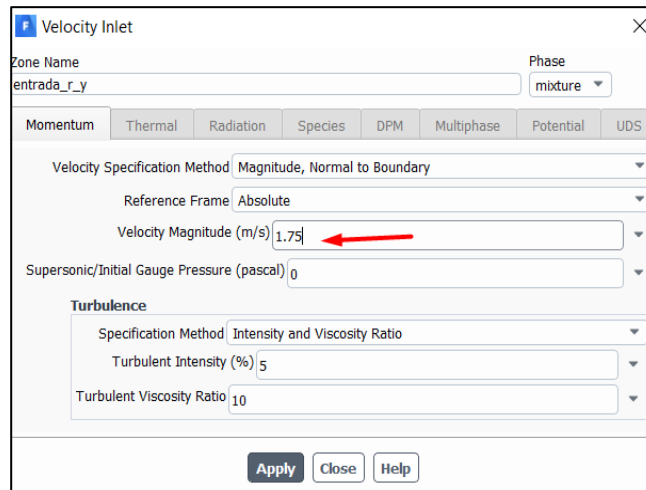


Figura 26 Configuración de las condiciones de la entrada general de flujo para el río Yanamarca. -ANSYS fluent.

Para configurar las condiciones del afluente contaminante se tuvo que identificar las velocidades de flujo de este sobre los puntos de confluencia de la corriente principal del río Yanamarca, el valor medio de esta velocidad corresponde a 0.58 m/s al 5% de intensidad de turbulencia estándar. El proceso se puede observar en la figura 27.

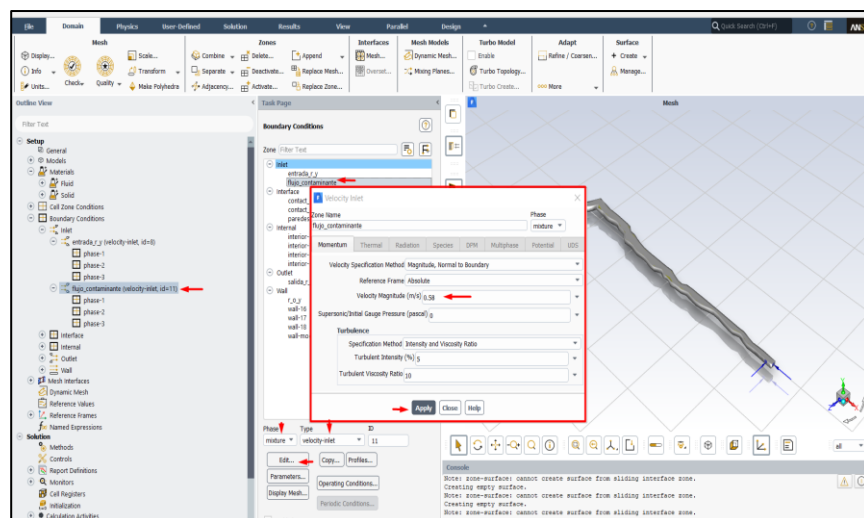


Figura 27 Configuración de las condiciones del afluente contaminante al río Yanamarca-ANSYS fluent.

El contaminante también fue editado respecto a su fase y fracción volumétrica de trabajo (1), esto permitió generar un rastreo fino del mismo en los sectores definidos. Estas configuraciones se muestran en la figura 28.

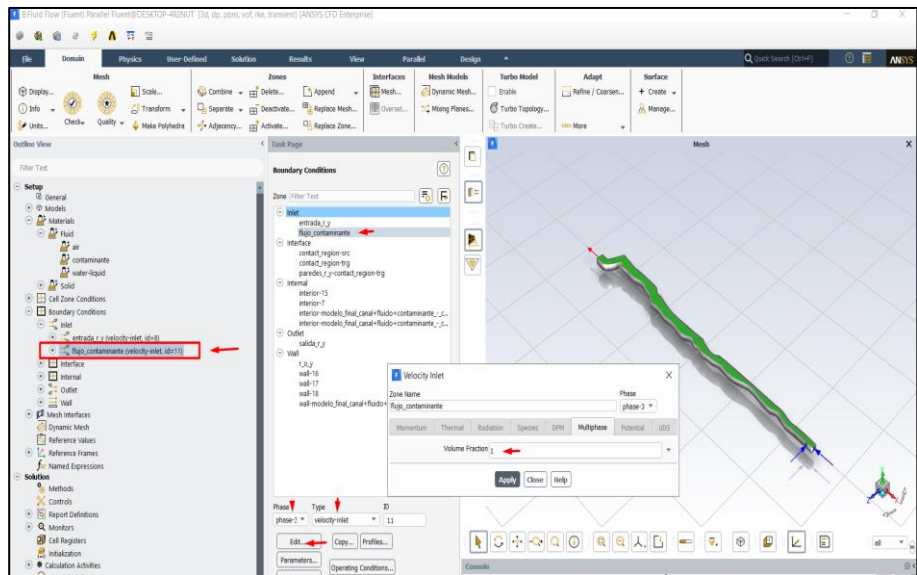


Figura 28 Configuración de las condiciones del afluente contaminante al río Yanamarca-fracción volumétrica para la fase 3-ANSYS fluent

También se trabajó con la configuración de las condiciones de salida, escogiéndose para esta el tipo “outflow”, esto se logra verificar en la figura 29.

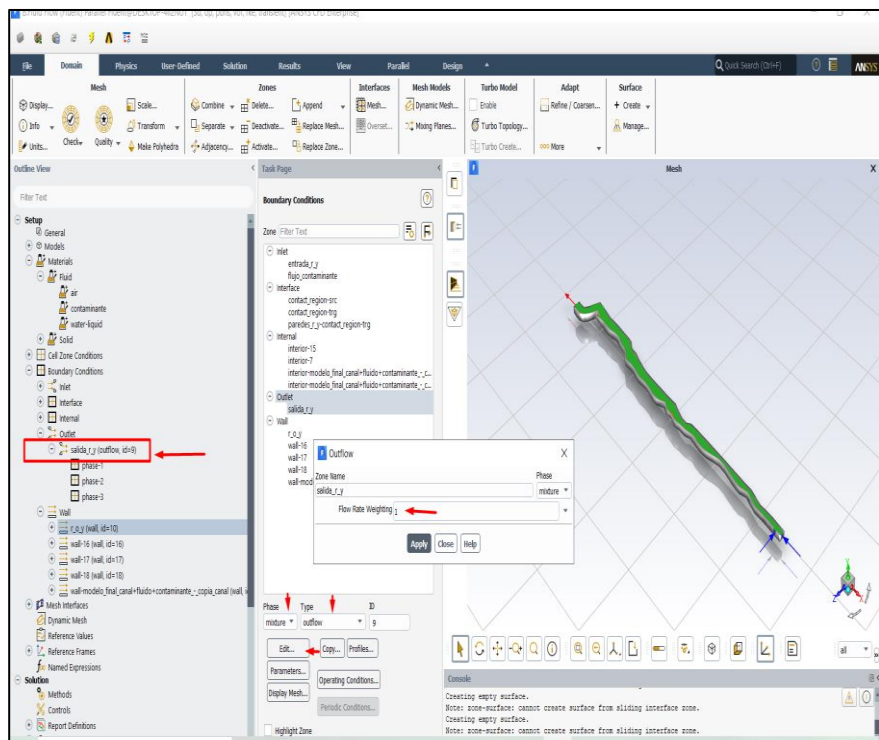


Figura 29 Configuración de las condiciones de salida-ANSYS fluent

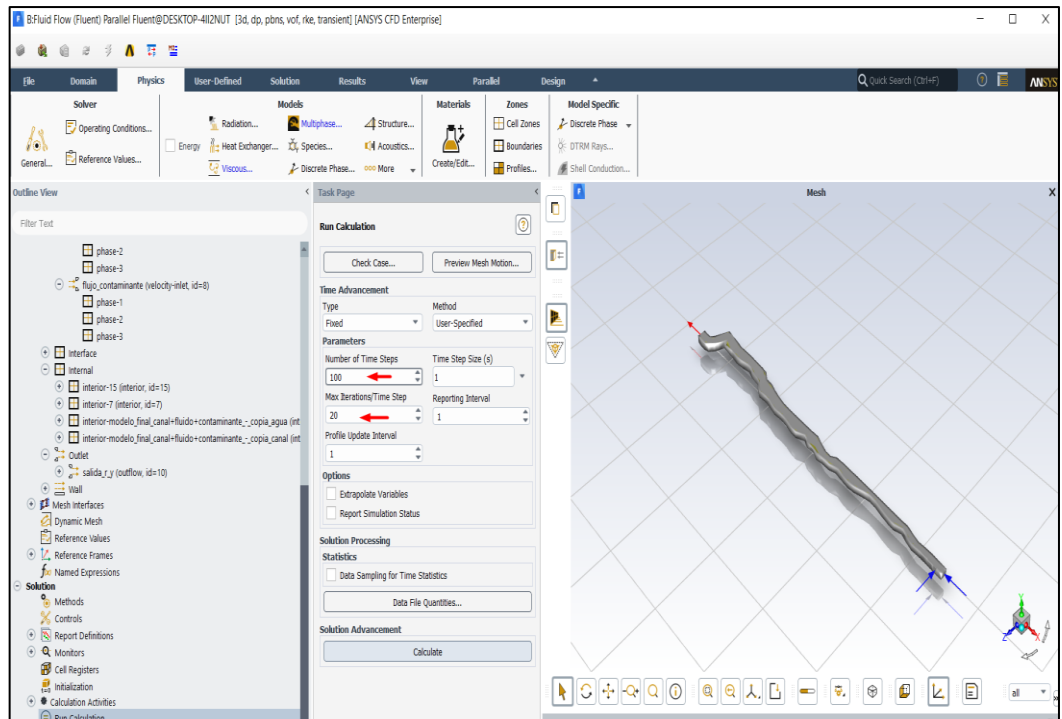


Figura 31 Edición de las actividades de cálculo de la simulación-ANSYS fluent

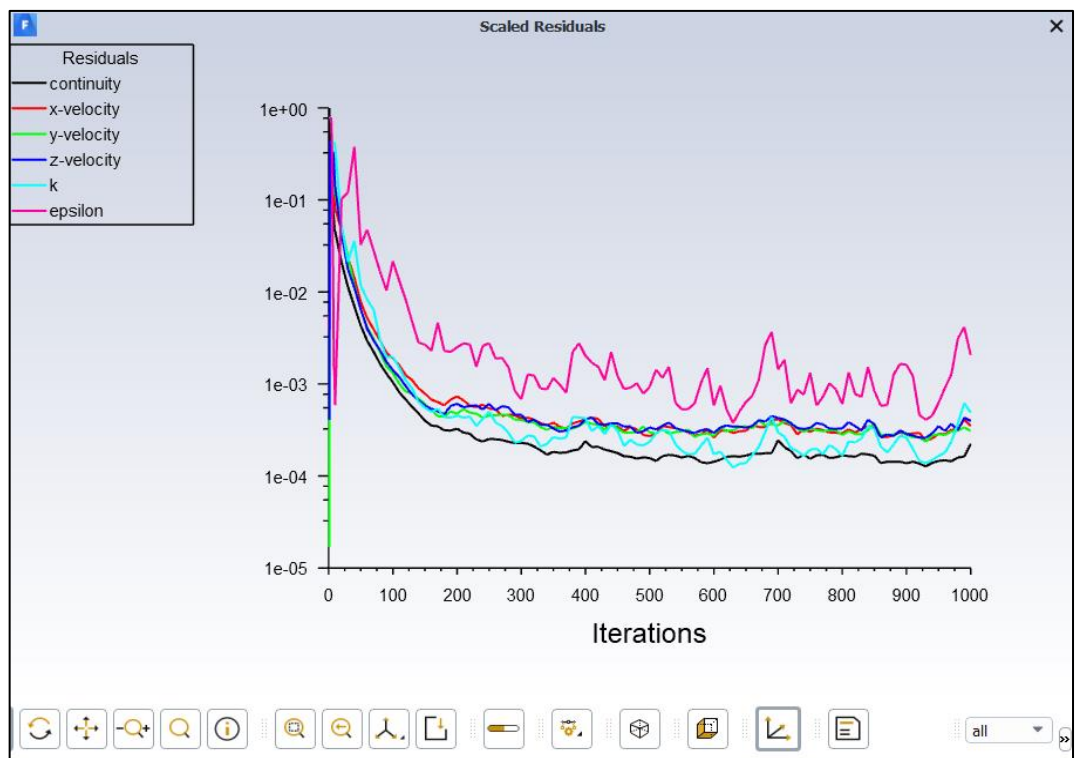


Figura 32 Soluciones iteradas-ANSYS fluent

4.2.4. Análisis de las soluciones calculadas

Los resultados calculados en el paso anterior fueron analizados en el subprograma Fluid Flow (Fluent)- CFD, este nos permite hacer uso de planos de locación de contornos

(contour), vectores (vector), flujo de velocidad (stream line), y representaciones volumétricas (volumen rendering) para la visualización y análisis de resultados. Esta fase culmina con la animación simulativa que se visualiza opcionalmente post análisis en la figura 33.

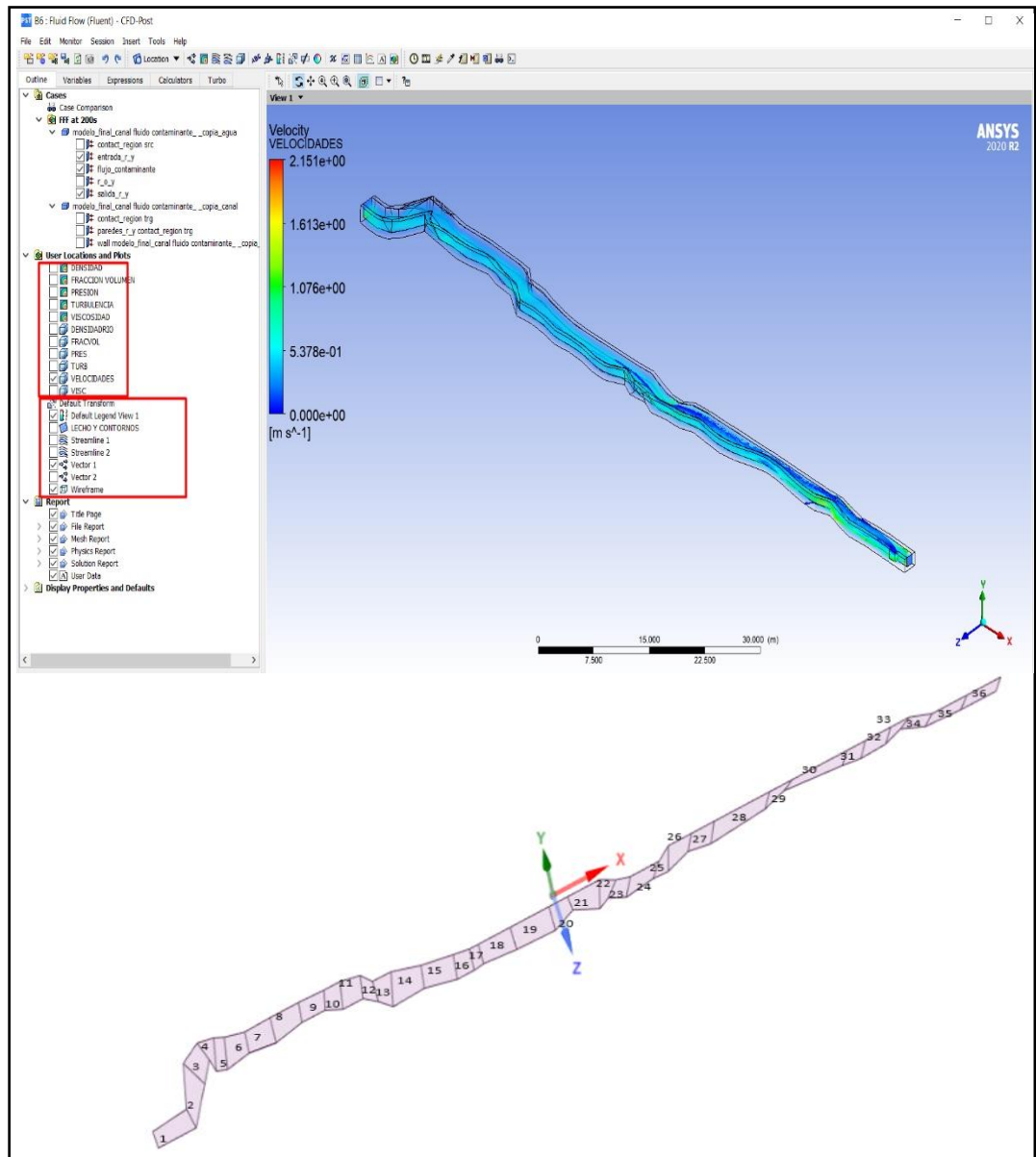


Figura 33 Análisis de las soluciones-ANSYS fluent

4.3. Nivel de validez y sensibilidad de la simulación en CFD respecto a los datos dispersivos de contaminantes experimentales del río Yanamarca – Jauja 2021

Nuestra simulación de dispersión de contaminantes del río Yanamarca fue validada por cuatro profesionales que se desempeñan dentro de las actividades de topografía, monitoreo ambiental

y gestión medio ambiental. Para la validación se consideraron 9 ítems de evaluación, cuyos formularios se verifican en anexos y se compendian en la siguiente tabla 6 de valoración.

Tabla 6 Resultados del proceso de validación y confiabilidad

| Juez Experto | | 1. Precisión del modelo 3D del canal | 2. Características del Mallado | 3. Modelización | 4. Características de materiales y condiciones de frontera | 5. Administración de soluciones | 6. Presentación Simulada | 7. Intencionalidad | 8. Metodología y propósito | 9. Pertinencia |
|-------------------------------|--------------------------------------|--------------------------------------|--|--|---|---|---|--|---|--|
| Apellidos y Nombres | Experto en: | Está diseñado acorde a la realidad | Cumple con densidad, distribución de nodos y curvatura | Modeliza y los siguientes modelos: Navier-Stokes, Reynolds Stress. | Define materiales y condiciones de frontera: Condiciones de entrada, condiciones de salida, condiciones de descarga, fases de simulación, condiciones de pared y flujo. | Genera: Velocidades de flujo, Campos vectoriales de flujo, flujos máxicos advectivos, fracciones volumétricas, energía cinética de turbulencia. | Genera reporte, gráficas 3D, análisis de Stream line, Vector, plano, superficie respuesta y Videos3D. | Es adecuado para valorar inferencias sobre la realidad hidrodinámica dispersiva. | El proceso de simulación responde al propósito de la investigación. | La simulación es aplicable al entorno. |
| DE LA CRUZ HIDALGO, JORGE | Monitoreo ambiental | 75 | 70 | 80 | 75 | 85 | 70 | 80 | 85 | 85 |
| SOCUALAYA PEREZ, DANIEL ANGEL | Topografía pública | 70 | 75 | 60 | 85 | 75 | 70 | 60 | 80 | 85 |
| QUISPE SANABRIA, LUIS ALBERTO | Gestión ambiental y desarrollo rural | 70 | 75 | 60 | 80 | 65 | 65 | 80 | 60 | 85 |
| HUAMÁN AYALA, SEGUNDO JOSÉ | Monitoreo ambiental | 80 | 90 | 85 | 85 | 90 | 80 | 80 | 80 | 80 |

Estos resultados fueron procesados con el estadístico del α de Cronbach, en el software SPSS statics 25, los valores se muestran en la tabla 7 y de estos se logra apreciar que el α de Cronbach al tener un valor de 0.805 demuestra la validez de la simulación en un rango Bueno- alto (incluso con su respectivo valor estandarizado). Cabe recalcar que los rangos de validez por el estadístico α de Cronbach se encuentran en anexos.

Tabla 7 Estadísticos de fiabilidad del instrumento de simulación

| Alfa de Cronbach | Alfa de Cronbach basada en elementos estandarizados | N de ítems evaluados |
|------------------|---|----------------------|
| 0.805 | 0.70 | 9 |

4.4. Comportamiento del vector gradiente de velocidades de descarga contaminante y su interacción con la corriente principal simulada en CFD, en el río Yanamarca- Jauja 2021

En nuestra simulación del río Yanamarca se pudo determinar el perfil de velocidades en los sectores simulados, en estos se logra visualizar la variante de los vectores de velocidad en las

tres direcciones (X, Y, Z), los cuales varían por la naturaleza de las curvaturas de nuestro modelo implementado. En la figura 34 se observa la variabilidad del flujo de velocidades en varios puntos finitos que varían desde la sección transversal hasta la superficie por las condiciones de fondo y taludes. En esta misma figura también podemos apreciar que las velocidades de vertimiento de nuestro contaminante promedio corresponden a 0.6562 m/s, generando valores de ascendencia superlativa cercanos a la descarga, llegando a valores medios de 1.313 m/s correspondiente a los sectores 30 – 35.

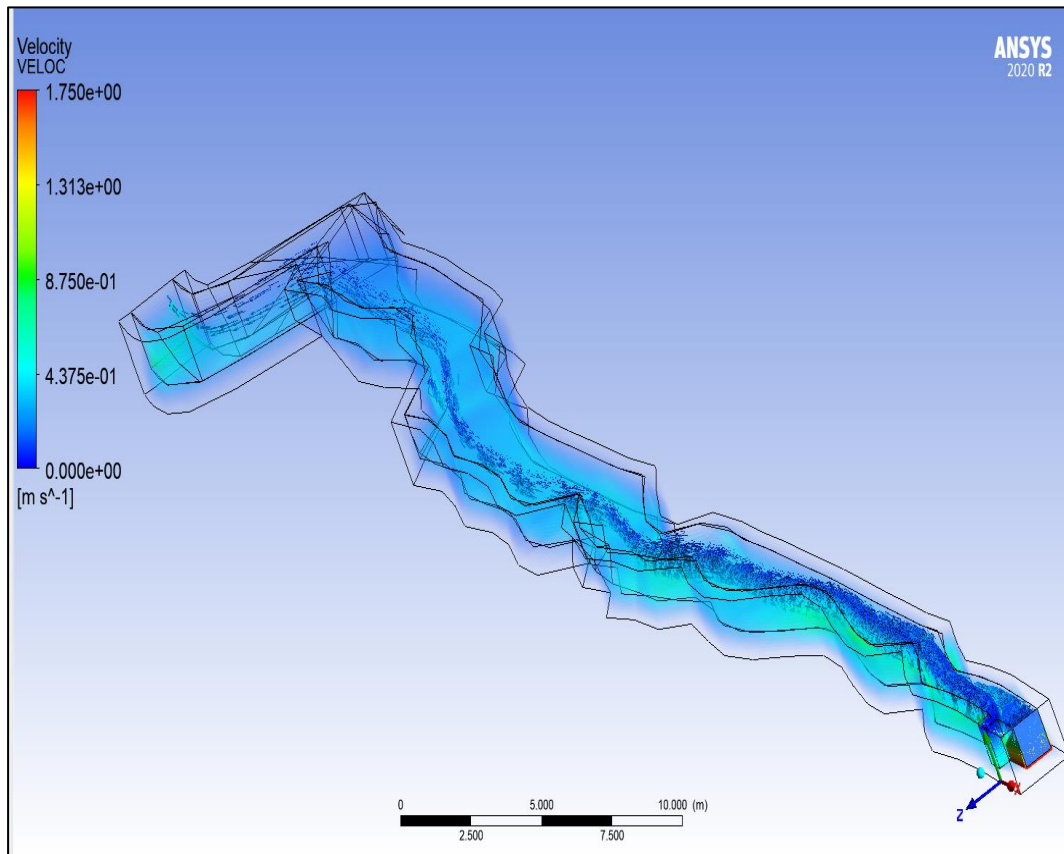


Figura 34 Velocidades del flujo contaminante -ANSYS fluent-VOF

En la figura 35 se observa el perfil vectorial de las velocidades desde la confluencia de la descarga y la corriente principal en el río Yanamarca. En esta se aprecia que dichos gradientes de flujo varían acorde a la proximidad de la descarga en el campo vectorial y van generando turbulencia cinética a corde con la interacción de la corriente principal. Estudiar estas velocidades mostradas en la figura 35 nos permite identificar el comportamiento difusivo futuro del contaminante, ya que al identificar las velocidades de flujo en un punto dado de nuestro campo vectorial nos permite identificar las trayectorias y variantes modulares del fenómeno (29). Los valores medios de la velocidad de flujo están comprendidos entre 0.4375 m/s y 1.75 m/s.

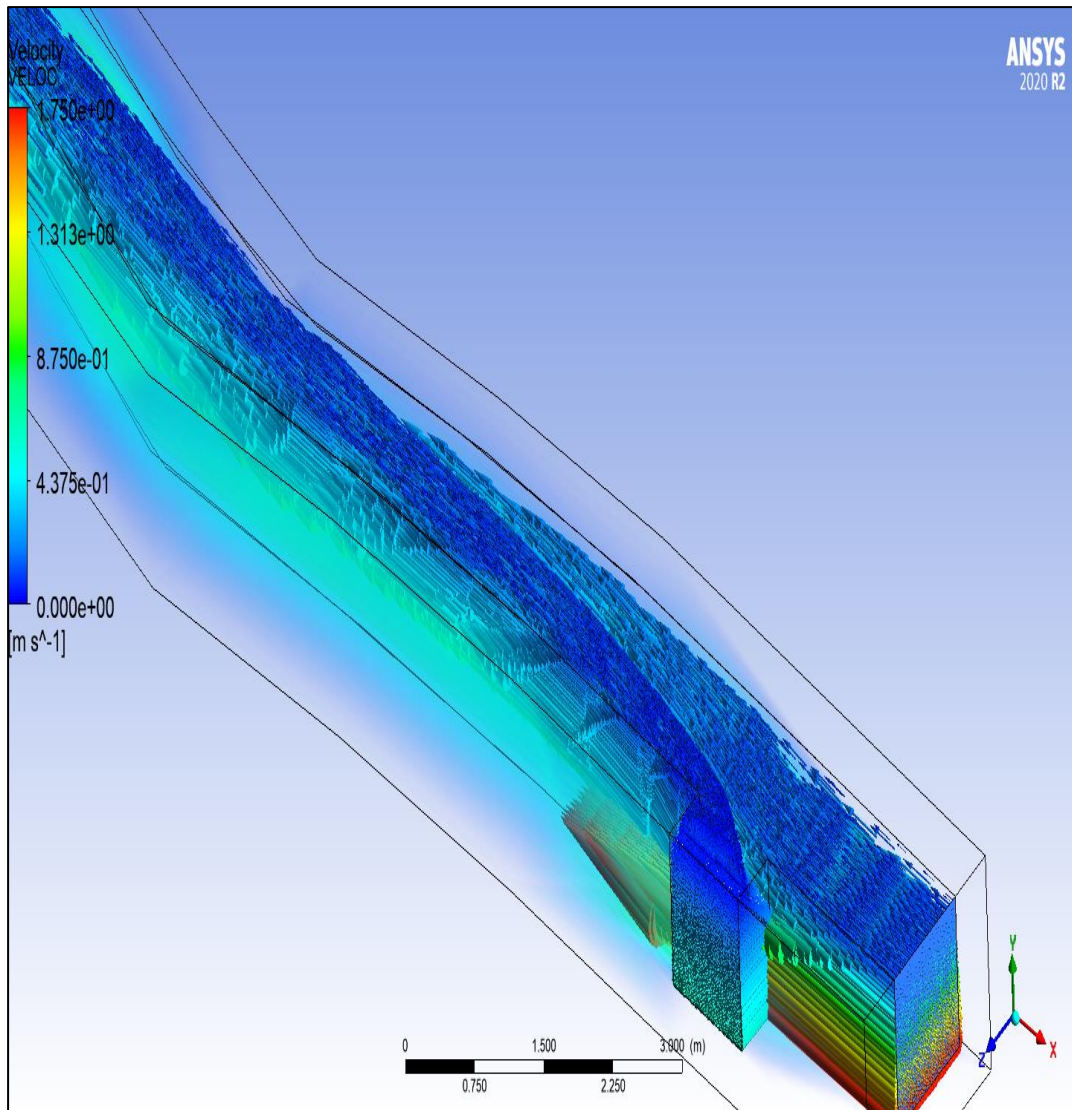


Figura 35 Gradiente de velocidades en la descarga del contaminante-ANSYS fluent-VOF

4.5. Sectores de mayor energía cinética de turbulencia responsable de la disipación caótica del contaminante simulado en CFD, en el río Yanamarca – Jauja 2021

El trabajo simulativo también determinó la zona del río que se caracteriza por la mayor turbulencia generada, esta variable simulada tiene la capacidad de analizar las variaciones de la energía cinética en un medio de flujo. Los valores vistos en la figura 36 son el resultado de la generación de vórtices que alteran el flujo regular del cauce del río. El gráfico también muestra la existencia de zonas de marcada energía cinética de turbulencia como los sectores 15 y 35 (alcanzan mínimos de $0.09138 \text{ m}^2/\text{s}^2$ y máximos de $0.147 \text{ m}^2/\text{s}^2$) y el sector 21 (alcanza valores que superan los $0.1818 \text{ m}^2/\text{s}^2$); estos valores son generados por posibles vórtices pequeños que tienen tendencia a la subdivisión continua, produciendo mini cascadas que coexisten entre sí y generan las variantes turbulentas verificadas en la intensidad de flujo del sector. Este suceso simulativo coincide con lo señalado por Ballesteros (2014) en su estudio de flujos turbulentos

en la mecánica de fluidos, quien trasciende el uso de software aplicado para la resolución adecuada de las ecuaciones de Navier-Stokes o DNS (Direct Numerical Simulation) y conseguir de forma precisa estudios prácticos del flujo turbulento en los sistemas de interés.

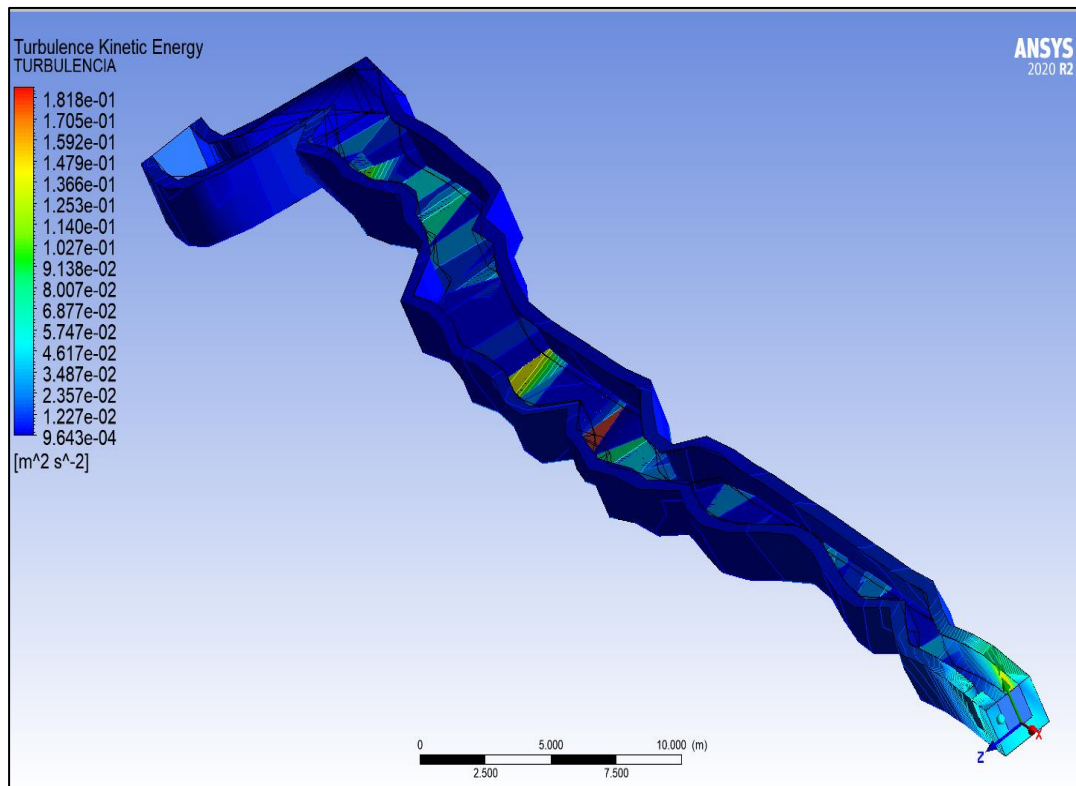


Figura 36 Sectores de turbulencia- energía cinética de turbulencia-ANSYS fluent-VOF

Se determino también las variaciones de viscosidad turbulenta del río Yanamarca, en la gráfica 37, en esta se identifican los sectores de transferencia turbulenta que generan afectaciones a la viscosidad del agua. Cabe recalcar que las zonas de mayores viscosidades de turbulencia se reportan en los sectores 1 y 35 (entrada a la laguna de tragadero-zona de descarga) teniendo aumentos graduales que llegan a máximos de 0.03091 Pa.s. Cabe recalcar que la viscosidad turbulenta es la responsable de la formación de corrientes arremolinadas, las cuales son las responsables de la circulación de basura y contaminantes en un sistema acuático; mantienen también gradientes de calor a diversas profundidades de la escorrentía (31). Este fenómeno es importante en nuestra simulación debido a que es el responsable del flujo del contaminante a través de la corriente principal, ese fenómeno físico de características caóticas, genera vórtices hasta cierto punto casi ordenados que afectan la dirección del movimiento y generan los resultados vistos en la gráfica 37.

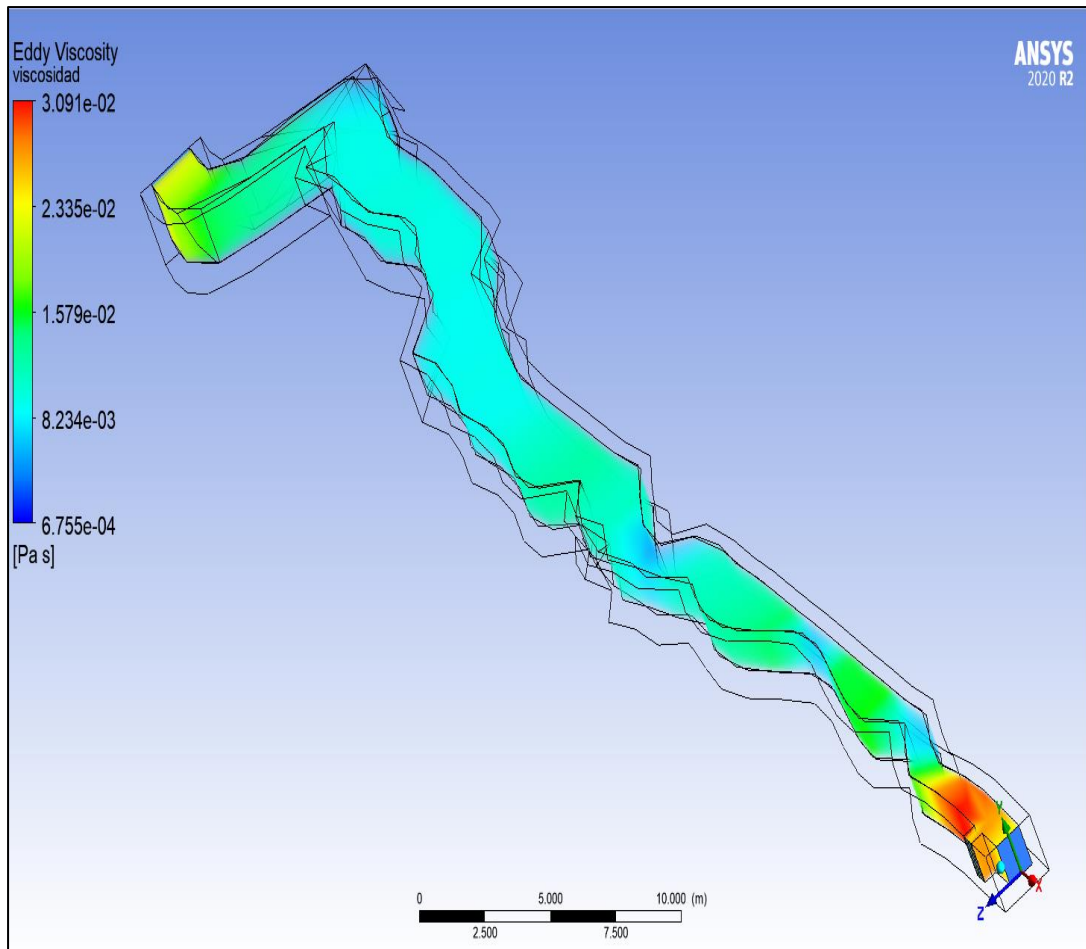


Figura 37 Viscosidad de turbulencia o de remolino-ANSYS fluent-VOF

4.6. Flujo másico advectivo espacial del contaminante simulado en CFD, en el río Yanamarca – Jauja 2021

Uno de los resultados relevantes de nuestra simulación es el correspondiente al flujo másico del contaminante en un determinado punto; el flujo másico advectivo simulado en el río Yanamarca nos indica el grado de arrastre o flujo másico a través en las secciones de nuestro modelo.

Los resultados generados por ANSYS fluent vistos en la figura 38, nos indican que hay mayor advección molecular en los lugares de mayor intensidad de color, llegando a valores máximos de $0.02391 \frac{kg}{s.m^2}$. También se observa que los sectores de color azul fuerte son aquellos que presentan el menor arrastre de nuestra sustancia contaminante (solución de detergente). De la gráfica 38 se aprecia claramente que los sectores del río con intensidad media alta de flujo másico del contaminante corresponde a los sectores 1,7,8,9,10,11, 21,22 y 23,31 y 35, para los cuales sus valores fluctúan entre un rango de 0.01196 y $0.01913 \frac{kg}{s.m^2}$; estos sectores están

propensos a concentrar altos niveles de fósforo que devienen de la concentración inicial del detergente (tripolifosfato) generando así posibles impactos indeseables de eutrofización (32).

Los flujos de masa del contaminante trabajado en nuestro río Yanamarca coinciden con lo afirmado por Salvador & Ana (2013), quienes afirman que los transporte advectivos concernientes a una sustancia contaminante en un río depende de la velocidad de la corriente general de flujo y observando nuestros valores dispersivos de velocidades (figura 34), estos se encuentran en sectores coincidentes a los de mayor flujo advectivo.

Nuestro flujo másico advectivo calculado (también conocido como densidad de flujo) demuestra la dependencia de la concentración del contaminante y la velocidad del fluido en el punto analizado, esto coincide con lo afirmado por Mohapatra, Mohanta, Patra, Khatua & Paai (2007) en su investigación de características de flujo en canales de un río serpenteante, respecto a que los flujos másicos dispersivos aumentan con el aumento de la profundidad de un sector de flujo.

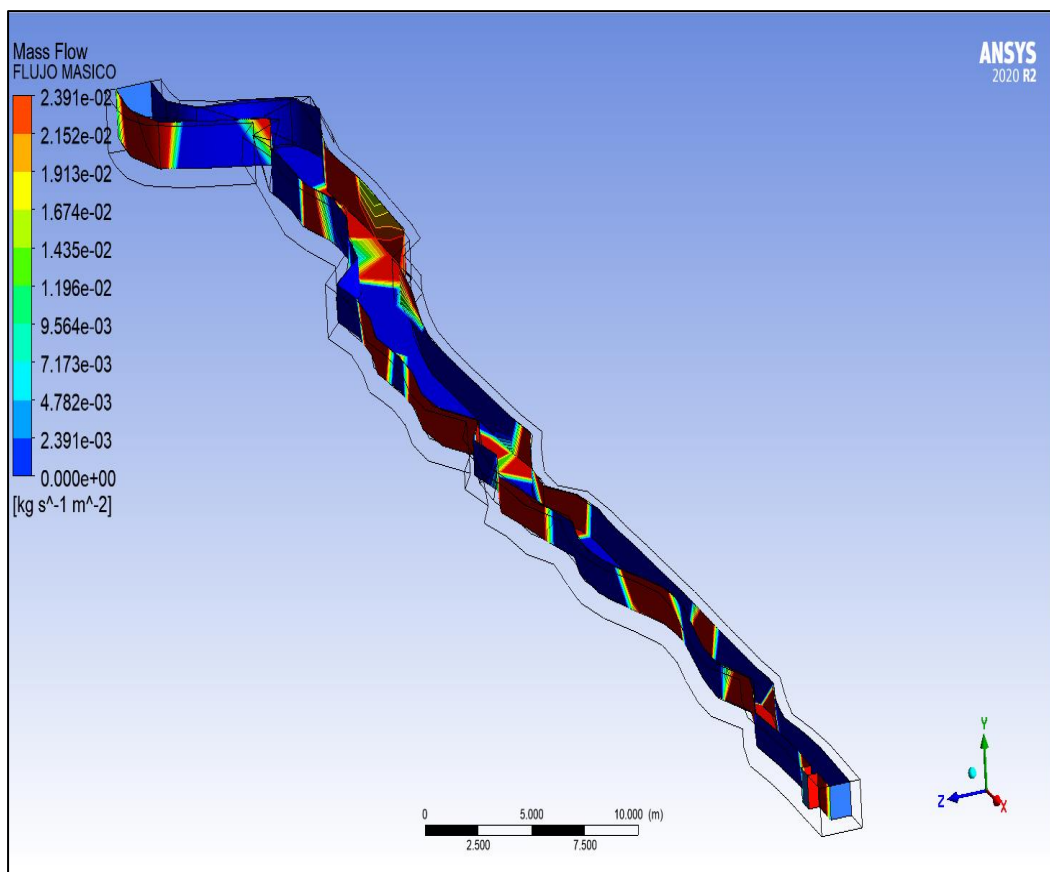


Figura 38 Flujo másico por sectores del río Yanamarca-ANSYS fluent-VOF

La fracción volumétrica de nuestro contaminante se puede apreciar en la figura 39, esta queda definida como la fracción entre el contaminante y el volumen total del agua en el sector al cabo

de un tiempo de 1000 iteraciones. En esta operación se aprecia que la fracción volumen del contaminante va cambiando gradualmente conforme el paso del tiempo, disminuyendo desde el punto de descarga hasta la salida del sector simulado (Outflow). Se aprecian que en las zonas de colores “vivos” se alcanzan valores de fracción volumétrica elevada de hasta 0.97. También se puede apreciar que existen zonas de actividad advectiva media, las cuales presentan rangos de fracción volumétrica comprendida entre 0.2042-0.7147 (sectores del 23 al 35), indicando implícitamente que el contaminante compromete seriamente 35 m aguas abajo; igualmente se verifican otros sectores donde esta fracción volumétrica permanece con valores relativamente altos de entre 0.2553-0.5105 (sectores 2,3,4,5,6,12,13) significando que también el contaminante vertido compromete sectores de hasta 86.5992 m aguas abajo por debajo de la descarga.

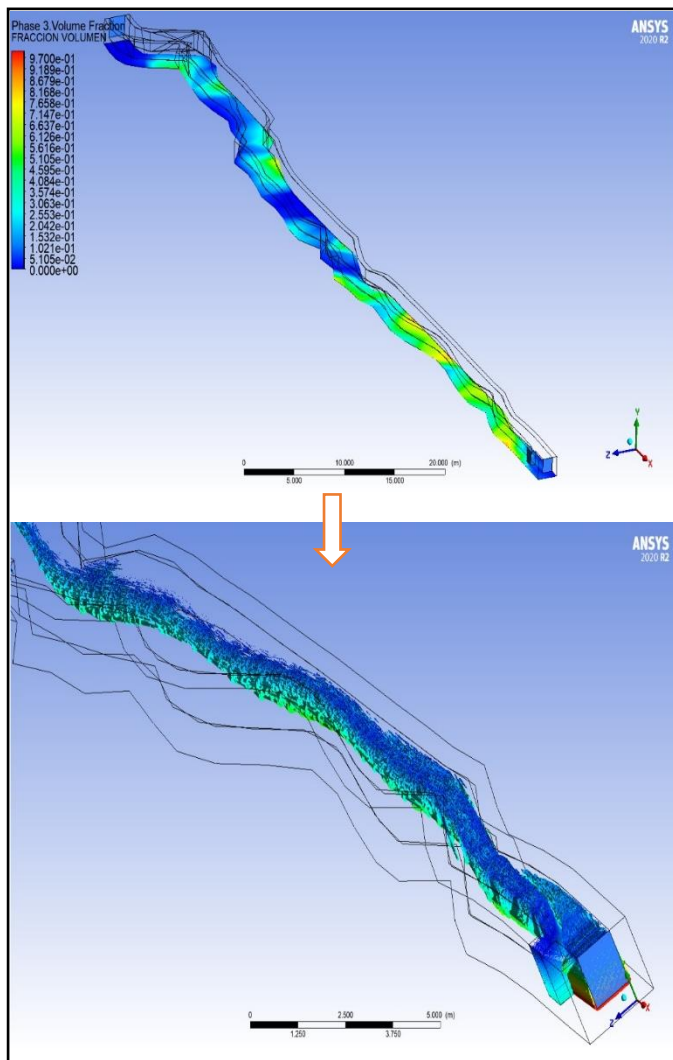


Figura 39 Fracción volumétrica simulada para el río Yanamarca-ANSYS fluent-VOF

4.7. Discusiones

En el proceso de análisis para la dispersión del contaminante en el río Yanamarca, los sectores con mayor tendencia de flujos máscicos advectivos medios son los sectores 1,7,8,9,10,11, 21,22 y 23,31 y 35 valores comprendidos entre 0.01196 y 0.01913 kg/s m², llegando incluso a máximos de 0.02391 kg/s m² cercanos a la descarga. Esta afirmación coincide con lo mencionado por Garzón (34) en su investigación de dispersión de contaminantes de un río mostro resultados de 0.07846277 kg/s m² de descarga, afirmando que las variables influyentes en la variación de la concentración contaminante son la profundidad, anchura y velocidad. Marusic (35) investiga problemas de calidad del agua y dispersión de contaminantes en Ucrania tras el desarrollo determino la dispersión inicial de contaminante de 0,06 kg/s m² en el punto de muestreo, después de 3 horas alcanzó el valor de 0,051 kg/s m² concluyendo que el flujo máscico de contaminantes es medible para la técnica CFD como en las valoraciones obtenidas es posible determinar el flujo máscico advectivo espacial de los contaminantes los autores Garzón (34) y Marusic (35) presenta resultados favorables que contrasta nuestra investigación.

La delimitación y desarrollo de la geometría del contaminante calculado verifica valores directamente proporcionales a los flujos máscicos advectivos del contaminante en el Río Yanamarca (0.2042 a 0.7147mg/l variantes entre los sectores del 23 al 35). Las fracciones volumétricas alcanzan valores superlativamente altos hasta 35 m aguas abajo. Estos resultados coinciden con lo investigado por Zarate (36) en mezclas diversas de aguas en ríos y mares, encontró que en 1500 m de estudio, llego a una concentración de arsénico en 0.017mg/ l concluyendo que son aptos para el consumo humano así las fracciones volumétricas varían con la conductividad, la variabilidad de la dilución y flujo máscico.

Del nivel de validez y sensibilidad del CFD respecto a los datos dispersivos de contaminantes él α de Cronbach tiene un valor de 0.805 demuestra la validez de la simulación en un rango Bueno- Alto. Granados (4) al realizar el modelamiento para validar la acción del CFD con respecto a la contaminación humana en ríos donde concluyo que el modelo es capaz de predecir el transporte de contaminantes. Giraldo (10) desarrolla una simulación del fluido hidrodinámico en CFD para determinar el nivel de contaminantes efluentes mineros donde concluyeron que existe una correlación entre contaminantes detectados y la sensibilidad de la concentración de estas. Tanto Granados como Giraldo concluyen con validez de nuestra investigación.

Los perfiles vectoriales de las velocidades correspondiente a la zona de descarga y la interacción con el flujo de la corriente principal en el Río Yanamarca tienen ascendencia gradual respecto a la proximidad de la zona de descarga (1.313 m/s) dependen de la cercanía a la misma variando de 0.4375 m/s y 1.75 m/s. Este fenómeno de variación de merma gradual

también fue verificada por Alves (38) en la modelación del Río Suquiapa Santa Ana en la que su velocidad de flujo obtuvo un valor de aproximadamente 120.602 m /s es directamente proporcional al ancho de sección y proximidad al vertimiento contaminante. Contrastando en lo propuesto con la investigación.

Las turbulencias simuladas generadas, identifican las variaciones de la energía cinética en el flujo del Río Yanamarca, los vórtices generadores se presentaron en sectores 15 y 35 donde los flujos turbulentos aumentan modificando la viscosidad de flujo encontrando rangos de 0.09138 m²/s² a 1.147 m²/s². También se verificó las viscosidades turbulentas llegando a máximos de 0.1818 m²/s² con viscosidades de hasta 0.03091 Pa.s. Rani (39) desarrolló la Modelación física y numérica del flujo en ríos, encontró resultados coincidentes a nuestra investigación respaldando la simulación del Río Yanamarca, afirma , que los flujos turbulentos desarrollan estructuras con cierto grado de coherencia dependientes de la velocidad de flujo, y que a su vez generan oscilaciones temporales de la velocidad en las paredes del río, generando disipación por viscosidad e incrementando la actividad difusiva en cantidades escalares que se caracterizan por viajar con un flujo contaminante descargado. Garcia (40) realizó la simulación mediante CFD para hallar el cambio de energía cinética de calor concluyendo que el modelo es variable según régimen turbulento. Rani (39) y . Garcia (40) aportan resultados como punto de contraste con nuestra investigación.

Los resultados de flujo masico advectivo espacial del contaminante indican que hay mayor advección molecular en los sectores 1,7,8,9,10,11, 21,22 y 23,31 y 35, llegando a valores máximos de $0.02391 \frac{kg}{s.m^2}$. Oviedo (41) menciona los valores lo cual fluctúan entre un rango de 0.01196 y $0.01913 \frac{kg}{s.m^2}$. También Salvador (33) afirman que los transportes advectivos concernientes a una sustancia contaminante en un río depende de la velocidad de la corriente general de flujo y observando nuestros valores dispersivos de velocidades, estos se encuentran en sectores coincidentes a los de mayor flujo advectivo. La investigación presenta valores muy altos difiriendo en las menciones.

CAPÍTULO V

CONCLUSIONES

- La modelización hidrodinámica capaz de describir la dispersión de contaminantes en el Río Yanamarca-Jauja usando CFD (Dinámica de fluidos computacional) en ANSYS- fluid, Flow (fluent), corresponde a los modelos conservativos de Navier-Stokes- Reynolds Promediado, ejecutados mediante configuración del volumen de fluido multifase (VOF) de ríos y canales y trabajados mediante las ecuaciones de la energía cinética de turbulencia (ECT).
- Las ecuaciones de masa y momento identificadas para su correspondiente uso y edición en ANSYS CFD- fluid Flow son: Ecuación de conservación de masa, ecuaciones conservativas de momento (x,y,z), ecuaciones de flujo turbulento (Spalart-Almaras, $k - \epsilon$, $k\omega$, transición $k - l - \omega$, transición SST, Reynolds Stress), ecuaciones de la energía cinética de turbulencia, ecuaciones de transporte turbulento, ecuaciones de energía. para varias fases en sus formas implícitas y explícitas.
- El nivel de validez y fiabilidad de la simulación CFD del río Yanamarca-Jauja 2021 por juicio de expertos, corresponde a un valor del estadístico α de crombach de 0.805, que identifica un grado bueno-alto de validez.
- El comportamiento de las gradientes vectoriales de velocidad de descarga contaminante tiene carácter variable intenso modular, esto acorde a la proximidad de la descarga con la corriente principal del río Yanamarca, el choque de fases genera turbulencia cinética en el entrada de la corriente (intensidades de color más afirmadas) traduciéndose en un aumento temporal de velocidades en el campo vectorial de la zona de descarga, estos valores están comprendidos entre 0.4375 m/s y 1.75 m/s, consiguiéndose valores medios de 0.6562 m/s con tendencia superlativa creciente en el sector 30 (1.313 m/s).
- Los sectores que presentaron mayor actividad de energía cinética de turbulencia responsable de la disipación caótica del contaminante son los sectores 15 y 35, estos alcanzan valores medios comprendidos entre 0.09138 m²/s² y 0.147 m²/s². Además, se lograron verificar valores de turbulencia máxima de 0.18.18 m²/s² (sector 21) que identifican la generación de pequeños vórtices generadores de variantes turbulentas con características disipativas, que coadyuban a la difusión irregular del contaminante aguas abajo de la descarga del río Yanamarca
- El flujo másico advectivo del contaminante trabajado en el río Yanamarca alcanza máximos de $0.02391 \frac{kg}{s.m^2}$, presentando valores altos en varios sectores, comprendidos en el rango de $0.01196 \frac{kg}{s.m^2}$ a $0.01913 \frac{kg}{s.m^2}$ (sectores 1,7,8,9,10,11,21,22,23,31 y 35), los que dependen del

sector analizado y su correspondiente fracción volumétrica. Se encontraron valores de fracción volumétrica elevada de hasta 0.97 en zonas donde el flujo másico encontraba su máximo valor del rango. También se pudo determinar zonas de actividad advectiva intermedia, las cuales presentan rangos de fracción volumétrica comprendida entre 0.2042-0.7147 (sectores del 23 al 35), indicando implícitamente que el área de impacto de la descarga contaminante compromete hasta 35 m aguas abajo.

RECOMENDACIONES

- Se recomienda trabajar en el modelizado del cauce del río referente a la variabilidad de las condiciones del entorno natural (estiaje, inundaciones, etc.), esto mediante representación y modelación numérica complementaria a las herramientas CFD utilizadas.
- Implementar extensiones y complementos avanzados para el modelado digital del terreno (MDT) respecto a la topografía y batimetría del Río Yanamarca, y que a pesar del costo elevado generarían representaciones más detalladas y contemplaría las variaciones infinitesimales del modelo MDT.
- Comparar el modelado CFD simulado y desarrollado en ANSYS fluent, con otros softwares de modelación como el HECRAS, IRIC V2, HEC-HMS, SWAT, MIKE 1 y softwares de recursos hídricos DHI para identificar el nivel de varianza y coincidencia.
- Desarrollar modelización convectiva en respuesta a las variaciones del calor y radicación del sistema e implementarlos para simulación en CFD

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. LUCICH, Ivan. *Expediente N° 005-2021-SUNASS-DAP*. Lima, 2021.
2. YU, Xiao, YE, Xi y ZHANG, Shunxian. Floating pollutant image target extraction algorithm based on immune extremum region. *Digital Signal Processing* [online]. abril 2022. Vol. 123, p. 103442. [Accessed 24 febrero 2022]. DOI 10.1016/J.DSP.2022.103442. Available from: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1051200422000598>
3. ROJAS, Isaac, CORONADO, Manuel, ROSSETTI, Segio y BELTRÁN, Félix. Contaminación por nitratos y fosfatos provenientes de la actividad agrícola en la cuenca baja del río Mayo en el estado de Sonora, México. *Revista terra latinoamericana*. 2020. DOI 10.28940/terra.v38i2.642.
4. SOARES DE OLIVEIRA, B, APARECIDO, J y CLARO, E. Dispersion of Pollutants in a River According to Its Geometry and Tributaries: A Case Study for River Paraiba do Sul—State of Sao Paulo, Brazil. *Environmental engineering science*. 2019.
5. DAMIÀ, L. y LÓPEZ, M.J. Contaminación y calidad química del agua: el problema de los contaminantes emergentes. *Panel científico técnico de seguimiento de la política del agua. Jornada de presentación de resultados*. 2008.
6. BAXEVANOU, C, FIDAROS, D, BARTZANAS, T y KITTAS, C. Yearly numerical evaluation of greenhouse cover materials. *Elsevier*. 2018.
7. SUAREZ, Efraín, ORREGO, Marly y REGAL, Fernando. Evaluación Ecológica Rápida del Humedal de Tragadero (Junín, Perú). *Científica* [online]. 2015. Vol. 12, no. 2, p. 132-144. Available from: <http://revistas.cientifica.edu.pe/index.php?journal=cientifica>
8. DIAS, M y CAMACHO, L. Metodología para la obtencion de un modelo predictivo de transportes de soluto y calidad de agua en rios - caso rio Bogota. In : . Colombia, 2011.
9. MENÉNDEZ, Angel N. Transporte de contaminantes en el Medio Acuático. *Universidad Tecnológica Nacional, Maestría en Ingeniería Ambiental*. 2010.
10. GIRALDO, Adriá. *Simulación mediante dinámica de fluidos computacional (cfd) de un intercambiador de flujo cruzado*. 2017.
11. GORMAZ, Raul. *Modelo Hidrodinamico de la marea roja en la bahia Quellon*.

Universidad de Chile, 2020.

12. CLAROS, Edith. Modelación de la dispersión de contaminantes del agua de la cuenca del Rio Huaura. . 2017.
13. GARZON, Santiago. *Modelacion en CDF de un tramo del rio Arzobispo (Bogotá D.C)* [online]. Pontificia Universidad Javeriana, 2014. Available from: <https://repository.javeriana.edu.co/bitstream/handle/10554/16782/GarzonSanchezSantiagoHumberto2015.pdf?sequence=3>
14. MARUSIC, Galina, CIUFUDEAN, Calin y MARUSIC, Diana. Use of Finite Element Method (FEM) to determine spatio-temporal evolution of pollutants in river-type systems. . 2016. Vol. 1, no. January, p. 102-108.
15. RANI, Mohapatra. *Analisis de flujo de un sionosco canal*. National Institute Oftechnology, 2015.
16. BAO, J, ZHOU, T, HUANG, M, HOU, Z, PERKINS, W, HARDING, S, TITLER, S, HAMMOND, G, REN, H, THORNE, P, SUFFIELD, S y MURRAY, C. Modulating factors of hydrologic exchanges in a large-scale river reach: Insights from three-dimensional computational fluid dynamics simulations. . 2018.
17. TORRES, Frankiln. validacion de un modelo hidrodinamico y calidad del agua del rio de Magdalena, en el tramo adyacente a Barraquilla, Colombia. *Scielo*. 2015. Vol. 25.
18. SUÁREZ, Zarate. *Modelamiento y simulacion ambiental para evaluar la contaminacion por Arsenico del rio Tambo - Arequipa*. UNSA Investiga, 2014.
19. SAAVEDRA, Facuse y ANTONIO, Jose. *Análisis mediante simulación fluidodinámica computacional del flujo de relaves de minería en desgaste de cajones disipadores*. Universidad de Chile, 2013.
20. ESPEJO, O y ZABALETA, Y. *Modelamiento numérico para mejorar la eficiencia de funcionamiento de las pozas disipadoras en ríos de alta pendiente: Caso de estudio Bocatoma San Pedro - Ayacucho*. UPC, 2022.
21. HUEI, L. *Finite Element Simulation with ANSYS Workbench 18*. 2018.
22. MATSSON, Jhon. *An Introduction to ANSYS Fluent 2021*. 2021.
23. WAGNER, W. *Using IBM® SPSS® Statistics for Research Methods and Social Science*

- Statistics*. 2018.
24. RIOS, N. Curso de Uso del Modelo SWAT como una Herramienta para el Manejo de Cuencas. . 2018.
 25. HENRÍQUEZ, S. *Caracterización numérica de la acumulación de partículas sólidas en flujo turbulento a través de tuberías curvas mediante números de stokes*. PUCV, 2020.
 26. EDUARDO, Normand, SANÉN, Asuad, CRISTINA, Mtra y RUIZ, Vazquez. Marco lógico de la investigación científica. *UNAM*. 2015.
 27. ANSYS. *Guía Teórica de ANSYS FLUENT*. 2021.
 28. TOAPANTA, Luis, ZAPATA, Jorge, CHOLANGO, Andrea, QUITIAQUEZ, William, NIETO, César y ZAPATA, Zulamita. Estudio numérico y comparativo del efecto de turbulencia en codos y dobleces para distribución de agua sanitaria. *Revista Facultad de Ingeniería*. 2019. Vol. 28, no. 53, p. 101-118. DOI 10.19053/01211129.v28.n53.2019.10156.
 29. MARDENSEN, M y TROMBA, J. *Campos Vectoriales*. 2012.
 30. BALLESTEROS. *Turbulencia*. ballesteros. 2014.
 31. RODRIGUEZ, Javier. Trabajo Fin de Máster Máster en Ingeniería Aeronáutica Socavación en lechos de ríos y fondos marinos. . 2019.
 32. FALCONI, Eulalia, YAYA, Domingo, VELÁSQUEZ, Mario, AZÁLDEGUI, Antonieta y BENAVIDES, Oscar. Riesgos del uso de detergentes domésticos en la calidad del agua en poblaciones en transición de lo rural a lo urbano: Churín 2017. *Alternativa Financiera*. 2018. Vol. 9, no. 1, p. 1-19.
 33. ESPINOZA ET.AL. Caracterización hidrodinámica y dispersión de contaminantes de la parte alta del río Suquiapa, Santa Ana. *Universidad de El Salvador*. 2013.
 34. GARZÓN, S. Modelación en cfd de un tramo del río arzobispo. *REPOSITORI JAVERIANA*. 2014.
 35. MARUSIC, D, CIUFUDEAN, C y MARUSIC, G. Use of Finite Element Method (FEM) to Determine Spatio-Temporal Evolution of Pollutants in River-Type Systems. *Laras PUB*. 2016.

36. ZARATE. Modelamiento y simulación ambiental para evaluar la contaminación por arsénico del Río Tambo – Arequipa. *UNSA INVESTIGA*. 2014.
37. GRANADOS, Hugo. *Análisis del Cambio Climático y su Impacto en el Cultivo de Papa Nativa a través de WorldClim/ArcGIS en la Comunidad de Paru Paru – Cusco 2020* [online]. Universidad Cesar Vallejo, 2020. Available from: http://repositorio.ucv.edu.pe/bitstream/handle/20.500.12692/47102/Gutierrez_RS-SD.pdf?sequence=1&isAllowed=y
38. ALVEZ, F. Dinámica de fluidos computacionales (cfd) y su uso para analizar la distribución de gases al interior de instalaciones pecuarias: una revisión literaria. *Actualidad & Divulgación Científica*. 2016.
39. RANI, M. Analisis de flujo de un sionosco canal. *NATIONAL INSTITUTE OF TECHNOLOGY*. 2015.
40. GARCIA, Marcelo. *Hidronimica ambiental . Buenos Aires*. Universidad Nacional del Litoral, 1996.
41. OVIEDO, I. Turbulencia. ballesteros. *Universidad de Oviedo*. 2014.

ANEXOS

ANEXO 01: MATRÍZ DE CONSISTENCIA

TÍTULO: MODELIZACIÓN HIDRODINÁMICA DE DISPERSIÓN DE CONTAMINANTES EN EL RIO YANAMARCA-JAUJA, UTILIZANDO CFD PARA SIMULACIÓN NUMÉRICA COMPUTACIONAL

| Problema | Objetivo | Metodología | Población y Muestra |
|---|---|--|---|
| <p>Problema general.</p> <p>¿Cuál será la modelización hidrodinámica capaz de describir la dispersión de contaminantes utilizando simulación numérica computacional de fluidos CFD en el río Yanamarca – Jauja 2021?</p> <p>Problemas específicos.</p> <ul style="list-style-type: none"> ➤ ¿Cómo delimitar y desarrollar la geometría para desarrollar la modelización hidrodinámica capaz de describir la dispersión de contaminantes utilizando simulación numérica computacional de fluidos CFD en el río Yanamarca – Jauja 2021? ➤ ¿Qué ecuaciones específicas de masa y momento serán consideradas en CFD para su correspondiente edición e implementación en la simulación del río Yanamarca – Jauja 2021? ➤ ¿Cuál será el nivel de validez y fiabilidad de la simulación en CFD del río Yanamarca – Jauja 2021? ➤ ¿Cuál será el comportamiento del vector gradiente de velocidades de descarga contaminante y su interacción con la | <p>Objetivo general.</p> <p>Determinar la modelización hidrodinámica capaz de describir la dispersión de contaminantes utilizando simulación numérica computacional de fluidos CFD en el río Yanamarca – Jauja 2021</p> <p>Objetivos específicos.</p> <ul style="list-style-type: none"> ➤ Delimitar y desarrollar la geometría para la modelización hidrodinámica capaz de describir la dispersión de contaminantes utilizando simulación numérica computacional de fluidos CFD en el río Yanamarca – Jauja 2021 ➤ Identificar que ecuaciones específicas de masa y momento serán consideradas en CFD para su correspondiente edición e implementación en la simulación del río Yanamarca – Jauja 2021 ➤ Determinar el nivel de validez y fiabilidad de la simulación en CFD del río Yanamarca – Jauja 2021 ➤ Determinar el comportamiento del vector gradiente de velocidades de descarga contaminante y su interacción con la corriente principal simulada en CFD, en el río Yanamarca- Jauja 2021 | <p>método general:</p> <p>Nuestra investigación desarrollada recurrirá al método científico como método general de nuestra investigación, ya que nos permitirá el análisis científico mediante procedimientos estandarizados la observación detallada y sistemática de nuestra simulación CFD (Hernández Sampieri y Mendoza Torres, 2018).</p> <p>método específico</p> <p>Método de Investigación Bibliográfica</p> <p>Este método nos permitió hacer uso de técnicas y estrategias para poder compilar, resumir, analizar y localizar todos nuestros marcos bibliográficos teorizados que dan soporte a nuestra investigación (Matos Ayala, 2020).</p> <p>Método Inductivo-deductivo</p> <p>Este método nos permitió intervenir deliberadamente en nuestra simulación para producir los datos que nos interesan mediante herramientas lógicas y observativas de nuestra simulación del río Yanamarca. Nos permitió desarrollar un análisis general de resultados que devienen del análisis</p> | <p>Población:</p> <p>Comprende todo el comportamiento hídrico dispersivo de contaminantes en las aguas del río Yanamarca-Jauja.</p> <p>Muestra:</p> <p>Corresponde al análisis del comportamiento dispersivo de contaminantes para 2 tramos del río Yanamarca-Jauja.</p> <div style="text-align: center;"> <pre> graph TD M --> O1 M --> O2 O1 --> R[Validación R] O2 --> R </pre> </div> <p>Donde:</p> <ul style="list-style-type: none"> ➤ M = sistema modelado y simulado ➤ O1 = Observación Y Análisis Post Simulación ➤ O2 = Observación de expertos ➤ R = Correlación de validación |

| | | | |
|---|---|---|--|
| <p>corriente principal simulada en CFD, en el río Yanamarca- Jauja 2021?</p> <p>➤ ¿Cuáles serán los sectores de mayor energía cinética de turbulencia responsable de la disipación caótica del contaminante simulado en CFD, en el río Yanamarca – Jauja 2021?</p> <p>➤ ¿Cuál será el flujo másico advectivo espacial del contaminante simulado en CFD, en el río Yanamarca – Jauja 2021?</p> | <p>➤ Determinar los sectores de mayor energía cinética de turbulencia responsable de la disipación caótica del contaminante simulado en CFD, en el río Yanamarca – Jauja 2021</p> <p>➤ Determinar el flujo másico advectivo espacial del contaminante simulado en CFD, en el río Yanamarca – Jauja 2021</p> | <p>numérico computacional, para así construir nuestras inferencias y conclusiones (Eduardo et al., 2015).</p> <p>alcance:</p> <p>Tipo de investigación: Nuestra investigación es del tipo aplicada con enfoque cuantitativo y un alcance descriptivo</p> <p>Nivel de investigación: El nivel es descriptivo exploratorio por que se describe la situación del rio Yanamarca y se realiza una propuesta de acuerdo a un modelamiento virtual.</p> <p>Diseño de investigación: Es no experimental de corte transversal como se muestra en la figura 04.</p> | |
|---|---|---|--|

ANEXO 02. OPERACIONALIZACIÓN DE VARIABLES

| Tipo de variable | Definición | Dimensiones | Indicadores | Unidad de medida |
|-------------------------------------|---|--|---|--|
| Variable Independiente | | | | |
| Modelamiento Hidrodinámico CFD | Corresponde al proceso de modelizado hidrodinámico numérico, con fines de revisión, inspección, adecuación, modificación y edición para su correspondiente utilización en la dinámica de fluidos computacional CFD. | <ul style="list-style-type: none"> • Modelos de Navier y Stokes • Modelo de Reynolds promediado RANS • Modelos de Energía y turbulencia | <ul style="list-style-type: none"> • Velocidad de Entrada • Velocidad de la descarga • Viscosidad de entrada • Viscosidad de la descarga • Presión de entrada • Gravedad • Simetría • Mallado del modelo • Intensidad de Turbulencia | <p>m/s</p> <p>m/s</p> <p>kg/m-s</p> <p>kg/m-s</p> <p>atm</p> <p>m/s²</p> <p>Adimensional</p> <p>Adimensional</p> <p>%</p> |
| Variable Dependiente | | | | |
| Dispersión simulada de contaminante | Definida como el análisis simulado del arrastre o estudio del transporte de un contaminante en un flujo de agua. | <ul style="list-style-type: none"> • Flujo advectivo contaminante simulado | <ul style="list-style-type: none"> • Velocidad de flujo del contaminante • Energía cinética turbulenta • Viscosidad Turbulenta • Fracción volumétrica del contaminante | <p>m/s</p> <p>m²/s²</p> |

| | | | | |
|--|--|--|---|--|
| | | | <ul style="list-style-type: none">• Flujo másico advectivo del contaminante | Pa.s Adimensional $\frac{kg}{S.m^2}$ |
|--|--|--|---|--|

Anexo 03: Reportes ANSYS



Date

2021/10/12 23:19:58

Contents

- [1. File Report](#)
- [Table 1](#) File Information for FFF
- [2. Mesh Report](#)
- [Table 2](#) Mesh Information for FFF
- [3. Physics Report](#)
- [Table 3](#) Domain Physics for FFF
- [Table 4](#) Boundary Physics for FFF
- [4. User Data](#)

1. File Report

Table 1. File Information for FFF

| | |
|---------------------|---|
| Case | FFF |
| File Path | C:\Users\Usuario\AppData\Local\Temp\WB_DESKTOP-4II2NUT_Usuario_5040_2\unsaved_project_files\dp0\FFF\Fluent\FFF-3-00200.dat.gz |
| File Date | 12 October 2021 |
| File Time | 10:40:11 PM |
| File Type | FLUENT |
| File Version | 20.2.0 |

1. File Report

Table 1. File Information for FFF

| | |
|---------------------|---|
| Case | FFF |
| File Path | C:\Users\Usuario\AppData\Local\Temp\WB_DESKTOP-4II2NUT_Usuario_5040_2\unsaved_project_files\dp0\FFF\Fluent\FFF-3-00200.dat.gz |
| File Date | 12 October 2021 |
| File Time | 10:40:11 PM |
| File Type | FLUENT |
| File Version | 20.2.0 |

2. Mesh Report

Table 2. Mesh Information for FFF

| Domain | Nodes | Elements |
|--|-------|----------|
| modelo_final_canal fluido contaminante_ _copia_agua | 200 | 55 |
| modelo_final_canal fluido contaminante_ _copia_canal | 476 | 1130 |
| All Domains | 676 | 1185 |

Table 3. Mesh Statistics for FFF

| Domain | Minimum Face Angle | Maximum Face Angle | Maximum Edge Length Ratio | Maximum Element Volume Ratio | Connectivity Range |
|--|--------------------|--------------------|---------------------------|------------------------------|--------------------|
| modelo_final_canal fluido contaminante_ _copia_agua | 7.26504 [degree] | 165.065 [degree] | 5.832 | 7.17025 | 1 7 |
| modelo_final_canal fluido contaminante_ _copia_canal | 3.24444 [degree] | 166.184 [degree] | 15.6539 | 289.308 | 1 30 |
| All Domains | 3.24444 [degree] | 166.184 [degree] | 15.6539 | 289.308 | 1 30 |

3. Physics Report

Table 3. Domain Physics for FFF

| | |
|--|------|
| Domain - modelo_final_canal fluido contaminante_ _copia_agua | |
| Type | cell |
| Domain - modelo_final_canal fluido contaminante_ _copia_canal | |
| Type | cell |

Table 4. Boundary Physics for FFF

| Domain | Boundaries | |
|--|---|----------------|
| modelo_final_canal fluido contaminante_ _copia_agua | Boundary - contact_region src | |
| | Type | INTERFACE |
| | Boundary - entrada_r_y | |
| | Type | VELOCITY-INLET |
| | Boundary - flujo_contaminante | |
| | Type | VELOCITY-INLET |
| modelo_final_canal fluido contaminante_ _copia_canal | Boundary - r_o_y | |
| | Type | WALL |
| | Boundary - salida_r_y | |
| | Type | OUTFLOW |
| | Boundary - contact_region trg | |
| | Type | INTERFACE |
| modelo_final_canal fluido contaminante_ _copia_canal | Boundary - paredes_r_y contact_region trg | |
| | Type | INTERFACE |
| | Boundary - wall modelo_final_canal fluido contaminante_ _copia_canal | |
| Type | WALL | |

Anexo 04- Valores del seccionamiento del río Yanamarca

| SECTORES | LONGITUDINAL | | TRANSVERSAL | | PROMEDIO PROFUNDIDAD |
|-----------|--------------|------|-------------|------|----------------------|
| | MD | MI | T1 | T2 | |
| Sector 1 | 3.96 | 4.29 | 1.73 | 2.15 | 1.60 |
| Sector 2 | 4.38 | 4.14 | 2.15 | 3.18 | 1.60 |
| Sector 3 | 2.28 | 2.26 | 3.18 | 2.18 | 1.59 |
| Sector 4 | 1.77 | 1.38 | 2.18 | 3.21 | 1.59 |
| Sector 5 | 1.15 | 1.20 | 3.21 | 3.10 | 1.50 |
| Sector 6 | 2.17 | 2.64 | 3.10 | 2.10 | 1.53 |
| Sector 7 | 2.89 | 2.94 | 2.10 | 2.54 | 1.46 |
| Sector 8 | 3.21 | 3.17 | 2.54 | 1.97 | 1.34 |
| Sector 9 | 2.83 | 2.61 | 1.97 | 1.91 | 1.30 |
| Sector 10 | 1.80 | 1.91 | 1.91 | 2.68 | 1.30 |
| Sector 11 | 2.20 | 2.27 | 2.68 | 2.24 | 1.26 |
| Sector 12 | 1.47 | 1.73 | 2.24 | 2.11 | 1.20 |
| Sector 13 | 2.10 | 1.68 | 2.11 | 3.33 | 1.20 |
| Sector 14 | 3.18 | 3.58 | 3.33 | 2.24 | 1.24 |
| Sector 15 | 3.50 | 3.54 | 2.24 | 2.42 | 1.24 |
| Sector 16 | 1.76 | 1.92 | 2.42 | 2.13 | 1.24 |
| Sector 17 | 1.00 | 1.10 | 2.13 | 1.98 | 1.22 |
| Sector 18 | 3.58 | 3.64 | 1.98 | 2.29 | 1.20 |
| Sector 19 | 4.39 | 4.33 | 2.29 | 2.42 | 1.20 |
| Sector 20 | 2.10 | 2.51 | 2.42 | 1.44 | 1.20 |
| Sector 21 | 3.60 | 2.89 | 1.44 | 2.74 | 1.23 |
| Sector 22 | 1.76 | 1.24 | 2.74 | 1.82 | 1.27 |
| Sector 23 | 1.54 | 1.93 | 1.82 | 1.94 | 1.27 |
| Sector 24 | 3.25 | 3.19 | 1.94 | 1.70 | 1.27 |
| Sector 25 | 1.66 | 1.68 | 1.70 | 2.43 | 1.20 |

| | | | | | |
|-----------|------|------|------|------|------|
| Sector 26 | 2.61 | 2.67 | 2.43 | 1.70 | 1.17 |
| Sector 27 | 2.57 | 2.48 | 1.70 | 2.10 | 1.17 |
| Sector 28 | 6.26 | 6.31 | 2.10 | 1.65 | 1.17 |
| Sector 29 | 2.52 | 2.50 | 1.65 | 1.26 | 1.15 |
| Sector 30 | 6.20 | 6.43 | 1.26 | 1.44 | 1.18 |
| Sector 31 | 2.10 | 2.00 | 1.44 | 1.71 | 1.18 |
| Sector 32 | 2.87 | 2.83 | 1.71 | 1.65 | 1.16 |
| Sector 33 | 2.10 | 2.00 | 1.65 | 1.41 | 1.16 |
| Sector 34 | 2.40 | 2.64 | 1.41 | 1.36 | 1.15 |
| Sector 35 | 3.93 | 3.95 | 1.36 | 1.47 | 1.15 |
| Sector 36 | 3.84 | 3.96 | 1.47 | 1.40 | 1.15 |

Anexo 05- Valoración de confiabilidad-

| Intervalo al que pertenece el coeficiente alfa de Cronbach | Valoración de la fiabilidad de los ítems analizados |
|---|--|
| [0 ; 0,5[| Inaceptable |
| [0,5 ; 0,6[| Pobre |
| [0,6 ; 0,7[| Débil |
| [0,7 ; 0,8[| Aceptable |
| [0,8 ; 0,9[| Bueno |
| [0,9 ; 1] | Excelente |

Anexo 06- Estadísticas de Validación por alfa de Cronbach - SPSS

| | Media de escala si el elemento se ha suprimid o | Varianza de escala si el elemento se ha suprimido | Correlación total de elementos corregida | Correlación múltiple al cuadrado | Alfa de Cronbach si el elemento se ha suprimido |
|--|---|--|---|--|---|
| 1. Presición del modelo 3D del canal | 615.0000 | 1966.667 | .981 | . | .758 |
| 2. Características del Mallado | 611.2500 | 1922.917 | .538 | . | .780 |
| 3. Modelización | 617.5000 | 1341,667 | .926 | . | ,706 |
| 4. Características de materiales y condiciones de fronteraa | 607.5000 | 2375.000 | .018 | . | .824 |
| 5. Administración de soluciones | 610,0000 | 1483,333 | .937 | . | .709 |
| 6. Presentación Simulada | 617,5000 | 1875.000 | .902 | . | .749 |
| 7. Intencionalidad | 613.7500 | 2122.917 | .199 | . | .828 |
| 8. Metodología y propósito | 612.5000 | 1825.000 | .484 | . | .791 |
| 9. Pertinencia | 605.0000 | 2616.667 | -.847 | . | .846 |

| Estadísticas De Elemento De Resumen | | | |
|---|---------|---------------------|---|
| | Media | Desv. Desviación | N |
| 1. Presición del modelo 3D del canal | 73.7500 | 4.78714 | 4 |
| 2. Características del Mallado | 77.5000 | 8.66025 | 4 |
| 3. Modelización | 71.2500 | 13.14978 | 4 |
| 4. Características de materiales y condiciones de fronteraa | 81.2500 | 4.78714 | 4 |
| 5. Administración de soluciones | 78.7500 | 11.08678 | 4 |
| 6. Presentación Simulada | 71.2500 | 6,29153 | 4 |
| 7. Intencionalidad | 75.0000 | 10.00000 | 4 |
| 8. Metodología y propósito | 76.2500 | 11.08678 | 4 |
| 9. Pertinencia | 83.7500 | 2.50000 | 4 |

| Estadísticas De Elemento De Resumen | | | | | | | |
|--|--------|--------|---------|---------|--------------------|----------|-------------------|
| | Media | Mínimo | Máximo | Rango | Máximo / Mínimo | Varianza | N de elementos |
| Medias de elemento | 76.528 | 71.250 | 83.750 | 12.500 | 1.175 | 18.273 | 9 |
| Varianzas de elemento | 76.157 | 6.250 | 172.917 | 166.667 | 27.667 | 3274.860 | 9 |

Estadísticas De Fiabilidad

| Alfa de Cronbach | Alfa de Cronbach basada en elementos estandarizados | N de elementos |
|------------------|---|----------------|
| .805 | 0.7 | 9 |

Anexo 07- Formularios de validación por expertos

VALIDACIÓN DEL INSTRUMENTO DE SIMULACIÓN CFD-ANSYS-RIO YANAMARCA JAUJA-2021

I. DATOS GENERALES DEL EVALUADOR

APellidos y nombres del experto:

Socua Laya Pérez Daniel Angel

INSTITUCIÓN DONDE LABORA:

Municipalidad Distrital de Mito

II. GENERALIDADES DE LA SIMULACIÓN

2.1. NOMBRE DEL INSTRUMENTO DE SIMULACIÓN:

MODELAMIENTO HIDRODINÁMICO DE DISPERSIÓN DE CONTAMINANTES UTILIZANDO LA DINÁMICA COMPUTACIONAL DE FLUIDOS EN EL RIO YANAMARCA, JAUJA 2021

2.2. SOFTWARE UTILIZADO:

ANSYS WORKBENCH-ANSYS-FLUENT-ANSYS SPACE CLEAN-DESIGN MODELER

2.3. OBJETIVO GENERAL DE LA SIMULACIÓN:

Determinar la modelización hidrodinámica capaz de describir la dispersión de contaminantes utilizando simulación numérica computacional de fluidos CFD en el río Yanamarca – Jauja 2021.

2.4. CARACTERÍSTICAS DE TRAMO:

| Sección | Coordenada | Velocidad media (m/s) | Área transversal (m ²) | Caudal (m ³ /s) |
|---------------------|--------------------------------|-----------------------|------------------------------------|----------------------------|
| Entrada del río | 11°45'38.21"S 75°32'33.20"O | 1.75 | 1.1716 | 2.0608 |
| Sección de salida | 11°45'41.47"S 75°32'32.80"O | 0.83 | 2.8388 | 2.35620 |
| Sección de descarga | 11°45'38.40"S 75°32'33.15"O | 0.58 | 1.1627 | 0.6744 |

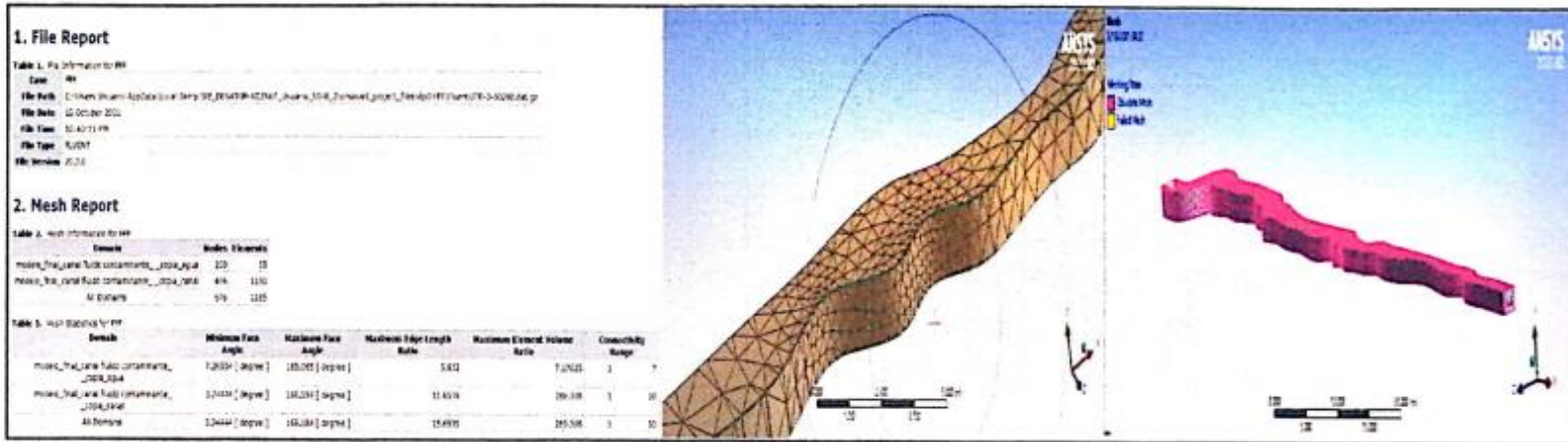
2.5. MODELOS UTILIZADOS PARA LA SIMULACIÓN CFD:

Modelos conservativos de NAVIER-STOKES- REYNOLDS PROMEDIADO, ejecutados mediante configuración del volumen de fluido multifase (VOF) de ríos y canales y trabajados mediante las ecuaciones de la energía cinética de turbulencia (ECT).


Ing. Daniel Angel Socua Laya Pérez
INGENIERO CIVIL
C.O. N° 147513

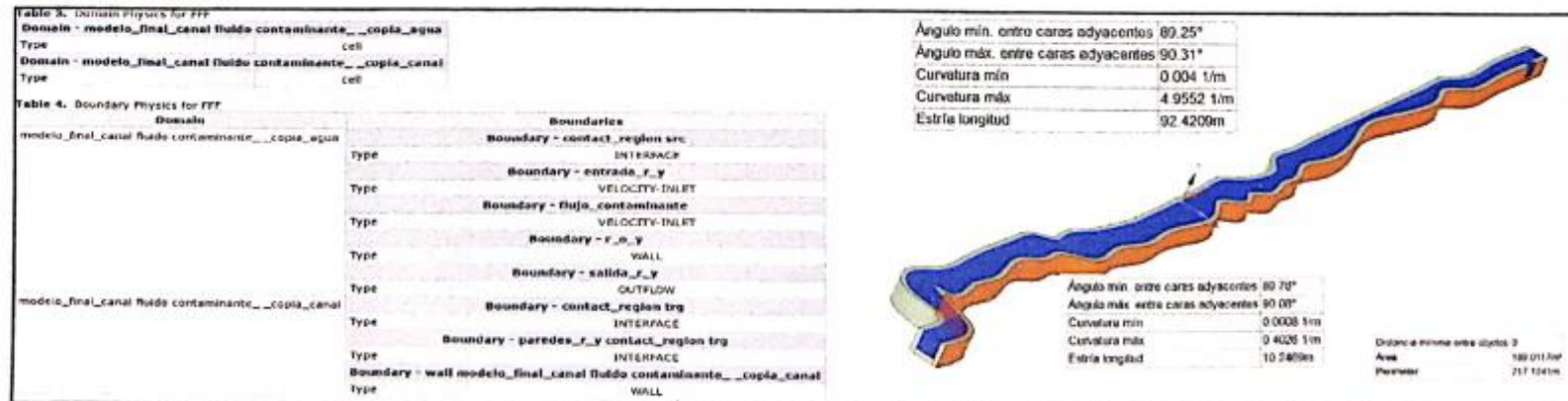
1

2.6. CARACTERÍSTICAS DE MALLADO -MODELO PARA SIMULACIÓN



2.7. REPORTE FÍSICO ANSYS

3. Physics Report



| VALIDEZ DE LA SIMULACIÓN | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|--|---|------------|----|----|----|------|----|----|----|---------|----|----|----|-------|----|----|----|-----------|----|----|-----|
| ITEMS DE VALIDEZ | CUMPLE CON: | DEFICIENTE | | | | BAJA | | | | REGULAR | | | | BUENA | | | | MUY BUENA | | | |
| | | 5 | 10 | 15 | 20 | 25 | 30 | 35 | 40 | 45 | 50 | 55 | 60 | 65 | 70 | 75 | 80 | 85 | 90 | 95 | 100 |
| 1. Precisión del modelo 3D- del canal | Este diseñado acorde a la realidad. | | | | | | | | | | | | | | X | | | | | | |
| 2. Características del malla | Cumple con densidad, distribución de nodos y curvatura. | | | | | | | | | | | | | | | X | | | | | |
| 3. Modelos modelizados | Modeliza y aplica los siguientes modelos: Modelos de Navier-Stokes, Reynolds Stress, Ecuación de conservación de masa, ecuaciones conservativas de momento (x,y,z), ecuaciones de flujo turbulento (Spalart-Almaras, k-ε, kω, transición k-l-ε, transición SST, Reynolds Stress), ecuaciones de la energía cinética de turbulencia, ecuaciones de transporte turbulento, ecuaciones de energía para varias fases en sus formas implícitas y explícitas. | | | | | | | | | | | X | | | | | | | | | |
| 4. Características de materiales y condiciones de frontera | Define materiales y condiciones de frontera: Condiciones de entrada, condiciones de salida, condiciones de descarga, fases de simulación, condiciones de pared y flujo. | | | | | | | | | | | | | | | | | X | | | |
| 5. Administración de soluciones | Genera: Velocidades de flujo, Campos vectoriales de flujo, flujos máximos advectivos, fracciones volumétricas, energía cinética de turbulencia. | | | | | | | | | | | | | | | X | | | | | |
| 6. Presentación simulada | Genera reporte, gráficas 3D, análisis de Stream line, Vector, plano, superficie respuesta y Videos3D. | | | | | | | | | | | | | | X | | | | | | |
| 5. Intencionalidad | Es adecuado para valorar inferencias sobre la realidad hidrodinámica dispersiva. | | | | | | | | | | | X | | | | | | | | | |
| 7. Metodología y propósito | El proceso de simulación responde al propósito de la investigación. | | | | | | | | | | | | | | | | X | | | | |
| 8. Pertinencia | La simulación es aplicable al entorno. | | | | | | | | | | | | | | | | | X | | | |

Fecha: 04/11/2021

Firma y sellos del Evaluador :



Daniel Angel Socualaya Pérez
 Ing. Daniel Angel Socualaya Pérez.
 INGENIERO CIVIL
 CIP. N° 147513

VALIDACIÓN DEL INSTRUMENTO DE SIMULACIÓN CFD-ANSYS-RIO YANAMARCA JAUJA-2021

I. DATOS GENERALES DEL EVALUADOR

APellidos y nombres del experto:

..... QUISEP SANABRIA LUIS ALBERTO

INSTITUCIÓN DONDE LABORA:

..... MUNICIPALIDAD DISTRITAL DE MITO

II. GENERALIDADES DE LA SIMULACIÓN

2.1. NOMBRE DEL INSTRUMENTO DE SIMULACIÓN:

MODELAMIENTO HIDRODINÁMICO DE DISPERSIÓN DE CONTAMINANTES UTILIZANDO LA DINÁMICA COMPUTACIONAL DE FLUIDOS EN EL RIO YANAMARCA, JAUJA 2021

2.2. SOFTWARE UTILIZADO:

ANSYS WORKBENCH-ANSYS-FLUENT-ANSYS SPACE CLEAN-DESIGN MODELER

2.3. OBJETIVO GENERAL DE LA SIMULACIÓN:

Determinar la modelización hidrodinámica capaz de describir la dispersión de contaminantes utilizando simulación numérica computacional de fluidos CFD en el río Yanamarca – Jauja 2021.

2.4. CARACTERÍSTICAS DE TRAMO:

| Sección | Coordenada | Velocidad media (m/s) | Área transversal (m ²) | Caudal (m ³ /s) |
|---------------------|--------------------------------|-----------------------|------------------------------------|----------------------------|
| Entrada del río | 11°45'38.21"S 75°32'33.20"O | 1.75 | 1.1716 | 2.0608 |
| Sección de salida | 11°45'41.47"S 75°32'32.80"O | 0.83 | 2.8388 | 2.35620 |
| Sección de descarga | 11°45'38.40"S 75°32'33.15"O | 0.58 | 1.1627 | 0.6744 |

2.5. MODELOS UTILIZADOS PARA LA SIMULACIÓN CFD:

Modelos conservativos de NAVIER-STOKES- REYNOLDS PROMEDIADO, ejecutados mediante configuración del volumen de fluido multifase (VOF) de ríos y canales y trabajados mediante las ecuaciones de la energía cinética de turbulencia (ECT).



| VALIDEZ DE LA SIMULACIÓN | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|--|--|------------|----|----|----|------|----|----|----|---------|----|----|----|-------|----|----|----|-----------|----|----|-----|
| ITEMS DE VALIDEZ | CUMPLE CON: | DEFICIENTE | | | | BAJA | | | | REGULAR | | | | BUENA | | | | MUY BUENA | | | |
| | | 5 | 10 | 15 | 20 | 25 | 30 | 35 | 40 | 45 | 50 | 55 | 60 | 65 | 70 | 75 | 80 | 85 | 90 | 95 | 100 |
| 1. Precisión del modelo 3D- del canal | Este diseñado acorde a la realidad. | | | | | | | | | | | | | | X | | | | | | |
| 2. Características del mallado | Cumple con densidad, distribución de nodos y curvatura. | | | | | | | | | | | | | | | X | | | | | |
| 3. Modelos modelizados | Modeliza y aplica los siguientes modelos: Modelos de Navier-Stokes, Reynolds Stress, Ecuación de conservación de masa, ecuaciones conservativas de momento (x,y,z), ecuaciones de flujo turbulento (Spalart-Allmaras, k-ε, kω, transición k-l-ω, transición SST, Reynolds Stress), ecuaciones de la energía cinética de turbulencia, ecuaciones de transporte turbulento, ecuaciones de energía para varias fases en sus formas implícitas y explícitas. | | | | | | | | | | | X | | | | | | | | | |
| 4. Características de materiales y condiciones de frontera | Define materiales y condiciones de frontera: Condiciones de entrada, condiciones de salida, condiciones de descarga, fases de simulación, condiciones de pared y flujo. | | | | | | | | | | | | | | | | X | | | | |
| 5. Administración de soluciones | Genera: Velocidades de flujo, Campos vectoriales de flujo, flujos máscicos advectivos, fracciones volumétricas, energía cinética de turbulencia. | | | | | | | | | | | | | X | | | | | | | |
| 6. Presentación simulada | Genera reporte, gráficas 3D, análisis de Stream line, Vector, plano, superficie respuesta y Vídeos3D. | | | | | | | | | | | | | X | | | | | | | |
| 5. Intencionalidad | Es adecuado para valorar inferencias sobre la realidad hidrodinámica dispersiva. | | | | | | | | | | | | | | | | X | | | | |
| 7. Metodología y propósito | El proceso de simulación responde al propósito de la investigación. | | | | | | | | | | | | X | | | | | | | | |
| 8. Pertinencia | La simulación es aplicable al entorno. | | | | | | | | | | | | | | | | | X | | | |

Fecha: 04/11/2021

Firma y sellos del Evaluador :

MUNICIPALIDAD DE TOTA DE NITO

 Ing. Luis Quispe Sanabria
 DIRECTOR DE PLANIFICACION Y MONITOREO
 TOTA, 2022