



UNIVERSIDAD RICARDO PALMA

**FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA CIVIL**

Efecto de las variables hidráulicas en un floculador placas perforadas
TESIS

Para optar el título profesional de Ingeniero(a) Civil

AUTORES

Alvarez Callupe, Xiomí Nicole
ORCID: 0000-0002-2132-4237

Díaz Urrutia, Gabriel
ORCID: 0000-0002-4885-9549

ASESOR

López Silva, Maiquel
ORCID: 0000-0002-0946-6160

Lima, Perú

2022

Metadatos Complementarios

Datos del autor(es)

Alvarez Callupe, Xiomi Nicole

DNI: 77137988

Diaz Urrutia, Gabriel

DNI: 72041757

Datos de asesor

López Silva, Maiquel

DNI: 002946058

Datos del jurado

JURADO 1

Carmenates Hernandez, Dayma Sadami

DNI: 002944620

ORCID: 0000-0001-5482-7562

JURADO 2

Gárate Cáceres, Francisco Héctor

DNI: 07640930

ORCID: 0000-0003-0413-3399

JURADO 3

Pereyra Salardi, Enriqueta

DNI: 06743824

ORCID: 0000-0003-2527-3665

Datos de la investigación

Campo del conocimiento OCDE: 02.01.01

Código del Programa: 732016

DEDICATORIA

Primeramente, a Dios que bendice mi camino, por haberme fortalecido y otorgado una familia maravillosa, quienes han creído en mí siempre, dándome ejemplo de superación, humildad y sacrificio. En especial dedico a mi madre Mercedes Callupe Salas y mi hermana Shirley por su apoyo incondicional, sus consejos, motivación y paciencia, todo lo que hoy soy es gracias a ellas; a ustedes dedico este logro, por fomentar en mí el deseo de superación, liderazgo, perseverancia y triunfo en la vida. También dedico a los ingenieros, profesores y buenos amigos que me apoyaron en mi camino universitario y profesional.

Alvarez Callupe, Xiomi Nicole

Dedico esta tesis a mis familiares cercanos que siempre creyeron en mí y me brindaron su apoyo a lo largo de mi vida universitaria. En especial agradecimientos a mi abuelo Víctor Díaz y mi padre Víctor Hugo Díaz que siempre tuvieron la confianza en que me convertiría en un ingeniero. También dedico esta tesis a mi mamá Mónica, a mis hermanos Javier, Víctor, Micaela y Bianca que me ayudaron en seguir adelante en este camino universitario. Muchas gracias

Díaz Urrutia, Gabriel

AGRADECIMIENTO

Agradecemos a Dios por su bendición en la vida, guiarnos y ser nuestra fortaleza en todo momento.

Gracias a nuestros padres por ser los principales pilares a base de valores y principios inculcados para lograr nuestras metas y objetivos, también confiar en nosotros y apoyarnos incondicionalmente a lo largo de nuestra vida.

A nuestros queridos y estimados profesores/ingenieros Jacinto Calderón, Arturo Aliaga, William Sánchez, Maiquel López y grandes amigos por su tiempo brindado y gran apoyo para el desarrollo y culminación de la presente tesis.

Xiomi Alvarez y Gabriel Diaz

ÍNDICE GENERAL

RESUMEN	i
ABSTRACT	ii
INTRODUCCIÓN	iii
CAPÍTULO I: PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	1
1.1. Descripción de la realidad problemática.....	1
1.2. Objetivos de la investigación.....	3
1.2.1 Objetivo general.....	3
1.2.2 Objetivos específicos	3
1.3. Delimitación de la investigación.....	3
1.3.1. Temporal.....	3
1.3.2. Espacial.....	3
1.3.3. Temática	4
1.4. Justificación e importancia.....	4
1.4.1. Justificación teórica	4
1.4.2. Justificación Práctica	5
1.4.3. Justificación social.....	5
1.4.4. Justificación Ambiental	5
1.4.5. Importancia del estudio.....	6
CAPÍTULO II: MARCO TEÓRICO	7
2.1. Antecedentes del estudio de investigación.....	7
2.1.1. Antecedentes internacionales.....	7
2.1.2. Antecedentes Nacionales	11
2.2. Bases teóricas.....	12
2.2.1. Planta de tratamiento de agua potable	12
2.2.2. Importancia de la planta de tratamiento.....	12
2.2.3. Componente de la planta de tratamiento	13
2.2.4. Proceso del tratamiento de agua:	14
2.2.5. Coagulación	15
2.2.6. Mecanismos de desestabilización química	18
2.2.7. Mecanismos de coagulación	18
2.2.8. Dosificación y coagulantes	20
2.2.9. Factores que afectan el proceso de coagulación	21
2.2.10. Control del proceso de coagulación en laboratorio	22

2.2.11. Teoría del proceso de floculación:.....	23
2.2.12. Mecanismos de procesos de mezcla	24
2.2.13. Tipos de floculadores.....	25
2.2.14 Modelo matemático de la floculación.....	29
2.2.15. Procesos posteriores de tratamiento.....	43
2.2.16. Factores que afectan la desinfección	46
2.2.17. Cloración.....	47
2.2.18. Fundamentos de la mecánica de Fluidos	47
2.2.19. Principio de la conservación de la Energía:.....	49
2.2.20. Pérdida de Carga:.....	50
2.2.21. Aplicación de la mecánica de fluidos a inyector Venturi:.....	53
2.2.22. Aplicación de la mecánica a la Botella de Mariotte:	55
2.2.23. Mecánica de fluidos en orificios:.....	57
2.2.24. Coeficiente de descarga	59
2.2.25. Placa orificio:.....	59
2.2.26. Coeficiente en sistemas de placa orificio.....	61
2.3. Definición de términos básicos.....	64
CAPÍTULO III: SISTEMA DE HIPÓTESIS	67
3.1. Hipótesis.....	67
3.1.1. Hipótesis general	67
3.1.2. Hipótesis específica.....	67
3.2. Variables.....	67
3.2.1. Variable independiente.....	67
3.2.2. Variable dependiente.....	67
3.3. Operacionalización de variables.....	67
CAPÍTULO IV: METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN.....	69
4.1 Tipo y nivel.....	69
4.1.1. Tipo de investigación.....	69
4.1.2. Nivel	69
4.2 Diseño de investigación.....	69
4.2.1. Etapa 1: Determinación del coeficiente de descarga en orificios	70
4.2.2. Etapa 2: Determinación del efecto de la gradiente de velocidad y tiempo de retención sobre la remoción de turbiedad usando floculador de placas perforadas. 70	

4.2.3. Etapa 3: Determinación de las relaciones geométricas sobre la remoción de turbiedad usando un floculador de placas perforadas.....	71
4.2.4. Etapa 4: Caracterización de la calidad del agua utilizando el tipo de floculador de placas perforadas.	72
4.3. Población y muestra.....	72
4.3.1. Población.....	72
4.3.2. Muestra.....	73
4.4. Técnicas e instrumentación de recolección de datos.....	73
4.4.1. Tipos de técnicas e instrumentos.....	73
4.4.2. Criterios de validez y confiabilidad de los instrumentos	75
4.4.3. Procedimientos para la recolección de datos.....	76
4.5. Técnicas para el procesamiento y análisis de la información.....	84
4.5.1. Técnica para el procesamiento de información.....	84
4.5.2. Análisis de resultados.....	85
CAPÍTULO V: PRESENTACIÓN Y ANÁLISIS DE RESULTADOS DE LA INVESTIGACIÓN.....	92
5.1. Caracterización del floculador placa escala piloto.....	92
5.2. Resultados.....	110
5.2.1. Determinación Coeficiente de descarga del orificio	110
5.3. Prueba de hipótesis.....	133
5.3.1. Análisis de varianza	135
5.3.2. Modelación de la eficiencia de remoción de turbiedad.....	139
5.3.3. Relación de diámetro equivalente de orificios/diámetro de placas y longitud/diámetro de placas.....	142
5.3.4. Caracterización de la calidad de agua:	145
5.3.5. Prueba de hipótesis.....	149
5.4. Análisis de resultados.....	149
5.4.1. Coeficiente de descarga del orificio	149
5.4.2. Efecto gradiente velocidad y tiempo de retención sobre la eficiencia	149
5.4.3. Relación de diámetro equivalente de orificios/diámetro de placas y longitud/diámetro de placas.....	152
5.5. Contratación de hipótesis.....	154
5.5.1. Hipótesis Principal	154
5.5.2. Hipótesis Secundaria	154

CONCLUSIONES	156
RECOMENDACIONES	157
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	158
ANEXOS	161
Anexo 1: Cronograma de actividades	161
Anexo 2: Presupuesto	162
Anexo 3: Operacionalización de las variables.....	166
Anexo 4: Matriz de consistencia.....	167
Anexo 5: Esquema isométrico del piloto	168

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: Ubicación del laboratorio de hidráulica en la Facultad de Ingeniería Civil de la Universidad Ricardo Palma	4
Figura 2: Floculador placa orificio a escala real	9
Figura 3 Diagrama del flujo de agua a través del floculador	9
Figura 4: Unidad experimental a escala piloto	10
Figura 5: Diagrama de flujo del agua en una planta convencional de tratamiento de agua	14
Figura 6 Coagulante en forma seca.....	15
Figura 7: Distribución de tamaño de partículas en el agua.....	16
Figura 8: Esquematización de la teoría de la doble capa eléctrica.	17
Figura 9: Mecanismo de coagulación, Neutralización de la carga; Barrido; y Puente... ..	20
Figura 10: Equipo de prueba de jarras convencional.....	23
Figura 11: Floculador hidráulico en forma serpentín	23
Figura 12: Esquematización de floculador mecánico de paletas	24
Figura 13: Floculadores de contacto de sólidos.....	25
Figura 14: Floculador pantalla de flujo horizontal	27
Figura 15: Floculador helicoidal.....	27
Figura 16: Floculador medio poroso.....	28
Figura 17: Paleta	28
Figura 18: Turbina	29
Figura 19: Relación entre G, T y m según la ecuación de Argaman y Kaufman	35
Figura 20: Correlación entre la constante de floculación y la turbiedad del agua cruda del río Iguazú	38
Figura 21: Turbiedad residual versus tiempos de floculación para diversos valores de G (20).....	39
Figura 22: Turbiedad residual versus valor óptimo de G para diversos tiempos de floculación.	39
Figura 23: Valor óptimo de G versus periodo de floculación.....	40
Figura 24: Correlación de gradientes de velocidad óptimos versus tiempo de floculación	41
Figura 25: Esquematización del crecimiento de flóculos a través de la coagulación, floculación y sedimentación.	44
Figura 26: Sedimentador hidráulico horizontal de forma rectangular.....	44

Figura 27: Batería de filtros.....	45
Figura 28: Continuidad de masa en Tee.....	49
Figura 29: Ecuación de Bernoulli con pérdidas aplicado a una línea de corriente.....	50
Figura 30: Regímenes de flujo según Reynolds.....	51
Figura 31: Sección del inyector Venturi, geometría y dirección del flujo.....	53
Figura 32: Esquema de Botella Mariotte.....	55
Figura 33: Orificio sumergido en un tanque.....	57
Figura 34: Orificio sumergido en un tanque y líneas de corriente en proximidad del orificio.....	58
Figura 35: Representación esquemática del flujómetro placa orificio.....	60
Figura 36: Tipos de orificios.....	60
Figura 37: Fluido que pasa a través de un orificio hidráulico de bordes afilados.....	60
Figura 38: Variación del Cd con respecto al Reynolds y d/D.....	62
Figura 39: Variación de la pérdida de carga con el Reynolds.....	63
Figura 40: Variación del coeficiente de descarga con la raíz cuadrática del número de Reynolds.....	63
Figura 41: Variación del coeficiente de descarga con el número de Reynolds para fluido viscoso.....	64
Figura 42: Metodología para la determinación del coeficiente de descarga.....	70
Figura 43: Metodología para la determinación del efecto e interacción de la gradiente de velocidad y tiempo de retención.....	71
Figura 44: Metodología para la determinación del efecto e interacción de las relaciones geométricas.....	72
Figura 45: Instrumentos empleados para la recolección de datos.....	75
Figura 46: Aforo por método volumétrico.....	78
Figura 47: Lectura de manómetros.....	78
Figura 48: Elementos de Placa de disco base de 3 mm con distintos tamaños de orificios.....	79
Figura 49: Floculador placa orificio. Tubo floculador (Izq.) y sistema placa orificio (Der.).....	79
Figura 50: Arcilla caolinita (Sup. Izq.), Tanque de agua superficial sintética (Sup. Der), Coagulante en presentación granular (Inf. Izq.) y Coagulante tamizado (Inf. Der).....	80
Figura 51: Colocación de la muestra en turbidímetro para toma de lectura de turbiedad.....	81

Figura 52: Prueba de jarras: Inoculación de coagulante (Izq.) y Flocculación (Der.).....	81
Figura 53: Relaciones geométricas del flocculador placa orificio. d: Diámetro de orificio, D: Diámetro de tubo flocculador, y L: Distancia entre placas.	82
Figura 54: Frascos para almacenamiento de muestras (Sup. Izq), frascos con muestras de agua (Sup. Der), Potenciómetro o Ph metro (Inf. Izq), Medición de turbiedad (Inf. Der)	83
Figura 55: Tanque de reserva de agua sintética (Izq); Bomba sumergible. (Der.).....	92
Figura 56: Primer Módulo ubicado 2do nivel del laboratorio de hidráulica	94
Figura 57: Detalle de la botella Mariotte (Sup.) Inyector Venturi con embudo receptor (Inf.)	95
Figura 58: Flocculador piloto trabajando en el 1er y 2do nivel del laboratorio de hidráulica	98
Figura 59: Módulo de flocculadores en el 1er nivel del laboratorio de hidráulica.....	99
Figura 60: Parte posterior del módulo del 1er nivel del laboratorio de hidráulica	100
Figura 61: Detalle de flocculador de placas perforadas.	101
Figura 62: Inserción de la armadura de placa orificio en el interior del tubo flocculador (Izq.) Vista superior. (Der)	102
Figura 63: Estadístico descriptivo del coeficiente de descarga Fuente: Elaboración propia por Minitab 19	132
Figura 64: Coeficiente de descarga vs Número de Reynolds	132
Figura 65: Resultado de prueba de jarras.....	134
Figura 66: Diagrama de Pareto de efectos estandarizados	136
Figura 67: Gráfica del análisis de residuos para validación de ANOVA	137
Figura 68: Gráfica de efectos principales	137
Figura 69: Gráfica de interacción	138
Figura 70: Gráfica de contorno	138
Figura 71: Diagrama de Pareto de efectos estandarizados	140
Figura 72: Diagrama de Pareto de efectos estandarizados aprobados	140
Figura 73: Gráfica de residuos.....	141
Figura 74: Representación cuadrática y lineal	142
Figura 75: Diagrama de Pareto	144
Figura 76: Gráfica de residuos para eficiencia	144
Figura 77: Calidad de agua en términos de turbiedad	145
Figura 78: Variación del pH	146

Figura 79: Estadístico descriptivo de turbiedad afluente.....	146
Figura 80: Estadístico descriptivo de turbiedad efluente.....	147
Figura 81: Estadístico descriptivo de pH inicial.....	147
Figura 82: Estadístico descriptivo de eficiencia de Remoción de turbiedad.....	148
Figura 83: Estadístico descriptivo de Variación Ph.....	148

ÍNDICE DE TABLA

Tabla 1: Mecanismos de coagulación	18
Tabla 2: Valores de las constantes de aglomeración y ruptura.....	35
Tabla 3: Constantes de floculación Coagulante: Sulfato de aluminio	37
Tabla 4: Agente desinfectante y características	46
Tabla 5: Coeficiente de pérdida de carga menor.	53
Tabla 6: Coeficiente de descarga en orificios sumergidos. (King, 1990).....	59
Tabla 7: Métodos para recolección de datos durante la experimentación.	76
Tabla 8: Arreglo factorial de las variables hidráulicas	88
Tabla 9: Arreglo factorial de las relaciones geométricas.....	90
Tabla 10: Componentes del Primer módulo de equipos	93
Tabla 11: Componentes del Segundo módulo de equipos	96
Tabla 12: Corrida experimentales (1-36) para determinación coeficiente K para la pérdida de carga localizada por accesorio	110
Tabla 13: Determinación de coeficiente de descargas de orificios para placa orificios. Corridas experimentales (1-36)	112
Tabla 14: Valor de Z y P.....	133
Tabla 15: Resultado de prueba de jarras	133
Tabla 16: Determinación de eficiencia de la remoción de turbiedad con respecto a los factores gradiente velocidad y tiempo de retención. Corridas experimentales (37-72)	134
Tabla 17: Análisis de Varianza	136
Tabla 18 : Ajuste y predicción del modelo	136
Tabla 19: Análisis de varianza.....	139
Tabla 20: Resultado del análisis de optimización.....	141
Tabla 21: Determinación de eficiencia de la remoción de turbiedad con respecto a los factores d/D y d/L. Corridas experimentales (73-88), Gv:24s ⁻¹ y Tr:24 min	142
Tabla 22: Análisis de varianza.....	143
Tabla 23: Caracterización del agua (Corrida 89-100)	145
Tabla 24: Prueba de hipótesis para eficiencia de remoción de turbiedad.....	149

RESUMEN

En la presente investigación, se llevó a cabo un estudio experimental de un floculador de placas perforadas para evaluar el efecto de los principales parámetros hidráulicos en la eficiencia del proceso de mezcla que son la gradiente velocidad y tiempo de retención, además se incluyó las relaciones geométricas y el estudio de coeficiente de descarga para esta tecnología. Para ello se empleó un floculador de placas perforadas a escala piloto, agua sintética que simulaba la calidad de una fuente de agua superficial con turbiedad 25 NTU y sulfato de aluminio como coagulante y la investigación acabó dentro las instalaciones del laboratorio de hidráulica de la facultad de Ingeniería Civil de la Universidad Ricardo Palma, Lima – Perú.

Se llevó a cabo un planeamiento experimental del tipo factorial completo para determinar los factores más significativos. El experimento se llevó en 4 etapas; en la etapa 1 se halló el coeficiente de descarga para un sistema de placa orificio; en la etapa 2 se experimentó con valores de gradiente velocidad dentro del rango de 18 s^{-1} a 36 s^{-1} , y tiempo de retención 12 min a 24 min para determinar los efectos significativos y elaborar un modelo que permita relacionar las variables respuestas con las variables hidráulicas. En la etapa 3 se evaluó las relaciones geométricas bajo condiciones óptimas de la gradiente velocidad y tiempo de retención a fin de determinar si influyen en la eficiencia de remoción de turbiedad. En la etapa 4 se evaluó que la eficiencia de remoción de turbiedad era mayor a 70% en numerosas corridas experimentales, por lo cual se concluyó que es sistema es una tecnología altamente eficiente si se opera en condiciones adecuadas, además se puede considerar como una opción a un floculador hidráulico convencional o mecánico, dentro de un esquema de tratamiento de agua.

Palabras claves: Coeficiente de descarga , Proceso de mezcla, Tiempo de retención, Gradiente velocidad, eficiencia de remoción de turbiedad.

ABSTRACT

In the present investigation, an experimental study of a perforated plate flocculator was carried out to evaluate the effect of the main hydraulic parameters on the efficiency of the mixing process, which are the gradient velocity and the retention time, as well as the geometric relations and the study of the discharge coefficient for this technology. For this, a pilot scale perforated plate flocculator was used, synthetic water that simulates the quality of a surface water source with turbidity 25 NTU and aluminum sulfate as a coagulant and the investigation ended within the facilities of the hydraulics laboratory of the faculty of Civil Engineering of the Ricardo Palma University, Lima - Peru.

An experimental planning of the complete factorial type was carried out to determine the most significant factors. The experiment was carried out in 4 stages; in stage 1 the discharge coefficient for an orifice plate system was found; In stage 2, experiments were carried out with velocity gradient values within the range of 18 s^{-1} to 36 s^{-1} , and retention time from 12 min to 24 min to determine the significant effects and develop a model that allows correlating the response variables with hydraulic variables. In stage 3, the geometric relationships under optimal conditions of the velocity gradient and the retention time were evaluated in order to determine if it influences the efficiency of turbidity removal. In stage 4, it was evaluated that the efficiency of turbidity removal was greater than 70% in numerous experimental runs, for which it was concluded that it is a system that is a highly efficient technology if it is operated under adequate conditions, and it can also be considered as an option to a conventional or mechanical hydraulic flocculator, within a water treatment scheme.

Keywords: Discharge coefficient, Mixing process, Retention time, Velocity gradient, Turbidity removal efficiency.

INTRODUCCIÓN

Los floculadores son unidades de mezcla que promueven la formación de flóculos en el tratamiento de agua para consumo humano. El concepto de floculación consiste en inducir el contacto o aglomeración entre los flóculos hasta que estos alcancen un tamaño que garanticen su separación por efecto de la gravedad en los tanques sedimentadores.

En la década de los 80's, en Brasil se concibió los floculadores de placa perforadas como alternativa a los floculadores convencionales, que tiene como principal característica ser construidos sencillamente en módulos prefabricados y su funcionamiento de estos floculadores consiste en transportar el agua coagulada a través de orificios, de este modo se induce la mezcla por turbulencia.

Es por ello que el propósito de la presente tesis es evaluar el efecto de los principales parámetros hidráulicos en la eficiencia de proceso de mezcla o remoción de materia sólida mediante un estudio experimental a escala piloto llevado a cabo en el laboratorio de hidráulica de la facultad de Ingeniería Civil de la Universidad Ricardo Palma, Lima – Perú, ejecutándose corridas experimentales, cálculos matemáticos en Excel y análisis estadísticos mediante el software Minitab 2019, proponiendo así una alternativa de mejora económica, eficaz, uso de abastecimiento a zonas rurales y entre otros factores. La presente investigación, consta de cinco capítulos de los cuales se detallarán a continuación:

En el capítulo I, mencionamos el planteamiento y la delimitación del problema, los objetivos de la tesis, se describe la delimitación de la investigación, su justificación e importancia.

En el capítulo II, mencionamos el marco teórico, antecedentes de las investigaciones nacionales e internacionales, las bases teóricas vinculadas a las variables y la definición de los términos básicos. En el capítulo III, mencionamos el sistema de hipótesis, tanto general como específica y el sistema de variables. En el capítulo IV, mencionamos la metodología de estudio, el diseño de la investigación, la población y muestra. En el capítulo V, comprende la presentación y análisis de resultados de la investigación. Finalmente, se presenta la discusión, las conclusiones, recomendaciones, las referencias bibliográficas y los anexos.

CAPÍTULO I: PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

1.1. Descripción de la realidad problemática

El agua es el recurso esencial renovable más importante, ya que de este recurso depende la existencia de la vida en nuestro planeta. El ser humano no puede consumirla directamente ya que en las fuentes de agua naturales el agua tiene presencia de contaminantes microbiológicos y fisicoquímicos. Para convertirla en apta para el consumo humano, se emplean procesos de tratamiento que remueven la carga contaminante, hasta valores que cumplan con la normatividad de calidad de agua potable. Generalmente, el tratamiento de agua potable comprende los siguientes procesos: coagulación, floculación, sedimentación, filtración y desinfección; pero dependiendo de la calidad del afluente se pueden considerar otros procesos, particularmente se puede incluir sistema de separación de algas, ósmosis inversa, entre otros. (Jouravlev et al, 2021).

En el Perú, la producción y distribución de agua potable se realiza a través de las empresas prestadoras de servicios (EPS) para el ámbito urbano, y las Juntas Administradoras de Servicios de Saneamiento (JASS). Según “Diagnóstico de la situación de brechas de infraestructura o de acceso a servicios públicos del sector vivienda, construcción y saneamiento” (MVCS, 2020) actualmente, la cobertura (porcentaje de población abastecida del servicio) en el ámbito urbano y rural es de 90% y 66%, respectivamente. Con el fin de acelerar la reducción de la brecha, deben implementarse tecnologías de tratamiento que prueben sostenibilidad en el tiempo. Una tecnología rentable es aquella que demande bajos costos de inversión, operación y mantenimiento. En las plantas del Perú, por lo general se utilizan sistemas de funcionamiento hidráulico, que minimizan la cantidad y complejidad de máquinas y equipos, de este modo se ajustan a los recursos humanos existentes; sin embargo, este tipo de tecnologías demandan altos costos de inversión, ya que son construidos generalmente con concreto armado. En los países desarrollados, no se usan sistemas hidráulicos exclusivamente, por lo general conjugan la operatividad con hidráulica y dispositivos mecánicos, esto les permite operar con unidades de menor volumen que el sería necesario en un sistema hidráulico, y, por ende, sus sistemas requieren menores costos de inversión, pero mayores costos asociados a la operación, debido principalmente a la automatización y el alto grado de especialización del personal técnico de las plantas.

Tracey (2019) en su trabajo descriptivo “Drinking Water Treatment and Challenges in Developing Countries”, menciona que las plantas de agua para países en vías de desarrollo deben funcionar hidráulicamente para garantizar su operabilidad. Asimismo, resalta la importancia de los procesos de mezcla rápido (coagulación) y mezcla lenta (floculación) en el tratamiento en general, ya que de estos depende la eficiencia de los procesos de tratamiento posterior, es decir, conlleva a la disminución de la remoción microorganismos patógenos, sólidos y materia orgánica y en vez de prevenir enfermedades, la transmiten a toda la población a través del agua.

Actualmente, el planeta entero está atravesando por una pandemia debido a una nueva enfermedad llamada CoVid-19, causada por el virus SARS-COV-2, que ha originado centenares de miles de muertos a escala mundial, y la muerte de cerca de 200 mil peruanos según los últimos reportes de estado situacional del MINSA (Ministerio de Salud). En este escenario, resulta fundamental dotar de agua potable a toda la población de buena calidad para asegurar la salud pública y de este modo reforzar la prevención de la propagación de esta y otras enfermedades. Además de la crisis sanitaria, se presenta un contexto económico complicado con varias actividades económicas suspendidas y o controladas como el turismo, educación presencial, entre otros. La presente situación crítica presupone nuevos retos tecnológicos en la industria del tratamiento de agua para consumo humano, a fin de dotar a la mayor cantidad de población y ajustada a la situación económica actual.

En Brasil, se creó un sistema de tratamiento de floculación del tipo hidráulico y fácil de construir y operar, denominado “Floculador de Bandejas Perforadas”. Según el trabajo de investigación llevado a cabo por (Vianna & Vasalle, 2008) “Floculador Hidráulico Tipo Bandeja perforada para Tratamiento de Agua Potable: Concepto y Estado del Arte en Brasil”, los ingenieros civiles del estado de Minas Geras (Brasil) lo vienen empleando desde la década de los 80 del siglo pasado, a consecuencia de que son fáciles de construir en módulos prefabricados de plástico o metal; sin embargo hace hincapié en que su desarrollo ha sido más que nada empírico, por ese motivo, ambos investigadores iniciaron un estudio para determinar, a través de ensayos hidráulicos, el coeficiente de descarga de los orificios.

Con la finalidad de aplicar una tecnología de tratamiento en plantas potabilizadoras es fundamental observar su comportamiento a escala laboratorio para determinar los efectos de las diversas variables sobre la eficiencia del proceso. Como el proceso de

floculación, está determinado por la gradiente de velocidad y tiempo de retención, será necesario evaluar experimentalmente el efecto de ambas variables sobre la eficiencia de un floculador de placas perforadas. Asimismo, las relaciones geométricas como relación entre diámetro equivalente de orificio de paso y diámetro de bandeja, y longitud entre placas y diámetro equivalente de orificio juegan un rol importante en las corrientes de flujos y un valor inadecuado podría provocar cortocircuito o la aparición de zonas muertas, y por consecuencia, en la eficiencia del proceso de floculador de placas perforadas. Por lo tanto, resulta esencial evaluar el efecto de las variables hidráulicas mencionadas anteriormente, en la eficiencia del proceso de mezcla de un floculador de placas perforadas, mediante experimentación, para poder extender la aplicabilidad de esta tecnología en el Perú, sin embargo, hasta la fecha no se cuenta con estudios de este tipo a escala nacional e internacional.

1.2. Objetivos de la investigación

1.2.1 Objetivo general

Determinar el efecto de las variables hidráulicas sobre la eficiencia del proceso de mezcla en floculador de placas perforadas

1.2.2 Objetivos específicos

- a) Determinar el coeficiente de descarga del orificio sumergido para floculador placa orificio.
- b) Evaluar el efecto de la gradiente de velocidad y el tiempo de retención sobre la eficiencia del proceso de mezcla en un floculador.
- c) Evaluar el efecto de la relación de diámetro equivalente de orificios/diámetro de placa y longitud/diámetro de placas.
- d) Caracterizar la calidad del agua cruda y decantada.

1.3. Delimitación de la investigación

1.3.1. Temporal

El presente proyecto de investigación se desarrollará desde mayo del 2022 hasta noviembre del 2022, por lo que durante este periodo se realizará la construcción e instalación del piloto, ensayo experimental, procesamiento de datos, redacción de la tesis de investigación y sustentación. Asimismo, se presenta el cronograma de actividades en el Anexo 1.

1.3.2. Espacial

La experimentación se realiza con una unidad piloto situada en el laboratorio de hidráulica de la UNIVERSIDAD RICARDO PALMA con coordenadas $76^{\circ}58'45.47''\text{O}$, $12^{\circ}7'51.93''\text{S}$ ubicadas en el distrito de Santiago de Surco, Ciudad de Lima, Perú. Esta locación cuenta con los servicios sanitarios (acceso a agua y drenaje) y eléctricos (necesarios para el funcionamiento de los dispositivos mecánicos como las bombas y focos de luz para la visibilidad) necesarios para llevar a cabo los ensayos hidráulicos. En la *Figura 1* se muestra ubicado el perímetro y coordenadas de la universidad Ricardo Palma y el laboratorio de hidráulica.

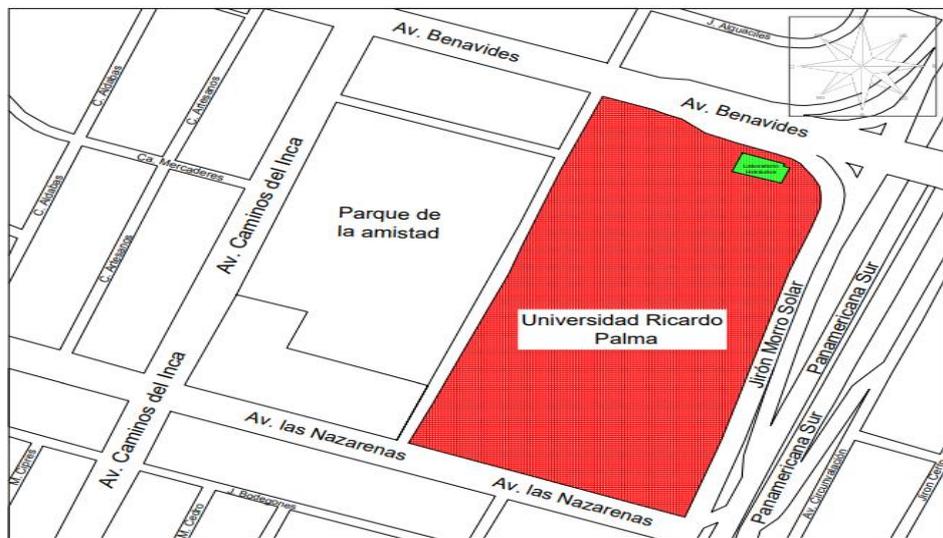


Figura 1: Ubicación del laboratorio de hidráulica en la Facultad de Ingeniería Civil de la Universidad Ricardo Palma

Fuente: Elaboración propia

1.3.3. Temática

- Campo : Sistematización de datos
- Área académica : Ingeniería Civil
- Línea de Investigación : Hidráulica
- Sub-Línea de Investigación : Floculadores de placa perforada

1.4. Justificación e importancia

1.4.1. Justificación teórica

En los procesos de mezcla, se reconoce que las variables hidráulicas del proceso que influyen mayormente en la eficiencia del proceso son la gradiente de velocidad y el tiempo de retención. puesto que va aportar al conocimiento existente de floculadores de placas perforadas, el efecto individual y conjunto

de las variables hidráulicas gradiente de velocidad y tiempo de retención sobre la eficiencia de la mezcla, así como que también se incluirá en el análisis el efecto de las relaciones geométricas: relación diámetro equivalente orificio/diámetro de placa y diámetro equivalente orificio/longitud entre placas. Estas últimas dos variables no suelen ser analizadas, pero pueden afectar significativamente los patrones de flujo y por consiguiente la eficiencia del proceso, de allí la incorporación de estas variables en el presente estudio. Los resultados del presente estudio permitirán establecer las variables más significativas, y los valores dentro del cual deben estar funcionando, para ser incorporado en el conocimiento de este tipo de tecnología.

1.4.2. Justificación Práctica

La investigación se enfoca en dimensionar, operar un sistema de tratamiento de agua y analizar que el sistema funcione dentro de los rangos operativos. Cuando estos rangos operativos estén establecidos previamente, conformarán el también denominado “criterios de diseño”, puesto que mediante la evaluación experimental se analizará que se encuentren dentro de los rangos operativos de las variables hidráulicos establecidos por la literatura académica (y de ser necesario rangos fuera de estos límites) nos permitirá mejorar la eficiencia del proceso de mezcla en un floculador de placas perforadas.

1.4.3. Justificación social

La presente investigación nos permite comprobar los resultados que están orientados a poner en conocimiento a la comunidad académica interesada en la problemática del tratamiento de agua (dentro de los cuales se encuentran ejerciendo profesionales como: ingenieros civiles, ingenieros sanitarios e ingenieros de mecánica de fluidos) siendo este funcionamiento hidráulico una alternativa de tratamiento efectiva, potencial, económica, novedosa ya que es poco conocida en el Perú la “floculación por placas perforadas” y finalmente ser de apoyo futuro para zonas rurales como alternativa hidráulica.

1.4.4. Justificación Ambiental

Para convertir el agua apta para el consumo humano deben construirse y operarse plantas de tratamiento de agua potable que sean sostenibles en el

tiempo. Los floculadores de placas perforadas son tecnologías adecuadas a países en desarrollo como el Perú, las cuales pueden reemplazar los floculadores de pantalla que puedan ser dañados por causas ambientales, ya que son fáciles de construir con prefabricados, por ejemplo, reemplazar el concreto armado por tubos de plástico, reduciendo costos de materiales, así como también los tiempos de instalación y puesta en marcha de las unidades.

1.4.5. Importancia del estudio

El presente trabajo contribuirá en la comprensión del efecto de las variables hidráulicas en un floculador de placas perforadas. Hasta la actualidad, las investigaciones experimentales de este tipo de floculador son escasas, solo existe una cuyo tema de investigación fue determinar el valor de coeficiente de descarga de los orificios para diversas velocidades de paso. Para la presente tesis se han identificado 4 posibles variables hidráulicas que afecten el proceso, y concluirá con la determinación de las variables más significativas, así como los rangos operativos para su adecuado funcionamiento. Los resultados permitirán establecer experimentalmente criterios de diseño para las distintas variables hidráulicas contempladas, y de este modo se retroalimenta la teoría de este tipo de tecnología, lo cual conlleva a un mayor entendimiento que beneficiará directamente a la comunidad ingenieril involucrada en el sector saneamiento, dentro de los cuales se encuentran los ingenieros civiles, ingenieros sanitarios, ingenieros mecánicos de fluidos y ambientales.

CAPÍTULO II: MARCO TEÓRICO

2.1. Antecedentes del estudio de investigación

2.1.1. Antecedentes internacionales

Neupane et al., (2006), en su artículo *Influencia de las características de la fuente, los químicos y la floculación en los sólidos no sedimentables y el tratamiento primario mejorado químicamente en Estados Unidos con objetivo guía de utilidad práctica para los ingenieros hidráulicos vinculados al floculador compuestas de concreto y tubos de ensayo y metodología descriptiva* tiene el objetivo de realizar una investigación pionera respecto al efecto de los parámetros hidráulicos del proceso de floculación para tratamiento químico del agua residual. La evaluación se llevó a cabo en una unidad experimental a escala laboratorio, en un equipo llamado prueba de jarras, y controlaron los parámetros de floculación para maximizar la remoción de sólidos no sedimentables. Estas variables hidráulicas fueron controladas según los valores recomendados en unidades para tratamiento de agua. El autor concluyó que se máxima la floculación cuando la gradiente se configura escalonadamente, es decir, en valores decrecientes en el sentido del flujo. Adicionalmente, evalúa el efecto de tiempo de retención, encontrando que brinda máximo rendimiento cuando llega a 10 min. Este último valor es significativamente menor al mínimo recomendado para agua, por lo cual el autor plantea que pueda deberse a que los químicos presentes en el agua residual, mejoran la floculación. Lo cual nos aportó que el tiempo de retención mayores no contribuyen a la mejora del proceso ni estabilización de la calidad del agua. Vale mencionar que se usó agua natural captada de lagos y una variedad de coagulantes y todos mostraron esa misma tendencia según los gráficos de sus resultados.

Garland (2017), en su tesis “Descubriendo los misterios del manto de flóculos: una exploración con chorros de entrada, floculadores y precipitados de cloruro de poli aluminio” en Estados Unidos, tiene como objetivo. analizar los diferentes mecanismos individuales involucrados en la “floculación compuesta” las cuales pueden optimizar el tratamiento del proceso, teniendo una metodología experimental, donde concluyó que generalmente, el dimensionamiento de floculadores está basado principalmente en el tiempo de

retención y la gradiente de velocidad, sin considerar otras variables relevantes como las condiciones de ingreso, salida, calidad de agua, geometría del floculador, tipo de mezclador. En una unidad experimental a escala piloto, Garland contempló un mecanismo de floculación compuesto por uno hidráulico y otro de manto de lodos. Los cual nos aportó de qué resultados obtenidos indicaron que el tiempo de retención es un parámetro hidráulico poco significativo, por lo que solo debería controlarse la gradiente de velocidad y mantener el número de Camp (producto de gradiente y tiempo de retención) dentro de un rango específico.

Vianna & Vasalle (2008) menciona en su investigación “Floculador Hidráulico Tipo Bandeja Perforada para el Tratamiento de Agua Potable: Concepto y estado del arte en Brasil” en Brasil que tiene como objetivo que su diseño y operación permita que estas unidades sean pre fabricadas con plástico o asbesto cemento. La forma puede ser cilíndrica u horizontal. Consta de una serie de cilindros que contienen cada uno placas perforadas internamente, a modo de varios pisos. El diámetro del orificio progresivamente va incrementándose, de modo que la gradiente aguas arriba es alta y aguas abajo es bajo, de modo que los flóculos no se rompan por alto esfuerzo cortante. Además, ocurre interacción entre los flóculos durante todo el recorrido. La pérdida de carga se produce principalmente en el orificio, por lo cual debe asegurarse que la velocidad de paso no sea muy elevada. La metodología es descriptiva, concluyó que ya que la agitación se produce en el orificio el valor de este parámetro generalmente es 0.60 para orificios de pared delgada; sin embargo, este valor aplica en regímenes de flujo turbulento. Nos aportó que en nuestra experimentación a escala piloto a que se cumplan los valores de número de Reynolds, el coeficiente de descarga coincide con los valores indicados en la literatura.

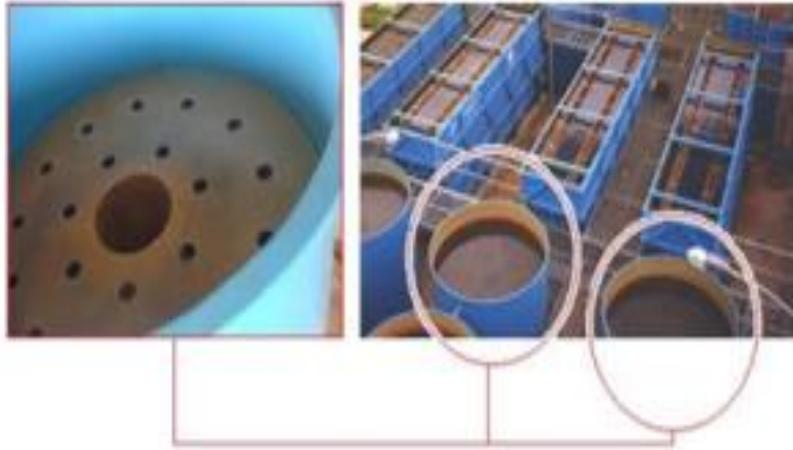


Figura 2: Floculador placa orificios a escala real

Fuente: Perforated Tray-Type hydraulic flocculator for potable water treatment: Concept and State of the Art in Brazil (Vianna & Vasalle, 2008)

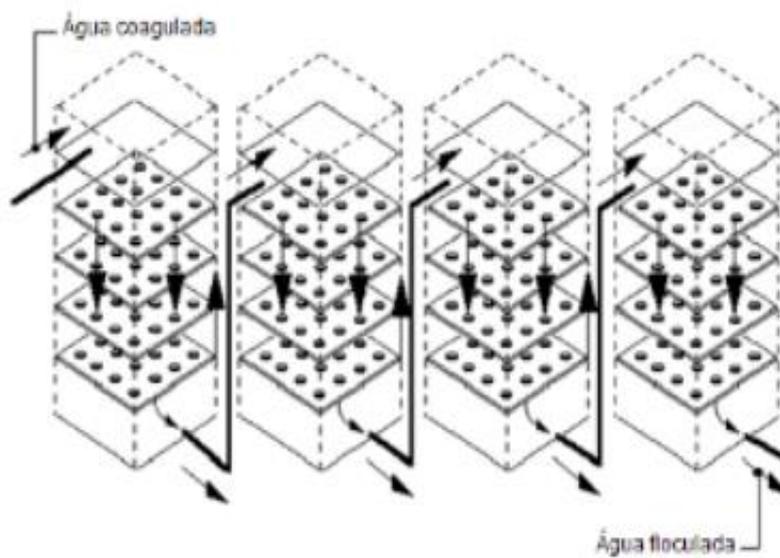


Figura 3: Diagrama del flujo de agua a través del floculador

Fuente: Perforated Tray-Type hydraulic flocculator for potable water treatment: Concept and State of the Art in Brazil. (Vianna & Vasalle, 2008)

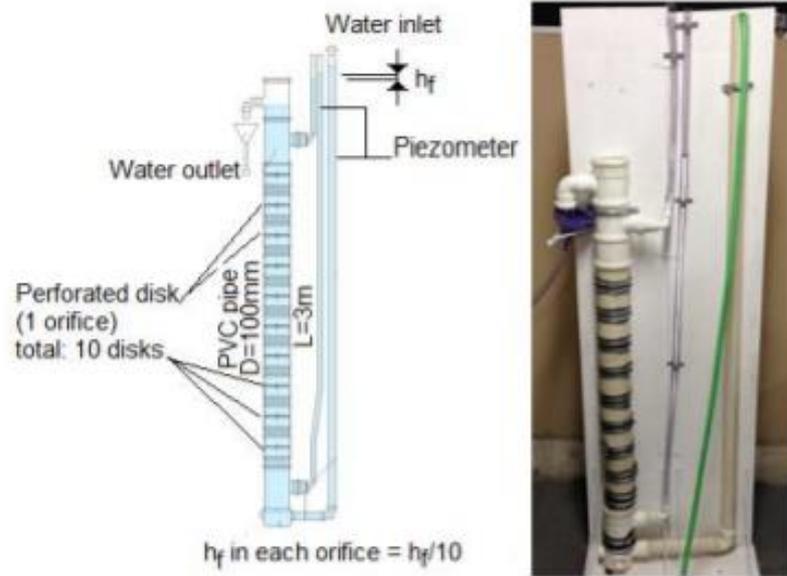


Figura 4: Unidad experimental a escala piloto

Fuente: Perforated Tray-Type hydraulic flocculator for potable water treatment: Concept and State of the Art in Brazil (Vianna & Vasalle, 2008)

Walsh et al. (2009), en su artículo “Efecto de las condiciones de coagulación y floculación sobre la calidad del agua en un proceso de ultrafiltración sumergido” publicado en Francia, tenía el objetivo principal fue establecer criterios consensuados para la reparación y/o refuerzo estructural en Floculadores placa orificio, que permitan generar una guía tanto para los diseñadores de reparaciones y refuerzos de floculadores convencionales, como a otros profesionales y técnicos que participen del desarrollo de proyectos de saneamiento de agua teniendo metodología experimental, donde evaluaron el efecto tanto de las condiciones de coagulación como floculación para agua que posteriormente atraviesa por un proceso de ultrafiltración. El artículo aporta a que no solo debe contemplarse exclusivamente la gradiente y tiempo de retención en los estudios para comprender la eficiencia de un floculador, sino que debe considerarse la geometría del reactor y el tipo de sistema de floculación. El investigador sostiene que el tamaño de los flóculos está influenciado mayormente por la gradiente de velocidad, por lo tanto, el artículo nos aporta que es conveniente controlar el nivel de agitación a valores bajos cuando se quiere producir flóculos de mayor tamaño.

2.1.2. Antecedentes Nacionales

Andia (2000) en el artículo “Tratamiento de agua coagulación y floculación” menciona que en el Perú con objetivo de eliminar estas partículas se recurre a los procesos de coagulación y floculación, la coagulación tiene por objeto desestabilizar las partículas en suspensión es decir facilitar su aglomeración, con metodología experimental donde concluyó que el diseño hidráulico de la planta de tratamiento del proyecto de agua potable en la localidad de San Cristóbal de Sisa, que tuvo el objetivo del floculador de proporcionar a la masa de agua coagulada una agitación lenta aplicando velocidades decrecientes, para promover el crecimiento de los flóculos y su conservación, hasta que la suspensión de agua y flóculos salga de la unidad. La energía que produce la agitación del agua puede ser de origen hidráulico o mecánico.

Concluyó que los parámetros y recomendaciones generales de diseño son:

Los gradientes de velocidad que optimizan el proceso normalmente varían entre 70 y 20 s⁻¹. En todo caso, en el primer tramo de la unidad el gradiente no debe ser mayor que el que se está produciendo en la interconexión entre el mezclador y el floculador. El gradiente de velocidad debe variar en forma uniformemente decreciente, desde que la masa de agua ingresa a la unidad hasta que sale. El tiempo de retención puede variar de 10 a 30 minutos, dependiendo del tipo de unidad y de la temperatura del agua. En las zonas tropicales, donde las aguas presentan temperaturas por encima de los 20 °C, el tiempo de floculación necesario suele ser más breve, alrededor de 15 minutos. En cambio, en los lugares fríos, donde el agua tiene temperaturas de 10 a 15 °C, generalmente el proceso se optimiza con tiempos de retención iguales o superiores a 20 minutos. Para que el periodo de retención real de la unidad coincida con el de diseño, ella debe tener el mayor número posible de compartimentos o divisiones. Nos aportó que en el paso del mezclador al floculador debe ser instantáneo y deben de evitarse los canales y las interconexiones largas. El tiempo de retención y el gradiente de velocidad varían con la calidad del agua. Pueden operar indefinidamente sin riesgos de interrupción, debido a que solo dependen de la energía hidráulica. Por esta razón, son muy confiables en su operación.

2.2. Bases teóricas

2.2.1. Planta de tratamiento de agua potable

De acuerdo a Chulluncuy (2011), es una instalación donde el agua cruda es sometida a diversos procesos con el objetivo de eliminar los microorganismos y los contaminantes físicos y químicos hasta los límites aceptables que estipulan las normas, para que esté apta para el consumo humano. De acuerdo con el tipo de procesos que las conforman, las plantas de tratamiento se clasifican en plantas de filtración rápida y plantas de filtración lenta.

La tecnología usada se puede clasificar en plantas convencionales, plantas convencionales de tecnología apropiada y plantas de tecnología importada o patentada.

2.2.2. Importancia de la planta de tratamiento

El agua potable es aquella agua que no causa daño ni tiene riesgo para la salud cuando se consume toda una vida, teniendo en consideración las vulnerabilidades que pueden presentar las personas en las distintas etapas de su vida (OMS, 2011). El agua potable debe cumplir ciertos requisitos de parámetros físicos, químicos y microbiológicos. En la parte física como turbiedad, olor, color y sabor; en la parte química como la acidez, alcalinidad, aceites, grasa, entre otros y debe estar exenta de microorganismos patógenos sobre todo bacterias y virus que afectan la salud de las personas. Por lo tanto, se han creado normas de calidad de agua para su control y vigilancia que se encargan de regular la calidad de agua de consumo humano además que sirven para seleccionar las fuentes de agua, el tratamiento y su distribución. Por ello cada país ha establecido sus propias normas tomando como base y guía las normas de la Organización Mundial de la Salud (OMS, 2011).

Según Ordinola (2019), para convertir el agua cruda a agua potable se realizan procesos físicos, químicos que inician desde el pretratamiento que consiste en remover sólidos grandes y partículas entre un rango de 0.2 a 0.4 mm para evitar que puedan ocasionar daños en los equipos y en los procesos siguientes de tratamiento del agua que consisten en la clarificación (mezcla rápida, floculación y decantación) y desinfección (cloración) del agua para que sea apta para el consumo.

2.2.3. Componente de la planta de tratamiento

- a) Captación: Según Ordinola (2019), la captación del agua es el primer paso para el diseño del tratamiento del agua potable debido a que se debe asegurar que el ingreso de agua sea lo suficiente, para ello se recomienda un estudio de un ciclo hidrológico o en caso que no existieran dichos registros, para determinar la calidad del agua los estudios pueden basarse en los meses más lluviosos como lo recomienda la norma OS.020 Planta de tratamiento de agua para consumo humano.
- b) Pretratamiento: De acuerdo (ANA, 2010) el pretratamiento consiste en unidad de cribado y desarenador. El cribado consiste en unas rejillas o planchas perforadas que sirven para retener el material grueso y material suspendido de mayor tamaño que puedan dañar algún instrumento mecánico, atorar tuberías o interferir en el proceso de tratamiento. El desarenador es la unidad de una planta de tratamiento de agua que tiene como objetivo separar del agua cruda la arena y partículas en suspensión gruesa con el fin de evitar que se produzcan depósitos en las obras de conducción, proteger a las bombas de la abrasión y evitar sobrecargas en los procesos posteriores de tratamiento disminuyendo así la calidad del agua para consumo. Para plantas de tratamiento de agua el desarenador removerá partículas de arena de un diámetro mayor a 0.2 mm.
- c) Tratamiento: De acuerdo con (Arboleda, 2010):
- Coagulación: Son sustancias químicas que se agregan al agua con el fin de desestabilizar a las partículas coloidales e incrementar la tasa de formación de flóculos. Pueden ser coagulantes metálicos y polielectrolitos o ayudantes coagulantes.
 - Floculación: Es un proceso que sigue a la coagulación, donde las partículas coaguladas colisionan unas con otras para dar la formación o aglomeración de partículas de mayor tamaño y densidad (floc) para luego decantar, por lo que el contacto de las partículas se debe realizar con una lenta agitación del agua.
 - Filtración: Es un proceso de clarificación que consiste en la remoción del material suspendido, como el floc, arcillas, y de algunos microorganismos resistentes a la desinfección.

- Sedimentación: es un proceso que se usa en el tratamiento de clarificación del agua y es proceso físico (gravitacional) y se logra en un tanque llamado sedimentador o decantador, que se coloca a continuación del floculador, que permite la separación de las partículas floculantes que se forman en los procesos de coagulación y floculación.
- Desinfección: Es el último proceso de una planta de tratamiento de agua potable que garantiza la destrucción de organismos patógenos presentes en el agua y que no han sido eliminados totalmente en los anteriores procesos (coagulación, floculación, sedimentos y filtración) mejorando así la calidad del agua y a la vez que sea inocua para la salud del consumidor.

2.2.4. Proceso del tratamiento de agua:

De acuerdo con Andía, (2000). Las plantas de tratamiento convencionales tienen por propósito remover la turbiedad del agua, y reducir la presencia de microorganismos, virus, contaminantes orgánicos e inorgánicas para proveer agua segura, limpia y apta para el consumo humano. Para ello hace uso de los siguientes procesos secuenciales: coagulación, floculación, sedimentación, filtración y desinfección.

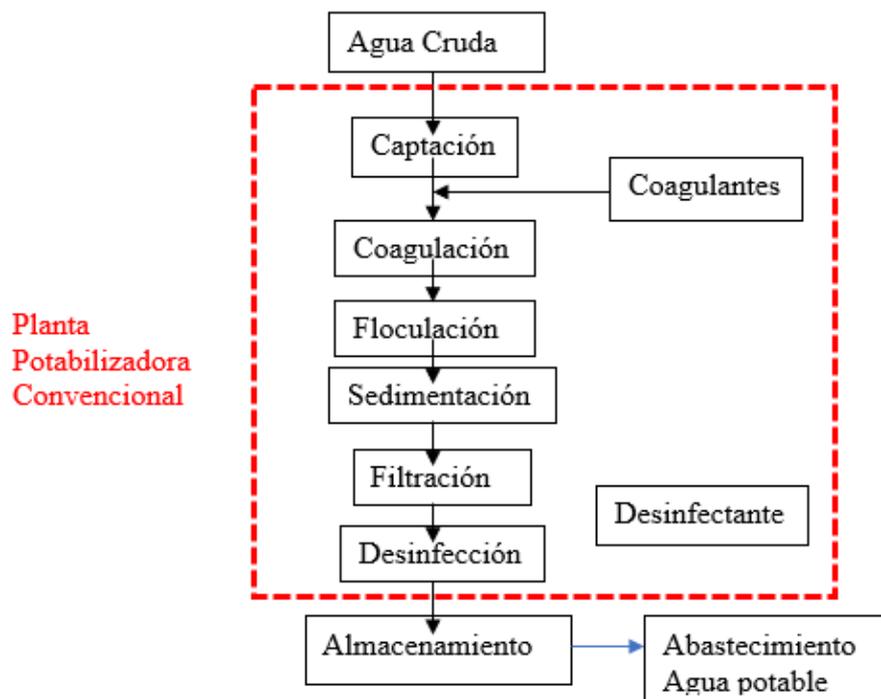


Figura 5: Diagrama de flujo del agua en una planta convencional de tratamiento de agua

Fuente: Elaboración propia

2.2.5. Coagulación:

El tratamiento inicia en el instante en que se agregan los coagulantes al agua. Durante la coagulación se produce una serie de reacciones físicas y químicas entre el coagulante, la superficie de las partículas, la alcalinidad del agua y el agua misma, y tiene una duración menor a 1 segundo (Andia, 2000). Los elementos físicos de la unidad de coagulación comprenden la caseta de almacenamiento de coagulantes (reactivos), caseta para la preparación de la mezcla de coagulante (coagulante diluido), y el mezclador rápido. El elemento central es el mezclador rápido, ya que de su eficiencia depende el grado de dispersión del coagulante, y estos se clasifican según su mecanismo de funcionamiento en mecánico o hidráulico (Maldonado, 2000). El resultado final se denomina partículas coloidales desestabilizadas o micro flóculos. En poblaciones urbanas importantes, se utiliza coagulante sulfato de aluminio en solución como en la siguiente figura:

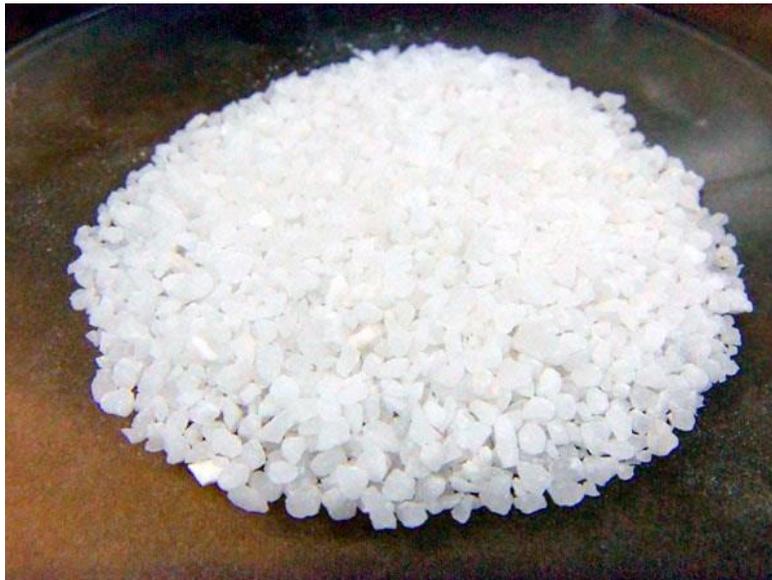


Figura 6: Coagulante en forma seca.

Fuente: Elaboración propia

a) Teoría de la coagulación

- Partículas coloidales:

Las partículas presentes en el agua se clasifican según su tamaño en: sedimentables, tamaño mayor a 100 μm ; supra-coloides, en el rango de 1 a 100 μm ; y coloides, en el rango 10 a 10^{-3} μm ; y sustancias en solución,

menores a 1 nm. El agua cruda proveniente de fuentes naturales es de naturaleza predominantemente particulada y coloidal (Bratby, 2016).

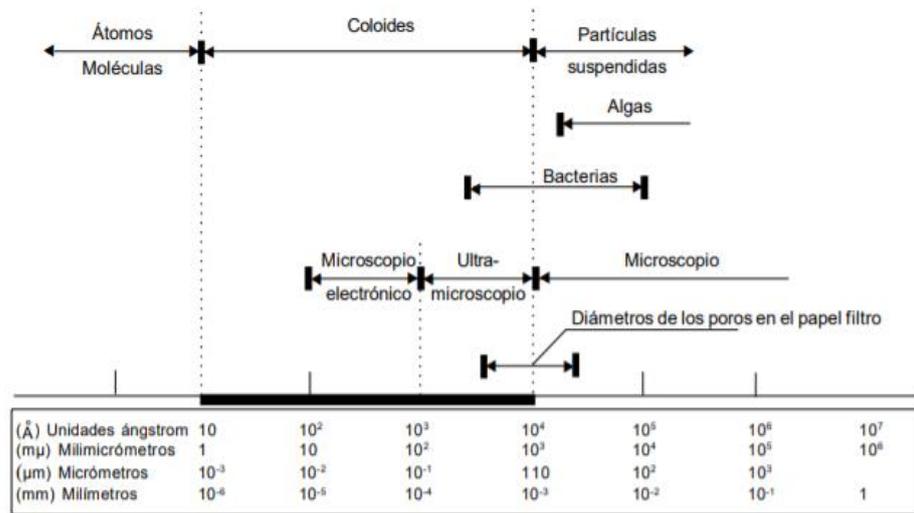


Figura 7: Distribución de tamaño de partículas en el agua.

Fuente: Tratamiento de agua (Canepa, 2000)

En las partículas pequeñas, los fenómenos interfaciales predominan sobre los efectos gravitatorios; por lo tanto, los coloides no pueden removerse por sedimentación y requieren de otros tipos de tratamientos. (Albarran, 2010)

Se entiende por estabilidad a la propiedad inherente de los coloides a mantenerse dispersos en el agua (Bratby, 2016). Los coloides en el agua se encuentran superficialmente electrificados y, en gran medida, su comportamiento se atribuye a esta propiedad (Albarran, 2010). Según (Bratby, 2016), las partículas coloidales poseen carga negativa en su superficie; y por lo tanto atraen las cargas positivas del agua circundante. La interfase entre la superficie coloidal y el líquido está formada por una doble capa formada por la capa interna o de Stern, compuesta de contra iones fuertemente fijados a la superficie coloidal, y la capa externa o difusa, compuesta de iones débilmente ligados.

De acuerdo con Albarran (2010), la concentración de iones en el fluido circundante disminuye al alejarse del coloide. El espesor de la capa difusa (E) varía con la fuerza iónica del agua (I):

$$E = \frac{0.304}{\sqrt{I}}$$

La distribución de la doble capa se puede asimilar a un condensador eléctrico, por lo que la caída del potencial eléctrico es exponencial. El potencial eléctrico puede estimarse a partir del potencial eléctrico superficial (ϕ) y la distancia desde la superficie(x):

$$\Phi = \Phi_0 \cdot e^{-kx}$$

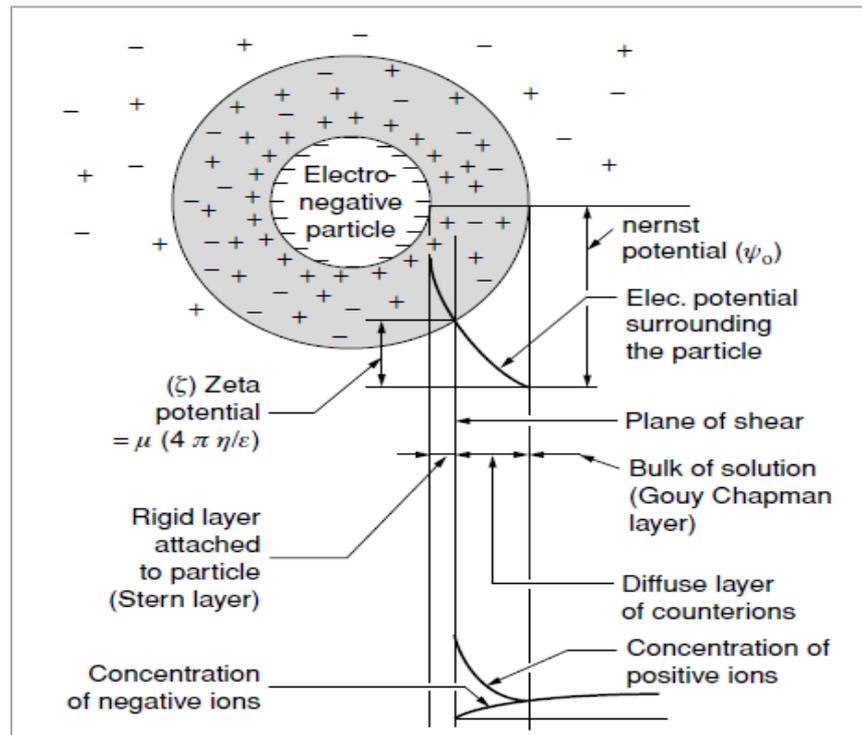


Figura 8: Esquemmatización de la teoría de la doble capa eléctrica.

Fuente: Coagulation and flocculation in water and wastewater treatment (Bratby, 2016)

Albarran (2010) señala que, del modelo matemático anteriormente descrito, se desprende que, si se aumenta la fuerza iónica, disminuye el espesor de la doble capa y por consiguiente el potencial eléctrico. La carga también está influenciada por el pH de la solución y existe un valor de pH, en el cual la carga coloidal es nula, conocido como punto isoeléctrico. Para evaluar la carga del coloide, se mide el potencial Z que es el potencial eléctrico entre la superficie de cizallamiento y el líquido. Si el potencial Zeta es elevado (adopta valores lejanos a cero), el coloide experimenta una

fuerte repulsión electrostática cuando otros coloides se le aproximan; en consecuencia, se encuentran dispersos. (Hurst, 2010)

2.2.6. Mecanismos de desestabilización química

De acuerdo con Canepa (2000). El propósito de la coagulación es “juntar” coloides, mediante el establecimiento de condiciones que favorezcan su desestabilización; para ello se introduce cationes metálicos multivalentes o polielectrolitos que reducen la carga superficial (aumentar la fuerza iónica) y en consecuencia facilitar la aglomeración de flóculos por acción de las fuerzas de atracción de Van Der Waals, que son efectivas sólo en la vecindad inmediata del coloide.

2.2.7. Mecanismos de coagulación

Los mecanismos de desestabilización coloidal se clasifican en: Compresión de la doble capa, adsorción neutralización de la carga, barrido y adsorción y puente.

Tabla 1: Mecanismos de coagulación

Mecanismos	Descripción
Compresión de la doble capa.	El coagulante incrementa la fuerza iónica, y en consecuencia comprime la doble capa eléctrica, lo que a su vez reduce la potencial zeta. Si la doble capa está suficientemente comprimida, entonces la fuerza neta es de atracción.
Adsorción y neutralización de carga.	La neutralización de la carga eléctrica se produce porque los iones metálicos originados en la coagulación, $Al (H_2O)_6^{+3}$ y $Fe (H_2O)_6^{+3}$ son absorbidos por los coloides. Una vez que la carga superficial se neutraliza, la nube iónica se disipa y desaparece el potencial electrostático, ya que se comprime la capa difusa. Por este mecanismo se desestabilizan los coloides hidrofóbicos
Barrido.	A elevadas dosis de coagulantes como el sulfato de aluminio y cloruro férrico, estos

Mecanismos	Descripción
	<p>reaccionan con los hidróxidos del agua para formar hidróxidos metálicos, Al (OH)₃ y Fe (OH)₃, respectivamente. Los coloides son atrapados por los precipitados hidróxidos durante su formación y caída. Por este mecanismo se desestabilizan los coloides hidrofílicos;</p>
<p>Adsorción y formación del puente</p>	<p>Este mecanismo ocurre en presencia de polímeros. Los polímeros consisten de moléculas orgánicas de cadena larga que tienen sitios ionizados. Al ser agregados al agua se extienden en la solución y algunos segmentos de su cadena son adsorbidos por los coloides. Este fenómeno es conocido como puente. De este modo ligan numerosas partículas.</p>

Fuente: Tratamiento de agua (Canepa, 2000)

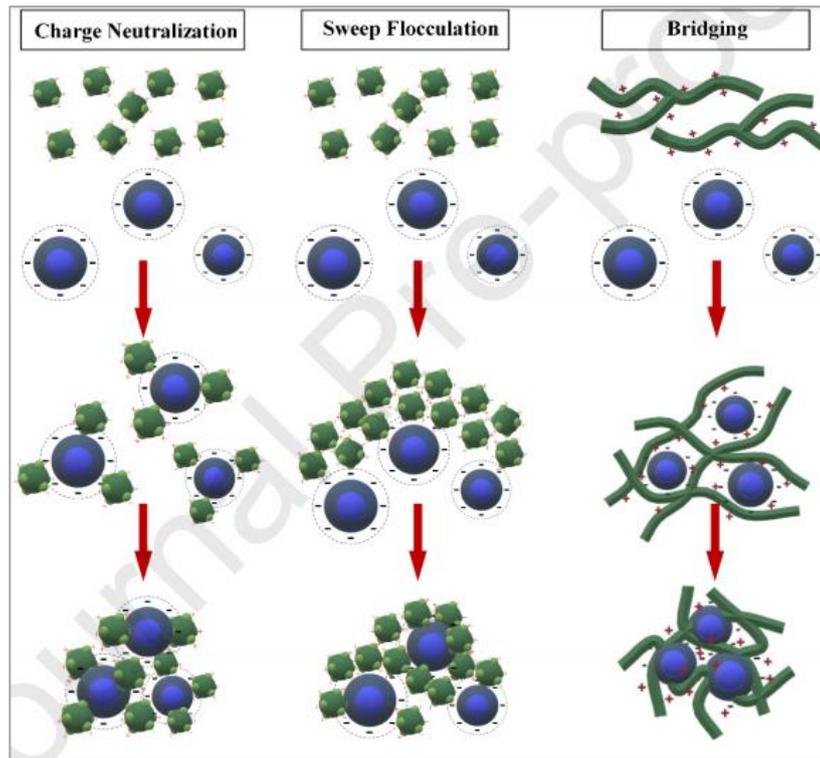


Figura 9: Mecanismo de coagulación, neutralización de la carga; barrido y Puente.
Fuente: Principles of Water Treatment (Tchobanoglous et al., 2012)

Una vez concluida la desestabilización coloidal, se produce una agregación inicial entre las partículas y se forman los primeros micro flóculos. Estas pequeñas masas se caracterizan por ser numerosas y compactas, pero están débilmente ligadas (Tripaty & Rajan, 2006).

2.2.8. Dosificación y coagulantes

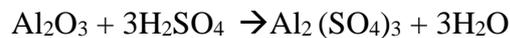
Según Maldonado, (2000). Menciona que la dosificación de las sustancias químicas debe efectuarse mediante equipos que aseguren la aplicación de una dosis exacta por unidad de tiempo. La cantidad precisa de coagulante a dosificar se determina a través del procedimiento de laboratorio conocido como “prueba de jarras”. Los dosificadores se seleccionan según la capacidad de la planta, y pueden utilizar coagulantes en seco o en estado líquido y deben de disponer de energía eléctrica continua para la operación diaria de la planta potabilizadora.

Los coagulantes más usados en el tratamiento de las aguas son: sulfato de aluminio, cloruro férrico, el sulfato ferroso y férrico y el cloro sulfato férrico. Mayormente en el Perú, se usan sales de aluminio, hierro por su bajo costo,

relativa disponibilidad y alta efectividad (Maldonado, 2000). La eficacia de estos coagulantes reside en su capacidad para formar complejos polinucleares de múltiples cargas en solución con características de adsorción mejorada (Bratby, 2016). Las sales férricas tienen las ventajas de ser más económicas, producen flóculos más pesados y son ligeramente más efectivas en remoción de fosfato que las sales de aluminio. Su mayor inconveniente son los problemas de corrosión que puedan derivar de su aplicación (Tracey, 2019).

a) Sulfato de Aluminio:

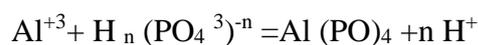
El sulfato de aluminio se obtiene mediante la reacción de un mineral aluminico (bauxita o hidrato de aluminio) con ácido sulfúrico a elevadas temperaturas:



El sulfato de aluminio al ser añadido al agua se disocia en su ion trivalente, para luego hidrolizarse y forman varios complejos solubles que poseen altas cargas positivas. Sus productos de hidrolisis reaccionan con la alcalinidad del agua y producen los precipitados hidróxidos (Andía, 2000).



Asimismo, reacciona con los fosfatos produciendo su precipitación:



El sulfato de aluminio puede incrementar el contenido de sólidos disueltos y reducir posiblemente el pH, por lo cual, en ocasiones es necesario adicionar carbonatos para neutralizar la acidez. Comercialmente se presenta en forma líquida o sólida. La selección de la forma depende de las condiciones propias de la planta de tratamiento como la disponibilidad de tanques de almacenamiento, temperatura ambiental, distancia a la planta productora, etc. (Andía, 2000).

2.2.9. Factores que afectan el proceso de coagulación

La coagulación está influenciada por: el contenido de coloides, pH, dosis de coagulante, tipo de coagulante y condiciones de mezcla rápida. (Canepa, 2000)

- Contenido de coloides

Si el contenido de coloides (turbiedad) es alto, la demanda de coagulante se reduce ya que existe una alta probabilidad de colisión entre las partículas; por el contrario, cuando la turbiedad es baja la coagulación es más dificultosa, por lo cual la demanda del coagulante aumenta.

- Influencia de la dosis de coagulante

Si la dosis de coagulante es baja, no desestabiliza totalmente las cargas de los coloides, por lo tanto, se genera baja cantidad de micro flóculos; mientras que elevadas dosis, puede producir inversión de la carga. El efecto de la dosis de coagulante se mide en la prueba de jarras;

- Influencia del pH y tipo de coagulante

El rango óptimo de pH es función del tipo de coagulante y de las características del agua a tratar (alcalinidad y pH). Si la coagulación se realiza fuera del rango de pH óptimo, entonces se incrementa la demanda de coagulante, y en consecuencia los costos operativos del tratamiento. En las sales de aluminio el rango de pH para la coagulación es de 6.5 a 8.0 y en las sales de hierro es de 5.5 a 8.5 unidades (Andia, 2000);

- Influencia de las condiciones de mezcla rápida

La agitación debe ser uniforme y enérgica para asegurar la satisfactoria reacción entre el agua y el coagulante. Por este motivo se inyecta el coagulante en la zona de alta turbulencia.

2.2.10. Control del proceso de coagulación en laboratorio

El método de selección y control de coagulantes en el tratamiento convencional es la prueba de jarras. Este proceso es económico, confiable y de rápida ejecución, donde se simulan los procesos de coagulación, floculación y sedimentación, a escala de laboratorio. Permite realizar un adecuado manejo de coagulantes y dosis que conduzcan a la óptima remoción de sólidos.

El equipo de prueba de jarras consiste de un estante de agitadores (impulsado por un motor de velocidad variable) debajo del cual se disponen los frascos, de 1 a 2 L de capacidad. El protocolo experimental consiste en aplicar diferentes dosis de coagulante a las muestras de agua residual vertidas en cada frasco y someterlos a una agitación lenta, por un periodo de 15 minutos aproximadamente, y luego dejarla sedimentar por un tiempo similar. Finalizado ello, el agua sobrenadante se retira y analiza en laboratorio para cuantificar la turbiedad y otros parámetros que se consideren convenientes, y de este modo encontrar la dosis óptima de coagulante.

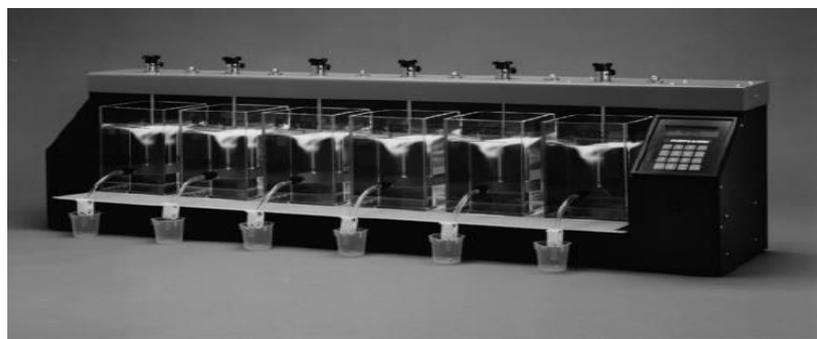


Figura 10: Equipo de prueba de jarras convencional.

Fuente: Coagulation and flocculation in water and wastewater treatment (Bratby, 2016)

2.2.11. Teoría del proceso de floculación:

Es el proceso en el que las partículas ya desestabilizadas chocan unas con otras para formar flóculos de mayor tamaño. Las colisiones se caracterizan por producir una agitación lenta en forma decreciente en dirección del flujo, para promover el crecimiento de los flóculos y su conservación, hasta que finalmente la suspensión de flóculos salga de la unidad. La agitación puede ser originada por un dispositivo hidráulico o mecánico. (Maldonado, 2000)



Figura 11: Floculador hidráulico en forma serpentina

Fuente: Manual tratamiento de agua (Maldonado, 2000)

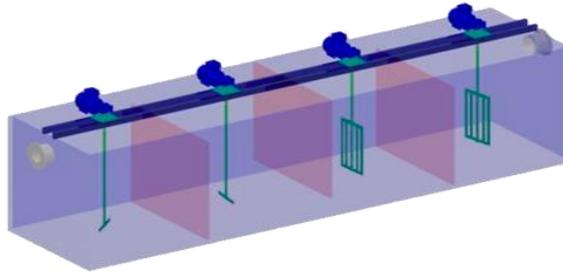


Figura 12: Esquematación de floculador mecánico de paletas

Fuente: Manual tratamiento de agua (Maldonado, 2000)

2.2.12. Mecanismos de procesos de mezcla

Según Bratby, (2016). Se refiere por floculación como el proceso que procede de la coagulación y que consiste de la inducción del contacto entre las partículas recientemente desestabilizadas para formar partículas de mayor peso y tamaño que sedimentan a mayor velocidad. En la floculación, la agitación es menos intensa pero más prolongada que en la coagulación. La floculación atraviesa por dos etapas:

- Floculación peri cinética: La colisión es inducida por la agitación natural térmica de las moléculas, también conocido como movimiento browniano. Esta etapa dura pocos segundos porque solo es efectiva para tamaño de partículas muy reducidas y depende principalmente de la temperatura del agua.
- Floculación orto cinética: Esta segunda etapa, la colisión de los flóculos es inducida por las gradientes de velocidades en el líquido, generada por una fuente de energía externa (mecánica o hidráulica).

El floculador es esencialmente un tanque con algún medio de mezcla suave y lenta, y con un tiempo de retención relativamente prolongado. (Walsh, Zhao, Gora, & Gagnon, 2009)

2.2.13. Tipos de floculadores

Según Canepa, (2000). Los floculadores pueden clasificarse según el modo de agregación en floculadores de contactos de sólido o floculadores de disipación de energía.

- Floculadores de contacto de sólidos:

Los floculadores de contacto de sólidos o de manto de lodos son controlados por la concentración de sólidos. Normalmente forman parte de los tanques de decantación de flujo vertical y constituyen unidades compactas. Antes de que aparecieran los decantadores de placas, paralelos o tubulares, presentaban precios inferiores a los proyectos convencionales, pero actualmente ya no tienen una ventaja muy significativa de precio. Estas unidades se recomiendan para aguas que mantengan constantes sus características fisicoquímicas, con variaciones de calidad imperceptibles. Los floculadores de contactos pueden ser clasificados a su vez en mecánicos o hidráulicos.

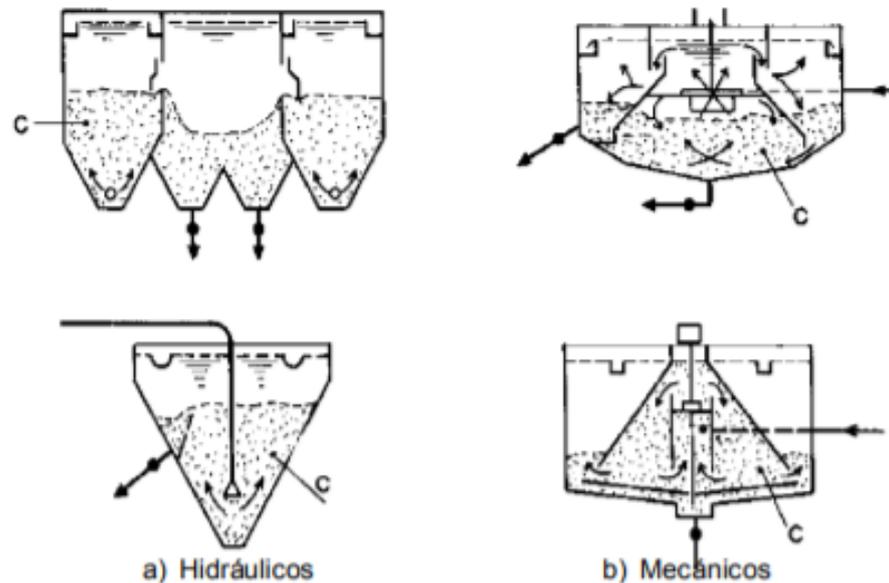


Figura 13: Floculadores de contacto de sólidos.

Fuente: Tratamiento de agua (Andia, 2000)

- Floculadores de disipación de energía

En los floculadores de potencia, las partículas son arrastradas por el flujo de agua a través del tanque de floculación sin que prácticamente exista

concentración de sólidos. De acuerdo con la forma de disipación de energía, se pueden clasificar en hidráulicos y mecánicos

- Hidráulicos

Dentro de ellos, tenemos los floculadores de pantalla o también llamados tabiques, medio poroso y helicoidal.

- Floculador de tabiques

Los floculadores hidráulicos más utilizados son los de pantallas, de flujo horizontal o de flujo vertical. En los primeros, el agua circula con un movimiento de vaivén, y en los segundos, la corriente sube y baja sucesivamente, contorneando las diversas pantallas. La pérdida de carga total es la suma de dos parciales. La primera, de menor cuantía, ¿debida a la fricción en el canal; y la segunda, la principal, debida a los cambios de dirección. Los de flujo vertical se suelen usar para grandes unidades de tratamiento y los de flujo horizontal para pequeñas plantas.

- Medio poroso

Aplicado principalmente en pequeñas instalaciones, debido a su elevada eficiencia y bajo costo. Se distinguen dos tipos básicos: floculación en un medio poroso fijo (o floculación en medio granular) y floculación en un medio poroso expandido (floculación en lechos de arena expandida). Consiste en hacer pasar el agua, después de haberle aplicado los coagulantes, a través de un medio granular contenido en un tanque (flujo vertical) o canal (flujo horizontal). El flujo normal mente es laminar y la eficiencia es extraordinaria. Puede flocular satisfactoriamente en pocos minutos.

- Helicoidal:

En este floculador el agua es admitida tangencialmente por la parte superior y sale de la cámara de floculación a través de una curva dotada de unas guías paralelas, lo que ayuda a generar el movimiento helicoidal. En la práctica, el helicoide que se forma no es de diámetro constante, sino que el diámetro disminuye al aproximarse al fondo. Estos floculadores se recomiendan para aguas con baja turbidez y que no contengan sólidos pesados en especial arena (Maldonado, 2000)

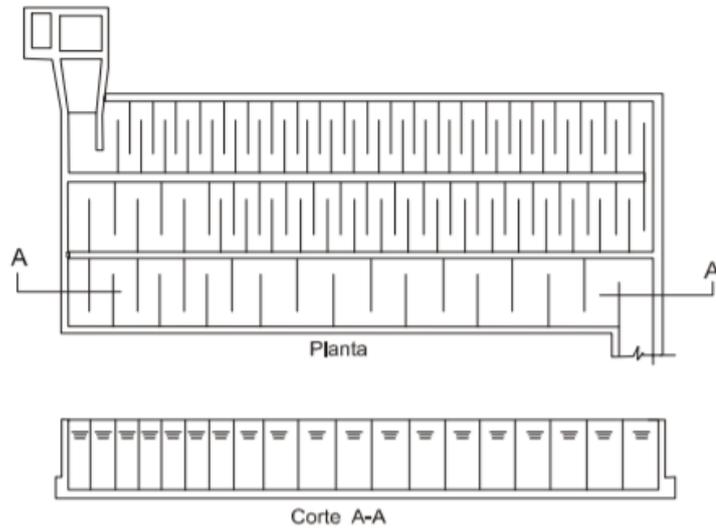


Figura 14: Floculador pantalla de flujo horizontal

Fuente: Tratamiento de agua (Andia, 2000)

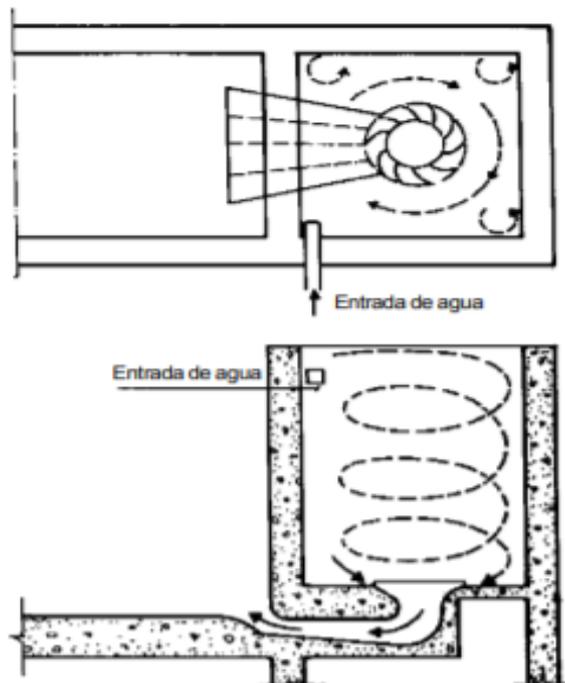


Figura 15: Floculador helicoidal

Fuente: Tratamiento de agua (Andia, 2000)

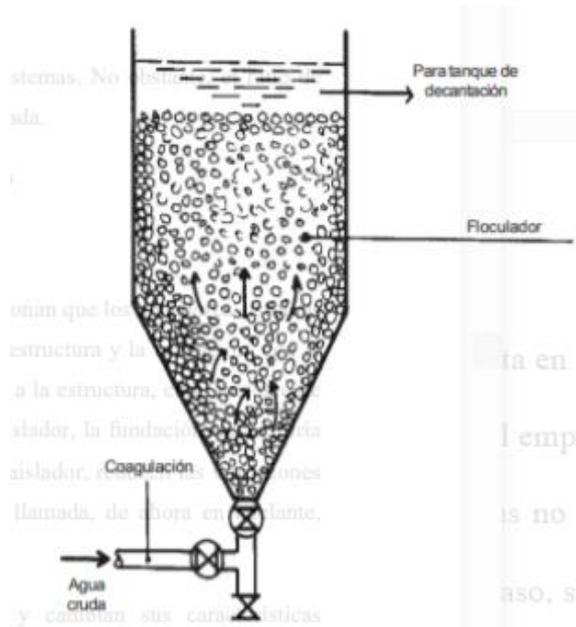


Figura 16: Floculador medio poroso

Fuente: Tratamiento de agua (Andia, 2000)

- Mecánicos

Los floculadores mecánicos utilizan energía de una fuente externa, normalmente un motor eléctrico acoplado a un intercambiador de velocidades, que hace posible la pronta variación de la intensidad de agitación. Entre los más usados se encuentran los floculadores de paletas y turbinas.

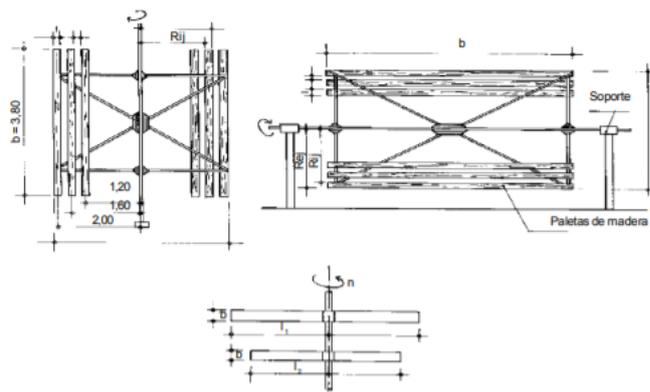


Figura 17: Paleta

Fuente: Tratamiento de agua (Andia, 2000)

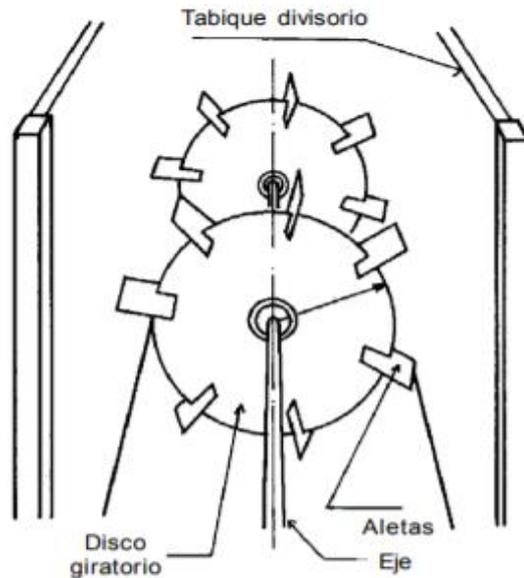


Figura 18: Turbina

Fuente: Tratamiento de Agua de Floculación (Andia, 2000)

2.2.14 Modelo matemático de la floculación

En referencia a Canepa, (2000):

Las primeras teorías sobre la cinética de la floculación fueron desarrolladas por Smoluchowski, quien derivó las expresiones básicas para la frecuencia de colisión de las partículas bajo el efecto del movimiento browniano y en régimen de flujo laminar, y desarrolló la siguiente expresión, que es representativa de la floculación pericinética.

$$J = 1/6 n_1 n_2 (d_1 + d_2) \frac{dv}{dz} \quad (1)$$

donde:

J = número de colisiones entre las partículas

n₁ = concentración de partículas de diámetro (d₁)

n₂ = concentración de partículas de diámetro (d₂)

$\frac{dv}{dz}$ = energía desarrollada en el proceso

Camp y Stein fueron los primeros en determinar que, para fines prácticos, era necesario añadir turbulencia al proceso y generalizaron la ecuación de Smoluchowski para incluir las condiciones de flujo turbulento. Así, de acuerdo con la expresión de Camp y Stein, la frecuencia de colisiones está expresada por la siguiente ecuación:

$$H_{ij} = 4/3 \cdot n_i \cdot n_j \cdot R_{ij}^3 \cdot G \quad (2)$$

donde:

(H_{ij}) es el número de colisiones por unidad de tiempo y por unidad de volumen entre las partículas de radio (R_i) y (R_j); (n_i) y (n_j) son las concentraciones de las partículas colisionantes; (R_{ij}) es el radio de colisión ($R_i + R_j$) y (G) es el gradiente de velocidad que, según ellos, es igual a:

$$G = \sqrt{\frac{\varepsilon}{\nu}} \quad (3)$$

donde:

(ε) = potencia total por unidad de volumen del fluido

(ν) = viscosidad cinemática.

La principal objeción a la expresión (2) se basa en el hecho de que esta ecuación fue deducida para condiciones de flujo laminar y que pierde mucho de su sentido físico cuando se la aplica a flocladores cuyo flujo es en su mayor parte turbulento, según expresaron los autores, posteriormente Snel y Arboleda.

Los gradientes de velocidad a una escala de longitud dada no contribuirán significativamente a la colisión de partículas más grandes o más pequeñas que esta escala. Así, el rígido modelo desarrollado por Smoluchowski para condiciones de flujo laminar no es enteramente aplicable a floclación turbulenta. Otras alternativas fueron estudiadas por Frisch, Levich, Saffman y Turner, quienes desarrollaron expresiones estrictamente formuladas para flujo turbulento.

$$J = 12 \pi \beta n_1 n_2 R_{1-2} G \text{ (Levich)} \quad (4)$$

$$J = 1.3 R^2 n_1 n_2 G \text{ (Turner)} \quad (5)$$

Los dos últimos autores llegaron a expresiones que, excepto por las constantes numéricas, son equivalentes a la ecuación (2). El supuesto básico era que las partículas involucradas son mucho más pequeñas que la más pequeña escala de turbulencia, un supuesto que se encuentra fuertemente justificado en los sistemas de floclación encontrados en la práctica del tratamiento de las aguas. Los dos últimos autores llegaron a expresiones que, excepto por las constantes numéricas, son equivalentes a la ecuación (2). El supuesto básico era que las partículas involucradas son mucho más pequeñas que la más

pequeña escala de turbulencia, un supuesto que se encuentra fuertemente justificado en los sistemas de floculación encontrados en la práctica del tratamiento de las aguas.

A pesar de sus limitaciones teóricas, la ecuación (2) ha tenido amplia aplicación entre los ingenieros sanitarios y muchos investigadores la han encontrado válida bajo determinadas condiciones.

Formas integradas de la ecuación (2) para diferentes tipos de flujo fueron presentadas por Fair, Gemmell, Tambo, Swift y Friedlander, Wang y otros.

Partiendo de la ecuación de Smoluchowski, Harris et al., establecieron un modelo matemático para la velocidad de aglomeración de las partículas, admitiendo que el volumen de la partícula resultante es igual a la suma de los volúmenes de las partículas aglomeradas y que su densidad permanece constante. A la menor de las partículas agregadas se la llama partícula primaria y su concentración por unidad de volumen es (n_1). Una fracción de las partículas que colisionan se aglomera, otra no lo hace y otras se pueden des aglomerar, de acuerdo con las características de las partículas, del coagulante y del flujo (por ejemplo, estabilidad de los coloides, esfuerzos hidrodinámicos). En las ecuaciones que siguen se introducirá, por lo tanto, un coeficiente de aglomeración (n), que representa a la fracción del número total de colisiones realizadas con éxito. Los flóculos restantes están constituidos por las partículas $i, j, k \dots$, cuyas concentraciones por unidad de volumen son $n_i, n_j, n_k \dots$ y sus radios, $i^{1/3}R, j^{1/3}R, k^{1/3}R \dots$

Inicialmente, para una suspensión dispersa, $t = 0$

$$\frac{dn_1}{dT} = -n \delta a^3 \frac{dv}{dy} \phi n_1 \quad (6)$$

donde: (δ) es una función de la distribución de tamaños definida por:

$$\delta = \frac{\sum_{i=0}^{p-1} n_i [i^{1/3} + 1]^3}{\sum_{i=0}^p i \cdot n_i} \quad (7)$$

(a) es una relación entre el radio de colisión de un flóculo y su radio físico:

$$a = \frac{R_i R_j}{r_i^{1/3} + j^{1/3}} \quad (8)$$

(ϕ) es una fracción del volumen del flóculo:

$$\Phi = \frac{4}{3} \pi R_1^3 \sum_{i=1}^p i n_i \quad (9)$$

y, $\frac{dv}{dy}$ es el gradiente de velocidad

El tamaño máximo de los flóculos está limitado a un flóculo de orden (p). El modelo propuesto no permite la determinación del tamaño máximo del flóculo. Un enfoque más simple fue tomado por Hudson, quien admite una distribución bimodal compuesta solamente por flóculos y partículas primarias cuyas variaciones de tamaño en cada grupo no son significativas.

En estas condiciones, $\delta = a = 1$ y la ecuación (6) se puede simplificar de la siguiente forma:

$$\frac{dn_1}{dt} = -\eta \cdot \frac{4}{3} n_F R_F^3 \cdot \frac{dv}{dy} \cdot n_1 \quad (10)$$

dónde: n_F y R_F son, respectivamente, el número de flóculos por unidad de volumen y el radio de cada flóculo. Siendo: (\forall) el volumen total de flóculos y dv/dy , el gradiente de velocidad medio, la ecuación (7) puede reescribirse del siguiente modo:

$$\frac{dn_1}{n_1} = -\eta \frac{G}{\pi} \forall dT \quad (11)$$

cuya integración resulta en:

$$\frac{n_1}{n_0} = e^{-\eta \frac{\forall G}{\pi} T} \quad (12)$$

que es la ecuación de Hudson. En esta ecuación (n_0) representa el material en suspensión al inicio de la floculación ($t = 0$) y (n_1) representa la concentración remanente de partículas (número de flóculos) después de un tiempo (T). La conclusión más importante a que se llega mediante la ecuación de Hudson es que la velocidad de floculación depende del volumen total de flóculos y no del número ni del tamaño de las partículas primarias. La ecuación (8) se aplica a la decantación en manto de lodos.

Considerando al tanque de floculación como un reactor en serie con número de cámaras (m), Harris et al., demostraron que:

$$\frac{n_1}{n_m} = \left(1 + \eta \phi G \frac{T}{m}\right)^m$$

Donde (n1) y (nm) representan las concentraciones de las partículas en la primera cámara y en la cámara de orden (m), respectivamente, y (T), el tiempo total de floculación. La ecuación anterior muestra claramente que una eficiencia dada puede ser obtenida en tiempos cada vez menores a medida que aumenta el número de cámaras de floculación en serie.

Harris et al. y Parker et al. identifican dos formas de ruptura de los flóculos: (1) por erosión de las partículas primarias de la superficie de los flóculos y (2) por fractura del flóculo propiamente dicho, para formar un grupo de aglomerados floculantes de menor tamaño.

Para comprender el mecanismo de fragmentación de los flóculos, deben distinguirse dos modos de acción hidrodinámica de acuerdo con el tamaño de los flóculos, que pueden ser mayores o menores que la microescala de turbulencia:

$$n = (v^3 / \varepsilon)^{1/4} \quad (13)$$

donde:

(ε) = función de la disipación de energía por unidad de masa del fluido

(v) = coeficiente de viscosidad cinemática

Tomando la ecuación de Camp y Stein:

$$G = \left(\frac{\varepsilon}{v} \right)^{1/2} \quad (14)$$

se puede estimar la microescala de turbulencia en función de G:

$$n = \left(\frac{v}{G} \right)^{1/2} \quad (15)$$

Es útil estimar la microescala de turbulencia para algunos valores de (G) usualmente aplicados al agua en la floculación. Por ejemplo:

Para G = 70 s⁻¹, η = 0,13 mm

Para G = 30 s⁻¹, η = 0,2 mm

Para G = 5 s⁻¹, η = 0,5 mm

Para flóculos menores que (η), la fragmentación no es significativa y sería causada por remolinos en la zona de flujo laminar, donde la disipación de energía se realiza por efecto de la viscosidad; los flóculos mayores que (η) son rotos por acción de la turbulencia con disipación de energía por efecto de la inercia.

El máximo tamaño estable de un flóculo será:

$$d = \frac{C}{G^n} \quad (16)$$

donde:

C = coeficiente que depende de las propiedades de los flóculos y del agua

G = gradiente medio de velocidad,

n = exponente que depende del modo en que se rompen los flóculos y de la escala de turbulencia que causa su fragmentación:

n = 2, para la erosión de flóculos mayores que (η)

n = 1, para la erosión de flóculos menores que (η)

n = 1/2, para la ruptura de los flóculos, independientemente de su tamaño

Según Argaman y Kaufman (16), el modelo teórico de la floculación, en su forma más general, que combina los efectos de aglomeración y ruptura de flóculos, puede ser representado por:

$$\frac{dN}{dt} = \text{función de aglomeración} + \text{función de ruptura} \quad (17)$$

La función de aglomeración o tasa de crecimiento de los flóculos es definida por Argaman y Kaufman como:

$$\frac{dN_A}{dt} = K_A N G \quad (18)$$

N = concentración de partículas primarias (m^{-3})

G = gradiente de velocidad (s^{-1})

K_A = coeficiente de aglomeración

La función de ruptura puede ser escrita de la siguiente forma:

$$\frac{dN_B}{dt} = K_B N_0 G^2 \quad (19)$$

N_0 = concentración inicial de partículas primarias al entrar en el floculador (m^{-3})

K_B = coeficiente de ruptura

Si reemplazamos (18) en la ecuación (17), esta se convierte en:

$$\left[\frac{nV}{r^{2/3}} \right]^2 I = K_A N G + K_B N G^2 \quad (20)$$

o, integrando entre ($t = 0$; $N_0 = N$) y ($t = T$; $N_t = N$), se tiene:

$$\frac{N_o}{N_t} = \frac{1 + K_A GT}{1 + K_B G^2 T} \quad (21)$$

Esta ecuación es válida para un reactor de una sola cámara.

Admitiendo que los coeficientes K_A y K_B se mantienen constantes en un tanque con m cámaras de floculación en serie (véase *Tabla 2*) Argaman y Kaufman encontraron la siguiente expresión:

$$\frac{N_o}{N_m} = \frac{(1 + K_A GT / m)^m}{1 + K_B G^2 T / m \int_{i=0}^{m-1} (1 + K_A GT / m)^j} \quad (22)$$

donde N_m es la concentración de partículas que sale de la última cámara de floculación y T es el tiempo total promedio de floculación:

Tabla 2 Valores de las constantes de aglomeración y ruptura

Constantes	Paletas	Turbinas
K_A	$5,1 \times 10^{-5}$	3.9×10^{-5}
K_B	1.1×10^{-7}	0.9×10^{-7}

El trabajo experimental llevado a cabo por Argaman y Kaufman consistió en pruebas de floculación, mediciones del tamaño de los flóculos y de la turbulencia. En la *Tabla 2*, se puede apreciar una síntesis de los resultados obtenidos, que representa la ecuación (22), interpretada a continuación:

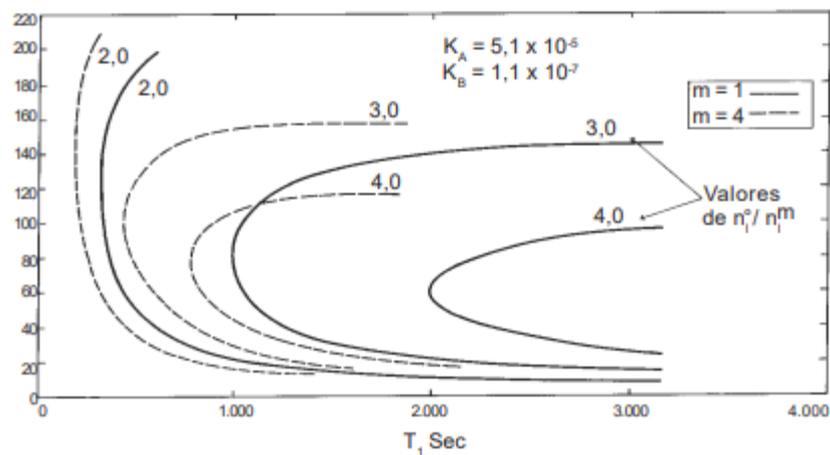


Figura 19: Relación entre G , T y m según la ecuación de Argaman y Kaufman.

- Los parámetros físicos que afectan directamente la eficiencia de un floculador son el tiempo de residencia, la compartimentalización y

distribución, la potencia total desarrollada y las características del campo de turbulencia.

- El efecto del espectro de turbulencia para un mecanismo de agitación dado puede expresarse mediante el gradiente de velocidad, un coeficiente de eficiencia de las paletas (K_A) y un coeficiente del espectro de energía (K_B).
- Para un tiempo de residencia dado, la eficiencia se incrementa en forma casi lineal con el gradiente de velocidad hasta que este alcanza un valor máximo, más allá del cual cualquier incremento adicional resulta en una disminución de la eficiencia.
- Para una eficiencia dada, existe un tiempo de residencia mínimo. El gradiente de velocidad asociado con este tiempo de residencia constituye un valor óptimo para una eficiencia dada, en el sentido de que cualquier otro valor, mayor o menor, dará como resultado una eficiencia menor.
- La compartimentalización de un sistema de flujo continuo ejerce una influencia considerable en la eficiencia del floculador. En sistemas con igual magnitud de tiempo de residencia se obtendrá mayor eficiencia que en aquellos en que se ha incrementado el número de compartimentos del floculador.

Bratby et al. demuestran que la relación equivalente para un ensayo de coagulación o un reactor en flujo de pistón (plug flow, $m = 0$) es la siguiente:

$$\frac{N_o}{N} = \left[\frac{K_B}{K_A} G - \left(\Sigma - \frac{K_B}{K_A} G \right) e^{-K_A G T} \right]^{-1} \quad (23)$$

Bratby et al. han demostrado que el coeficiente de ruptura de flóculos K_B es dependiente del gradiente de velocidad.

$$K_B = K_1 \ln G + k_2 \quad (24)$$

donde k_1 y k_2 son constantes para una determinada agua.

La *Tabla 2* Valores de las constantes de aglomeración y ruptura muestra que K_A y K_B dependen de las propiedades fisicoquímicas del agua.

Tabla 3: Constantes de floculación Coagulante: Sulfato de aluminio

Calidad del agua cruda	Valores de G	$K_A(10)^{-4}$	$K_B(10)^{-7}$	Referencia
Turb. Artificial (25 mg/L)	15 – 200	0.51	1.10	Argaman y Kaufman
Turb. Artificial (40 UN)	40 – 222	2.5	3.5 ^a	Bratby et al.
Turb. Artificial (85 UN)	90	6.5	1.7	Richter
Agua superficial (8 UN)	5 - 450	1.1	30	Hedberg (1970)
Agua superficial (80UN)	30 – 80	1.1	0.7	Richter (1984)
Agua superficial (2.5UN)	100	0.29	1.64	Bratby
Agua superficial (5UN)	20 - 90	0.16	0.53	Richter

Fuente: Elaboración propia

Se verifica que, para valores bajos de G, el coeficiente de ruptura es bastante pequeño, de manera que, en las condiciones de floculación normalmente empleadas en la práctica (G entre 70 y 15 s⁻¹), la ecuación (22) se puede simplificar así:

$$\frac{N_o}{N_m} = \left(1 + K_A G \frac{T}{m}\right)^m \quad (25)$$

A partir de este modelo simplificado y con los resultados de cerca de 300 ensayos de floculación realizados con agua del río Iguazú, en Curitiba, Brasil, Richter encontró la siguiente correlación entre el coeficiente de aglomeración K_A y la turbiedad de agua cruda N_o (Ver *Figura 20*)

$$K_A = 0.192 \times 10^{-4} N_0^{0.8} \quad (26)$$

Se demuestra, así, que el coeficiente de aglomeración tampoco es constante; varía con la turbiedad del agua cruda. Cuanto mayor es la turbiedad de esta, mayor será el coeficiente de aglomeración. En la práctica, se sabe que siempre es más difícil flocular aguas de baja turbiedad.

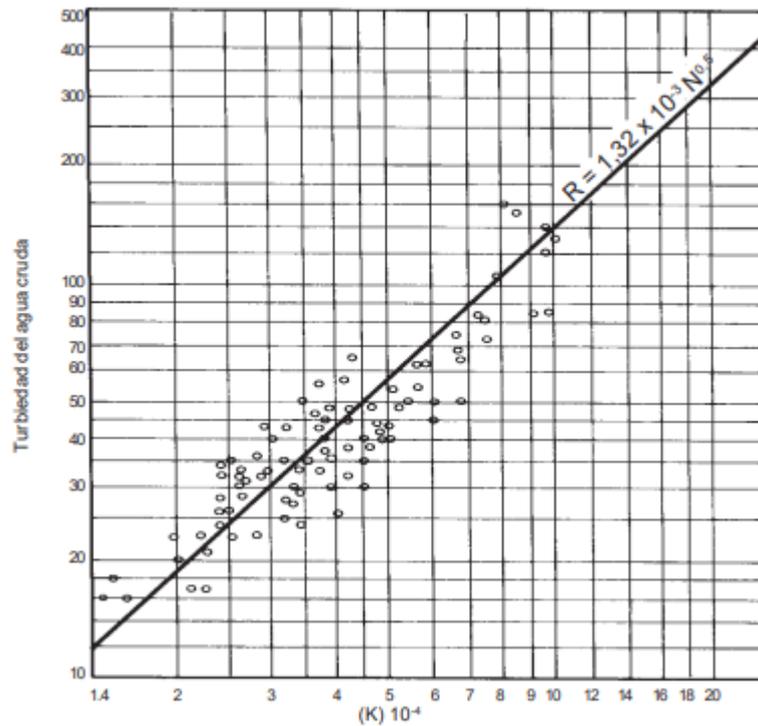


Figura 20: Correlación entre la constante de floculación y la turbiedad del agua cruda del río Iguazú

Fuente: SANEPAR, Compañía de saneamiento de Paraná - Agua cruda del Río Iguazú (Curitiba, Brasil)

Villegas y Letterman realizaron un estudio de gran importancia práctica, en el cual relacionaron el tiempo de floculación (T) y el gradiente de velocidad (G) con la dosis de coagulante.

La Figura 21 muestra los resultados experimentales con valores de (G) de 500, 200, 100 y 25 s⁻¹. Nótese que para valores de G < 100 s⁻¹, la turbiedad residual decrece a medida que se prolonga el tiempo de floculación, hasta llegar a un mínimo después del cual comienza a incrementarse.

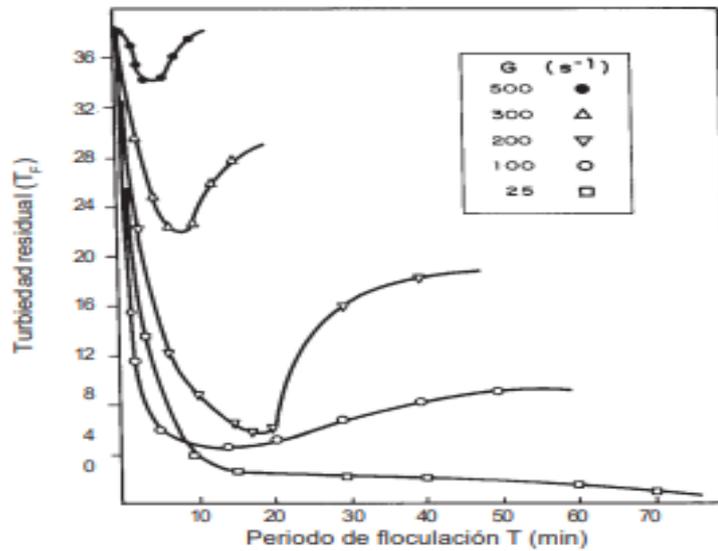


Figura 21: Turbiedad residual versus tiempos de floculación para diversos valores de G (20)

Fuente: Tratamiento de agua para consumo humano (Vargas,2004)

La Figura 22 se obtiene al graficar los valores de turbiedad residual para tiempos de floculación de 10, 15, 20, 30, 40 y 120 minutos. De acuerdo con la familia de curvas de la Figura 22, para cada turbiedad residual (n^*) existe un valor correspondiente de gradiente óptimo de velocidad (G^*). El valor óptimo de (G^*), en este caso, disminuye de 40 s^{-1} cuando $T = 10 \text{ min}$, y a 20 s^{-1} cuando $T = 120 \text{ min}$.

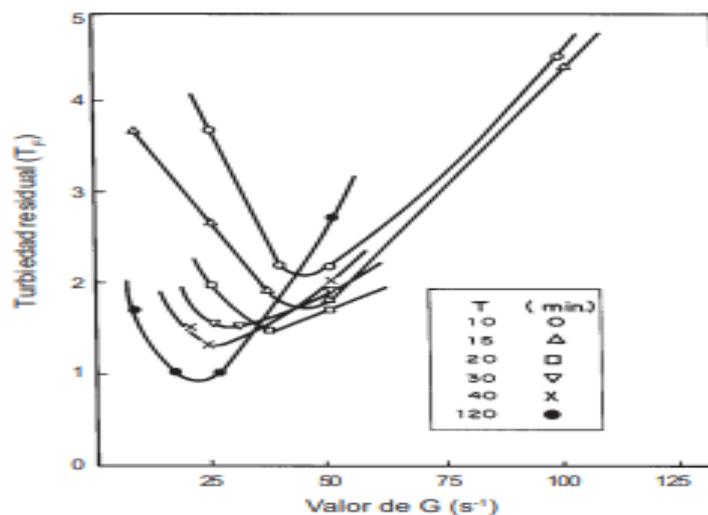


Figura 22: Turbiedad residual versus valor óptimo de G para diversos tiempos de floculación.

Fuente: Tratamiento de agua para consumo humano (Vargas,2004)

La Figura 23 es una representación logarítmica del valor óptimo de (G^*) y del tiempo de floculación (T), para una serie de experiencias. Las series A y B se diferencian entre sí solamente en las condiciones de mezcla rápida (gradiente y tiempo de mezcla). Los resultados de ambas series, al coincidir en la misma línea, indican que las condiciones de mezcla rápida no tienen mucho efecto en la relación entre los parámetros (G) y (T) del proceso de floculación. Las series C y D complementan estas experiencias haciendo variar la dosis del coagulante. Al incrementarse la dosis de coagulante, las rectas tienden hacia las abscisas. Las líneas rectas de mayor ajuste de todas las series tienen esencialmente la misma pendiente.

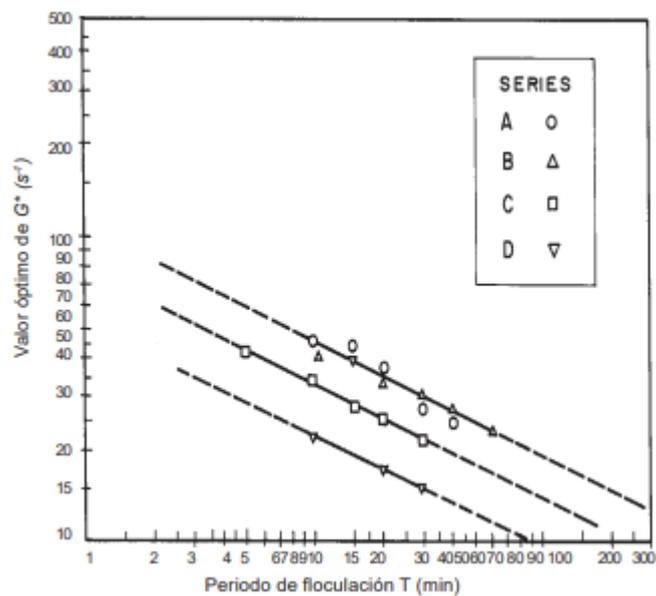


Figura 23: Valor óptimo de G versus periodo de floculación.

Fuente: Tratamiento de agua para consumo humano (Vargas,2004)

Del análisis de estas curvas se obtiene la siguiente expresión matemática:

$$(G^*)^{2.8} T = K \tag{27}$$

siendo los valores de $K = 4,9 \times 10$, $1,9 \times 10$ y $0,7 \times 10$ para dosis de sulfato de 10 mg/L, 25 mg/L y 50 mg/L, respectivamente.

El hecho de que (K) es directamente proporcional a $(G^*)^{2.8}$ cuando (T) permanece constante y decrece cuando se aumenta la dosis de sulfato, indica que el valor de (G) óptimo disminuye al aumentar la dosis de sulfato.

El hecho de que (K) es directamente proporcional a $(G^*)^{2.8}$ cuando (T) permanece constante y decrece cuando se aumenta la dosis de sulfato, indica que el valor de (G) óptimo disminuye al aumentar la dosis de sulfato.

Diversos proyectos realizados en el Perú, Costa Rica y Brasil en colaboración con el CEPIS/OPS, permiten generalizar la ecuación (27) en la forma siguiente:

$$G^n T = K \quad (28)$$

en la cual los valores de (n) y (K) varían en función de la calidad de cada agua. Así, se pueden obtener curvas representativas como las indicadas en la *Figura 24*

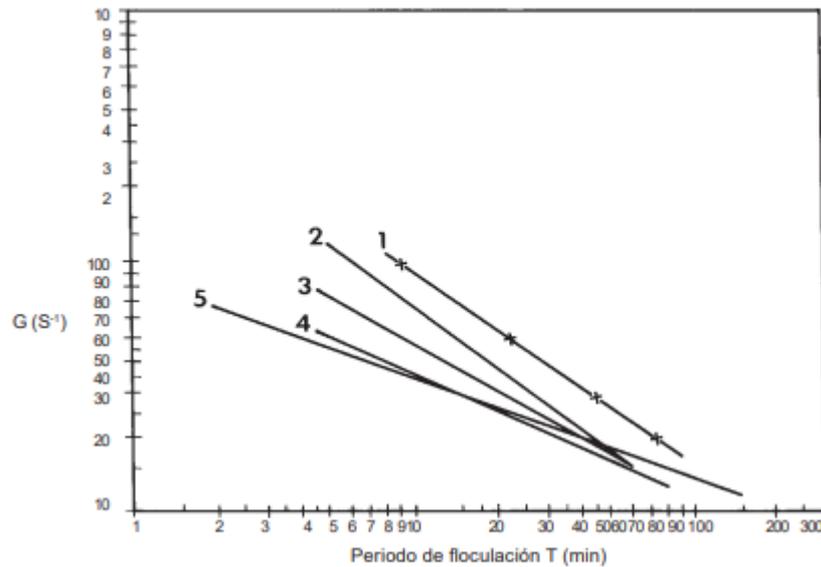


Figura 24: Correlación de gradientes de velocidad óptimos versus tiempo de floculación.

Fuente: Tratamiento de agua para consumo humano (Vargas,2004)

Snel y Arboleda demostraron que la ecuación del gradiente de velocidad (G), deducida por Camp y Stein:

$$G = \sqrt{\frac{P}{\mu \nabla}} \quad (29)$$

no es el parámetro más apropiado para medir la intensidad de agitación en un floculador de flujo turbulento.

Del mismo modo que en el régimen laminar, en el cual la tensión longitudinal debida al rozamiento entre dos láminas de corriente es igual a:

$$\left(\mu \frac{dv}{dy}\right) \quad (30)$$

existe otra tensión debida al régimen turbulento, denominada esfuerzo cortante de Reynolds. Esta tensión está definida por:

$$\left(\tau = \eta \frac{dv}{dy} \right) \quad (31)$$

donde (η) es el coeficiente de viscosidad virtual, de turbulencia o viscosidad de remolino.

Por lo tanto, la tensión total estará dada por:

$$\tau = (\mu + \eta) \frac{dv}{dy} \quad (32)$$

y así, la ecuación (29) tomará la siguiente forma

$$G = \sqrt{\frac{P}{(\mu + \eta)\nabla}} \quad (33)$$

Esta ecuación se vuelve igual a la expresión (29) cuando la disipación de energía debida a la turbulencia es despreciable, o sea cuando el flujo es laminar. Cuando el flujo es turbulento, el coeficiente de viscosidad turbulenta aumenta rápidamente al incrementarse el número de Reynolds y alcanza valores muchas veces superiores a la viscosidad dinámica. En consecuencia, la viscosidad dinámica puede despreciarse y la ecuación (33) se puede simplificar así:

$$G = \sqrt{\frac{P}{\eta\nabla}} \quad (34)$$

El coeficiente de viscosidad turbulenta está definido por la expresión:

$$\eta = \rho\lambda^2 \frac{dv}{dy} \quad \text{o} \quad \eta = \rho\lambda^2 G \quad (35)$$

donde:

ρ = masa específica

λ = longitud de la escala de turbulencia físicamente definida como la distancia hasta la cual se disgrega un conglomerado de partículas sin perder su identidad. Sustituyendo (35) en (34), resulta:

$$G = \left(\frac{P}{\rho\lambda^2\nabla} \right)^{1/3} \quad (36)$$

donde P/V es igual a ϵ , que es la potencia disipada por unidad de masa del fluido.

$$G = \left(\frac{\epsilon}{\lambda^2}\right)^{1/3} \quad (37)$$

Esta es la forma que Snel y Arboleda proponen para la ecuación (33) cuando el flujo es turbulento.

La pérdida de carga total es la suma de dos parciales. La primera, de menor cuantía, debida a la fricción en el canal; y la segunda, la principal, debida a los cambios de dirección. Esta puede ser calculada mediante la siguiente ecuación:

$$h_1 = \left[\frac{nV}{r^{2/3}} \right]^2 l \quad (38)$$

dónde: n = coeficiente de fricción de Manning

V = velocidad del flujo

r = radio hidráulico de los canales

l = longitud de canales en cada tramo

La pérdida de carga debida a las vueltas:

$$h_1 = K \frac{V^2}{2g} \quad (39)$$

K = coeficiente de pérdida de carga

2.2.15. Procesos posteriores de tratamiento

- Sedimentación:

En este proceso los flóculos previamente desarrollados decantan porque alcanzan un peso específico mayor al agua. Los flóculos deben ser lo suficientemente grande y agrupados para que puedan caer por su peso en esta unidad. De la eficiencia de esta unidad depende en gran medida la eficiencia de los filtros. (Bratby, 2016).

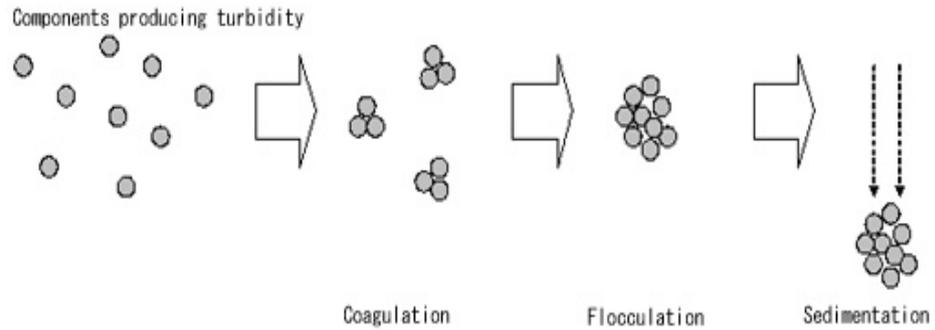


Figura 25: Esquematación del crecimiento de flóculos a través de la coagulación, floculación y sedimentación.

Fuente: Flocculation (Tripaty & Rajan, 2006)

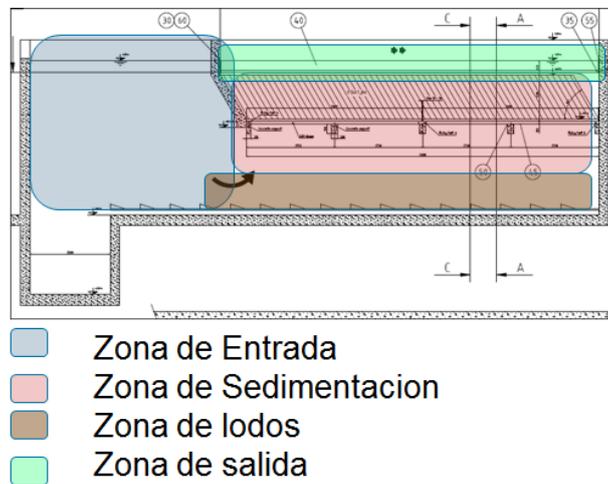


Figura 26: Sedimentador hidráulico horizontal de forma rectangular.

Fuente: Tratamiento de agua (Andia, 2000)

- Filtración:

La filtración consiste en forzar el paso del agua a través de medios porosos. El sistema de filtración consta de filtros con diferentes tamaños de granos y, a menudo, se compone de arena, grava y carbón. El resultado de esta unidad es un efluente con mínima presencia de coloides y flóculos, es decir el agua es transparente y no tiene coloración, puesto que se logra remover un 99% los sólidos suspendidos del agua. (Canepa, 2000)



Figura 27: Batería de filtros.

Fuente: Tratamiento de agua (Andia, 2000)

El filtro lento se utiliza principalmente para eliminar la turbiedad del agua, siempre y cuando se maneje unos indicadores medios (de 10 a 20 unidades nefelométricas de turbiedad), pero si se diseña y opera apropiadamente, puede ser considerado como un sistema de desinfección del agua. La filtración lenta de arena (FLA) consiste en un conjunto de procesos físicos y biológicos que destruyen los microorganismos patógenos presentes en el agua no apta para consumo humano. Por esta característica, se puede considerar como una tecnología limpia que purifica el agua sin crear una fuente adicional de contaminación para el ambiente y el consumidor (Arboleda, 2010).

- Desinfección:

Los patógenos son microorganismos que causan enfermedades en los seres humanos. Estos se encuentran presentes en fuentes de agua superficial, y se pueden agrupar en bacterias, virus y protozoarios. El agua además de lograr una apariencia de transparencia, debe ser apta para consumos por lo que es necesario el proceso de desinfección que es la única barrera para que microorganismos causantes de enfermedades sean ingeridos por la población. Es importante acotar que durante los procesos previos - coagulación, sedimentación y filtración se produce remoción de microorganismos patógenos, sin embargo, su remoción no llega a cubrir la

totalidad, por lo cual es necesario este proceso de desinfección que consiste principalmente en la inactivación de microorganismos. Para poner en contexto, la inactivación no implica la muerte del microorganismo, sino su transformación de modo que no cause enfermedad. Adicional a la inactivación, este proceso debe garantizar un mantenimiento residual en el sistema de distribución. (Tchobanoglous, Crittenden, Trussell, Hand, & Howe, 2012)

2.2.16. Factores que afectan la desinfección

Según Chulluncuy (2011), la efectividad de la desinfección se mide por el porcentaje de organismos muertos dentro de un tiempo, una temperatura y un pH prefijados. La resistencia de estos microorganismos varía, siendo las esporas bacterianas las más resistentes, le siguen en resistencia los quistes de protozoarios, virus entéricos y por último las bacterias vegetativas (coliformes). La presencia de sólidos reduce la eficacia de la desinfección debido a que los organismos asociados a estos sólidos pueden estar protegidos de la acción del agente desinfectante físico o químico. Un factor también importante es el tipo de agente desinfectante. A continuación, se adjunta una tabla que referencia el tipo de agente con una evaluación de su efectividad.

Tabla 4: Agente desinfectante y características

Descripción	Agente desinfectante				
	Cloro libre	Cloro combinado	Dióxido de cloro	Ozono	Luz Ultravioleta
Efectividad frente a:					
Bacteria	Excelente	Bien	Excelente	Excelente	Bien
Virus	Excelente	Regular	Excelente	Excelente	Regular
Protozoarios	Regular a pobre	Pobre	Bien	Bien	Excelente
Endosporas	Bueno a pobre	Pobre	Regular	Excelente	Regular
Efecto residual	Si	Si	Si	No	No
Presentación	Gas líquido en tanque. También en estado líquido y en estado sólido de	Gas líquido en tanque. También en estado líquido y en estado sólido de	Se produce con un generador a partir de la transformación de cloro. También tiene presentación	Se produce ozono haciendo circular oxígeno puro a través de	Se emplean lámparas de baja o mediana presión que emiten luz ultravioleta en longitud

hipoclorito sulfato de comercial un campo de onda de
de calcio. amonio líquida o eléctrico. 264nm.
sólida.

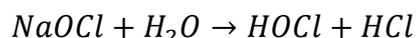
Fuente: (Tchobanoglous, Crittenden, Trussell, Hand, & Howe, 2012)

2.2.17. Cloración

Para la inactivación de estos agentes, el cloro es el agente desinfectante más importante; puede utilizarse en forma de gas, de líquido o de sal (hipoclorito de sodio). Es de fácil aplicación, manejo sencillo, transporte sencillo y bajo costo. Con respecto a su producción a escala industrial, puede encontrarse como gas comprimido en cilindros de acero de gran tamaño, típicamente de 150kg a 1 tonelada de peso. También se presenta en forma de hipoclorito de calcio (sólido) o hipoclorito de sodio (líquido), (Tchobanoglous, Crittenden, Trussell, Hand, & Howe, 2012).

Durante la cloración, se oxida la materia orgánica contenida en el agua. La química del cloro libre se puede resumir en las siguientes ecuaciones:

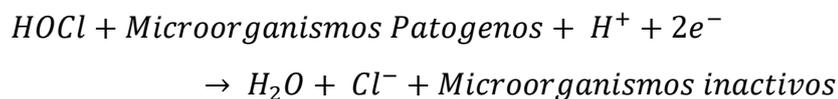
- Formación de ácido hipocloroso (HOCl): El ácido hipocloroso es el causante de la desinfección.



- Disociación del HOCl: La presencia del HOCl varía con el Ph, siendo su presencia mayor a Ph menores a 7.6. El OCl no tiene mucho potencial desinfectante.



- Inactivación de microorganismos: La desinfección es una reacción del ácido hipocloroso a ion Cl mientras los microorganismos están siendo inactivados.



En dosis adecuadas, el cloro no produce riesgos para el hombre ni para los animales. Asimismo, debe quedar un exceso de cloro para asegurar la desinfección durante su distribución en la red de agua. (Ordinola, 2019)

2.2.18. Fundamentos de la mecánica de Fluidos

Principio de conservación de la masa

Se denomina flujo másico “M” a la cantidad de masa de fluido que atraviesa una sección “A” (Hibbeler, 2021):

$$M = \frac{dm}{dt} = \int \rho Q = \int \rho v dA$$

Donde:

M: Flujo másico (kg/s)

m: masa (kg)

t: Tiempo (s)

ρ : Densidad (kg/m³)

v: Velocidad (m/s)

Q: Caudal (m³/s)

A: Área (m²)

El principio de la conservación de la masa para un fluido incompresible (densidad constante) y uniforme establece que la masa al interior de un sistema permanece constante con el tiempo, es decir, la cantidad de agua que entra a un volumen de control es idéntica a la que sale. Esto se expresa matemáticamente por la ecuación de la continuidad:

$$\int Q = \sum Q_{entra} - \sum Q_{sale}$$
$$V_e A_e - V_s A_s = 0$$

Donde:

V: Velocidad promedio (m/s)

A: Área de sección (m²)

Por ejemplo: La siguiente figura muestra el flujo en una Tee.

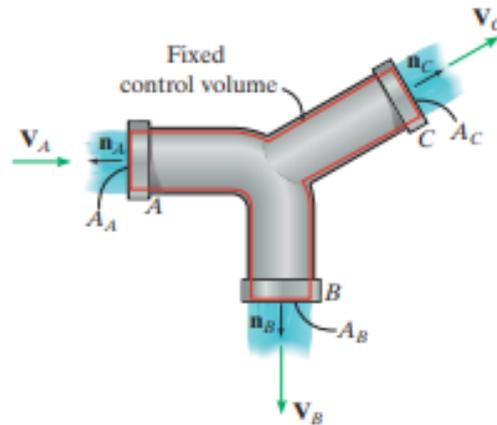


Figura 28: Continuidad de masa en Tee.

Fuente: Fluid mechanics in SI Units (Hibbeler, 2021)

Aplicando el teorema de la conservación de la continuidad:

$$-V_A A_A + V_B A_B + V_C A_C = 0$$

2.2.19. Principio de la conservación de la Energía:

Establece que la energía que posee el fluido en movimiento a lo largo de un conducto cerrado permanece constante a lo largo de su recorrido (Streeter, 1970). La energía de un fluido tiene por elementos:

- Energía cinética es la energía debido a la velocidad que posea el fluido
- Energía potencial la energía debido a la altitud que un fluido posea
- Energía de presión: es la energía que un fluido contiene debido a la presión que posee.
- La pérdida de energía es la energía que se pierde por rozamiento, cambio de dirección o cambio de sección o por cualquier fenómeno local que genere turbulencia.

Matemáticamente se expresa por la ecuación de Bernoulli (Ver Figura 29):

$$\frac{p_1}{\rho g} + \frac{V_1^2}{2g} + z_1 - h_l = \frac{p_2}{\rho g} + \frac{V_2^2}{2g} + z_2$$

Donde:

P_i : Presión (Pa)

V_i : Velocidad (m/s)

Z_i : Altura (m)

h_l : Pérdida de carga (m)

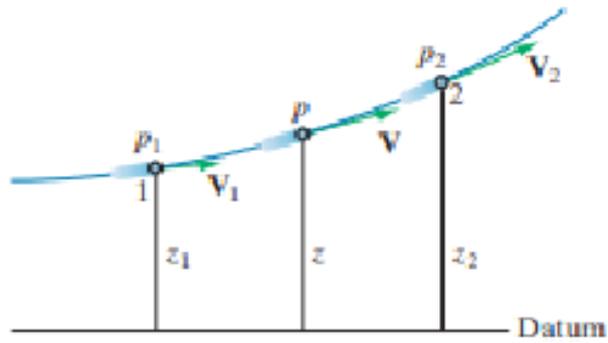


Figura 29: Ecuación de Bernoulli con pérdidas aplicado a una línea de corriente.

Fuente: Mecánica de fluidos (Streeter, 1970).

2.2.20. Pérdida de Carga:

Podemos distinguir entre dos tipos de pérdidas de carga, pérdidas primarias y pérdidas secundarias.

a) Pérdida de carga primaria

Las pérdidas primarias son producidas cuando el fluido se pone en contacto con la superficie del conducto, provocando que rocen unas capas de fluido con otras (flujo laminar) o el choque entre sí de las partículas del fluido entre sí (flujo turbulento).

Es decir, la pérdida de carga está influenciada por el tipo de régimen de flujo, los cuales pueden ser laminar o turbulento. En el flujo laminar, el fluido se mueve en capas paralelas sin corrientes cruzadas; mientras que en flujo turbulento el movimiento de un fluido se dará de forma caótica, las partículas del fluido se moverán desordenadamente y las trayectorias de las partículas formarán pequeños remolinos. Para determinar qué tipo de flujo se está produciendo, se emplea el número de Reynolds. El número de Reynolds refleja la relación de fuerzas de inercia a fuerzas de fricción viscosas.

El número de Reynolds se calcula mediante la siguiente expresión:

$$N_R = \frac{D \cdot v \cdot \rho}{\mu}$$

Donde:

N_R : Numero de Reynolds

D: Diámetro de la tubería

V: Velocidad del líquido

ρ : Densidad del líquido

μ : Viscosidad del líquido

En una tubería, se considera:

$Re < 2100$ el

flujo sigue un
comportamiento

laminar

$2100 < Re <$

4000 zona de
transición

laminar a

turbulento

$Re > 4000$ el

flujo es

turbulento

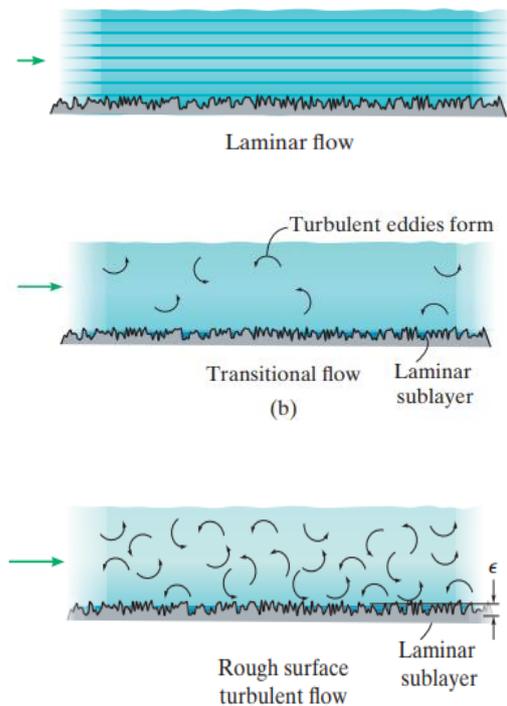


Figura 30: Regímenes de flujo según Reynolds

Fuente: Fluid mechanics in SI Units (Hibbeler, 2021)

La estimación de la pérdida de carga según régimen (Hibbeler, 2021):

Flujo laminar: La pérdida de carga ocurre dentro del fluido, y debido a la fuerza de fricción desarrollada entre capas de fluidos cuando se deslizan entre diferentes velocidades. Se puede emplear la siguiente ecuación:

$$h_f = \frac{64 \cdot L \cdot v^2}{Nr \cdot D}$$

Donde:

h_f : pérdida de energía (m)

L: Longitud (m)

D: Diámetro de la tubería (m)

Nr: Número de Reynolds.

Flujo turbulento: la pérdida de carga se puede estimar empleando la ecuación empírica de Hazen-Williams:

$$h_f = 10.674 \frac{L \cdot Q^{1.852}}{C^{1.852} \cdot D^{4.78}}$$

Donde:

h_f : Pérdida de energía (m)

Q : Caudal (m³/s).

L : Longitud (m)

D : Diámetro de la tubería (m)

C : Constante del material.

b) Pérdida de cargas menores

Las pérdidas secundarias son producidas por la turbulencia ocasionada cuando el agua circula por un obstáculo colocado en la tubería que pueda obstruir su paso, o provocar un cambio en la trayectoria al implementar accesorios en sistemas de tubería como: codos, válvulas, reducciones, etc., así como en las transiciones de los conductos tales como el estrechamiento o expansión (Hibbeler, 2021).

Para la estimación de la pérdida de carga por accesorios se emplea la siguiente ecuación:

$$h_l = k \frac{V^2}{2g}$$

Donde:

h_l : Pérdida de carga hidráulica por accesorio (m)

k : Coeficiente adimensional

V : Velocidad (m/s)

g : Gravedad (m/s²)

Con respecto al factor K , este depende de las características y tipo accesorio que puede variar de fabricante en fabricante. Su valor real se puede determinar realizando estudios de calibración.

A continuación, se adjunta una tabla de valores referenciales para diferentes tipos de accesorios:

Tabla 5 Coeficiente de pérdida de carga menor.

Accesorio	Valor K
Codo 90 grados (Radio corto)	0.90
Codo 90 grados (Radio largo)	0.60
Codo 45 grados (Radio corto)	0.40
Tee con flujo en línea recta	0.40
Tee con salida bilateral	1.80
Válvula compuerta abierta	0.19

Fuente: Fluid mechanics in SI Units (Hibbeler, 2021)

2.2.21. Aplicación de la mecánica de fluidos a inyector Venturi:

Los tubos Venturi son dispositivos hidráulicos que se emplean comúnmente con fines de riego de fertilizantes en agricultura. (Frizzone et al., (2012), citado por (Manzano & Palau, 2005)). Su funcionamiento se basa en el principio de caída de presión para succionar productos químicos provenientes de un tanque de almacenamiento hacia una tubería (Hoffman et al., 2007, citado por (Manzano & Palau, 2005)).

Según Manzano & Palau (2005), el funcionamiento de un inyector Venturi (cuya sección típica se muestra en la Figura 31) se explica fundamenta en:

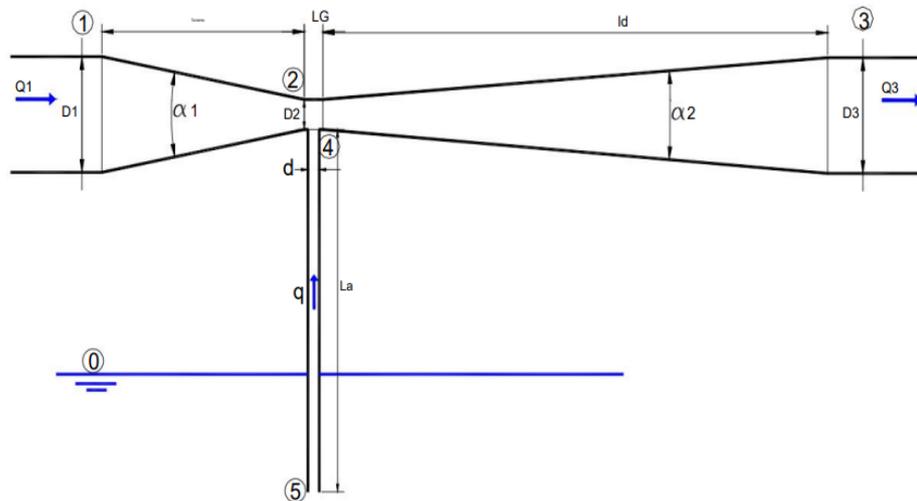


Figura 31: Sección del inyector Venturi, geometría y dirección del flujo

Fuente: (Montalvo, T; 2004, citado por (Manzano & Palau, 2005)).

Cuando se aspira la solución ($Q_1 + q = Q_2$), la ecuación de Bernoulli entre los tramos 1 (entrada) y 2 (garganta), es:

$$\frac{P_1}{\gamma} + \frac{V_1^2}{2g} = \frac{P_2}{\gamma} + (1 + K_t) \frac{V_2'^2}{2g}$$

Donde:

K_t es el coeficiente de resistencia de pérdidas menores para la boquilla.

La velocidad V_2' :

$$V_2' = \frac{Q_2}{\frac{\pi D_2^2}{4}}$$

El coeficiente K_t estimar según la siguiente expresión (Idel'cik, I.E.; 1960, citado por (Manzano & Palau, 2005)):

$$K_t = \left(0,04 \cdot (1 - \beta^2) + \frac{f}{8 \sin\left(\frac{\alpha_1}{2}\right)} (1 - \beta^2) \right)$$

Donde:

α_1 es el ángulo de abertura del difusor.

β es la relación de diámetros

$$\beta = \frac{D_2}{D_1}$$

La presión en la garganta:

$$\frac{P_2}{\gamma} = \frac{P_1}{\gamma} + [\beta^4 - (1 + K_t)] \frac{V_2'^2}{2g}$$

La velocidad en la garganta:

$$V_2' = \sqrt{2g \left(\frac{1}{1 + K_t - \beta^4} \right) \frac{P_1 - P_2}{\gamma}}$$

La pérdida de carga:

$$h_t = \left(0,04 \cdot (1 - \beta^2) + \frac{f}{8 \sin\left(\frac{\alpha_1}{2}\right)} (1 - \beta^2) \right) \frac{\left(\frac{Q_1 + q}{\frac{\pi D_2^2}{4}} \right)^2}{2g}$$

La presión a la salida del difusor de

$$\frac{P_3}{\gamma} = \frac{P_1}{\gamma} - K_t \frac{V_2'^2}{2g}$$

Si se conoce de antemano la presión en la garganta, el caudal inyectado “q” se puede obtener con un cálculo similar entre 0 y 2.

$$\frac{P_0}{\gamma} + Z_0 + \frac{V_0^2}{2g} = \frac{P_2}{\gamma} + Z_2 + \frac{V_2^2}{2g}$$

2.2.22. Aplicación de la mecánica a la Botella de Mariotte:

La botella de Mariotte es un instrumento empleado para obtener caudales bajos, pero con flujo constante ya que proporciona una presión constante (Kires, 2006). Consta de un frasco lleno de fluido hasta cierta altura, que estará cerrado con un tapón atravesado por un tubo cuyo extremo inferior está sumergido en el líquido, El fluido saldrá del frasco por un orificio al nivel de la base. En el extremo inferior del tubo, la presión es la atmosférica ya que está entrando aire por el tubo, a medida que sale el líquido por el orificio. (Schwartz, 1950) El dispositivo se ilustra a continuación:

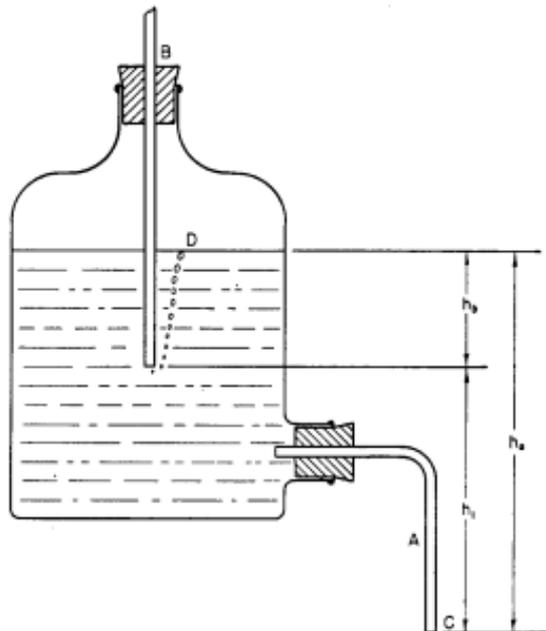


Figure 1. Typical Mariotte Bottle

Figura 32: Esquema de Botella Mariotte

Fuente: Rate-Indicating Mariotte Bottle (Schwartz, 1950)

El funcionamiento hidráulico de este dispositivo se fundamenta (Kires, 2006):

Al inicio, el nivel del extremo inferior del tubo vertical, existe una presión "Pe":

$$Pe = \rho g h_l + P_L$$

Donde:

P_e : Presión en el extremo inferior del tubo vertical (Pa)

ρ : es la densidad del agua (Kg/m^3)

g : es la aceleración de la gravedad (m/s^2)

h_l : es la distancia entre el nivel del agua en la botella y el extremo inferior del tubo (m)

P_L : es la presión del aire sobre el nivel del agua cerca de la parte superior de la botella. Al inicio esta presión es igual a la atmosférica. (Pa)

A medida que sale agua de la botella, P_L (que originalmente comienza en la presión atmosférica " P_{atm} ") cae continuamente a valores cada vez más bajos, y el nivel del agua dentro de la tubería vertical también cae. Cuando P_L alcanza el valor crítico ($P_{atm} - \rho gh$), la presión P_e en el extremo inferior de la tubería se vuelve igual a P_{atm} , y el nivel del agua dentro de la tubería habrá alcanzado el extremo inferior de la tubería. Durante el proceso, " h " disminuye porque el nivel del agua en la botella cae a medida que el agua sale. A medida que sale más agua de la botella, burbujas de aire se escaparán desde el fondo de la tubería y subirán a la parte superior de la botella. El efecto de este proceso de burbujeo es mantener $P_e = P_{atm}$ con una buena aproximación, siempre que el tamaño de las burbujas sea pequeño en comparación con el tamaño de la botella.

Aplicando la ecuación de Bernoulli entre el nivel inferior del tubo de aspiración de aire (1) y del nivel de salida del tubo de descarga (2), y tomando no nivel de referencia la descarga en (2):

$$\frac{P_{atm}}{\gamma} + h_l + \frac{V_1^2}{2g} - hf = \frac{P_{atm}}{\gamma} + \frac{V_2^2}{2g}$$

Dónde: hf : Pérdida de carga debido a fricción (m)

La velocidad en (1) es nula. Entonces, la velocidad en la descarga:

$$v_2 = \sqrt{2g(h_l - hf)}$$

Por lo tanto, la velocidad de descarga es proporcional a la raíz cuadrada de la cabeza hidrostática entre los puntos de descarga de líquido y entrada de aire. En consecuencia, la tasa de descarga puede regularse cambiando la distancia entre estos puntos. (Kires, 2006)

Aunque hf depende del régimen de flujo laminar o turbulento, una variedad de datos experimentales sugiere que hf es independiente del régimen de flujo

(Maroto & De Dios, 2012). Para flujo laminar, h_f se obtiene fácilmente de la ley de Hagen-Poiseuille:

$$h_f = \left(\frac{64}{R}\right) \frac{L}{D} \frac{v^2}{2}$$

En caso de régimen de flujo turbulento, se puede evaluar mediante la fórmula empírica de Blasius, que es válida para tubos lisos y números de Reynolds hasta 10^5 .

$$H_L = \frac{0.158 Lv^2}{DR^{1/4}}$$

2.2.23. Mecánica de fluidos en orificios:

Un orificio sumergido es una abertura con perímetro cerrado de forma regular a través del cual fluye el agua tal y cuya descarga está sumergida, como se presenta en la siguiente figura.

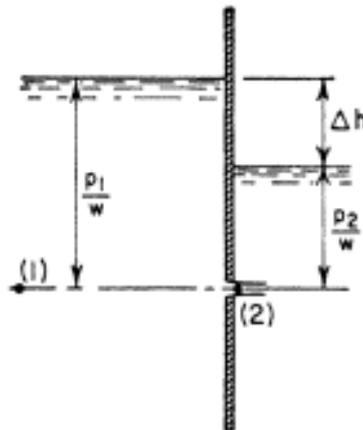


Figura 33: Orificio sumergido en un tanque

Fuente: Handbook of hydraulics (King, 1990)

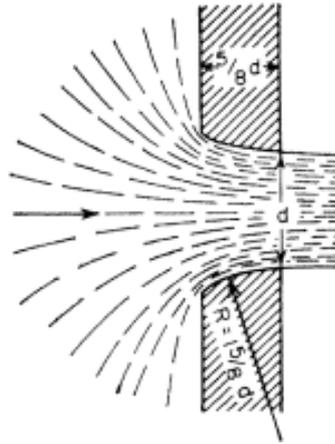


Figura 34: Orificio sumergido en un tanque y líneas de corriente en proximidad del orificio.

Fuente: Handbook of hydraulics (King, 1990)

El flujo de agua a través del orificio se denomina chorro, y su velocidad en el orificio se conoce como velocidad de aproximación. Debido a la forma del orificio, se forma una contracción y re direccionamiento de las líneas de corriente hacia el centro del orificio. El efecto del borde del orificio juega un rol importante en el grado o nivel de contracción, siendo así que mientras más redondeado, se produce una mayor reducción de la contracción del chorro. (King, 1990)

Aplicando la ecuación de Bernoulli, entre los puntos 1 y 2 y tomando como datum o nivel de referencia el centro del orificio.

$$\frac{p_1}{\rho g} + \frac{V_1^2}{2g} - h_l = \frac{p_2}{\rho g} + \frac{V_2^2}{2g}$$

$$v_2 = \sqrt{2 \cdot g \left(\frac{p_1}{\rho g} - \frac{p_2}{\rho g} + \frac{V_1^2}{2g} - h_l \right)}$$

El punto 2 está localizado donde el choro se está contrayendo. Para tanques largos, la velocidad en 1 es despreciable. Reemplazando la diferencia de presiones por diferencia de altura, la ecuación se reescribe:

$$v_2 = \sqrt{2 \cdot g (\Delta h - h_l)}$$

En vez de la diferencia de alturas, la expresión se puede reformular, la expresión se puede escribir:

$$v_2 = C_d \sqrt{2 \cdot g (\Delta h)}$$

Expresando el caudal en función de V_2 :

$$Q = C_d A \sqrt{2 \cdot g (\Delta h)}$$

2.2.24. Coeficiente de descarga

Según King (1990), el valor del coeficiente de descarga es afectado principalmente por la redondez del borde de la pared del orificio en flujos turbulentos. La sumergencia y forma geométrica son prácticamente despreciables. Para orificios de pared delgada o con borde filoso, el valor aproximado de C_d es de 0.60, y para orificios de pared ancha asciende a 0.95.

Tabla 6: Coeficiente de descarga en orificios sumergidos.

ORIFICIO DE BORDE FILOSO								
Dimensiones del orificio, cm	Autor	Altura de sumergencia agua, m						
		0.10	0.15	0.30	0.60	1.20	1.80	5.50
Círculo, d=1.5	Smith	-	0.599	0.597	0.595	0.595	-	-
Círculo, d=3.0	Smith	0.600	0.600	0.600	0.599	0.598	-	-
Cuadrado, 1.5 x 1.5	Smith	-	0.609	0.607	0.605	0.604	-	-
Cuadrado, 3.0 x 3.0	Smith	-	0.621	-	-	0.62	0.62	0.618
ORIFICIO DE BORDE REDONDEADO								
Dimensiones del orificio, cm	Autor	Altura de sumergencia del agua, m.						
		1.00	1.50	2.00	3.00	4.00	5.00	5.50
Cuadrado, 30 x 30	Smith	0.952	0.946	0.945	0.943	0.943	0.944	0.944

Fuente: Handbook of hydraulics (King, 1990).

2.2.25. Placa orificio:

Una placa orificio es un dispositivo que tradicionalmente se ha utilizado como un flujo metro. (Tukiman, M, et al, (2017), citado por (Abd, Alomar, & Mohamed, 2019). Esquemáticamente tiene la siguiente representación:

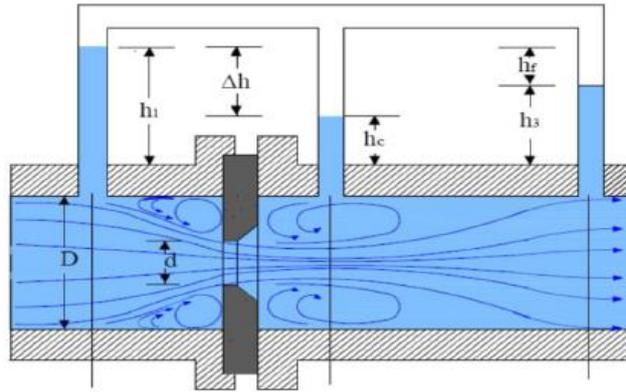


Figura 35: Representación esquemática del flujómetro placa orificio.

Fuente: Effects of varying orifice diameter and Reynolds number on discharge (Abd, 2019).

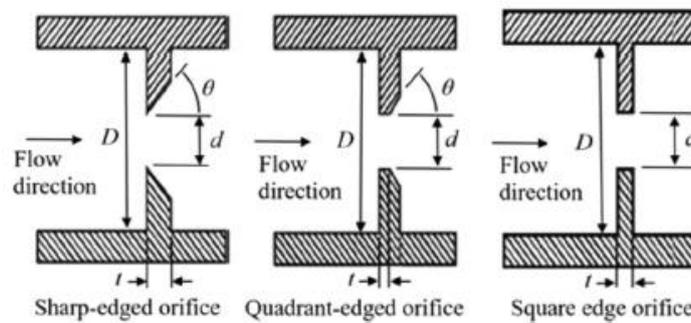


Figura 36: Tipos de orificios

Fuente: Effects of varying orifice diameter and Reynolds number on discharge (Abd, 2019).

En la siguiente figura se aprecia el mecanismo del fluido que pasa a través de un orificio hidráulico de borde afilado, cuyas áreas de sección transversal del orificio y la parte de contracción están dadas de la siguiente manera:

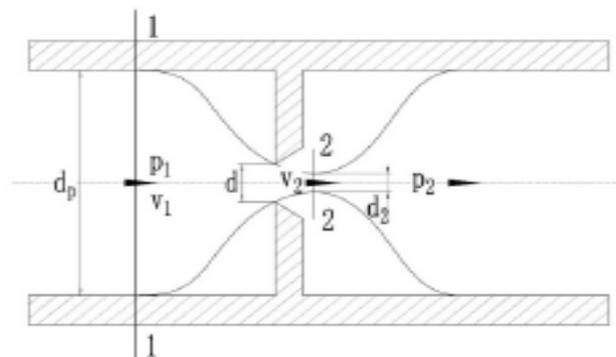


Figura 37: Fluido que pasa a través de un orificio hidráulico de bordes afilados.

Fuente: An experimental study on the discharge coefficient of a sharp-edged hydraulics orifice (Wang, 2020).

Por principio de conservación de masa:

$$v_1 A_1 = v_2 A_2$$

Donde:

A1: Área del tubo en la sección 1(m²)

A2: Área del tubo en la contracción. (m²)

v1: Velocidad del flujo en la sección 1(m/s)

v2: Velocidad del flujo en la contracción. (m/s)

Usando la Ecuación de Bernoulli, en las secciones transversales de la tubería y la parte de contracción se pueden formular respectivamente por:

$$\frac{P_1}{\rho} + \frac{v_1^2}{2} = \frac{P_2}{\rho} + \frac{v_2^2}{2} + k \frac{v_2^2}{2}$$

Donde:

P1: Presión del flujo en la sección 1(Pa)

P2: Presión del flujo en la contracción (Pa)

k: Coeficiente de pérdida de carga debido al orificio.

ρ: Densidad (kg/m³)

La velocidad en la contracción:

$$v_2 = C_d \sqrt{\frac{P_1 - P_2}{\rho}}$$

Donde:

C_d: Coeficiente de descarga.

El coeficiente de descarga está dado por la siguiente ecuación:

$$C_d = \sqrt{\frac{1}{1+k}}$$

2.2.26. Coeficiente en sistemas de placa orificio

En los últimos años se viene estudiando la mecánica en los dispositivos placa orificios. Singh et al (2010, citado por (Abd, Alomar, & Mohamed, 2019)) realizó un estudio numérico, y sus resultados demostraron que el valor de coeficiente de descarga es proporcional al espesor de la pared del orificio para altas relaciones d/D y es inversamente proporcional con el espesor de la pared

para bajos valores de d/D . De igual manera, Ntamba (Abd, Alomar, & Mohamed, 2019) realizó una simulación hidráulica para valores de número de Reynolds que caigan dentro del intervalo de flujo laminar encontrando que el valor de C_d es mayor a valores crecientes de número de Reynolds alto, pero permanece prácticamente invariable a valores de Reynolds dentro del rango de flujo turbulento.

Abd, et al., (2019) condujo un estudio experimental a escala laboratorio para valores de d/D en el rango 0.5 a 0.85, y número de Reynolds entre 2000 y 20.000, para determinar el efecto de estos dos factores, (Ver *Figura 38* y *Figura 39*), encontrándose que el coeficiente de descarga se incrementa proporcionalmente al número de Reynolds en el rango de 2000 a 9000, y luego se estabiliza para régimen turbulento; y que la relación d/D tiene un efecto positivo en C_d . El coeficiente de descarga tomó un valor próximo a 0.70 para relaciones d/D menores a 0.60. Con respecto a la pérdida de energía, se demostró que se incrementa con valores crecientes de Reynolds y que varía inversamente con la relación d/D porque se disminuye la recirculación de flujo aguas abajo.

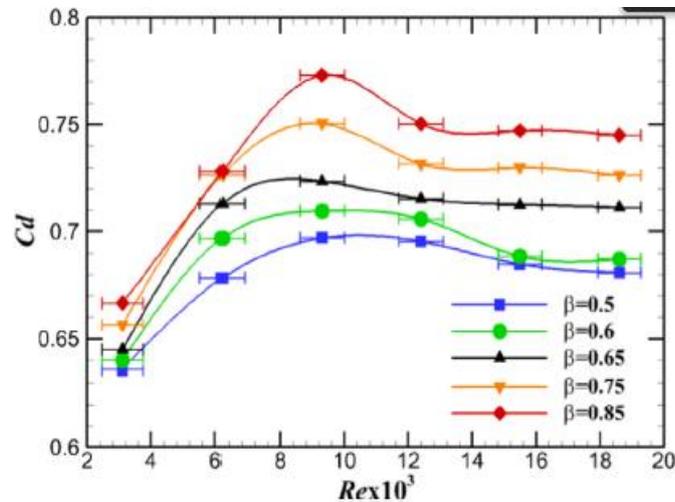


Figura 38: Variación del C_d con respecto al Reynolds y d/D .

Fuente: Effects of varying orifice diameter and Reynolds number on discharge (Abd, Alomar, & Mohamed, 2019)

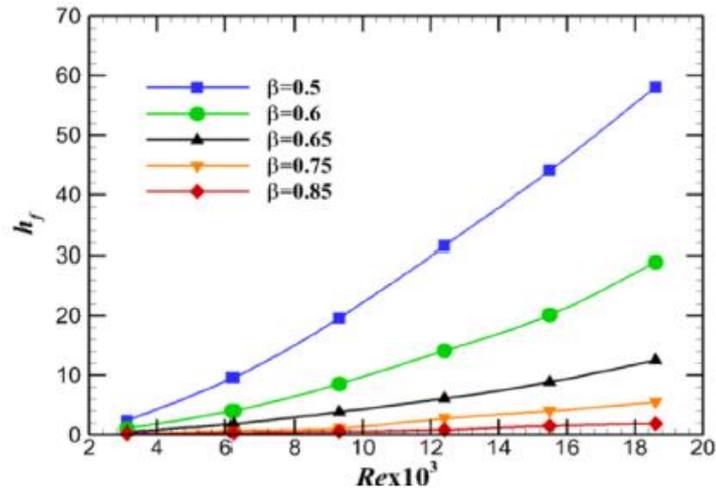


Figura 39: Variación de la pérdida de carga con el Reynolds

Fuente: Effects of varying orifice diameter and Reynolds number on discharge (Abd, Alomar, & Mohamed, 2019)

Según Wu et al., (2002), el coeficiente de descarga no es constante, ya que es función de la geometría del orificio, así como del número de Reynolds y esto puede ser determinado mediante métodos experimentales. El valor de C_d puede correlacionarse con la raíz cuadrada del número de Reynolds, para orificios circulares de pared delgada y número de Reynolds menores a 1000, y C_d tiende a adoptar un valor constante de 0.60 para condiciones de flujo turbulento, (ver Figura 40).

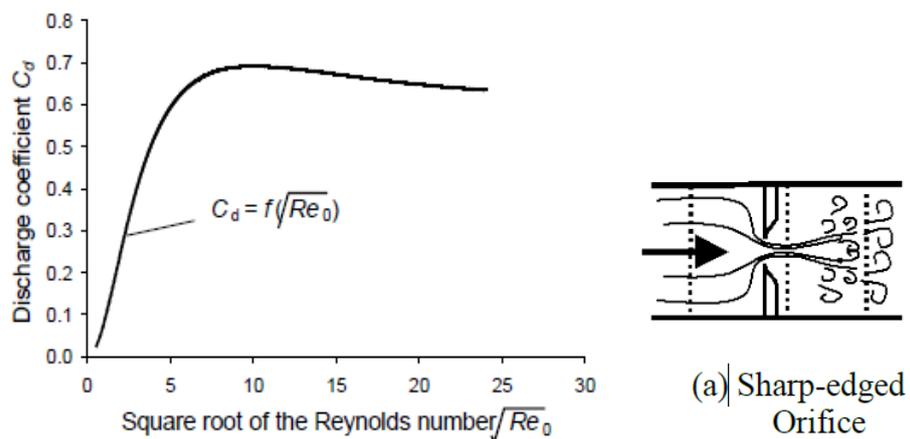


Figura 40: Variación del coeficiente de descarga con la raíz cuadrática del número de Reynolds.

Fuente: An empirical discharge coefficient model for orifice flow (Wu, Burton, & Schoenau, 2002).

Por otro lado, Wang, et al., (2020) llevó a cabo un estudio experimental con fluido petróleo para medir el efecto del número de Reynolds en el valor C_d para orificio de pared delgada, demostrando que el C_d varía entre 0.58 y 0.87, en el rango de Reynolds de 2300 a 3000, que es la zona de transición donde el flujo turbulento empieza a ocurrir; mientras que, en flujo turbulento, su valor varió de 0.85 a 0.75.

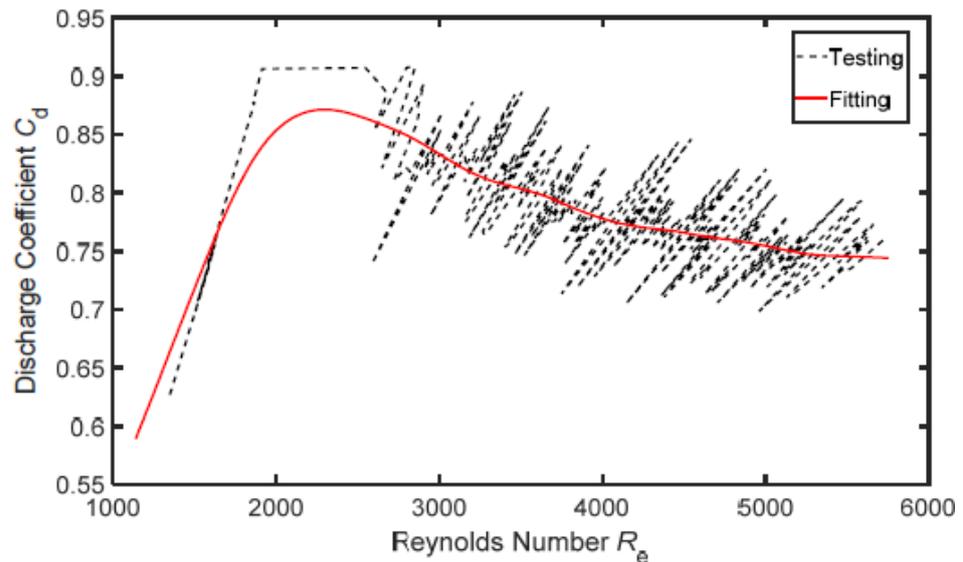


Figura 41: Variación del coeficiente de descarga con el número de Reynolds para fluido viscoso.

Fuente: An experimental study on the discharge coefficient of a sharp-edged hydraulic orifice (Wang, Cao, Kong, & Wu, 2020).

2.3. Definición de términos básicos

- Agitación hidráulica: Movimiento obtenido al aprovechar la energía del agua para producir turbulencia.
- Agitación Mecánica: Movimiento obtenido mediante dispositivos mecánicos (paletas, aspas, etc.) para producir turbulencia.
- Agua cruda: Agua que no ha sido sometida a proceso de tratamiento.
- Agua Potable: Agua apta para el consumo humano, que puede ser consumida directamente. Se encuentra libre de microorganismos patógenos y contaminantes físico químicos.
- Calidad de agua: Conjunto de características organolépticas, físicas, químicas y microbiológicas propias del agua.
- Caudal de diseño: Caudal estimado con el cual se diseñan equipos, dispositivos y las estructuras de un sistema determinado.

- Coagulación: Proceso de desestabilización de partículas coloidales por la adición de reactivo químico llamado coagulante.
- Coagulante: Compuesto químico usado para desestabilizar coloides suspendidos en el agua.
- Cortocircuito: Condición que ocurre en los tanques cuando parte del agua pasa a una velocidad mayor que el resto del fluido, disminuyendo el tiempo de residencia medio de la masa líquida en el reactor.
- Dosificación: acción mediante la cual se suministra una sustancia química al agua.
- Dosis óptima: Concentración que produce la mayor eficiencia de reacción en un proceso químico.
- Eficiencia: Se define como el nivel de remoción de determinado contaminante.
- Flujo mezcla completa: Flujo mezclado en el que todo el elemento ingresante al reactor se dispersa inmediatamente.
- Flóculo o Floc: Pequeña masa sin apretar agregado de material floculante suspendido o precipitado a partir de un líquido.
- Floculación: Proceso de agitación lenta, en el que se pone en contacto flóculos para facilitar su posterior decantación.
- Gradiente de velocidad: Se refiere al grado de agitación de un proceso de mezcla. Numéricamente se define por la raíz cuadrática del cociente entre la pérdida de carga y tiempo de retención.
- Mezclador: Equipo para producir turbulencia en el agua.
- Mezcla rápida: Agitación violenta para producir dispersión instantánea de un producto químico en la masa de agua.
- Mezcla lenta: Agitación suave del agua con los coagulantes, con el fin de favorecer la formación de los flóculos.
- Piloto: Es el modelo físico fabricado y que se utilizará como guía para realizar el experimento hidráulico, y que simule el comportamiento de una unidad de tratamiento a escala real.
- Prueba de jarras: Procedimiento empleado en plantas potabilizadoras con el fin de determinar el nivel de dosificación del agente coagulante.
- Reactor: Estructura hidráulica el cual sigue un proceso físico-químico.

- Tiempo de retención: Se refiere al tiempo promedio de permanencia del fluido en un reactor o recipiente. Numéricamente se define como el Cociente del volumen y caudal.
- Turbiedad: Nivel de transparencia en el agua, consecuencia de la presencia de partículas suspendidas.
- Tratamiento: Conjunto de operaciones y procesos que se realizan sobre el agua cruda, con el fin de modificar sus características organolépticas, físicas, químicas y microbiológicas, para hacerla potable de acuerdo a las normas establecidas.
- Zonas muertas: Sitios en un reactor en donde no hay desplazamiento unidimensional de la masa de agua.

CAPÍTULO III: SISTEMA DE HIPÓTESIS

3.1. Hipótesis

3.1.1. Hipótesis general

Las variables hidráulicas afectan el proceso de floculación para la purificación de agua potable: la gradiente velocidad, tiempo de retención, diámetro equivalente de orificios entre diámetro de placas y diámetro equivalente de orificios entre longitud de placas; siendo estas las que influye en el proceso de mezcla del floculador de placas perforadas.

3.1.2. Hipótesis específica

- a) H1: El coeficiente de descarga de orificio se encontrará en un valor de 0.60.
- b) H2: El efecto individual de cada factor, Gradiente y tiempo de retención, así como de su interacción, es nulo.
- c) H3: El efecto individual de cada factor, relación de diámetro equivalente de orificios/diámetro de placa y longitud/diámetro de placas, así como de su interacción, es nulo.
- d) H4: La remoción de turbiedad del proceso será mayor de 70%.

3.2. Variables

3.2.1. Variable independiente

Borja (2012), define variable independiente como la que produce el efecto o la causa de la variable dependiente.

Para la presente investigación, la variable independiente es variables hidráulicas.

3.2.2. Variable dependiente

Borja (2012), define que la variable dependiente es el resultado o efecto producido por la acción de la variable independiente. (p.23).

Tendremos como variable dependiente el efecto de remoción en turbiedad.

3.3. Operacionalización de variables

Reguant & Martinez (2014), definen que la operacionalización de conceptos/variables permite, por una parte, la elaboración de los instrumentos de medida, convirtiendo los indicadores en ítems o elementos de observación. Igualmente facilitan otro proceso, como es la construcción de índices, al mostrar de una forma esquemática todo el contenido de la investigación facilitan la visión global

que permite hacer el camino de vuelta, es decir recomponer la información recabada para integrar en una “explicación” de cada una de las dimensiones y conceptos. Ver Anexo 3: Operacionalización de las variables

CAPÍTULO IV: METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN

4.1 Tipo y nivel

4.1.1. Tipo de investigación

Según Lozada J. (2014), la investigación aplicada es un proceso que permite transformar el conocimiento teórico que proviene de la investigación básica en conceptos, prototipos y productos, sucesivamente.

Borja (2012), define que es cuantitativo como la forma confiable para conocer la realidad es a través de la recolección y análisis de datos, con lo que se podría contestar las preguntas de la investigación y probar las hipótesis.

La presente investigación fue del tipo aplicado con enfoque cuantitativo ya que busca medir ciertas variables y pronosticar el comportamiento del floculador. Asimismo, esta investigación se caracteriza por ser exploratoria, ya que aún no se ha investigado los parámetros hidráulicos para floculadores de placas perforadas, y se busca establecer el efecto de las variables en el rendimiento del floculador.

4.1.2. Nivel

Borja (2012), define la investigación descriptiva como la que se investigan y determinan las propiedades y características más representativas de los objetos de estudio como personas, viviendas, concreto armado o cualquier otro fenómeno que se quiera estudiar.

Mousalli-Kayat (2015), define la correlación como una relación entre dos variables, conceptos o aspectos, por ello las investigaciones correlacionales buscan establecer la intensidad y el sentido de la relación entre dos variables, si una aumenta qué pasa con la otra o si una disminuye qué pasa con la otra, por ende, en general se habla de dos variables que pueden analizarse asociados entre dos o más.

La presente investigación fue de nivel descriptiva - correlacional, ya que se busca determinar las variables y describir la diferencia de eficiencias en relación a floculadores hidráulicos.

4.2 Diseño de investigación

Ortega (2021), definen el diseño experimental como el método, procedimiento o conjunto de reglas para asignar los tratamientos aleatoriamente a las unidades experimentales.

La presente investigación tuvo un diseño experimental, porque se manipularon deliberadamente los parámetros operacionales para observar cambios y efectos que las variables hidráulicas producen sobre la eficiencia de un floculador de placas perforadas; y se empleó el método estadístico para el procesamiento de datos. El estudio se compone de 4 etapas:

- Etapa 1: Determinación de coeficiente de descarga de orificios en un sistema de floculador de placas perforadas.
- Etapa 2: Determinación de la influencia de la gradiente de velocidad y tiempo de retención sobre la remoción de turbiedad usando floculador de placas perforadas.
- Etapa 3: Determinación de la influencia de las relaciones geométricas sobre la remoción de turbiedad usando un floculador de placas perforadas.
- Etapa 4: Caracterización de la calidad del agua utilizando el tipo de floculador de placas perforadas.

4.2.1. Etapa 1: Determinación del coeficiente de descarga en orificios

El desarrollo de la metodología comprende de las siguientes actividades:

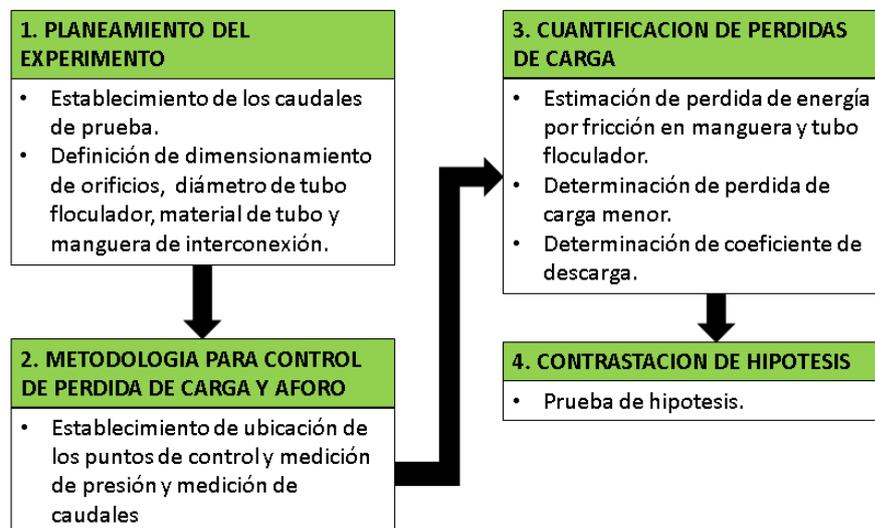


Figura 42: Metodología para la determinación del coeficiente de descarga.

Fuente: Elaboración Propia

4.2.2. Etapa 2: Determinación del efecto de la gradiente de velocidad y tiempo de retención sobre la remoción de turbiedad usando floculador de placas perforadas.

El desarrollo de la metodología comprende de las siguientes actividades:

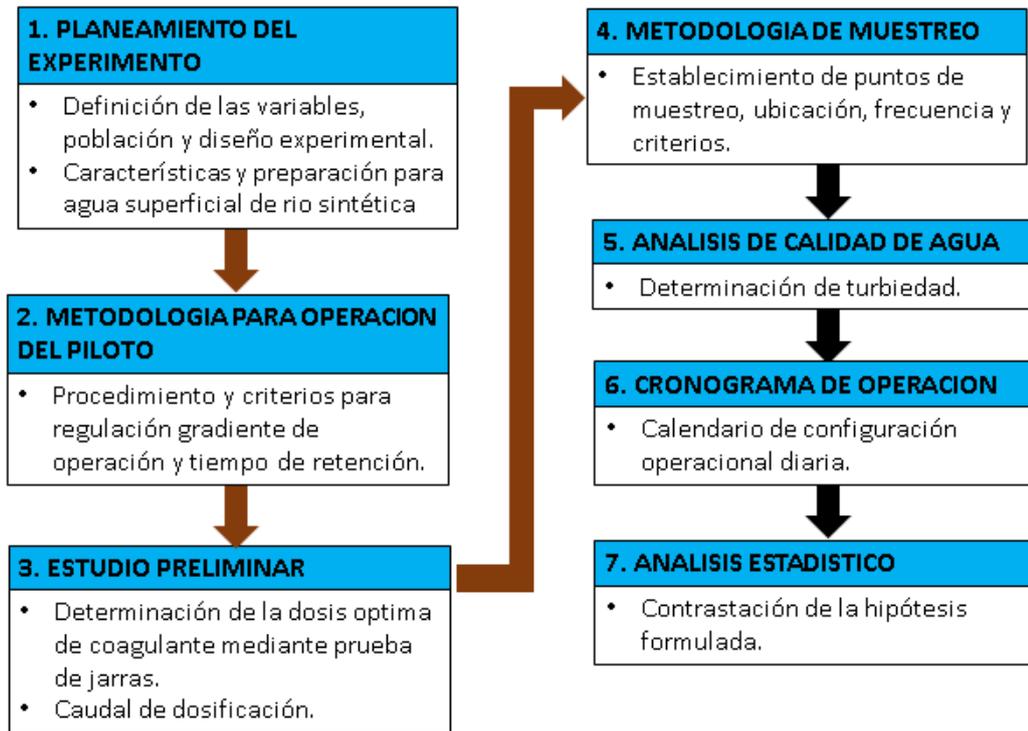


Figura 43: Metodología para la determinación del efecto e interacción de la gradiente de velocidad y tiempo de retención.

Fuente: Elaboración Propia

4.2.3. Etapa 3: Determinación de las relaciones geométricas sobre la remoción de turbiedad usando un floculador de placas perforadas.

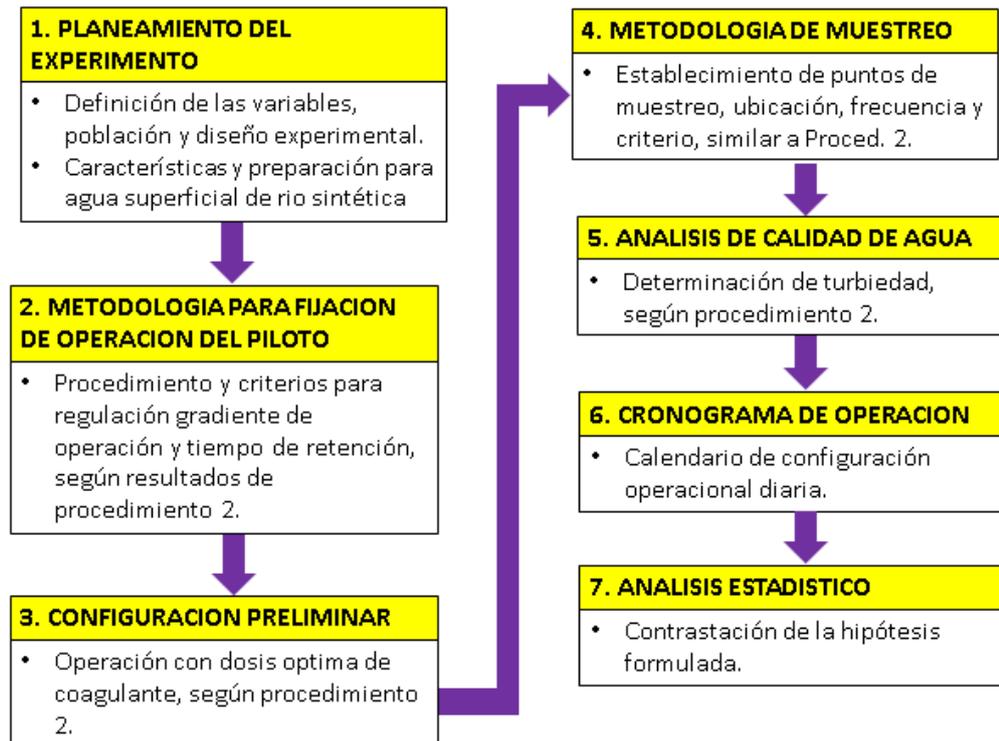


Figura 44: Metodología para la determinación del efecto e interacción de las relaciones geométricas.

Fuente: Elaboración Propia

4.2.4. Etapa 4: Caracterización de la calidad del agua utilizando el tipo de floculador de placas perforadas.

La metodología consistirá en evaluar la calidad del afluente y del efluente del efluente del floculador, posteriormente decantado, considerando un mayor número de corridas. Dentro de los parámetros incluidos se encuentra la turbiedad y Ph.

4.3. Población y muestra

4.3.1. Población

Borja (2012), en base a la población afirma que: “Desde un punto de vista estadístico, se denomina población o Universo al conjunto de elementos o sujetos que serán motivo de estudio. Si queremos estudiar, por ejemplo, el coeficiente de inteligencia de los estudiantes universitarios del Perú, el universo serán todos los estudiantes universitarios a nivel nacional. Si quisiéramos estudiar los problemas estructurales de las viviendas en la

ciudad de Chiclayo, el Universo sería todas las viviendas ubicadas en esta ciudad.” (p.30)

La población seleccionada para el presente estudio fue floculador de placas perforadas.

4.3.2. Muestra

Borja (2012), en base a la muestra afirma: “Dado que un estudio de este tipo resultaría muy costoso y extenso, salvo en el caso de los censos donde sí hay que estudiar a toda la población, tenemos que utilizar la estadística para seleccionar una fracción de la población” (p.32). (Borja, 2012) menciona lo siguiente para muestras no probabilísticas que: “En las muestras no probabilísticas no es posible calcular el error estándar, así como el nivel de confianza con el que hacemos la estimación. Sin embargo, este tipo de muestreo es muy importante en estudios cualitativos. En este caso la selección de los elementos no depende de la probabilidad sino del criterio del investigador.” (p.32)

La muestra seleccionada para el presente estudio fue un floculador de placa perforadas a escala piloto operado bajo condiciones hidráulicas controladas para el tratamiento de agua superficial simulada.

4.4. Técnicas e instrumentación de recolección de datos

4.4.1. Tipos de técnicas e instrumentos

Se usó la técnica de la experimentación y observación para examinar la influencia de las variables hidráulicas en la eficiencia de la remoción de turbiedad y variación de la calidad del agua. Se trabajó con floculadores de placas perforadas a escala piloto. Las variables hidráulicas manipuladas fueron la gradiente de velocidad, tiempo de retención y la relación geométrica de diámetro de orificio/ diámetro de tubo, y diámetro de orificio/ distancia entre orificios.

La instrumentación utilizada para la recolección de datos:

- Balanza analítica gramera 500gr: Utilizado para pesar muestras (coagulante y arcilla)
- Potenciómetro Mettler Toledo: Utilizado para determinar pH de las muestras

- Turbidímetro Hach 2100P: Utilizado para determinación de turbiedad
- Probeta de 100, 250 y 500 ml Pyrex Clase A: Para medición del volumen de coagulante en solución dosificado mediante el método volumétrico de aforo;
- Cronometro digital Citizen Profesional Precisión 1/1000s: Para medición del tiempo durante el control de flujos por aforo volumétrico;
- Pie de rey: Para la medición de aberturas y dimensionamiento de los elementos del floculador;
- Manómetro: Manguera para observar el nivel de agua.
- Regla graduada: Para la medición de la caída de presión en el floculador.
- Equipo de prueba de jarras “Degremont”: Para la determinación de la dosis de coagulante.
- Floculador a escala piloto
- Cámara fotográfica: Para el registro de imágenes del experimento.



a) Cronometro digital



b) Probetas graduadas



c) Balanza analítica



d) Turbidímetro Hach



e) Regla graduada



f) Equipo prueba de jarras



g) Vaso precipitado



h) Pie de rey

Figura 45: Instrumentos empleados para la recolección de datos.

Fuente: Elaboración propia.

4.4.2. Criterios de validez y confiabilidad de los instrumentos

Los instrumentos utilizados son confiables porque se utilizaron dispositivos de alta precisión que usualmente se emplean para la medición y control de parámetros hidráulicos; y se emplearon instrumentos normalizados para la

evaluación de la calidad del agua utilizando los equipos y técnicas altamente confiables.

Los instrumentos y técnicas son válidos porque se están estandarizados para el estudio de floculadores hidráulicos.

4.4.3. Procedimientos para la recolección de datos

- Etapa 1: Determinación del coeficiente de descarga.

Se llevó en dos subetapas:

a) Sub-etapa 1:

En primer lugar, para estimar la pérdida de carga originada por la fricción en las mangueras y de accesorios, se registró y midió las características de la manguera como el diámetro interno el cual se midió con el pie de rey, se observó qué tipo de material está construida y se midió la longitud con cinta métrica. Asimismo, se registró y midió las características de los accesorios del tipo y cantidad de accesorios:

En segundo lugar, para determinar el coeficiente de pérdida de carga menor, se realizó la experimentación hidráulica. El caudal se determinó mediante el método volumétrico y la pérdida de carga por lectura de manómetros (Ver *Tabla 7*. En la siguiente tabla se describe todos los métodos para la medición de las variables hidráulicas, así como de calidad agua utilizados durante la experimentación:

Tabla 7 Métodos para recolección de datos durante la experimentación.

Método	Parámetro medido	Descripción
Aforo volumétrico	Caudal	<ol style="list-style-type: none">1. Colocación de vaso precipitado en los puntos para caída de agua.2. En el instante en que inicia la recolección de muestra de agua, encender el cronómetro.3. Cuando esté próximo a llenarse el vaso precipitado, retirar el envase y detener el cronómetro.4. Medir el volumen de agua recolectado con una probeta graduada.5. Registrar el tiempo medido por el cronómetro.

Método	Parámetro medido	Descripción
Lectura de niveles	Pérdida de carga	<ol style="list-style-type: none"> 1. Observar y medir el nivel de agua en ambos manómetros con ayuda de una cinta métrica. 2. Registrar la diferencia de nivel.
Prueba de jarras	Turbiedad Dosis de coagulante	<ol style="list-style-type: none"> 1. Extraer coagulante en solución con una jeringa, diferentes volúmenes extraídos que corresponden a dosis diferentes. 2. Verter la muestra de agua sintética en los 6 vasos precipitados de 1000 ml disponibles. 3. Configurar el equipo para que las paletas giren a velocidad de 300rpm y activar el movimiento de las paletas. 4. Inyectar el contenido de las jeringas y vaciarlas lo más rápido posible (fracciones de segundo). Se debe dejar un frasco libre sin coagulante como testigo. 5. Configurar el giro de las paletas a 40rpm por 20 min. Acabado este periodo, dejar reposar por 40 min. 6. Al finalizar este periodo, retirar una muestra de 50ml de agua sobrenadante con un sifón. 7. Medir y registrar la turbiedad.
Turbidimetría	Turbiedad	<ol style="list-style-type: none"> 1. Enjuagar 3 veces la celda con la muestra de agua a analizar. 2. Limpiar la parte externa de la celda. 3. Colocar la celda con la flecha hacia el lado óptico del aparato. 4. Registrar la lectura indicada por el aparato. 5. Retirar la celda, verter su contenido.
Potenciómetro	pH	<ol style="list-style-type: none"> 1. Calibrar el electrodo con las soluciones buffer, ácido y alcalino; 2. Verter la muestra de agua residual a analizar en el vaso precipitado; 3. Introducir el electrodo en la muestra de agua residual a analizar; 4. Esperar que se estabilice la lectura y registrar valor resultante del pH; 5. Limpiar el electrodo con agua destilada.

Fuente: Elaboración propia



Figura 46: Aforo por método volumétrico.

Fuente: Elaboración propia.



Figura 47: Lectura de manómetros.

Fuente: Elaboración propia.

b) Sub-etapa 2:

Esta Sub-etapa tiene por propósito medir el valor del coeficiente de descarga del orificio. Se midió y registró las y características de las placas orificio como cantidad, diámetro de orificio, ancho de la pared de la placa orificio con pie de rey y diámetro del tubo floculador con cinta métrica.

En cada corrida experimental, se recolectó y registró información para la determinación del caudal por el método de aforo volumétrico y se

midió y registró la caída de presión por diferencia de lectura de manómetros.

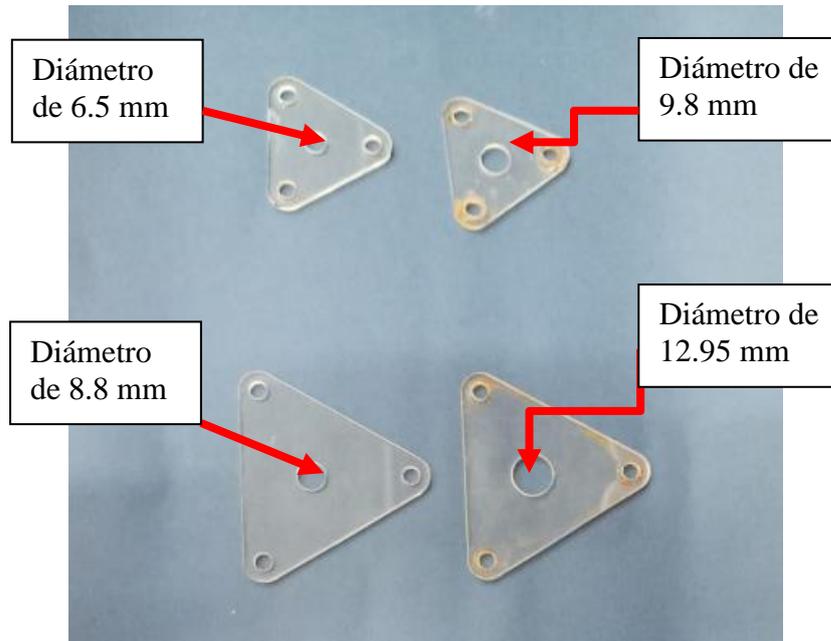


Figura 48: Elementos de Placa de disco base de 3 mm con distintos tamaños de orificios

Fuente: Elaboración propia



Figura 49: Floculador placa orificio. Tubo floculador (Izq.) y sistema placa orificio (Der.)

Fuente: Elaboración propia

- Etapa 2: Evaluación del efecto de la gradiente y tiempo de retención.

Se llevó en tres subetapas:

a) Sub-etapa 1:

Tiene por propósito determinar la cantidad de arcilla caolinita necesaria diluir en agua para lograr determinado nivel de turbiedad y preparar la solución coagulante. En primer lugar, se disuelve la arcilla en el reservorio de agua sintética y se agita fuertemente con ayuda de un tubo hasta que se uniformiza la arcilla. Luego se extrae una muestra de agua, y se deja reposar por espacio de 1 hora, en un vaso precipitado de 1000ml por espacio de 1 hora. Luego se extrae el agua de la superficie con una jeringa y se procede a medir su turbiedad. (Ver Tabla 7)

Para preparar la solución coagulante, se tamiza el coagulante sulfato aluminio tipo B-500(seco), haciéndolo pasar por tamiz #100. Se pesa el coagulante y se diluye en agua potable a razón 0.5g/100mL, donde el volumen medido utilizando probeta. Se registra la concentración del coagulante.



Figura 50: Arcilla caolinita (Sup. Izq.), Tanque de agua superficial sintética (Sup. Der), Coagulante en presentación granular (Inf. Izq.) y Coagulante tamizado (Inf. Der)

Fuente: Elaboración propia.



Figura 51: Colocación de la muestra en turbidímetro para toma de lectura de turbiedad.

Fuente: Elaboración propia.

b) Sub-etapa 2:

En esta Sub-etapa se busca determinar la dosis óptima mediante prueba de jarras. (Ver Tabla 7)



Figura 52: Prueba de jarras - Inoculación de coagulante (Izq.) y Floculación (Der.)

Fuente: Elaboración propia.

c) Sub-etapa 3:

En esta Sub-etapa se fija a las condiciones de gradiente de velocidad y tiempo de retención y se examina la eficiencia del floculador de placas perforadas. En primer lugar, se mide el caudal por el método de aforo volumétrico a la salida de la línea de impulsión, y a la salida del tanque de repartición. También se regula el caudal en la botella Mariotte para garantizar que la dosificación corresponda a su valor óptimo según indica la prueba de jarras. Una vez transcurridas las 3 horas que dura

cada corrida experimental, se procede a tomar muestra de 1000ml de agua superficial sintética a la salida de la línea de impulsión, y una muestra de 1000ml de agua tratada a la salida del floculador, y se dejan reposar por espacio de 1 hora en un vaso precipitado de 1000ml cada muestra. Finalizado este tiempo, se extrae con un sifón 50ml de muestra de agua sobrenadante y se procede a medir y registrar su turbiedad.

- Etapa 3: Evaluación de la influencia de las relaciones geométricas.

En esta etapa el propósito es determinar la influencia de las relaciones d/D y d/L (Ver *Figura 53*) para una condición óptima de gradiente de velocidad y tiempo de retención. Similar a la etapa 2, se mide y registra el caudal por el método de aforo volumétrico a la salida de la línea de impulsión y a la salida del floculador de placas perforadas, así como la descarga de la botella Mariotte. Se mide con el pie de rey el diámetro d y con una cinta métrica el diámetro D y L . Al transcurrir cada corrida experimental, al igual que en la etapa 2, se procede a tomar muestra de 1000ml de agua superficial sintética a la salida de la línea de impulsión, y una muestra de 1000ml de agua tratada a la salida del floculador, y se dejan reposar por espacio de 1 hora en un vaso precipitado de 1000ml cada muestra. Finalizado este tiempo, se extrae con un sifón 50ml de muestra de agua sobrenadante y se procede a medir y registrar su turbiedad.

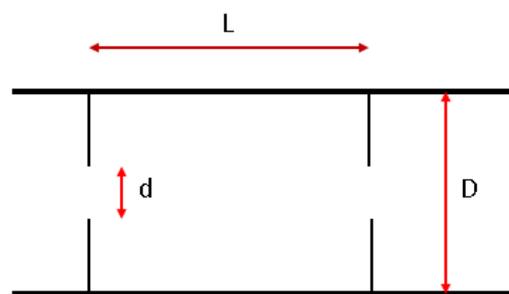


Figura 53: Relaciones geométricas del floculador placa orificio. d : Diámetro de orificio, D : Diámetro de tubo floculador, y L : Distancia entre placas.

Fuente: Elaboración propia.

- Etapa 4: Caracterización de la calidad del agua.

Para evaluar la eficiencia del floculador de placas perforadas, se caracterizó la calidad del efluente en términos de pH y turbiedad durante un mayor número de corridas a condiciones fijas óptimas de gradiente de velocidad, tiempo de retención y relaciones geométricas. Similar a las etapas 2 y 3, en cada corrida experimental se aforo los caudales a la salida de la línea de impulsión, salida del floculador y a la descarga de la botella Mariotte; y se midió y registró la turbiedad de las muestras procedentes de agua superficial sintética y agua tratada del floculador, con turbidímetro. Adicionalmente se incluyó el análisis del Ph de dichas muestras con un Ph metro, en el laboratorio de química de la facultad de ingeniería, de la Universidad Ricardo Palma. (Ver Tabla 7)



Figura 54: Frascos para almacenamiento de muestras (Sup. Izq), frascos con muestras de agua (Sup. Der), Potenciómetro o Ph metro (Inf. Izq), Medición de turbiedad (Inf. Der).

Fuente: Elaboración propia.

4.5. Técnicas para el procesamiento y análisis de la información

4.5.1. Técnica para el procesamiento de información

La información se agrupa y estructuran a fin de responder el problema de investigación, objetivos e hipótesis de estudios. No se excluyó información proveniente de la experimentación, se tomó en la totalidad de los valores obtenidos durante la investigación para su posterior análisis e interpretación. La presentación de resultados se hace en ecuaciones, tablas, y gráficos para su interpretación:

Tabla de calibración hidráulica: En ella se presentan los resultados que arrojen cada corrida experimental durante la etapa 1. Los datos están comprendidos por las mediciones realizadas durante la experimentación y los resultados obtenidos del análisis hidráulico: flujo, régimen de flujo, la pérdida de carga debido a sus diversos causantes, y el valor de los coeficientes de pérdidas menores y coeficiente de descarga para el orificio.

Tabla de eficiencia del proceso: En ella se presentan los resultados que arrojen cada corrida experimental, durante las etapas 2, 3 y 4. Se toma en cuenta los datos medidos durante la experimentación, así como los niveles de las variables hidráulicas consideradas en el proyecto: Gradiente de velocidad, tiempo de retención, y relaciones geométricas d/D y d/L . Para su elaboración se tomó en consideración los niveles de la variable. Luego hallamos la eficiencia del proceso de mezcla en términos de calidad final del efluente o rendimiento en términos de remoción de sólidos.

Tabla de prueba de hipótesis estadísticas: Nos permite obtener información sobre el nivel de significación para el rechazo o no de la hipótesis. Para la etapa 1 y 4, se considera como parámetro y decisión la media y estadístico de prueba Z ; en cambio para la etapa 3 y 4 se realiza un análisis de varianza que nos permite comparar las diferentes entre las medias de diferentes grupos para determinar la influencia de independiente o conjunta de los factores (variables hidráulicas) en la variación de la variable respuesta (eficiencia de remoción de turbiedad).

Tabla de estadísticos descriptivos: Nos permite obtener información relativa a la medida de tendencia central (media, mediana, y moda) y medida de la dispersión (rango, varianza, desviación estándar y coeficiente de variación)

Modelo matemático hacia una superficie respuesta: Para la predicción del valor óptimo de las variables hidráulicas en la maximización de la eficiencia de remoción de turbiedad (Etapa 2), mediante un ajuste a un modelo de regresión cuadrática.

Gráficos estadísticos para modelo factorial: Se presenta el diagrama de Pareto, gráfica de efectos principales e interacción, gráfico de curva de contorno y gráfica de superficie de nivel para visualizar gráficamente la participación de cada componente factorial en la variación del (Etapa 2) y posterior interpretación. Asimismo, se incluyen gráficas de análisis residual para efectuar las verificaciones de los supuestos y validación del modelo factorial (Etapa 2 y Etapa 3).

Gráficas de dispersión con líneas rectas: Nos permite visualizar la variación de determinada variable respuesta cuando se está modificando el valor que adopta una sola variable, o cuando no se todos los factores involucrados se encuentran en un valor estable. Se emplearon gráficos de dispersión para el estudio de la influencia del número de Reynolds en el valor del coeficiente de descarga (Etapa 1), determinación de la dosis óptima de coagulante (Etapa 2), y la caracterización del agua afluyente y efluente (Etapa 4).

Descriptivo: Se describe el diseño del sistema construido a escala piloto del floculador de placas perforadas indicando sus diversos elementos, así como funcionamiento.

4.5.2. Análisis de resultados

- Etapa 1: Determinación de coeficiente de descarga del orificio

a) Sub-etapa 1:

En primer lugar, se debe realizar un análisis matemático para la determinación de la pérdida de carga debido a la fricción en la tubería y a la pérdida localizada en los accesorios en corridas experimentales

en tubo flocladores sin el sistema placa orificio. En total se realizaron 36 corridas experimentales.

El caudal se calcula por:

$$Q = \frac{Vol}{T}$$

Dónde: Q: Caudal, Vol: Volumen de muestra medido de en probeta, y
T: Tiempo de llenado medido en cronómetro.

Luego con la fórmula de Reynolds se calcula el régimen de flujo:

$$N_R = \frac{D \cdot v \cdot \rho}{\mu}$$

La pérdida de carga por fricción en las tuberías se puede estimar ya que depende principalmente del tipo de régimen de flujo y caudal.

Si N_R es menor a 2000, entonces se emplea la siguiente fórmula para la determinación de la pérdida de carga por fricción:

$$h_f = \frac{64 \cdot L \cdot v^2}{Nr \cdot D}$$

Si N_R es menor a 2000, entonces se emplea la siguiente fórmula para la determinación de la pérdida de carga por fricción en la manguera de interconexión de flocladores:

$$h_f = \frac{64 \cdot L \cdot v^2}{Nr \cdot D}$$

Si N_R es mayor a 2000, entonces se emplea la siguiente fórmula para la determinación de la pérdida de carga por fricción en la manguera de interconexión de flocladores:

$$h_f = 10.674 \frac{L \cdot Q^{1.852}}{C^{1.852} \cdot D^{4.78}}$$

Luego, se calcula perdida de carga por perdida de carga local

$$h_l = \Delta P - h_f$$

Dónde: h_l : Pérdida de carga localizada, Δ : Diferencia de nivel en manómetros y h_f : pérdida de carga por fricción.

El coeficiente de pérdida de carga menor localizada se determina para corrida:

$$k = \sqrt{\frac{2g \cdot h_l}{V^2 2g}}$$

El valor real de k se calcula como el valor promedio de k en todas corridas experimentales.

b) Sub-etapa 2:

En segundo lugar, se debe realizar un análisis matemático para la determinación del coeficiente de descarga, para ello se debe implementar el sistema de placa orificio a cada tubo floculador y efectuar corridas experimentales a diferentes caudales. En total se hacen 36 corridas experimentales. La pérdida de carga debido a orificios:

$$h_o = \Delta P - k \frac{v^2}{2g} - h_f$$

El coeficiente de descarga se determina:

$$C_d = \sqrt{\frac{V^2}{2g \cdot \frac{h_o}{N}}}$$

Dónde, h_o: pérdida de carga por orificios, V: Velocidad en el orificio, N: Número de placas, C_d: Coeficiente de descarga de orificio.

El valor real de C_d se calcula como el valor promedio de C_d en todas las corridas experimentales.

Sub-etapa 3: Análisis estadístico para la contratación de la prueba de hipótesis.

Se realiza una prueba de hipótesis, tomando criterio el valor-p. Se utilizó el programa Minitab 19 para validar o rechazar la siguiente hipótesis:

$$“H_1: \mu_{C_d} = 0.60”$$

- Etapa 2: Evaluación del efecto de la gradiente y tiempo de retención.

a) Sub-etapa 1:

Para la determinación de la dosis óptima, se va a escoger la dosis que corresponde a la menor turbiedad final en la curva de prueba de jarras.

b) Sub-etapa 2:

En esta Sub-etapa del estudio, se aplica el diseño experimental factorial completo 3^k con réplicas porque permite evaluar el efecto de cada parámetro operativo y de sus interacciones sobre la variable respuesta que es la eficiencia de remoción de turbiedad. El nivel de los factores:

Tabla 8: Arreglo factorial de las variables hidráulicas

Factores	Unidades	Nivel de tratamiento		
		Bajo	Medio	Alto
Gradiente de velocidad	s^{-1}	18	27	36
Tiempo de retención	Min	12	18	24

Fuente: Elaboración propia

El diseño factorial es $3^2 \times 4$. El número total de corridas experimentales es 36

El tiempo de retención se calcula por la siguiente expresión:

$$\theta = \frac{\text{Vol}}{Q}$$

Dónde: θ : Tiempo de retención, Vol: Volumen de agua en floculadores, Q: Caudal.

La gradiente de velocidad para agua a 18°C de temperatura, se calcula por la siguiente expresión:

$$G = 3115 \sqrt{\frac{ht}{\theta}}$$

Dónde: G: Gradiente de velocidad, ht: Pérdida de carga total, y θ : Tiempo de retención.

Para el cálculo de la eficiencia de remoción de turbiedad, se emplea la siguiente fórmula:

$$\text{Eficiencia de remocion de turbiedad} = \left(\frac{\text{Turbiedad inicial} - \text{Turbiedad final}}{\text{Turbiedad inicial}} \right) \cdot 100$$

c) Sub-etapa 3:

El análisis estadístico consiste en encontrar la diferencia estadística entre los factores, mediante la aplicación del ANOVA Bifactorial:

$$y_{ijk} = \mu + \tau_i + \beta_j + (\tau\beta)_{ij} + \varepsilon_{ijk}$$

Dónde: y_{ijk} : Es el porcentaje de remoción de turbiedad con el i -ésimo nivel de gradiente de velocidad “G”, j -ésimo nivel del tiempo de retención “ Θ ”, k -ésima réplica; μ : Efecto del promedio global; β_j : Efecto i -ésimo nivel de “G”; τ_i : Efecto j -ésimo nivel de “ Θ ”; $(\tau\beta)_{ij}$: Efecto de la interacción En el i -ésimo nivel “G”, j -ésimo nivel de “ Θ ”; ε_{ijk} : Es el efecto del error experimental en el i -ésimo nivel de G, j -ésimo de Θ y k -ésima réplica.

Las hipótesis a evaluar:

H₂: El efecto individual de cada factor, Gradiente y tiempo de retención, así como de su interacción, es nulo en la remoción de turbiedad en un floculador de placas perforadas.

d) Sub-etapa 4:

En esta Sub-etapa se realiza el análisis gráfico. En base al gráfico de efectos factoriales y curva de contorno se describe el comportamiento de las diferentes variables involucradas.

e) Sub-etapa 5:

En esta Sub-etapa, se realiza el ajuste matemático hacia un modelo de superficie de respuesta cuadrática. Se procede a determinar los coeficientes de la siguiente expresión:

$$z = Ax^2 + By^2 + Cxy + Dx + Ey$$

Dónde: z : Eficiencia de remoción de turbiedad; x : Gradiente de velocidad; y : Tiempo de retención; A, B, C, D y E: Coeficientes del modelo cuadrático.

Con la superficie de respuesta, se procede a optimizar los valores que deben adoptar las variables hidráulicas para maximizar la remoción de turbiedad.

El análisis estadístico se efectúa en Minitab 19.

- Etapa 3: Efecto de Diámetro de orificio y longitud de placas sobre la eficiencia

Del modelo matemático obtenido en la Etapa 2 se determinó la condición de gradiente y tiempo de retención que resulte en la maximización numérica de la variable respuesta. Luego se definió dos niveles de relaciones geométricas: Diámetro orificio/ Diámetro de tubo floculador; diámetro de orificio/ Longitud de separación entre placas.

a) Sub-etapa 1:

En esta Sub-etapa, se aplica el diseño experimental factorial completo 2^k con réplicas porque permite evaluar el efecto de cada parámetro operativo y de sus interacciones sobre la variable respuesta que es la eficiencia de remoción de turbiedad. El nivel de los factores:

Tabla 9: Arreglo factorial de las relaciones geométricas

Factores	Unidades	Nivel de tratamiento	
		Bajo	Alto
d/D	-	0.04	0.12
d/L	-	0.08	0.18

Fuente: Elaboración propia

Dónde: d: Diámetro de orificio; D: Diámetro de tubo floculador; L: Longitud entre placas.

El diseño factorial es $2^2 \times 4$. El número total de corridas experimentales es 16.

b) Sub-etapa 2:

El análisis estadístico consiste en encontrar la diferencia estadística entre los factores, mediante la aplicación del ANOVA Bifactorial:

$$y_{ijk} = \mu + \tau_i + \beta_j + (\tau\beta)_{ij} + \varepsilon_{ijk}$$

Dónde: y_{ijk} : Es el porcentaje de remoción de turbiedad con el i -ésimo nivel de “d/D”, j -ésimo nivel del tiempo de retención “d/L”, k -ésima

replica; μ : Efecto del promedio global; β_j : Efecto i-esimo nivel de “d/D”; τ_j : Efecto j-esimo nivel de “d/L”; $(\tau\beta)_{ij}$: Efecto de la interacción En el i-esimo nivel “d/D”, j-esimo nivel de “d/L”; ε_{ijk} : Es el efecto del error experimental en el i-esimo nivel de d/D, j-esimo de d/L y k-esima réplica

Las hipótesis a evaluar:

H₃: El efecto individual de cada factor, d/D y d/L, así como de su interacción, es nulo en la remoción de turbiedad en un floculador de placas perforadas.

- Etapa 4: Caracterización de la calidad del agua

Según los resultados de la etapa 2 y 3, se define las condiciones operativas gradiente de velocidad, tiempo de retención y relaciones geométricas más favorables en los que debe funcionar el piloto. Dichas variables se mantienen constantes y se realiza un total de 12 corridas experimentales. El propósito de esta etapa es evaluar el comportamiento del floculador de placas perforadas en la variación de turbiedad y pH.

Se realizó un estudio estadístico descriptivo de la calidad del agua durante las corridas experimentales tanto del agua superficial sintética como el agua tratada.

El análisis estadístico consistió en el contraste de la siguiente hipótesis:

H₄: La remoción de turbiedad del proceso será de 70%.

CAPÍTULO V: PRESENTACIÓN Y ANÁLISIS DE RESULTADOS DE LA INVESTIGACIÓN

5.1. Caracterización del floculador placa escala piloto

El floculador de placas perforadas se ubicó en las instalaciones del Laboratorio de Hidráulica en la Universidad Ricardo Palma. El piloto funcionó mayormente de forma hidráulica, es decir, se aprovechó la energía hidráulica disponible para el funcionamiento de los procesos, requiriendo únicamente bombeo para la impulsión del agua sintética superficial hacia el tanque receptor del piloto. Ver esquema plano del piloto (Anexo 5).

Sus componentes fueron los siguientes:

- Tanque de reserva de agua superficial sintética:

El tanque es de forma rectangular con dimensiones de 2.40x1.20 x1.20, alcanzando un volumen de almacenamiento de 3m³. Está construido de acero inoxidable con protección anticorrosiva. En el interior de este tanque se produce la mezcla del agua potable con arcilla caolinita para simular la calidad promedio de agua superficial sintética. En el interior de este tanque se instaló un equipo de bombeo sumergible como se muestra a continuación.

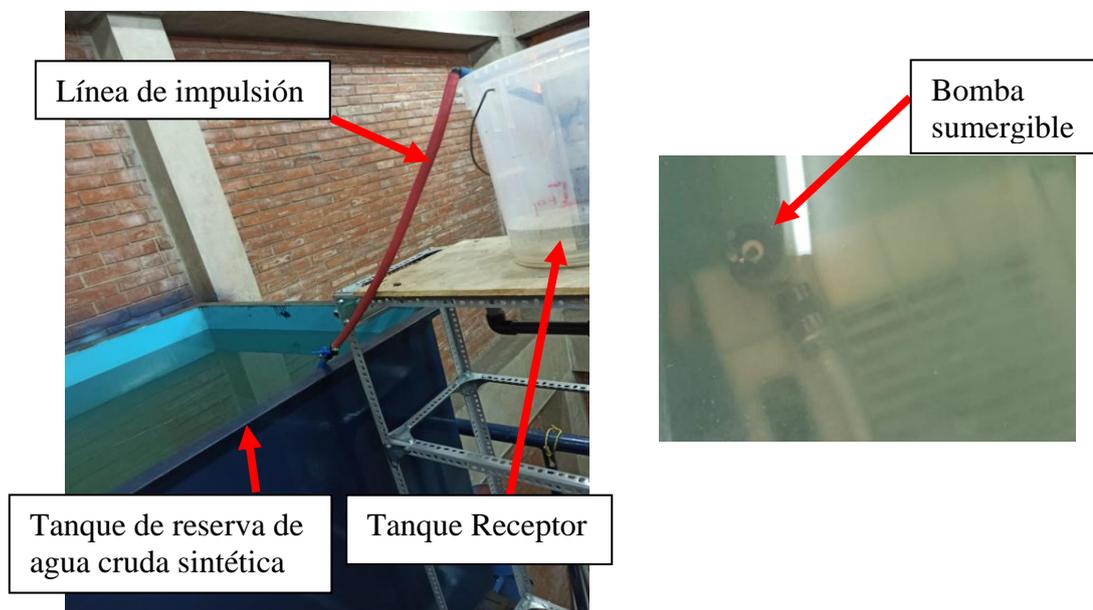


Figura 55: Tanque de reserva de agua sintética (Izq); Bomba sumergible. (Der.)

Fuente: Elaboración propia

- Bomba sumergida centrífuga de 1/16HP: Para elevar el agua cruda simulada mediante una manguera (línea de impulsión) hacia el “tanque receptor” del piloto como se muestra en la Figura 55.
- Primer módulo de equipos. En el módulo ubicado en el segundo nivel del laboratorio de hidráulica, se halló el tanque receptor de agua sintética impulsada, el inyector Venturi y el dosificador Mariotte como se muestra en la Figura 56 y Figura 57.

Tabla 10: Componentes del Primer módulo de equipos

Elementos	Descripción
Tanque receptor	Reservorio cuyo propósito fue recibir el agua cruda simulada proveniente de y conducir el flujo en cantidad adecuada hacia el inyector Venturi. También dispone de una línea de rebose donde retornan los excedentes de flujo hacia el reservorio de agua cruda.
Inyector Venturi	Es el dispositivo de coagulación. Este dispositivo opera hidráulicamente, sin necesidad de una fuente energética exterior. Se dispuso de un embudo en la garganta del Venturi, para la recepción de solución coagulante de sulfato de aluminio. (Ver <i>Figura 57</i>)
Dosificador Mariotte	En este tanque se almacenaba la solución de coagulante de sulfato de aluminio y a su vez lo dosificaban en tasa constante. Para regular el caudal de descarga, se empleó una válvula externa de cierre que comprimía la manguera de descarga. (Ver <i>Figura 57</i>)
Conductos para flujos	Para la conducción del agua a lo largo de los equipos del módulo se emplearon mayormente mangueras

Fuente: Elaboración propia

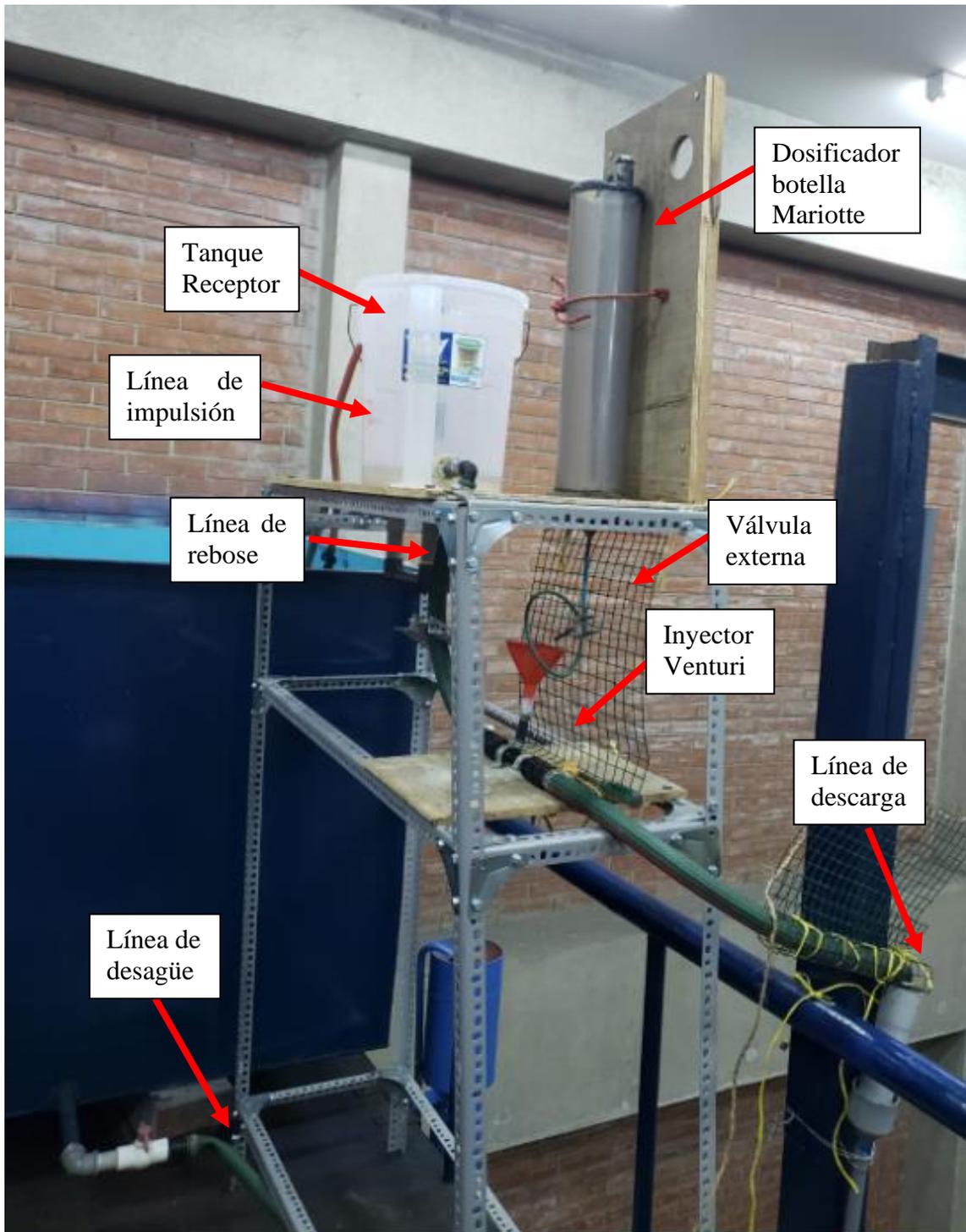


Figura 56: Primer Módulo ubicado 2do nivel del laboratorio de hidráulica

Fuente: Elaboración propia

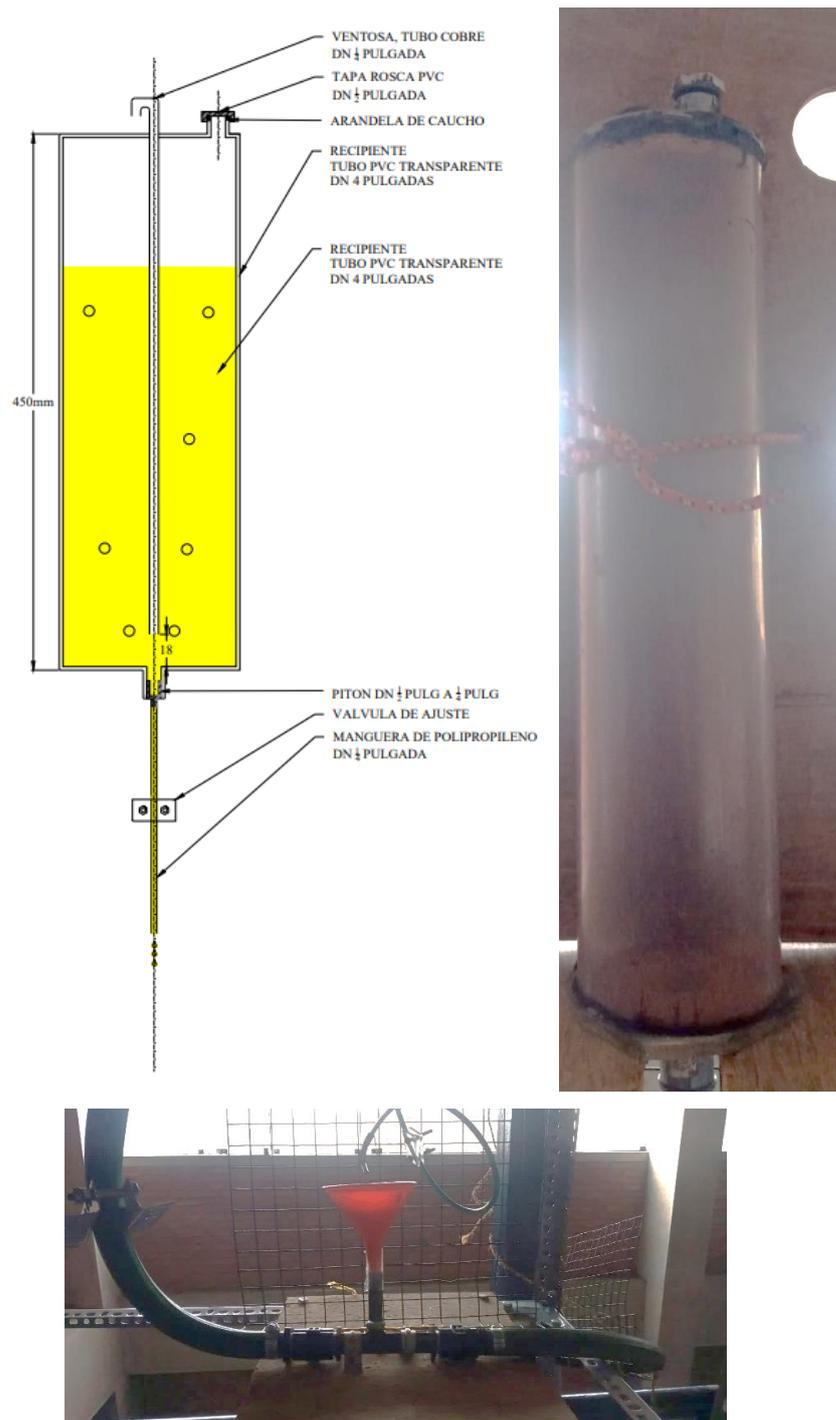


Figura 57: Detalle de la botella Mariotte (Sup.), inyector Venturi con embudo receptor (Inf.)
Fuente: Elaboración propia.

- Conductos de interconexión entre módulos de equipos:
Se instaló un tubo rígido para la amortiguación del exceso de energía cinética durante el descenso del agua proveniente del módulo situado en el nivel superior hacia el módulo del nivel inferior. En el tramo superior se instaló una tubería para la salida de aire (ventosa) y en el tramo final, se configuró la tubería a modo de

trampa P para frenar la velocidad de llegada en el tanque de distribución (Ver Figura 58).

- Segundo módulo de equipos: En el módulo ubicado en el primer nivel de laboratorio de hidráulica, se halló el tanque de paso, el sistema de fijación de nivel de descarga, los floculadores de placas perforadas y el tanque receptor de descargas como se muestra en la Figura 59 y Figura 60.

Tabla 11: Componentes del Segundo módulo de equipos.

Elementos	Descripción
Tanque de paso	Tanque provisto de 1 salida de agua, al cual va conectada una manguera que se encuentra vinculada por un sistema de fijación de nivel de descarga. Además, posee una línea de rebose que descargaba hacia el tanque receptor de descarga como se muestra en la <i>Figura 59</i> .
Sistema de fijación de nivel de descarga	Consiste de unas barras metálicas suspendidas desde el nivel superior por una tuerca de tope que impedía su caída por gravedad. Además, estaban provistas de un gancho en su nivel inferior para fijar las mangueras de descarga hacia los embudos que conectaron a los floculadores mediante mangueras, así como se muestra en la <i>Figura 59</i> . El nivel de salida de la manguera, y en consecuencia su caudal de transporte, se definía modificando la altura de la barra metálica con ayuda de la tuerca de tope ubicada en su parte superior.
Floculadores de placas perforadas	Se creó un sistema de floculadores que consiste en 4 tubos con 1 codo en la parte superior y otra en la parte inferior por donde llega el agua y se intercomunican los floculadores mediante mangueras. Internamente, dispone de placas perforadas, por donde se desplaza el agua. Los floculadores se mantienen separados, alineados verticalmente y posicionados a una misma distancia y con un nivel de agua descendente en cada floculador, ya que existe una pérdida de carga de accesorios, fricción y orificios. En el contorno de cada placa, se colocó una pequeña capa de neopreno para que cuando se inserte dentro del tubo, no se produzca un flujo por el contorno y de este modo asegurar el

flujo de agua a través del orificio central. Los floculadores se suspendieron a través de sogas atadas hacia el estante y se limitaba su desplazamiento horizontal con abrazaderas (*Figura 59, Figura 61 y Figura 62*)

Manómetro Son 2 mangueras utilizadas como manómetros.

Conducto de desagüe Manguera por donde conduce el agua del desagüe de los floculadores y el tanque receptor de descarga hacia el desagüe de la universidad Ricardo Palma

Fuente: Elaboración propia.



Figura 58: Floculador piloto trabajando en el 1er y 2do nivel del laboratorio de hidráulica.
Fuente: Elaboración propia.

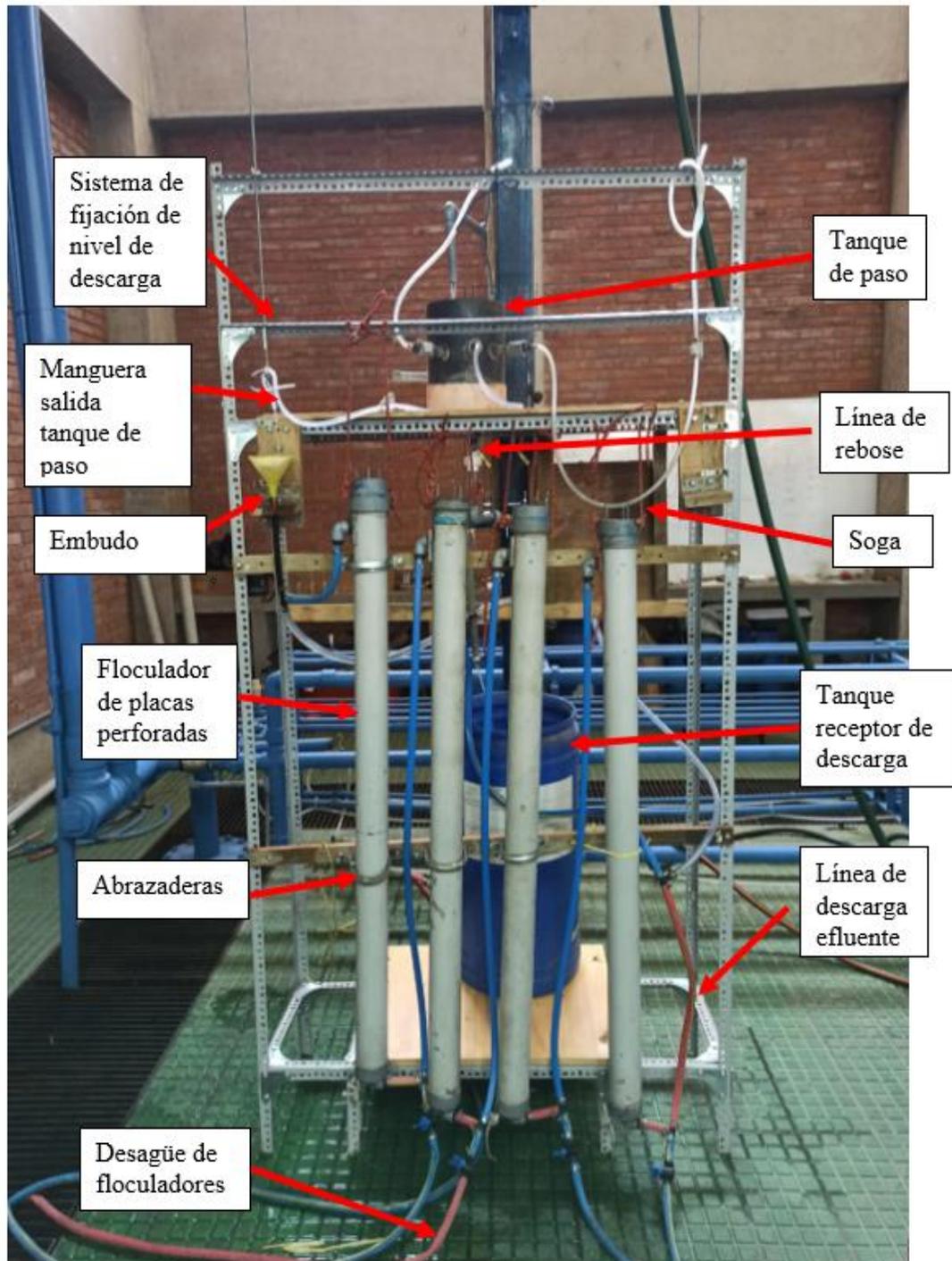


Figura 59: Módulo de floculadores en el 1er nivel del laboratorio de hidráulica.

Fuente: Elaboración propia.

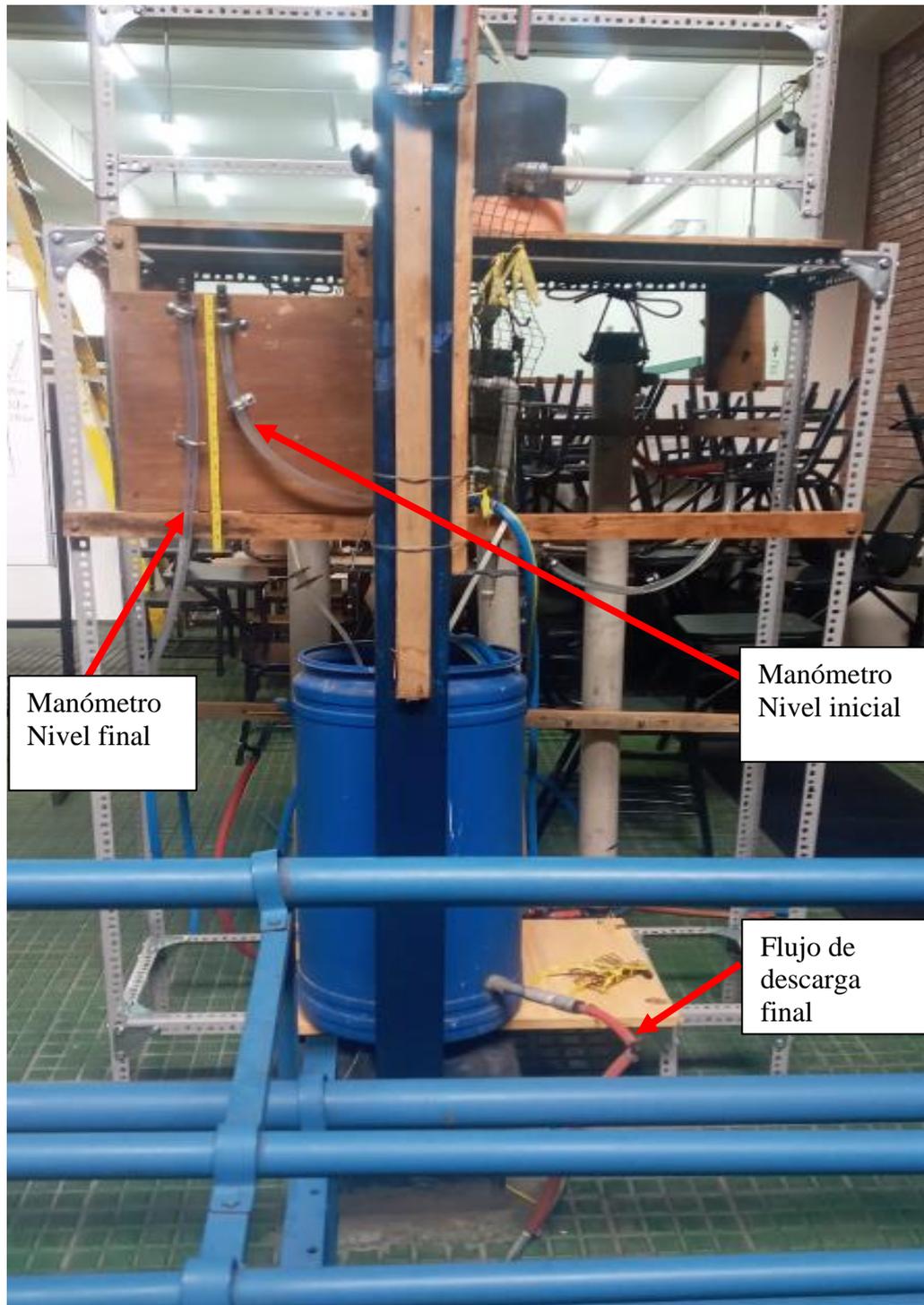


Figura 60: Parte posterior del módulo del 1er nivel del laboratorio de hidráulica.

Fuente: Elaboración propia.

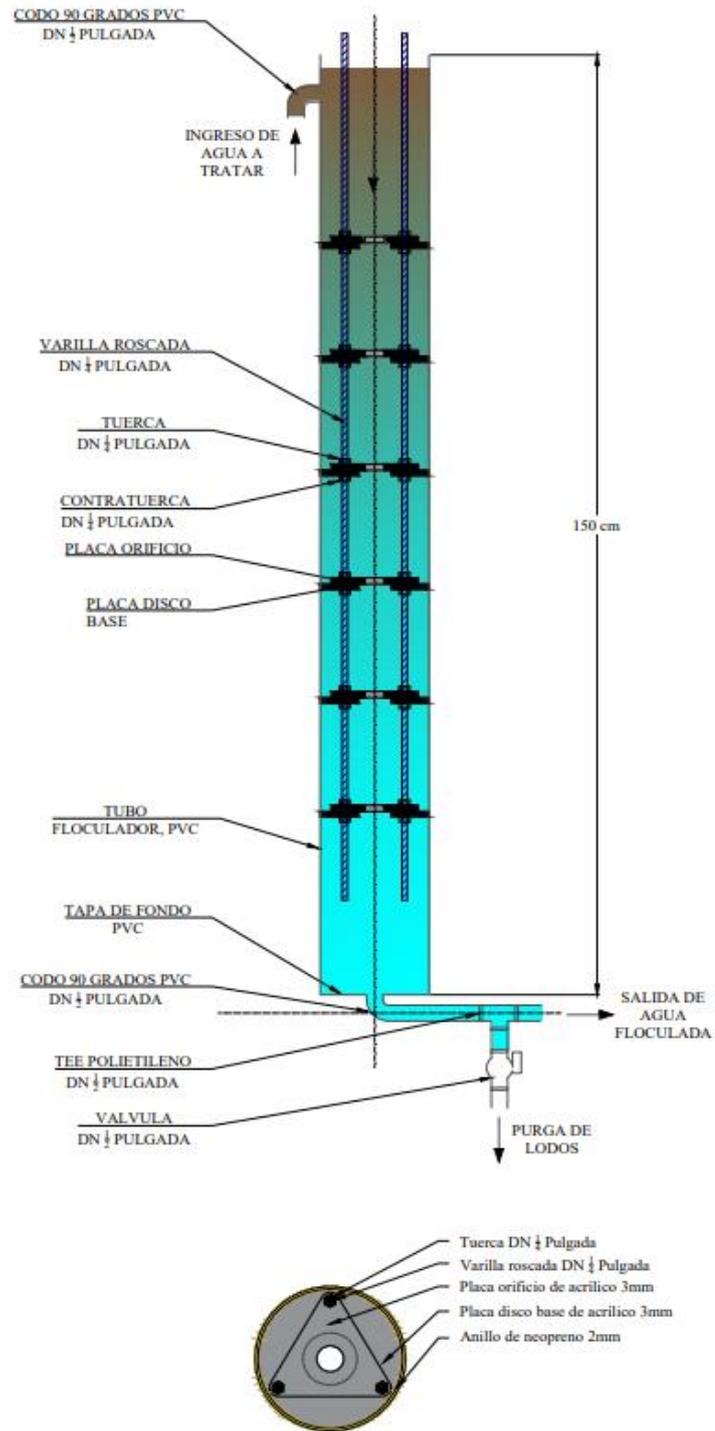


Figura 61: Detalle de floculador de placas perforadas.

Fuente: Elaboración propia.



Figura 62: Inserción de la armadura de placa orificio en el interior del tubo floculador (Izq.)

Vista superior. (Der)

Fuente: Elaboración propia.

5.2. Resultados

5.2.1. Determinación Coeficiente de descarga del orificio

Tabla 12: Corrida experimentales (1-36) para determinación coeficiente K para la pérdida de carga localizada por accesorio

Corridas experimentales	Caudal (L/s)	Velocidad(m/s)	Reynolds	Pérdida de carga debido a fricción(m)	Lectura de pérdida de carga en manómetro (m)	Pérdida de carga localizada por accesorio(m)	K
1	0.005	0.058	575	0.002	0.003	0.001	4.937
2	0.008	0.087	863	0.003	0.005	0.002	4.599
3	0.010	0.115	1150	0.004	0.008	0.004	5.411
4	0.013	0.144	1438	0.005	0.011	0.006	5.270
5	0.015	0.173	1726	0.006	0.014	0.008	4.915
6	0.018	0.202	2013	0.008	0.019	0.011	5.494
7	0.020	0.231	2301	0.012	0.024	0.012	4.524
8	0.023	0.260	2588	0.015	0.030	0.015	4.489
9	0.025	0.289	2876	0.018	0.037	0.019	4.546
10	0.028	0.318	3164	0.021	0.044	0.023	4.455
11	0.030	0.346	3451	0.025	0.052	0.027	4.448
12	0.033	0.375	3739	0.029	0.061	0.032	4.492
13	0.035	0.404	4026	0.033	0.070	0.037	4.446
14	0.038	0.433	4314	0.037	0.080	0.043	4.449
15	0.040	0.462	4602	0.042	0.091	0.049	4.484
16	0.043	0.491	4889	0.047	0.102	0.055	4.459
17	0.045	0.520	5177	0.053	0.114	0.061	4.466
18	0.048	0.549	5464	0.058	0.127	0.069	4.495

Corridas experimentales	Caudal (L/s)	Velocidad(m/s)	Reynolds	Pérdida de carga debido a fricción(m)	Lectura de pérdida de carga en manómetro (m)	Pérdida de carga localizada por accesorio(m)	K
19	0.050	0.577	5752	0.064	0.140	0.076	4.482
20	0.053	0.606	6040	0.070	0.154	0.084	4.490
21	0.055	0.635	6327	0.076	0.169	0.093	4.515
22	0.058	0.664	6615	0.083	0.184	0.101	4.508
23	0.060	0.693	6902	0.089	0.200	0.111	4.516
24	0.063	0.722	7190	0.097	0.216	0.119	4.500
25	0.065	0.751	7478	0.104	0.233	0.129	4.500
26	0.068	0.780	7765	0.111	0.251	0.140	4.511
27	0.070	0.808	8053	0.119	0.269	0.150	4.502
28	0.073	0.837	8340	0.127	0.288	0.161	4.505
29	0.075	0.866	8628	0.135	0.307	0.172	4.492
30	0.078	0.895	8916	0.144	0.327	0.183	4.489
31	0.080	0.924	9203	0.152	0.348	0.196	4.495
32	0.083	0.953	9491	0.161	0.370	0.209	4.509
33	0.085	0.982	9778	0.171	0.392	0.221	4.509
34	0.088	1.011	10066	0.180	0.414	0.234	4.497
35	0.090	1.039	10354	0.190	0.437	0.247	4.494
36	0.093	1.068	10641	0.199	0.461	0.262	4.497
						K_{promedio}	4.594

Fuente: Elaboración Propia

Tabla 13: Determinación de coeficiente de descargas de orificios para placa orificios. Corridas experimentales (1-36)

Corridas experimentales	Caudal (L/s)	Diámetro de orificio(m)	Número de placas	Velocidad orificio(m/s)	Reynolds	pérdida de carga total por lectura de manómetros(m)	pérdida de carga debido a fricción y accesorios(m)	Pérdida de carga debido a orificios(m)	Cd
1	0.005	0.0065	4	0.151	929	0.014	0.003	0.011	0.649
2	0.008	0.0088	4	0.123	1029	0.012	0.005	0.007	0.665
3	0.010	0.0098	4	0.133	1233	0.015	0.008	0.007	0.715
4	0.013	0.0130	4	0.095	1166	0.015	0.011	0.004	0.678
5	0.015	0.0065	4	0.452	2788	0.13	0.014	0.116	0.599
6	0.018	0.0088	4	0.288	2402	0.066	0.019	0.047	0.599
7	0.020	0.0098	4	0.265	2465	0.063	0.024	0.039	0.606
8	0.023	0.0130	4	0.171	2099	0.047	0.03	0.017	0.592
9	0.025	0.0065	4	0.753	4646	0.358	0.037	0.321	0.600
10	0.028	0.0088	4	0.452	3775	0.16	0.044	0.116	0.599
11	0.030	0.0098	4	0.398	3698	0.13	0.052	0.078	0.643
12	0.033	0.0130	4	0.247	3031	0.095	0.061	0.034	0.604
13	0.035	0.0065	4	1.055	6504	0.7	0.07	0.63	0.600
14	0.038	0.0088	4	0.617	5147	0.295	0.08	0.215	0.600
15	0.040	0.0098	4	0.530	4930	0.25	0.091	0.159	0.600
16	0.043	0.0130	4	0.323	3964	0.161	0.102	0.059	0.600
17	0.045	0.0065	2	1.356	8363	0.635	0.114	0.521	0.600
18	0.048	0.0088	4	0.781	6520	0.472	0.127	0.345	0.600
19	0.050	0.0098	4	0.663	6163	0.389	0.14	0.249	0.600
20	0.053	0.0130	4	0.399	4897	0.244	0.154	0.09	0.600
21	0.055	0.0065	2	1.657	10221	0.947	0.169	0.778	0.600

Corridas experimentales	Caudal (L/s)	Diámetro de orificio(m)	Número de placas	Velocidad orificio(m/s)	Reynolds	pérdida de carga total por lectura de manómetros(m)	pérdida de carga debido a fricción y accesorios(m)	Pérdida de carga debido a orificios(m)	Cd
22	0.058	0.0088	4	0.945	7893	0.69	0.184	0.506	0.600
23	0.060	0.0098	4	0.795	7395	0.558	0.2	0.358	0.600
24	0.063	0.0130	4	0.475	5830	0.344	0.216	0.128	0.599
25	0.065	0.0065	1	1.959	12079	0.776	0.233	0.543	0.600
26	0.068	0.0088	4	1.110	9265	0.93	0.251	0.679	0.608
27	0.070	0.0098	4	0.928	8628	0.757	0.269	0.488	0.600
28	0.073	0.0130	4	0.550	6762	0.45	0.288	0.162	0.617
29	0.075	0.0065	1	2.260	13938	1.03	0.307	0.723	0.600
30	0.078	0.0088	2	1.274	10638	0.787	0.327	0.46	0.600
31	0.080	0.0098	4	1.061	9861	0.985	0.348	0.637	0.600
32	0.083	0.0130	4	0.626	7695	0.592	0.37	0.222	0.600
33	0.085	0.0065	1	2.562	15796	1.31	0.392	0.918	0.604
34	0.088	0.0088	2	1.439	12011	1	0.414	0.586	0.600
35	0.090	0.0098	3	1.193	11093	1.042	0.437	0.605	0.600
36	0.093	0.0130	4	0.702	8628	0.74	0.461	0.279	0.600
								Cd _{promedio}	0.611

Fuente: Elaboración Propia

Empleando el software de procesamiento estadístico Minitab 19, se determinó se hizo el análisis estadístico descriptivo del coeficiente de descarga:

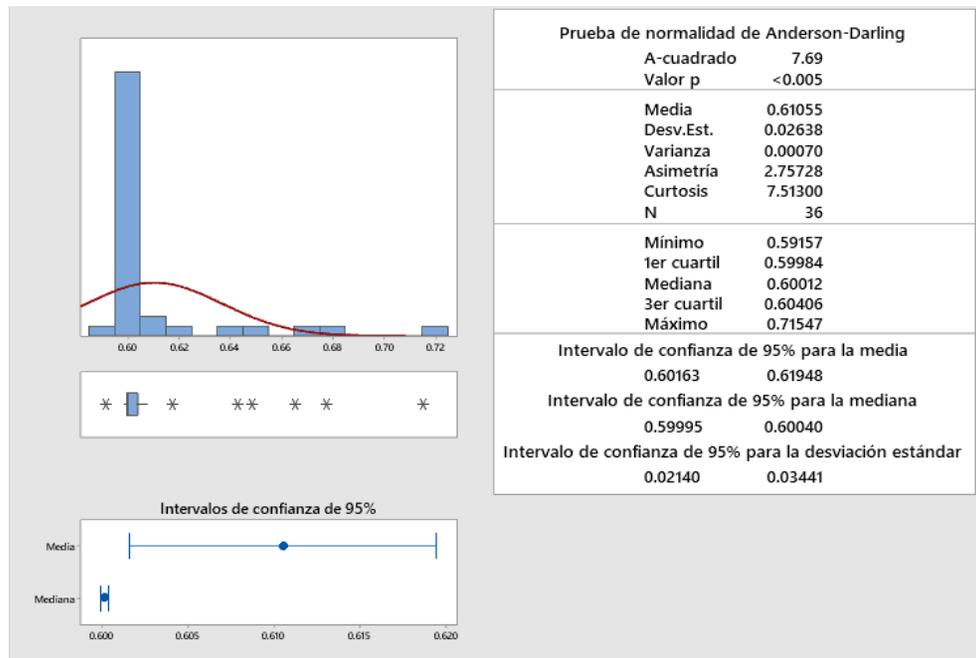


Figura 63: Estadístico descriptivo del coeficiente de descarga

Fuente: Elaboración propia por Minitab 19.

A continuación se muestra la gráfica del valor de coeficiente de descarga para cada número de reynolds experimentado:

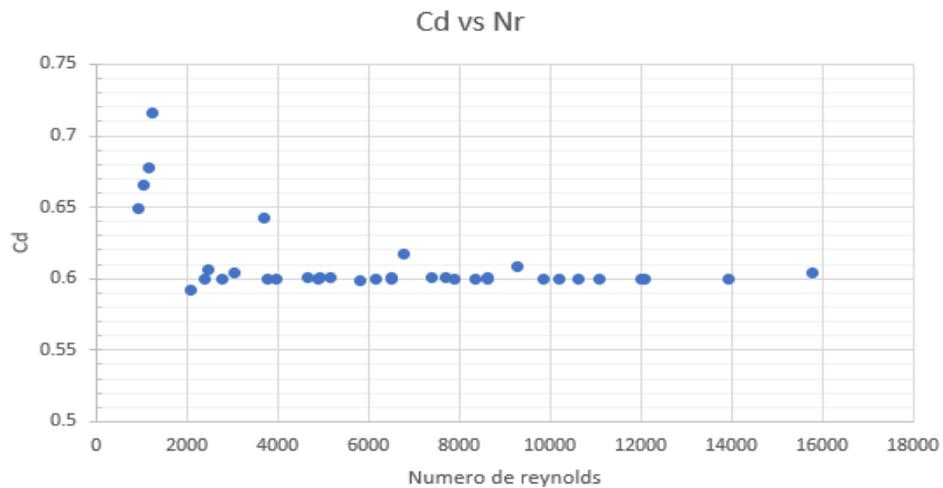


Figura 64: Coeficiente de descarga vs Número de Reynolds

Fuente: Elaboración propia en el minitab.

5.3. Prueba de hipótesis

Se realizó un análisis comparativo de la media para la prueba de hipótesis en el software Minitab 19.

Tabla 14: Valor de Z y P

Hipótesis	
Hipótesis nula	$H_0: \mu = 0.6$
Hipótesis alterna	$H_1: \mu \neq 0.6$
Valor Z	Valor p
2.44	0.015

Fuente: Elaboración propia por Minitab 19

Efecto gradiente de velocidad y tiempo de retención sobre la eficiencia de remoción de turbiedad.

Tabla 15: Resultado de prueba de jarras

Resultado prueba de jarras			
Dosis de coagulante	Turbiedad afluente	Turbiedad efluente	Remoción de turbiedad
10	26.3	4	84.8
20	26.3	3.3	87.5
30	26.3	2.4	90.9
40	26.3	2.1	92.0
50	26.3	1.8	93.2
60	26.3	1.9	92.8
70	26.3	2.5	90.5
80	26.3	2.3	91.3

Fuente: Elaboración propia

A continuación, se muestra gráficamente la relación entre la turbiedad efluente y eficiencia de remoción de turbiedad con respecto a la dosis de coagulante. Los datos de la *Figura 65*: Resultado de prueba de jarras *Figura 65* provienen de la Tabla 15.

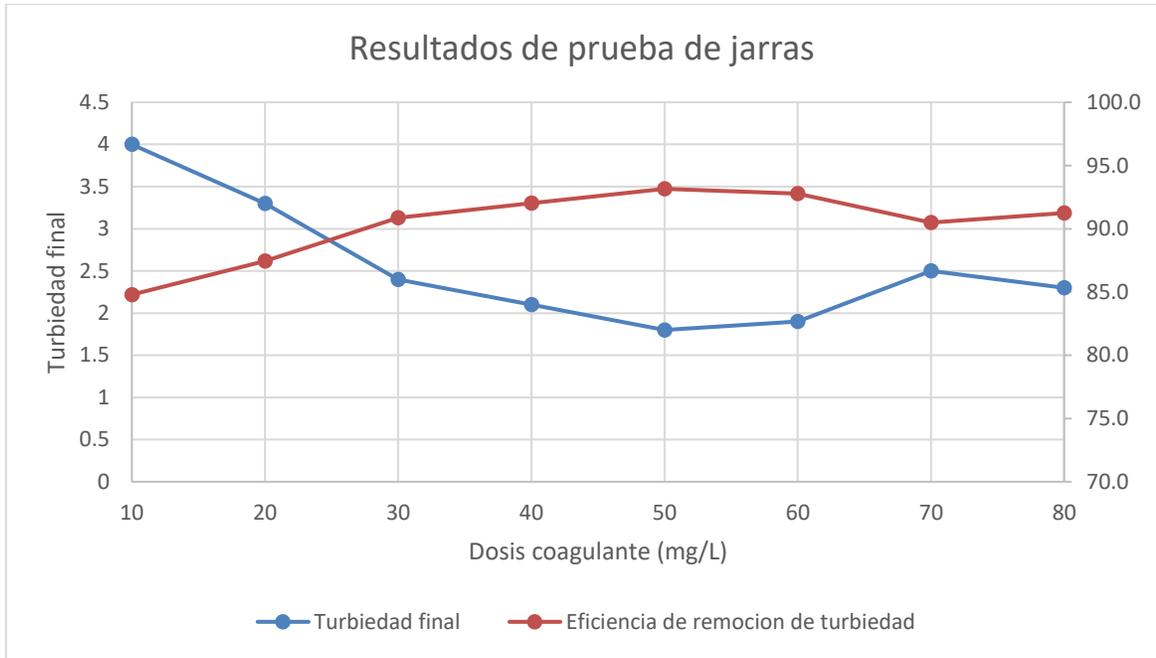


Figura 65: Resultado de prueba de jarras.

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 16: Determinación de eficiencia de la remoción de turbiedad con respecto a los factores gradiente velocidad y tiempo de retención. Corridas experimentales (37-72)

Corrida experimental	Réplica	Factores		Afluente	Efluente	Efluente
		Gradiente de velocidad	Tiempo de retención	Turbiedad	Turbiedad	Eficiencia
37	1	18	12	31	9.8	68.4
38	2	18	12	36	10.3	71.3
39	3	18	12	19	7.2	62.1
40	4	18	12	32	12.8	60.1
41	1	18	18	33	9.1	72.5
42	2	18	18	26	5.6	78.3
43	3	18	18	23	4.5	80.3
44	4	18	18	20	6.8	65.8
45	1	18	24	35	9.9	71.8
46	2	18	24	28	5.5	80.4
47	3	18	24	20	2.9	85.4
48	4	18	24	24	4.0	83.2
49	1	24	12	31	7.6	75.5
50	2	24	12	22	7.2	67.2
51	3	24	12	33	10.3	68.9

Corrida experimental	Réplica	Factores		Afluente	Efluente	Efluente
		Gradiente de velocidad	Tiempo de retención	Turbiedad	Turbiedad	Eficiencia
52	4	24	12	27	9.1	66.2
53	1	24	18	29	2.8	90.3
54	2	24	18	19	3.0	84.1
55	3	24	18	33	7.0	78.9
56	4	24	18	25	3.3	86.7
57	1	24	24	30	3.1	89.7
58	2	24	24	30	6.3	79.1
59	3	24	24	34	3.3	90.4
60	4	24	24	20	3.0	85.1
61	1	36	12	28	12.5	55.3
62	2	36	12	28	11.2	60.1
63	3	36	12	20	10.3	48.7
64	4	36	12	24	11.4	52.4
65	1	36	18	36	14.9	58.7
66	2	36	18	36	18.1	49.8
67	3	36	18	24	9.1	62.2
68	4	36	18	31	13.3	57.1
69	1	36	24	24	9.0	62.3
70	2	36	24	29	10.1	65.1
71	3	36	24	18	7.7	57.1
72	4	36	24	34	15.0	55.9

Fuente: Elaboración propia

5.3.1. Análisis de varianza

Utilizando el programa de procesamiento estadístico conocido como minitab 19, se obtuvo el análisis de varianza (Ver Tabla 17), diagrama de Pareto (Ver Figura 66), análisis residual (Ver Figura 67), gráfica de efectos principales (Ver Figura 68), gráfica interacción (Ver Figura 69) y gráfica de contorno (Ver Figura 70).

Tabla 17: Análisis de Varianza

Fuente	GL	SC	MC	Valor F	Valor P
		Ajuste.	Ajuste.		
Modelo	8	4584.5	573.06	21.27	0.000
Lineal	4	4374.2	1093.54	40.58	0.000
Gradiente de velocidad	2	3381.8	1690.88	62.75	0.000
Tiempo de retención	2	992.4	496.21	18.41	0.000
Interacciones de 2 términos	4	210.3	52.57	1.95	0.131
Gradiente de velocidad*Tiempo de retención	4	210.3	52.57	1.95	0.131
Error	27	727.6	26.95		
Total	35	5312.1			

Fuente: Elaboración propia por Minitab 19

Tabla 18 : Ajuste y predicción del modelo

S	R-cuad.	R-cuad. (ajustado)	R-cuad. (pred)
5.19112	86.30%	82.24%	75.65%

Fuente: Elaboración propia por Minitab 19.

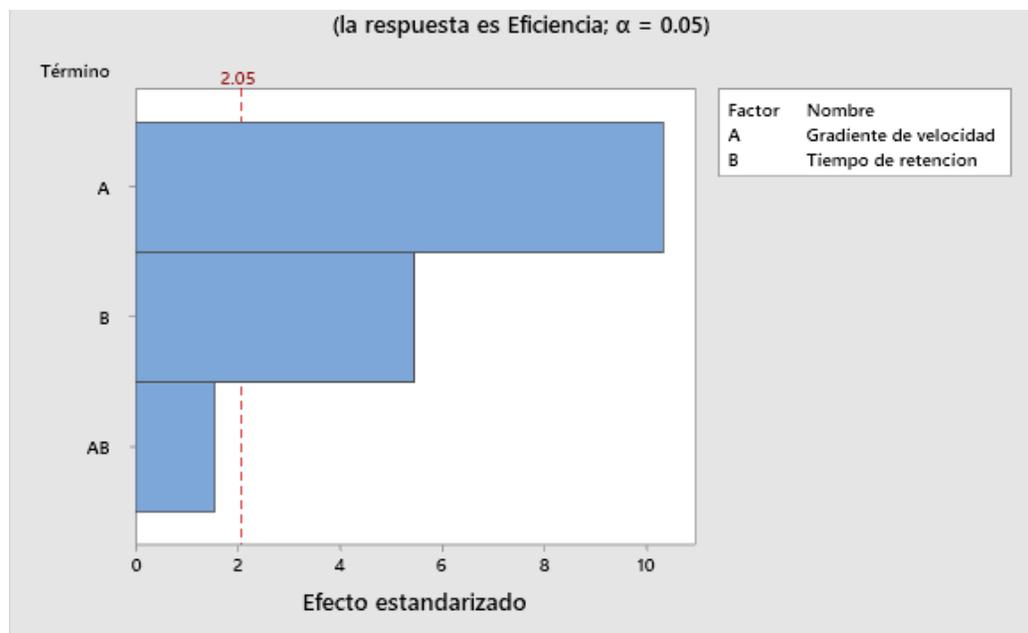


Figura 66: Diagrama de Pareto de efectos estandarizados.

Fuente: Elaboración propia por Minitab 19.

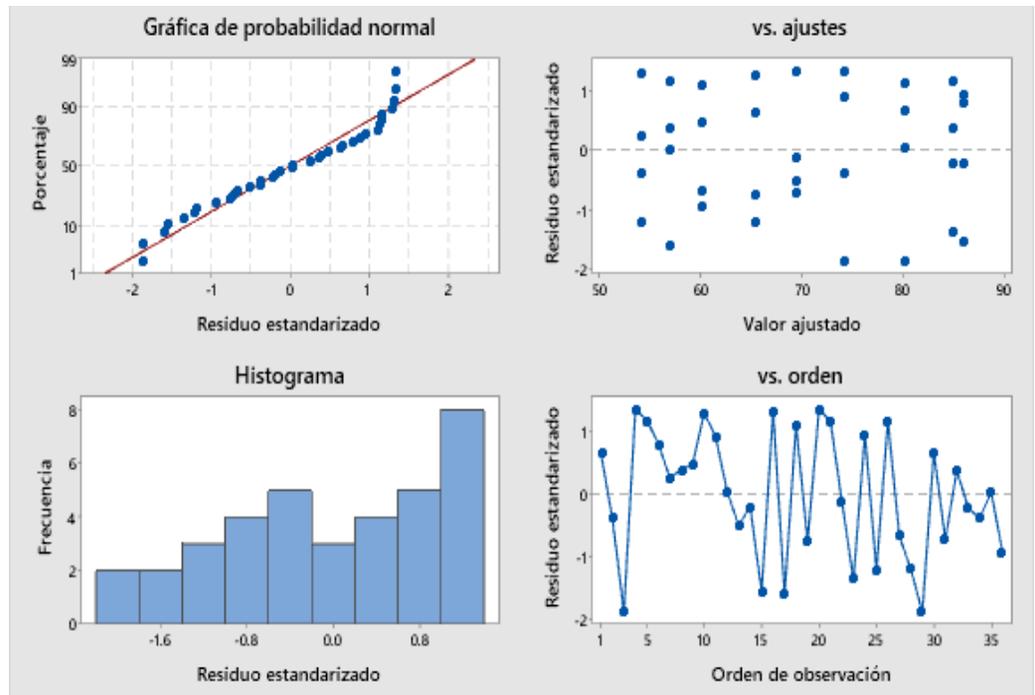


Figura 67: Gráfica del análisis de residuos para validación de ANOVA.

Fuente: Elaboración propia por Minitab 19.

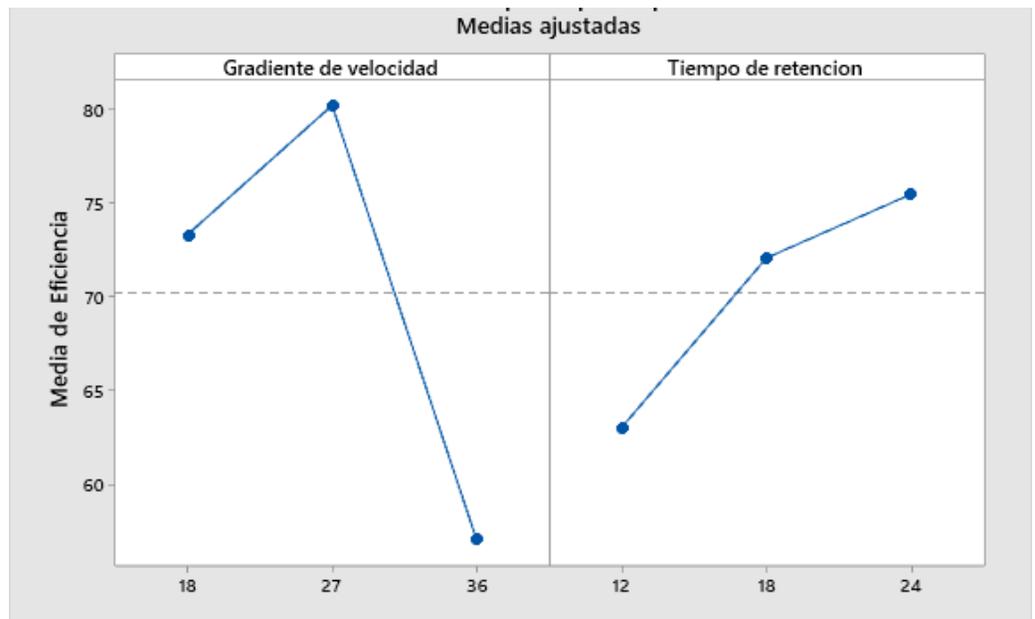


Figura 68: Gráfica de efectos principales.

Fuente: Elaboración propia por Minitab 19.

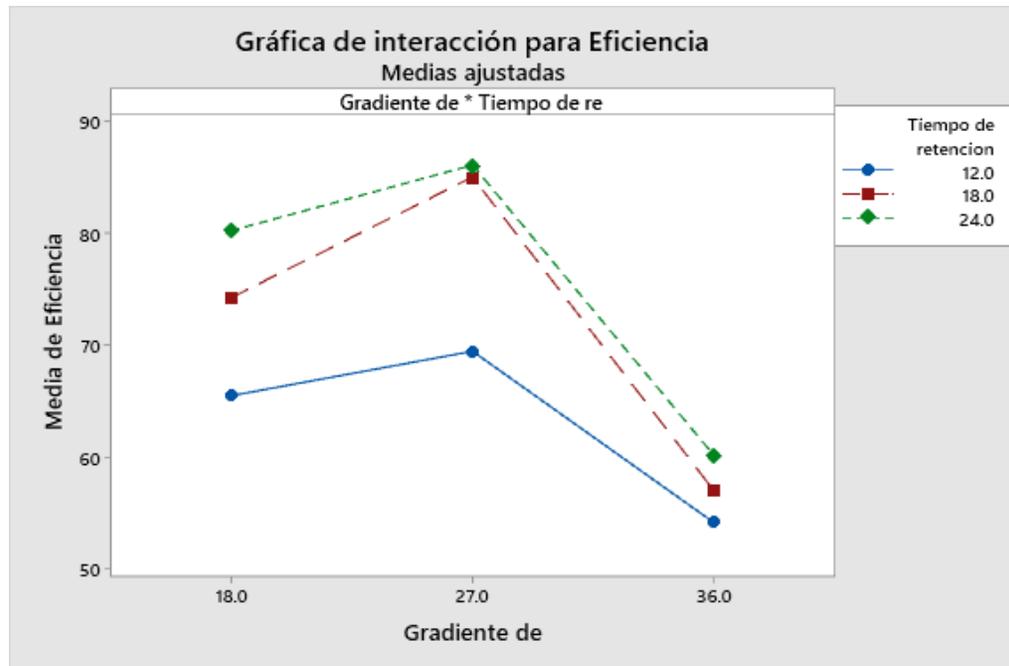


Figura 69: Gráfica de interacción.

Fuente: Elaboración propia por Minitab 19.

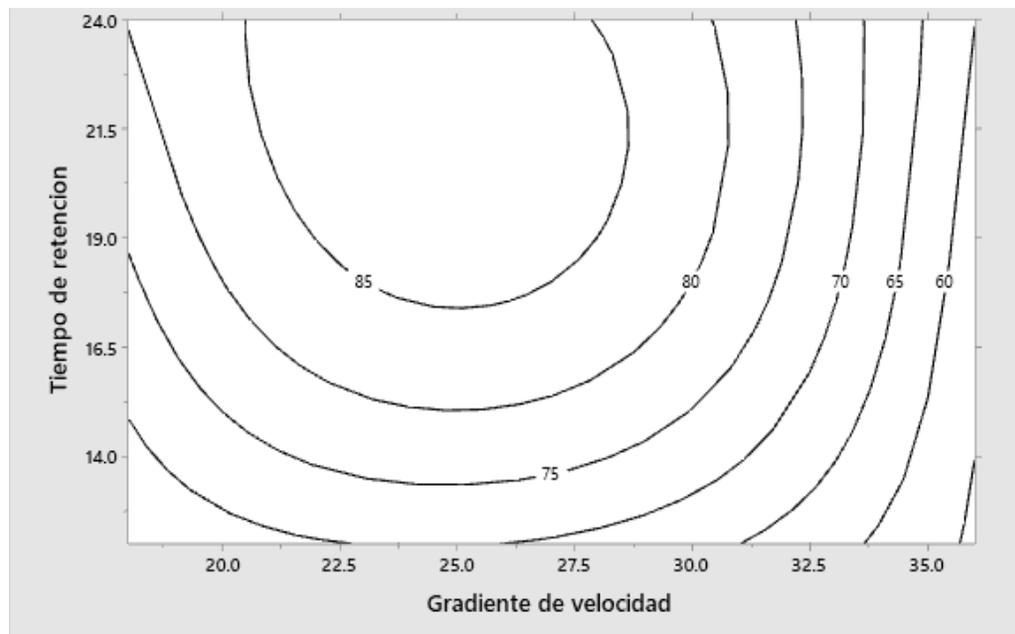


Figura 70: Gráfica de contorno.

Fuente: Elaboración propia por Minitab 19.

5.3.2. Modelación de la eficiencia de remoción de turbiedad

Utilizando Minitab 19 se realizó un ajuste de los datos obtenidos a un modelo cuadrático que relacione la eficiencia de remoción de turbiedad a la gradiente velocidad y tiempo de retención.

A continuación, se realizó un análisis de varianza (Ver *Tabla 19*) y se generó el diámetro de Pareto (Ver *Figura 71*), para determinar si los efectos cuadráticos o lineales de los factores son significativos y predecir la eficiencia de remoción de turbiedad. El diagrama de Pareto (Ver *Figura 72*) considero solo los componentes significativos. La gráfica de residuos (Ver *Figura 73*) corresponde al modelo cuadrático que considera únicamente a los componentes significativos (*Figura 72*).

Tabla 19: Análisis de varianza.

Fuente	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor P
Modelo	5	4450.74	890.15	31.00	0.000
Lineal	2	2511.52	1255.76	43.74	0.000
Gradiente de velocidad	1	1582.75	1582.75	55.13	0.000
Tiempo de retención	1	928.77	928.77	32.35	0.000
Cuadrado	2	1862.66	931.33	32.44	0.000
Gradiente de velocidad*Gradiente de velocidad	1	1799.00	1799.00	62.66	0.000
Tiempo de retención*Tiempo de retención	1	63.66	63.66	2.22	0.147
Interacción de 2 factores	1	76.56	76.56	2.67	0.113
Gradiente de velocidad*Tiempo de retención	1	76.56	76.56	2.67	0.113
Error	30	861.32	28.71		
Falta de ajuste	3	133.73	44.58	1.65	0.200
Error puro	27	727.59	26.95		
Total	35	5312.06			

Fuente: Elaboración propia por Minitab 19.

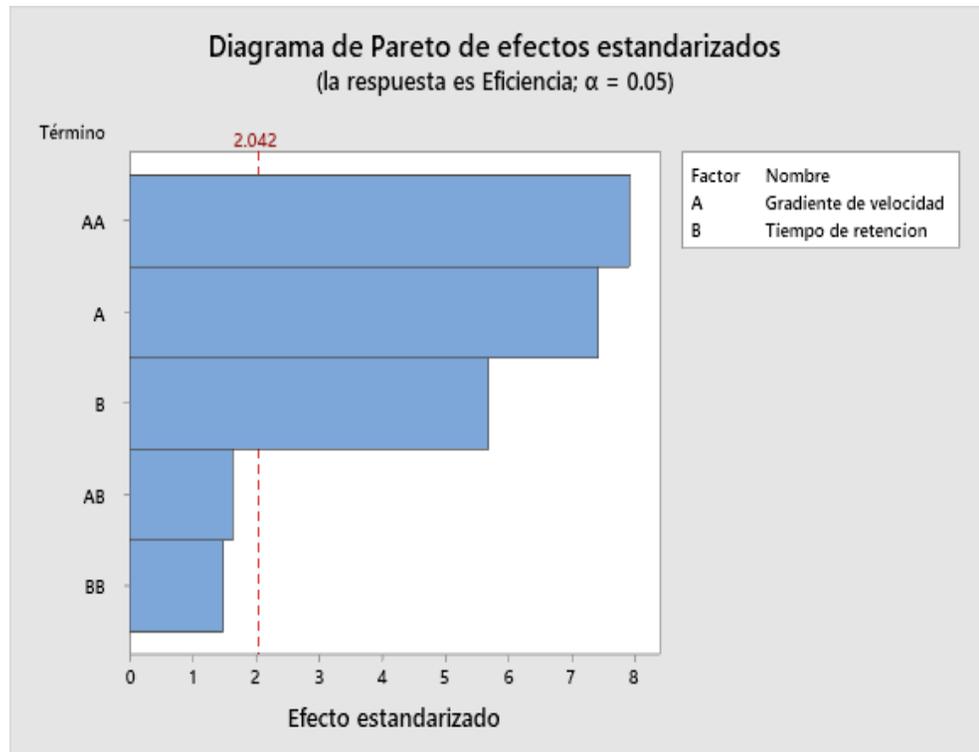


Figura 71: Diagrama de Pareto de efectos estandarizados.

Fuente: Elaboración propia por Minitab 19.

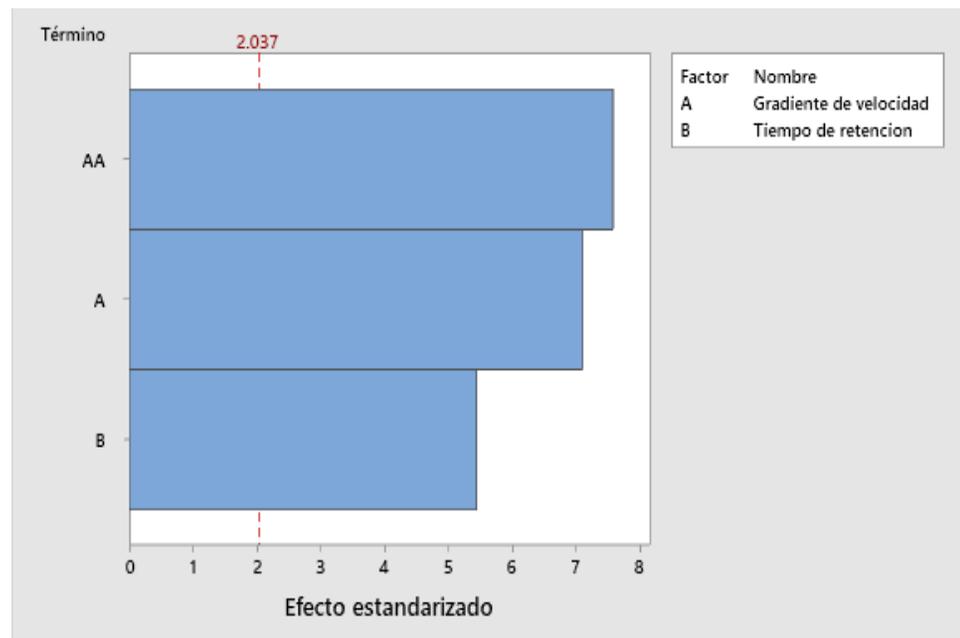


Figura 72: Diagrama de Pareto de efectos estandarizados aprobados.

Fuente: Elaboración propia por Minitab 19.

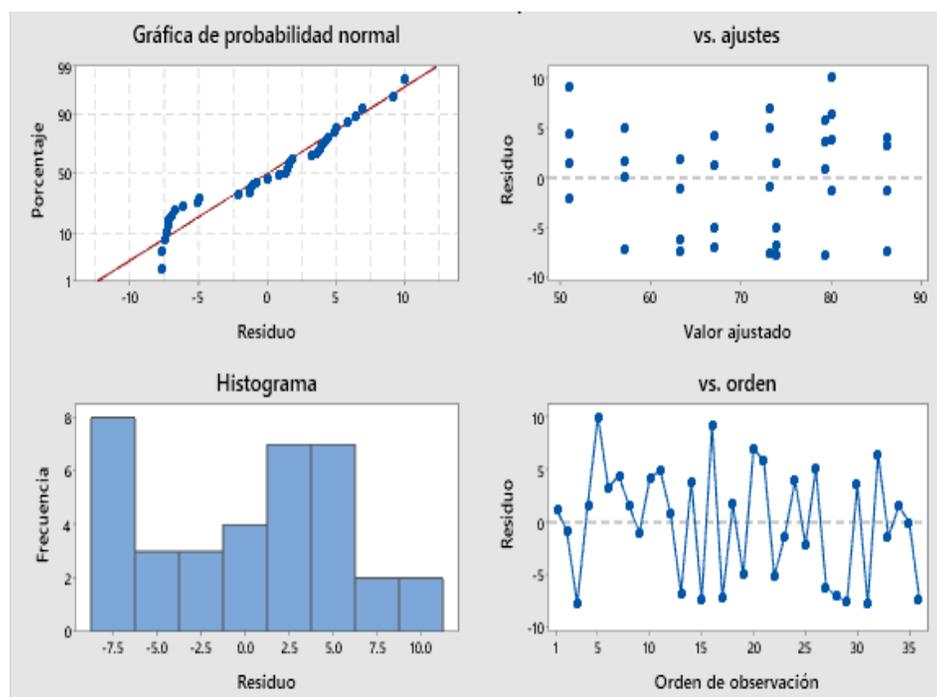


Figura 73: Gráfica de residuos.

Fuente: Elaboración propia por Minitab 19.

Utilizando software Minitab 19 se construyó el modelo matemático de 2do orden que considera los componentes significativos para la predicción de eficiencia con respecto a la gradiente velocidad y tiempo de retención. La expresión es la siguiente:

$$z = -0.1851y^2 + 1.037x + 9.09y - 49.1$$

Donde:

z: Eficiencia de remoción de turbiedad

y: Gradiente de velocidad

x: Tiempo de retención

La Tabla 20 y Figura 74 son resultado del análisis de optimización de Minitab 19.

Estos elementos nos permiten establecer los valores óptimos para los factores considerados.

Tabla 20: Resultado del análisis de optimización

Solución	Gradiente de velocidad	Tiempo de retención	Eficiencia Ajuste	Deseabilidad compuesta
1	24.5455	24	87.4952	0.930341

Fuente: Elaboración propia

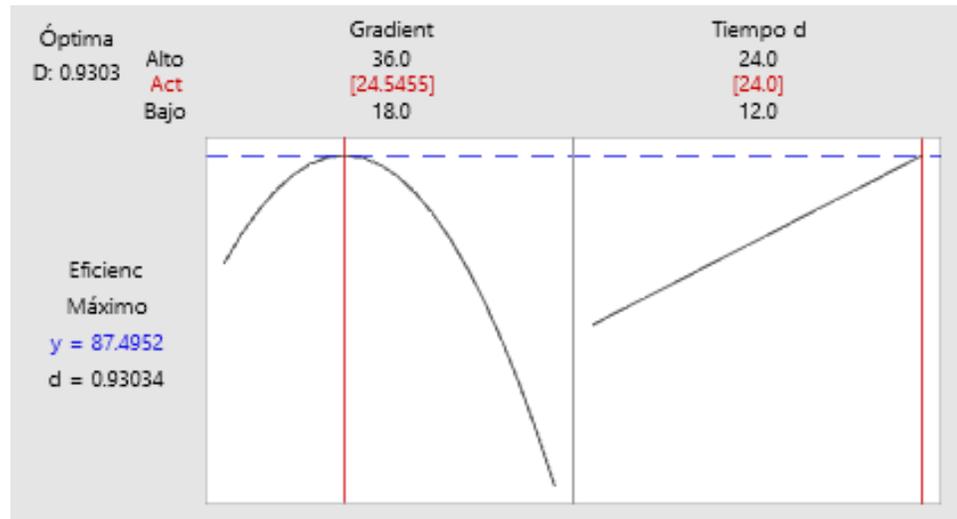


Figura 74: Representación cuadrática y lineal.

Fuente: Elaboración propia por Minitab 19.

5.3.3. Relación de diámetro equivalente de orificios/diámetro de placas y longitud/diámetro de placas.

Con los valores óptimos de la gradiente velocidad y tiempo de retención de la etapa 2 se establecieron las condiciones operativas para la etapa 3.

Tabla 21: Determinación de eficiencia de la remoción de turbiedad con respecto a los factores d/D y d/L. Corridas experimentales (73-88), Gv:24s⁻¹y Tr:24 min.

Corridas experimentales	Factores		Afluente	Efluente	Eficiencia
	d/D	d/L	Turbiedad	Turbiedad	
73	0.12	0.04	31.2	6.9	77.885
74	0.12	0.04	30.3	5.3	82.508
75	0.12	0.04	26.7	2.2	91.760
76	0.12	0.04	24.8	2.5	89.919
77	0.12	0.08	26.1	5.5	78.927
78	0.12	0.08	29.1	3.1	89.347
79	0.12	0.08	30.1	4.3	85.714

Corridas experimentales	Factores		Afluyente	Efluente	Eficiencia
	d/D	d/L	Turbiedad	Turbiedad	
80	0.12	0.08	25.8	2.9	88.760
81	0.18	0.04	25.4	5.7	77.559
82	0.18	0.04	23.3	1.6	93.133
83	0.18	0.04	27.8	3.3	88.129
84	0.18	0.04	19.2	2.7	85.938
85	0.18	0.08	17.8	1.8	89.888
86	0.18	0.08	25.5	4	84.314
87	0.18	0.08	23.5	3.2	86.383
88	0.18	0.08	23.4	3.8	83.761

Fuente: Elaboración Propia

A continuación, utilizando el software Minitab 19 se realizó un análisis de varianza (Ver Tabla 22 y Tabla 21) y se generó el diámetro de Pareto (Ver Figura 75 y Figura 71) y Gráfica de residuos (Ver Figura 76) para determinar si los efectos lineales e interacciones de los factores son significativos y predecir la eficiencia de remoción de turbiedad.

Tabla 22: Análisis de varianza.

Fuente	GL	SC	MC	Valor F	Valor p
		Ajust.	Ajust.		
Modelo	3	1.225	0.4084	0.01	0.998
Lineal	2	1.151	0.5755	0.02	0.980
d/D	1	1.147	1.1467	0.04	0.845
d/L	1	0.004	0.0043	0.00	0.990
Interacciones de 2 términos	1	0.074	0.0742	0.00	0.960
d/D*d/L	1	0.074	0.0742	0.00	0.960
Error	12	343.812	28.6510		
Total	15	345.037			

Fuente: Elaboración propia por Minitab 19.

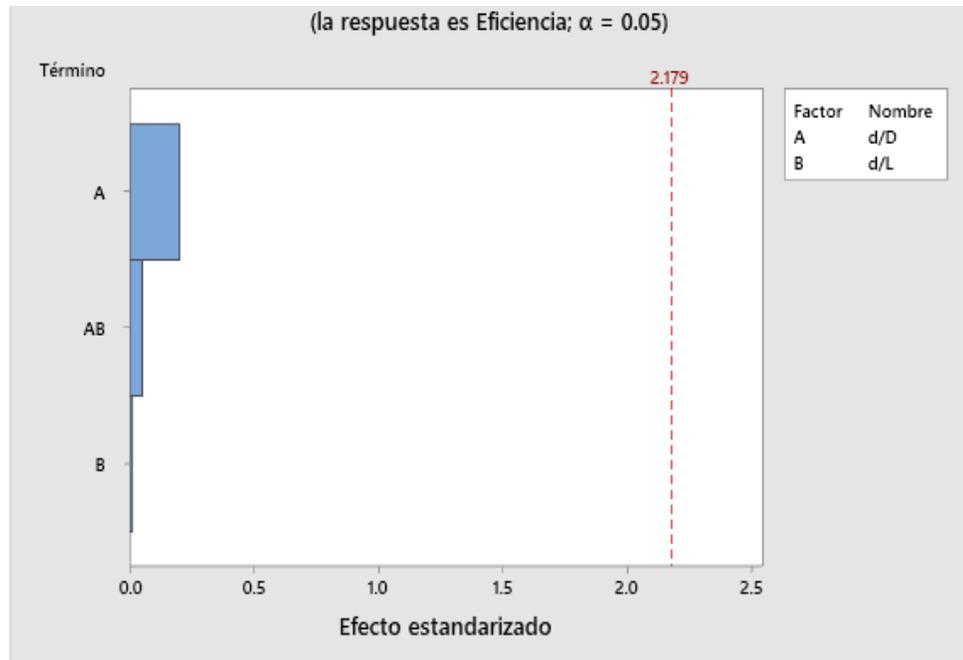


Figura 75: Diagrama de Pareto.

Fuente: Elaboración propia por minitab 19.

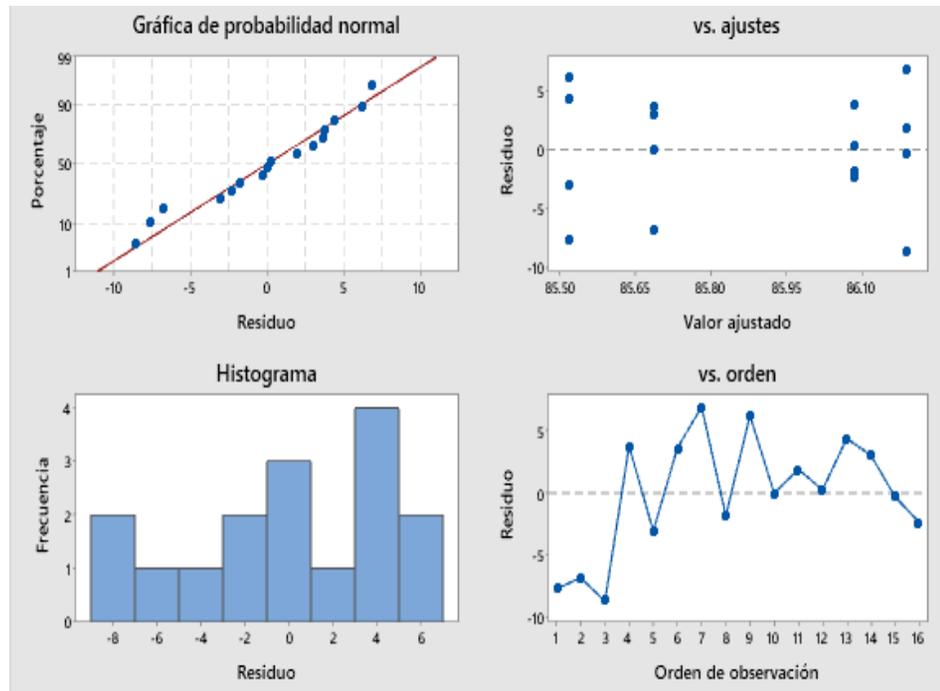


Figura 76: Grafica de residuos para eficiencia.

Fuente: Elaboración propia por minitab 19.

5.3.4. Caracterización de la calidad de agua:

Tabla 23: Caracterización del agua (Corrida 89-100).

Corridas Experimentales	Afluente	Efluente	Afluente	Efluente	Remoción de turbiedad	Variación de Ph.
	Turbiedad	Turbiedad	Ph	Ph		
89	21.2	1.6	7.3	7.2	92.45	1.37
90	17.3	3.9	7.2	7.2	77.46	0.00
91	36.6	3.5	7.2	7.2	90.44	0.00
92	26.8	2.3	7.2	7.2	91.42	0.00
93	37	5	7.3	7.2	86.49	1.37
94	26.5	4.7	7.3	7.2	82.26	1.37
95	18.7	4.3	7.2	7.2	77.01	0.00
96	32.8	3.3	7.2	7.2	89.94	0.00
97	17.9	3.9	7.3	7.2	78.21	1.37
98	30.2	3.7	7.2	7.2	87.75	0.00
99	27.7	1.9	7.3	7.2	93.14	1.37
100	21	4	7.3	7.2	80.95	1.37

Fuente: Elaboración propia

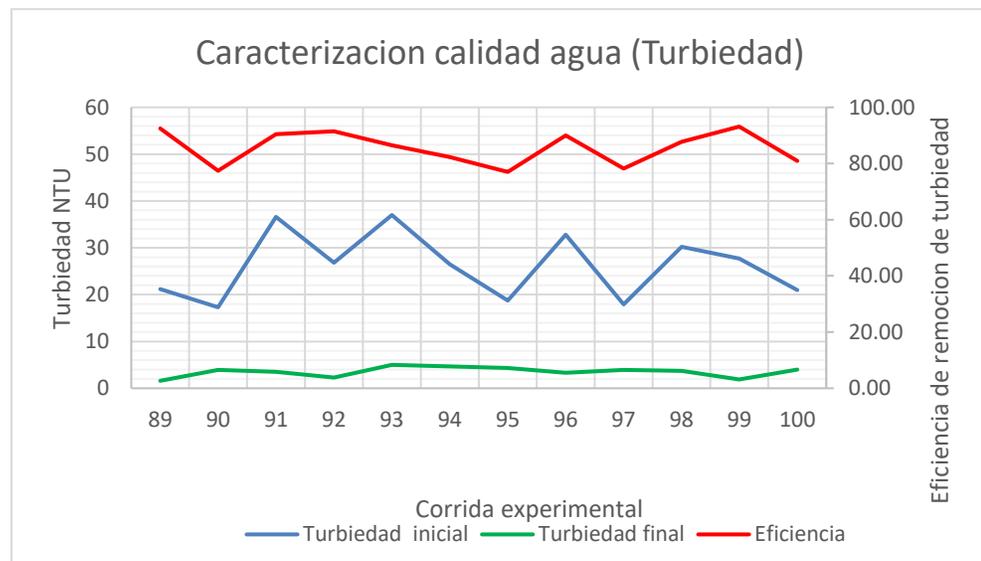


Figura 77: Calidad de agua en términos de turbiedad

Fuente: Elaboración propia

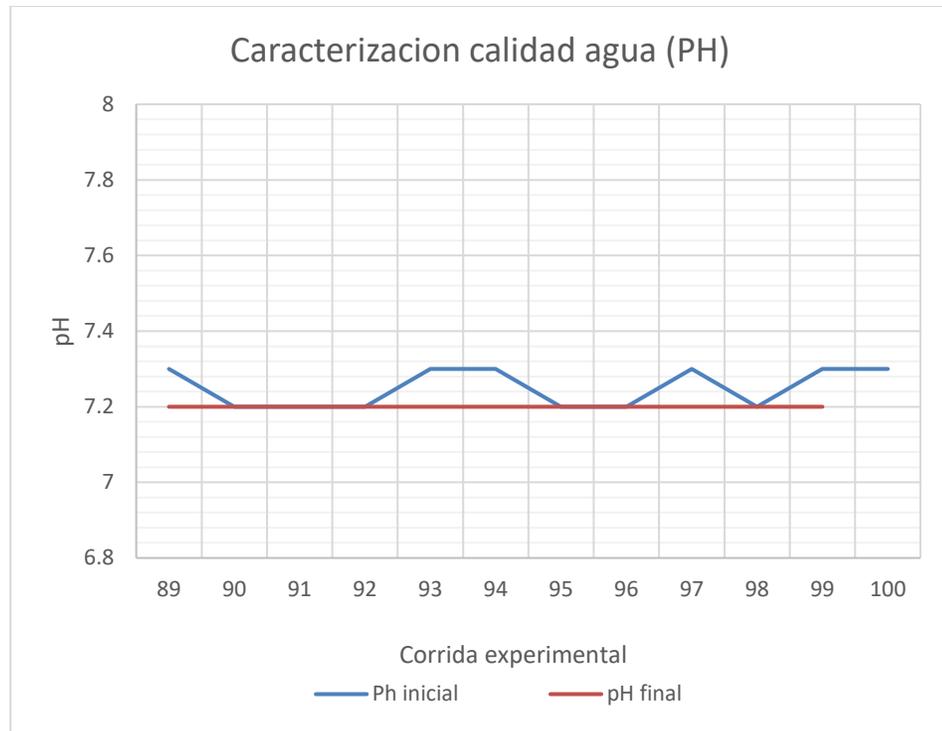


Figura 78: Variación del pH

Fuente: Elaboración propia.

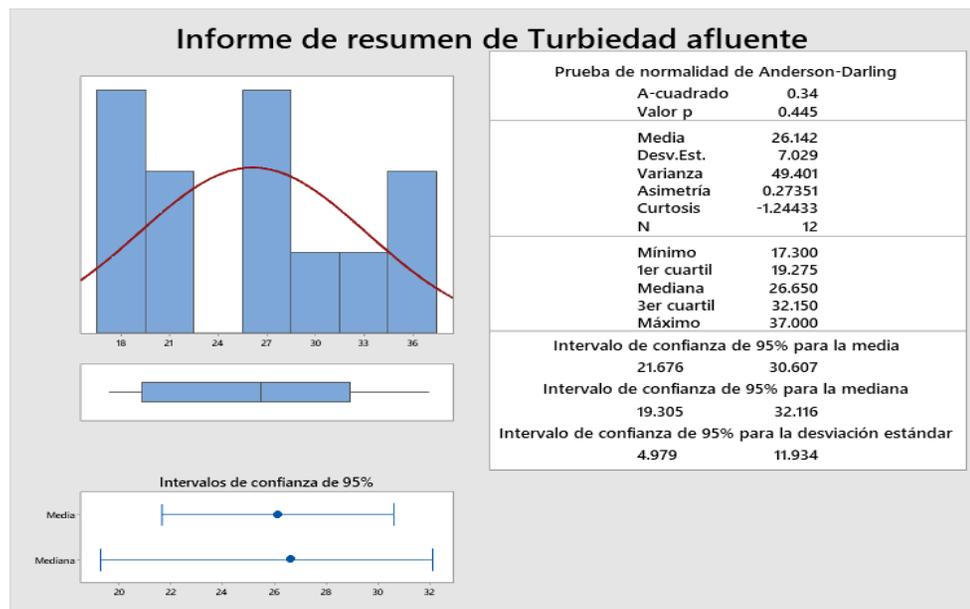


Figura 79: Estadístico descriptivo de turbiedad afluente

Fuente: Elaboración propia por minitab 19

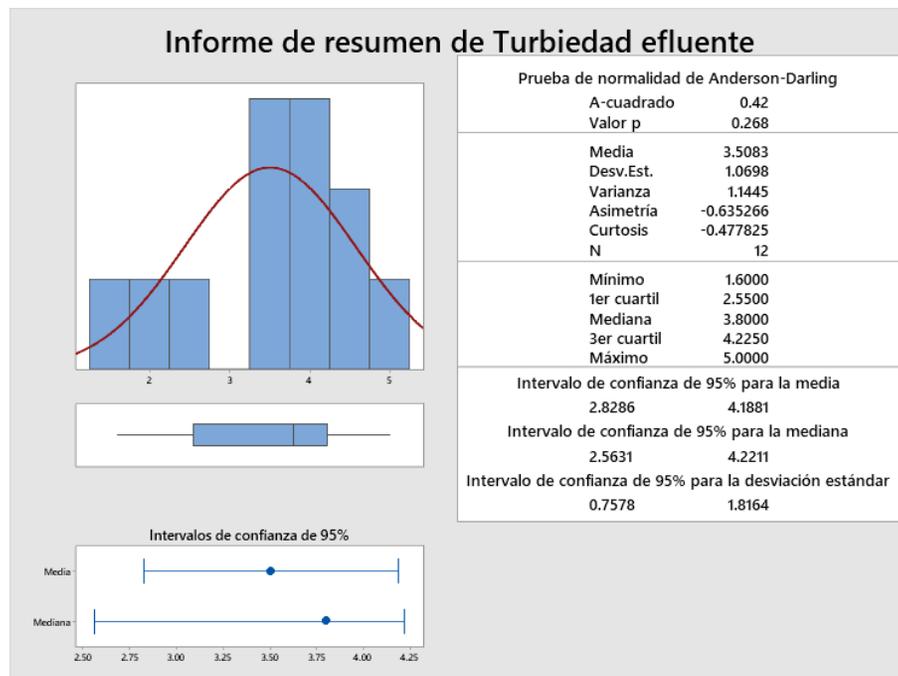


Figura 80: Estadístico descriptivo de turbiedad efluente.

Fuente: Elaboración propia por minitab 19.

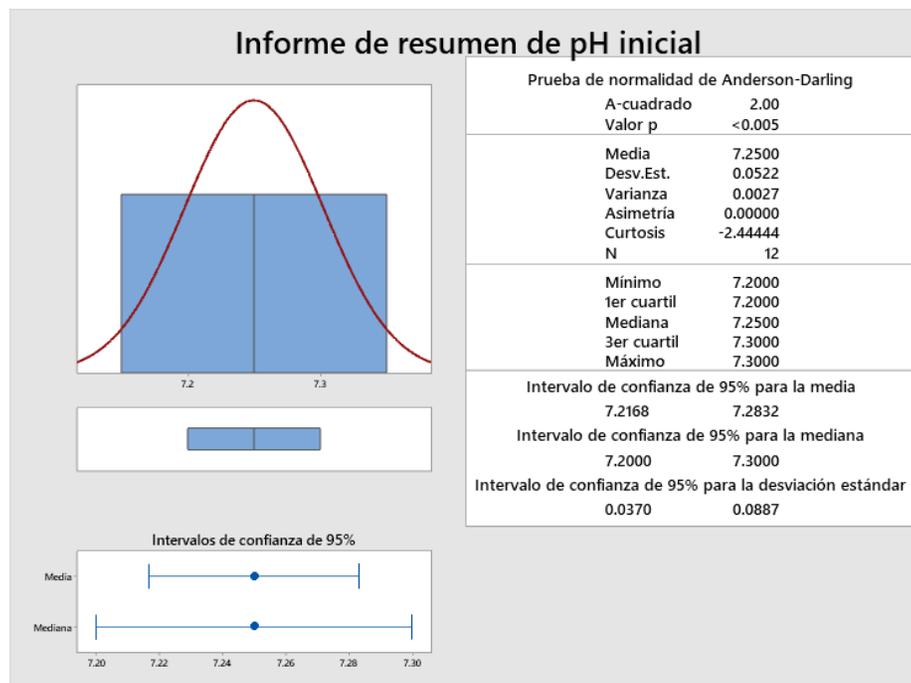


Figura 81: Estadístico descriptivo de pH inicial.

Fuente: Elaboración propia por minitab 19.

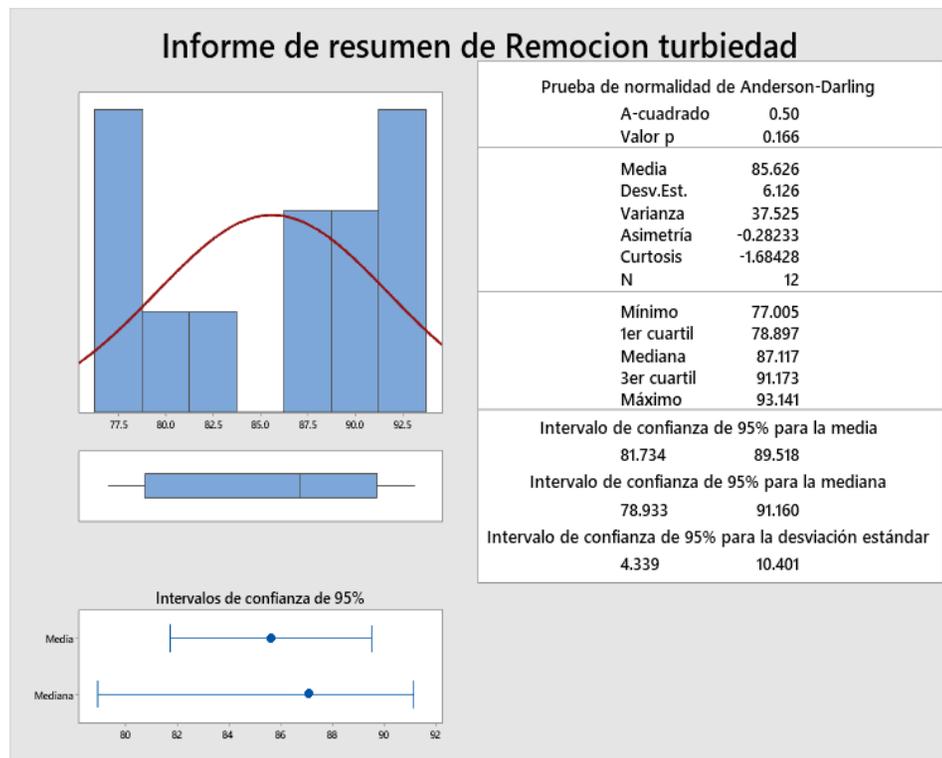


Figura 82: Estadístico descriptivo de eficiencia de Remoción de turbiedad.

Fuente: Elaboración propia por minitab 19.

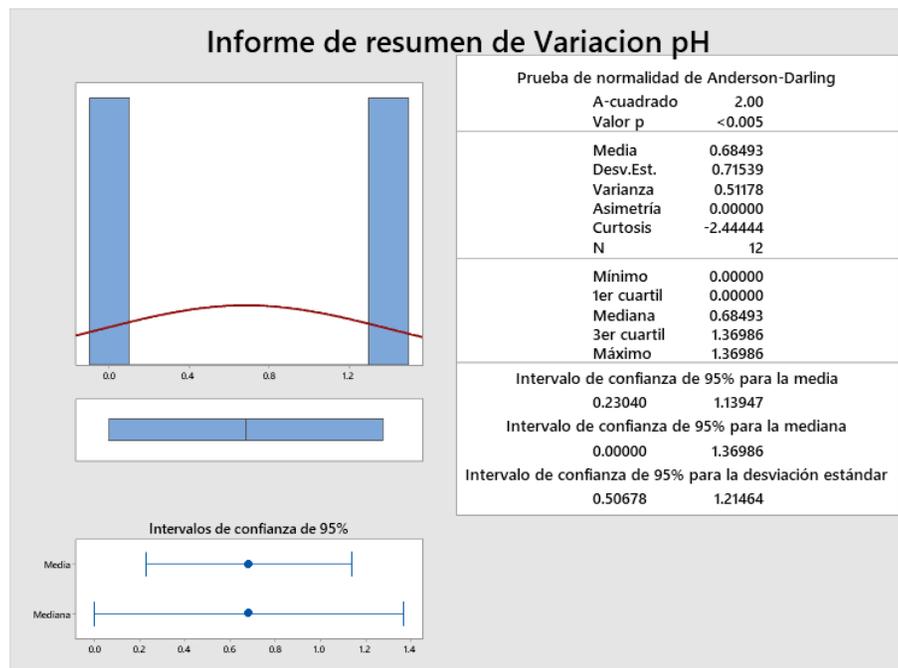


Figura 83: Estadístico descriptivo de Variación Ph.

Fuente: Elaboración propia por minitab 19.

5.3.5. Prueba de hipótesis

Tabla 24: Prueba de hipótesis para eficiencia de remoción de turbiedad

Hipótesis	
Hipótesis nula	$H_0: \mu = 70$
Hipótesis alterna	$H_1: \mu > 70$
Valor Z	Valor p
8.84	0.000

Fuente: Elaboración propia

5.4. Análisis de resultados

5.4.1. Coeficiente de descarga del orificio

- El valor de K (coeficiente pérdidas de cargas localizadas) resultó 4.594 (Ver Tabla 12). Este coeficiente es debido a la presencia de codos y tee en los canales de interconexión utilizados en nuestro experimento. El coeficiente de descarga promedio es 0.611 (Ver Tabla 13) y se encuentra dentro del rango [0.60163-0.61948] (Figura 63).
- Para régimen de flujo laminar (Reynolds menor a 2000) el coeficiente de descarga varía de 0.6 hasta 0.75 y para régimen de flujo turbulento tiende a 0.61 (Ver Figura 64). En el estudio realizado por (Abd, Alomar, & Mohamed, 2019) para régimen del flujo laminar había mucha variación del Reynolds, el coeficiente variaba entre 0.50 y 0.85, y esta diferencia con respecto a nuestro experimento se atribuye a que se realizó un estudio a escala laboratorio. En el estudio realizado por (Wu, Burton, & Schoenau, 2002) en el régimen del flujo laminar el coeficiente de descarga era creciente hasta llegar a cierto valor límite, a partir del cual tiende 0.60. En nuestro experimento también se comprobó ese patrón de variación.
- De la prueba de hipótesis (Ver Tabla 14) se observa que el Valor P es menor a 0.05, por lo tanto, se acepta la hipótesis nula que establece que el coeficiente de descarga tiene un valor de 0.60.

5.4.2. Efecto gradiente velocidad y tiempo de retención sobre la eficiencia

- La dosis óptima coagulante determinada en la prueba de jarras es de 50 mg/L (Ver Figura 65). Dosis mayores de coagulante no se refleja en un incremento de

la eficiencia ya que se mantiene prácticamente constante, por lo tanto, es innecesario añadir más coagulante.

- En la Tabla 16 recopila la información obtenida en el experimento que busca determinar el efecto de la gradiente velocidad y tiempo de retención sobre la eficiencia de remoción de turbiedad. Se evaluó valores de gradiente velocidad 18 s^{-1} , 28 s^{-1} , 36 s^{-1} , y tiempo de retención de 12 min, 18 min y 24 min. En análisis de varianza (ver Tabla 17) se obtienen los valores P menor a 0.05 para el efecto independiente de la Gradiente velocidad y Tiempo de retención. y el valor de P para la interacción Gradiente velocidad x Tiempo de retención es mayor a 0.05. Por lo tanto, el efecto principal de cada factor es significativo, mas no su interacción. Se observó que gradiente velocidad y tiempo de retención tienen valor P menor a 0.05 por tanto ambos factores influyen y la interacción es nula para la eficiencia de remoción de turbiedad. El diagrama de Pareto muestra que el factor que tiene mayor importancia es la gradiente velocidad seguido del tiempo de retención

- Para aceptar los resultados de Análisis de varianza (ver Tabla 17), se deben verificar los supuestos del modelo mediante el análisis de los gráficos de los residuales. De acuerdo con los gráficos de residuales (Ver Figura 67): se cumple la condición de normalidad ya que los errores se aproximan a la recta de normalidad; se cumple la condición de constancia de varianza ya que los residuos estandarizados no varían con los ajustes y los factores; y se cumple condición de independencia ya que los residuales varían con el orden temporal en el que fue recolectada la información. Por lo tanto, se validan los resultados de análisis de varianza.

En la Figura 68 se muestra el efecto principal de cada factor. Se aprecia que la eficiencia tiene un valor máximo para gradiente de velocidad en torno a 27 s^{-1} con respecto al tiempo de retención se visualiza que tiene un efecto positivo sobre la eficiencia de remoción de turbiedad, es decir, valores crecientes de retención resultan en valores crecientes de eficiencia.

- En la Figura 69 se observa la acción conjunta de los factores o interacción apreciándose que las curvas tienen mismo patrón por lo tanto la interacción no es significativa.
- La Figura 70 representa la curva de contorno que relaciona las variables con el valor de la eficiencia ajustada al modelo de análisis de varianza. Por las formas de las curvas de nivel se aprecia que dentro de la región operativa existe un valor máximo o superior.
- Para la generación del modelo cuadrático que correlacionan los factores con las variables respuesta, se efectuó un análisis de varianza (Ver Tabla 19) que muestra que los componentes lineales de la gradiente velocidad y tiempo de retención, así como el componente cuadrático de la Gradiente velocidad tienen un Valor P menor a 0.05, por lo tanto, el modelo cuadrático solo consideró estos componentes. En el diagrama Pareto (Ver Figura 71) se visualiza que se visualiza que el componente cuadrático del tiempo de retención y componente producto de gradiente x tiempo retención no son significativos y se debe excluir del modelo
- Efectuando un nuevo análisis de varianza para un modelo que se considere los componentes significativos, se obtuvo el siguiente diagrama de Pareto (Ver Figura 72) y la expresión del modelo es la siguiente

$$z = -0.1851y^2 + 1.037x + 9.09y - 49.1$$

Dónde: z: Eficiencia de remoción de turbiedad; Gradiente de velocidad; x: Tiempo de retención

Para validar el modelo se deben verificar los supuestos del modelos mediante el análisis de los gráficos de los residuales. De acuerdo con los gráficos de residuales (Ver Figura 73): se cumple la condición de normalidad ya que los errores se aproximan a la recta de normalidad; se cumple la condición constancia de varianza ya que los residuos estandarizados no varían con los ajustes y los factores; y se cumple condición independencia ya que los residuales varían con el orden temporal en el que fue recolectada la información. Por lo tanto, se valida el modelo.

De acuerdo al análisis de optimización la gradiente de velocidad y tiempo de retención óptimos son 24.52 s-1 y 24 min con lo cual se tiene una eficiencia óptima de 87.5 % (Tabla 20 y Figura 74)

El nivel de eficiencia obtenido en la prueba de jarras, 93.2%, resultó mayor a lo obtenido en el piloto, 87.5%. para las condiciones óptimas. Esto se atribuye a las siguientes causas:

- Durante la coagulación el inyector Venturi ha podido succionar aire además de coagulante. Posiblemente las condiciones de mezcla rápida no han sido las convenientes por lo tanto afectó al rendimiento del proceso.
- La región operativa no ha sido la más conveniente. Debieron realizarse corridas experimentales con otros niveles de gradiente y tiempo de retención.

Sin embargo, la eficiencia obtenida en el piloto es igualmente elevada.

Con respecto al análisis previo se aprecian gradientes altas y bajas son contraproducentes para el rendimiento de mezcla. Esto se atribuye que gradientes bajas provocan tasas bajas de colisiones entre los flóculos, por lo tanto, no logran desarrollarse lo suficiente para que decantan. Los niveles altos de gradiente de velocidad provocan esfuerzos cortantes que impiden el crecimiento del flóculo, fomentando su ruptura. Flóculos pequeños y livianos no decantan y por consiguiente la eficiencia disminuyen con valores altos de gradientes como se apreció en los resultados.

5.4.3. Relación de diámetro equivalente de orificios/diámetro de placas y longitud/diámetro de placas.

La Tabla 21 recopila los datos obtenidos en el experimento que evalúa la eficiencia de remoción de turbiedad con respecto a los factores d/D y d/L , bajo condiciones óptimas de gradiente velocidad de 24 s^{-1} y tiempo de retención 24 min previamente definidos en la etapa 2.

- Según el análisis de varianza bifactorial (Ver Tabla 22) se observó que los valores “P” de factores para d/D , d/L e interacción de ambos, son mayores a 0.05. Por lo tanto, estos factores de interacción no son significativos para la eficiencia de remoción de turbiedad.

El diagrama de Pareto (Ver Figura 75) se aprecia que ninguno de estos factores de las relaciones geométricas influye en la remoción de turbiedad.

Para validar el modelo se deben verificar los supuestos del modelos mediante el análisis de los gráficos de los residuales. De acuerdo con los gráficos de residuales (Ver Figura 76): se cumple la condición de normalidad ya que el los errores se aproximan a la recta de normalidad; se cumple la condición constancia de varianza ya que los residuos estandarizados no varían con los ajustes y los factores; y se cumple condición independencia ya que los residuales varían con el orden temporal en el que fue recolectada la información. Por la tanto se validan el modelo.

Analizo las relaciones geométricas porque estaban relacionadas con formación de corto circuitos o aparición de zonas muertas, sin embargo, los resultados nos permiten concluir que no se produce una variación significativa de estos patrones de flujos al modificar los niveles de las relaciones geométricas para el rango operativo experimentado.

5.4.4. Caracterización de la calidad de agua:

Del análisis descriptivo se resume lo siguiente:

- Turbiedad afluente promedio 26.142 UNT (Ver Figura 79) y se encuentra dentro del rango [21.676 - 30.607] UNT.
- Turbiedad efluente promedio 3.5083 UNT (Ver Figura 80) y se encuentra dentro del rango [2.8286 - 4.1881] UNT.
- pH inicial promedio 7.25 (Ver Figura 81) y se encuentra dentro del rango [7.2168 - 7.2832].
- Eficiencia de remoción de turbiedad promedio 85.626% (Ver Figura 82) y se encuentra dentro del rango [81.734 - 89.518] %.
- La variación de pH promedio es 0.68493 (Ver Figura 83) y se encuentra dentro del rango [0.23040 - 1.13947].
- Del análisis descriptivo podemos observar que la eficiencia predicha por la superficie de respuesta obtenida en la etapa 2, Se aproxima a los valores reales de un floculador placas perforadas.

- La aplicación de coagulantes no modifica el pH del agua (Ver *Figura 78*). Esto se atribuye a que el agua sintética tiene alto contenido de alcalinidad que amortigua la variación del pH, ya que el coagulante tiende acidificar el agua.
- En la *Figura 77* se aprecia que la calidad del afluente es fluctúa, sin embargo, la turbiedad del efluente se mantiene prácticamente estable y tiene un valor menor a 5NTU. Según (Arboleda, 2010), la turbiedad del flujo ingresante a un filtro debe ser menor a 5NTU para obtener agua potable de buena calidad, por lo tanto, el floculador de placas perforadas ha demostrado cumplir eficientemente los requerimientos para un sistema de agua potable. Así mismo por la forma de curva de eficiencia de remoción de turbiedad que este ha sido un patrón similar a la turbiedad del afluente, es decir se comprueba que la eficiencia de remoción de turbiedad está influenciada por la calidad inicial del agua.

5.5. Contrastación de hipótesis

5.5.1. Hipótesis Principal

Las variables hidráulicas afectan el proceso de floculación para la purificación de agua potable: la gradiente velocidad, tiempo de retención, diámetro equivalente de orificios entre diámetro de placas y diámetro equivalente de orificios entre longitud de placas; siendo estas las que influye en el proceso de mezcla del floculador de placas perforadas:

De acuerdo a la Tabla 14, Tabla 24 , Tabla 17, Tabla 22 y Tabla 24 Se demuestra que la únicas variables que afectan la eficiencia de remoción de turbiedad son las gradiente de velocidad y tiempo de retención con un coeficiente de descarga de 0.6 y eficiencia de remoción de turbiedad mayor a un 70%.

Por lo tanto, la hipótesis se demostró parcialmente. No se ha demostrado el cumplimiento total de la hipótesis planteada.

5.5.2. Hipótesis Secundaria

a) H1: El coeficiente de descarga de orificio se encontrará en un valor de 0.60:

De acuerdo a la Tabla 14 , Tabla 24 en la etapa 1 se comprobó que el Valor P es 0.015 ya que el Valor P es menor a 0.05. Se demuestra que la hipótesis si cumple.

b) H2: El efecto individual de cada factor, Gradiente y tiempo de retención, así como de su interacción, es nulo:

De acuerdo a la Tabla 17, Tabla 19 en la etapa 2 el Valor P es menor a 0.05 para la gradiente velocidad y tiempo de retención, sin embargo, el Valor P es mayor a 0.05 para la interacción de ambos factores. Solamente el efecto principal de la gradiente velocidad y tiempo de retención influyen sobre la eficiencia de remoción de turbiedad de un floculador de placas perforadas. Por lo tanto, la hipótesis si cumple.

c) H3: El efecto individual de cada factor, relación de diámetro equivalente de orificios/diámetros de placa y longitud/diámetro de placas, así como de su interacción, es nulo:

De acuerdo a la Tabla 22 en la etapa 3 el Valor P de los factores d/D , d/L y la interacción de ambos es mayor 0.05. Es decir, los factores d/D y d/L no influyen sobre la eficiencia de remoción de turbiedad. Por lo tanto, la hipótesis si cumple.

d) H4: La remoción de turbiedad del proceso será mayor de 70%:

De acuerdo a la Tabla 24 en la etapa 4 el Valor P es menor a 0.05. Es decir, la eficiencia de remoción de turbiedad es mayor al 70% en un floculador de placas perforadas. Por lo tanto, la hipótesis si cumple.

CONCLUSIONES

1. El coeficiente de descarga para orificios en un floculador placa orificio es de 0.61 para flujos laminares y turbulentos.
2. La gradiente velocidad y tiempo de retención influye en la eficiencia de remoción de turbiedad. Con el modelo evaluado se tiene un valor óptimo de la Gradiente velocidad $24s^{-1}$ y Tiempo de retención 24 min, que da como resultado una eficiencia de remoción de turbiedad de 87.5%
3. Las relaciones geométricas evaluadas, d/D y d/L no influyen en el rendimiento de un floculador de placas perforadas ya que sus factores e interacción no afectan la eficiencia de remoción de turbiedad.
4. El experimento reveló que la eficiencia del proceso de mezcla depende de la gradiente velocidad y tiempo de retención. Por lo tanto, deben definirse adecuadamente las condiciones operativas de dichas variables para obtener un alto rendimiento en el floculador.
5. El floculador placa orificio ha demostrado en un estudio experimental a escala piloto, ser altamente eficiente para remoción de turbiedad (mayor al 70%), y por lo tanto constituye una alternativa comparable a un floculador hidráulico convencional.

RECOMENDACIONES

1. Se recomienda evaluar el floculador de placas perforadas para agua superficial real, para diferentes valores de turbiedad y con otro tipo de coagulantes.
2. Se recomienda evaluar otros valores de gradiente y tiempo de retención. Asimismo, llevar a cabo un estudio de flexibilidad para determinar la respuesta del floculador frente a bruscas variaciones de calidad de agua cruda.
3. Se recomienda estudiar la aparición de zonas muertas y de corto circuitos y cómo estos fenómenos influyen sobre la eficiencia.
4. Se recomienda realizar un estudio técnico económico que compare la viabilidad de este tipo de floculadores frente a otros floculadores del tipo hidráulico.
5. Se ha presentado una metodología estadística conocida como “Análisis bifactorial” que muestra que a través de una adecuada planeación experimental se puede analizar eficientemente cualquier proceso del tipo hidráulico. Este método eliminó la necesidad de un estudio de prueba y error, y permite la optimización de un proceso, por lo que se recomienda su uso en investigaciones experimentales hidráulicas.
6. Si se van a llevar a cabo estudios a escala piloto para determinar la eficiencia de remoción de contaminante, se recomienda aplicar como criterio de semejanza el producto de la gradiente y tiempo de retención, ya que la eficiencia del proceso depende principalmente de este número.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Abd, H., Alomar, O., & Mohamed, I. (2019). Effects of varying orifice diameter and Reynolds number on discharge. *Flow Measurement and Instrumentation*.
- Albarran, N. (2010). *Procesos de migración de contaminantes asociados a coloides en un almacenamiento geológico de residuos sólidos*. Madrid: Tesis Doctoral.
- Recuperado de:
https://repositorio.uam.es/bitstream/handle/10486/6516/39159_albarranc3%a1n_castro_nairobi.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- ANA. (2010). Manual: Criterios de diseños de obras hidráulicas para la formulación de proyectos hidráulicos multisectoriales y afianzamiento hídrico-
Recuperado de:
<https://repositorio.ana.gob.pe/bitstream/handle/20.500.12543/3135/ANA0001746.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Andia, Y. (2000). Tratamiento de agua: Coagulación y floculación.
- Arboleda. (2010). Teoría y práctica de la purificación del agua. Tomo I.
- Borja, M. (2012). Metodología de la investigación científica para ingenieros. Chiclayo – Perú.
- Bratby, J. (2016). Coagulation and Flocculation in Water and Wastewater Treatment. IWA Publishing.
- Canepa, L. (2000). Tratamiento del agua .
- Chulluncuy. (2011). Tratamiento de agua para consumo. Perú.
- Curitiba. (s.f.). Brasil.
- Curitiba. (Brasil).
- Gabriel, J., Valverde, A., Indacochea, B., Castro, C., Vera, M., Alcívar, J., & Vera, R. (2021). Diseños Experimentales: Teoría y práctica para experimentos agropecuarios. Segunda edición,. Guayaquil: Grupo Compás.
- Garland, C., Weber-Shirk, M., & Lion, L. (2015). Influence of variable inlet jet velocity on failure modes of a floc blanket in a water treatment process train. *Environmental Engineering Science*, Vol 33, N°2.

- Hernández, E. F. (2003). Análisis por medio de ensayos del tiempo de retención y gradiente hidráulico del proceso de floculación de la planta de tratamiento de agua potable "LO DE COY". Universidad de San Carlos de Guatemala- Facultad de Ingeniería.
- Hibbeler, R. (2021). Fluid mechanics in SI Units. Pearson.
- Hurst, M. (2010). EVALUATION OF PARAMETERS AFFECTING STEADY-STATE FLOC BLANKET PERFORMANCE.
- Jouravlev, A., Saravia Matus, S., & Gil, M. (2021). Reflexiones sobre la gestión del agua en América Latina y el Caribe. CEPAL.
- King, H. (1990). Handbook of hydraulics.
- Kires, M. (2006). Mariotte bottle with side openings. The physics teacher, 388-389.
- Lozada, J. (2014). Investigación Aplicada. CienciAmérica: Revista de divulgación científica de la Universidad Tecnológica Indoamérica.
- Lozada, J. (2014). Investigación Aplicada. Revista de divulgación científica de la Universidad Tecnológica Indoamérica, 47-50.
- Maldonado, V. (2000). Manual Tratamiento del Agua.
- Manzano, J., & Palau, G. (2005). Hydraulic modeling of venturi injector by means of CFD. 2005 ASAE Annual International Meeting. Tampa, Florida USA.
- Maroto, J., & De Dios, J. (2012). Use of a Mariotte bottle for the experimental study of the transition. American Journal of Physics.
- Mousalli-Kayat, G. (2015). Métodos y Diseños de Investigación Cuantitativa. Mérida.
- MVCS. (2020). Diagnóstico de la situación de brechas de infraestructura o de acceso a servicios públicos del sector vivienda, construcción y saneamiento. Lima.
- Neupane, D., Riffat, R., Sudhir, M., & Peric, M. (2006). INFLUENCE OF SOURCE CHARACTERISTICS, CHEMICALS AND FLOCCULATION ON NON-SETTLEABLE SOLIDS AND CHEMICALLY ENHANCED PRIMARY TREATMENT.
- OMS. (2011). Guías para la calidad del agua de consumo humano.
- Ordinola, E. (2019). Diseño de la Planta de Tratamiento de Agua Potable para. Perú.
- Ortega, G. (2021). Diseños Experimentales.

- Reguant, M., & Martinez, F. (2014). Operacionalización de conceptos/variables. OPERACIONALIZACIÓN DE CONCEPTOS/ VARIABLES, Dipòsit Digital de la UB.
- Romero, A. (2006). Purificación del agua 2a. Edición.
- Schwartz, F. (1950). Rate-Indicating Mariotte Bottle . Analytical Chemistry, 1214-1218.
- Streeter, V. (1970). Mecánica de fluidos. McGraw Hill.
- Tchobanoglous, G., Crittenden, J., Trussell, R., Hand, D., & Howe, K. (2012). Principles of water treatment. Canada.
- Tracey, J. (2019). Drinking Water Treatment and Challenges in Developing Countries.
- Tripathy, T., & Rajan, B. (2006). Flocculation: A new way to treat the waste water. Journal of Physical Science, Vol 10.
- Vargas, L. d. (2004). Tratamiento de agua para consumo humano. Perú.
- Vianna, M., & Vasalle, L. (2008). Perforated Tray-Type Hydraulic Flocculator for Potable Water Treatment: Concept and State of the Art in Brazil.
- Walsh, M., Zhao, N., Gora, S., & Gagnon, G. (2009). Effect of coagulation and flocculation conditions on water quality in an immersed ultrafiltration process.
- Wang, W., Cao, X., Kong, X., & Wu, Y. (2020). An experimental study on the discharge coefficient of a sharp-edged hydraulic orifice. Journal of physics.
- Wu, D., Burton, R., & Schoenau, G. (2002). An empirical discharge coefficient model for orifice flow.

ANEXOS

Anexo 1: Cronograma de actividades

Actividades	Cronograma de actividades																															
	Mayo				Junio				Julio				Agosto				Septiembre				Octubre				Noviembre				Diciembre			
	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4
Elección del tema	■	■																														
Descripción del problema		■	■	■																												
Preguntas y objetivos			■	■	■																											
viabilidad, justificación e importancia				■	■	■	■																									
Antecedentes de la investigación					■	■	■	■																								
Bases teóricas y términos básicos						■	■	■	■	■																						
Hipótesis y Variables								■	■	■	■																					
Tipo de método de la investigación									■	■	■	■																				
Población y diseño muestral										■	■	■	■																			
Matriz de consistencia											■	■	■	■																		
Diseño de unidad experimental												■	■	■	■																	
Adquisición de materiales													■	■	■	■																
Construcción del floculador piloto														■	■	■	■															
Experimentación															■	■	■	■														
Recolección de datos																■	■	■	■													
Procesamiento de datos																	■	■	■	■												
Cálculos y resultados																		■	■	■	■											
Discusión del problema																			■	■	■	■										
Revisión Bibliográfica																				■	■	■	■									
Entrega de plan de tesis																					■	■	■	■								
Levantamiento de observaciones																						■	■	■	■							
Aprobación de plan de tesis																							■	■	■	■						
Sustentación																								■	■	■	■					

Fuente: Elaboración propia

Anexo 2: Presupuesto

Presupuesto					
Materiales y equipos	Unidad	Cantidad	Precio unitario (S/)	Parcial (S/)	Subtotal (S/)
Seguridad					
Zapatos de seguridad	Und	1	120.00	120.00	
Lentes de seguridad	Und	2	10.00	20.00	
Guantes Látex x 100	Und	4	20.00	80.00	
Mandil de laboratorio	Und	1	30.00	30.00	
					250.00
Materiales de trabajo					
Botellas de plástico para muestra	Und	50	5.00	250.00	
Tanque reservorio 60 L	Und	1	350.00	350.00	
Tanque de agua 20 L	Und	8	10.00	80.00	
Bomba sumergida tipo pecera	Und	1	120.00	120.00	
Inyector Venturi	Und	1	60.00	60.00	
Extensión 6m	Und	1	20.00	20.00	
SERRUCHO para madera	Und	1	40.00	40.00	
Arco de sierra		1	20.00	20.00	
Hoja de sierra para metal	Und	1	7.00	7.00	
Taladro Bosh	Und	1	250.00	250.00	
Tubo PVC Agua fría 1/2"	Und	4	13.00	52.00	
Manguera jardín económica pequeña 1/2" x 25m	Und	1	30.00	30.00	
Manguera jardín económica mediana 3/4" x 2m	Und	1	3.00	3.00	
Manguera silicona 1/4" x 2m	Und	1	3.00	3.00	
Codo 90 grados para tubo de 1/2" tipo a presión	Und	5	3.50	17.50	
Tee para tubo 1/2" tipo a presión	Und	1	4.50	4.50	
Codo 90 grados para manguera 1/2"	Und	6	2.00	12.00	
Codo 90 grados para manguera 3/4"	Und	2	3.50	7.00	
Adaptador tubo a manguera 1/2"	Und	2	2.50	5.00	
Adaptador tubo a manguera 3/4"	Und	3	3.50	10.50	
Unión simple roscada 1/2"	Und	2	1.50	3.00	
Unión simple roscada 3/4"	Und	3	2.50	7.50	
Reducción de tubo 1 a 1/2", tipo a presión	Und	2	1.50	3.00	
Reducción de tubo 2 a 1", tipo a presión	Und	2	4.00	8.00	

Presupuesto					
Materiales y equipos	Unidad	Cantidad	Precio unitario (S/)	Parcial (S/)	Subtotal (S/)
Reducción de tubo 2 a 1/2", tipo a presión	Und	1	4.00	4.00	
Discos y triángulos acrílico de 3mm	Und	2	80.00	160.00	
Niples roscados 1/2" x 2"	Und	2	1.50	3.00	
Niples roscados 3/4" x 2"	Und	1	2.50	2.50	
Niples roscados 1" x 2"	Und	1	3.00	3.00	
Tuercas hexagonales de bronce 1/2"	Und	2	2.50	5.00	
Tuercas hexagonales de bronce 3/4"	Und	2	3.50	7.00	
Tuercas hexagonales de bronce 1"	Und	2	4.00	8.00	
Pegamento Azul para tubo PVC	Und	1	13.00	13.00	
Teflón	Und	6	2.50	15.00	
Angulo ranurado liviano	Und	15	-	210.00	
Esquinero	Ciento	2	30.00	60.00	
Pernos y tuercas para ángulo ranurado	ciento	3	25.00	75.00	
Perno hexagonal galvanizado	Und	2	4.00	8.00	
Tablón de madera	Und	6	7.00	42.00	
Varillas roscadas de fierro	Und	18	-	45.00	
tuerca para varilla 3/6" x 1"	ciento	2	3.50	7.00	
Tuerca ala ancha	Und	3	5.00	15.00	
Gancho tipo U	Und	3	2.50	7.50	
Soga para carga liviana 12m	Und	1	7.00	7.00	
					2,060.00
Herramientas para muestra					
Cronómetro	Und	1	10.00	10.00	
Probeta 1000 ml	Und	1	60.00	60.00	
Probeta 500 ml	Und	1	38.00	38.00	
Probeta 15 ml	Und	1	20.00	20.00	
Pipeta 10 ml	Und	1	15.00	15.00	
Turbidímetro Hach 2100p	Equipo	1	2,600.00	2,600.00	
Pie de rey	Und	1	36.00	36.00	
Prueba de jarras	Und	1	5,000.00	6,000.00	
					8,779.00
Otros					
Cámara fotográfica	Und	1	700.00	700.00	

Presupuesto					
Materiales y equipos	Unidad	Cantidad	Precio unitario (S/)	Parcial (S/)	Subtotal (S/)
Empastado de tesis	Und	3	80.00	240.00	
Fotocopias	Millar	3	200.00	600.00	
Documentos impresos	Gb	1	1,500.00	1,500.00	
					3,040.00
Presupuesto total					S/14,129.00

Fuente: Elaboración propia

Anexo 3: Operacionalización de las variables.

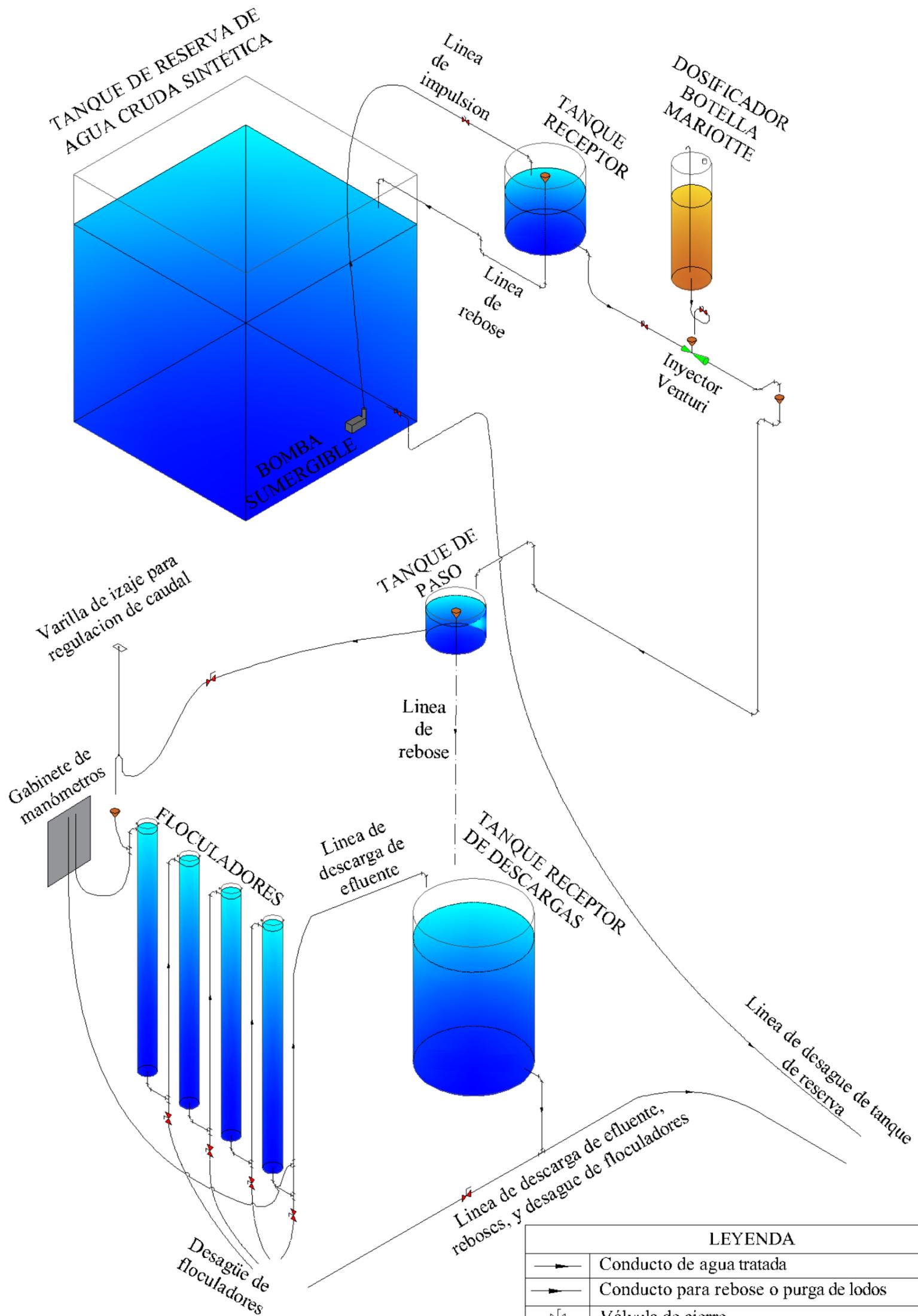
VARIABLE INDEPENDIENTE	DEFINICIÓN CONCEPTUAL	DIMENSIONES	INDICADORES	MÉTODOS
VARIABLES INDEPENDIENTE	DEFINICIÓN CONCEPTUAL	DIMENSIONES	INDICADORES	MÉTODOS
Variables hidráulicas	Borja (2012) define variable independiente como la que produce el efecto o la causa de la variable dependiente.	Separación de sólidos.	Eficiencia en remoción de turbiedad	- Minitab 19 - Excel
Eficiencia de remoción de turbiedad	Borja (2012) define como variable dependiente al resultado o efecto producido por la acción de la variable independiente	Parámetros operativos Relaciones geométricas	- Gradiente de velocidad - Tiempo de retención - Diámetro equivalente de orificio/ Longitud entre placas. - Diámetro equivalente de orificios/ Diámetro de placa	- Cronometro y calculo operacional - Cronómetro y calculo operacional - Wincha o regla - Wincha o regla

Fuente: Elaboración propia

Anexo 4: Matriz de consistencia.

PROBLEMA GENERAL	OBJETIVO GENERAL	HIPOTESIS GENERAL	DIMENSION	INDICADOR	INSTRUMENTOS
¿Cómo las variables hidráulicas pueden afectar la eficiencia en el proceso de mezcla en los floculadores de placas perforadas?	Determinar el efecto de las variables hidráulicas sobre la eficiencia del proceso de mezcla en floculador de placas perforadas	Las variables hidráulicas afectan el proceso de floculación para la purificación de agua potable: la gradiente velocidad, tiempo de retención, diámetro equivalente de orificios entre diámetro de placas y diámetro equivalente de orificios entre longitud de placas; siendo estas las que influirían en el proceso de mezcla del floculador de placas perforadas.			Minitab 19
					Excel
					wincha, regla
PROBLEMA ESPECÍFICO	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	HIPOTESIS ESPECÍFICAS			
a) ¿Cómo se encontrará el valor del coeficiente de descarga en un rango permisible?	a) Determinar el coeficiente de descarga del orificio sumergido para floculador placa orificio.	a) El coeficiente de descarga de orificio se encontrará en un valor de 0.60.			Regla graduada Cronometro Probeta Minitab19
b) ¿Cómo evaluar el efecto de la gradiente de velocidad y el tiempo de retención en la eficiencia del proceso de mezcla en el floculador?	b) Evaluar el efecto de la gradiente de velocidad y el tiempo de retención sobre la eficiencia del proceso de mezcla en un floculador.	b) El efecto individual de cada factor, Gradiente y tiempo de retención, así como de su interacción, es nulo.	Parámetros operativos	Gradiente de velocidad	Prueba de Jarras Cronometro Turbidimetro Probetas Minitab 19 Probetas Regla graduada
c) ¿Cómo definir la relación del diámetro equivalente de orificios/diámetro de placa y longitud/diámetro de placas?	c) Evaluar el efecto de la relación de diámetro equivalente de orificios/diámetro de placa y longitud/diámetro de placas.	c) El efecto individual de cada factor, relación de diámetro equivalente de orificios/diámetro de placa y longitud/diámetro de placas, así como de su interacción es nulo.	Relaciones geométricas	Diámetro de orificio/ Longitud entre placas y Diámetro de orificios/ Diámetro de placa	Prueba de Jarras Cronometro Turbidimetro Probetas Minitab 19 Probetas Pie de rey
d) Cómo caracterizar la calidad de agua cruda y decantada?	d) Caracterizar la calidad del agua cruda y decantada.	d) La remoción de turbiedad del proceso será mayor de 70%.			Turbidimetro Ph metro Minitab19

Fuente: Elaboración Propia



LEYENDA	
	Conducto de agua tratada
	Conducto para rebose o purga de lodos
	Válvula de cierre
	Codo
	Tee
	Deposito cilindrico
	Embudo receptor de caída de corriente de agua

Fuente: Elaboración propia