

**UNIVERSIDAD PERUANA UNIÓN
FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA AMBIENTAL**



Una Institución Adventista

Diseño de box-behnken en la eficiencia del sistema venturi de nanomicroburbujeo de oxígeno para la remoción de materia orgánica y microbiológicas en aguas residuales domesticas

Tesis para obtener el Título Profesional de Ingeniero Ambiental

Autores:

Evelyn Janet Atoche Saavedra

Benjamin Yers Hilaquita Cruz

Asesor

PhD. Noe Benjamin Pampa Quispe

Lima, Junio 2021

DECLARACIÓN JURADA DE AUTORÍA DE TESIS

Noé Benjamín Pampa Quispe, de la Facultad de Ingeniería y Arquitectura, de la Escuela Profesional de Ingeniería Ambiental, de la Universidad Peruana Unión.

DECLARO:

Que la presente investigación titulada: **“Diseño de box-behnken en la eficiencia del sistema venturi de nanomicroburbujeo de oxígeno para la remoción de materia orgánica y microbiológicas en aguas residuales domesticas”** constituye la memoria que presenta los Bachilleres Evelyn Janet Atoche Saavedra y Benjamín Yers Hilaquita Cruz, para obtener el título de Profesional de Ingeniero Ambiental, cuya tesis ha sido realizada en la Universidad Peruana Unión bajo mi dirección.

Las opiniones y declaraciones en este informe son de entera responsabilidad del autor, sin comprometer a la institución.

Y estando de acuerdo, firmo la presente declaración en la ciudad de Lima, a los 29 días del mes de Julio del año 2021.



PhD. Noé Benjamín Pampa Quispe

ACTA DE SUSTENTACIÓN

296

ACTA DE SUSTENTACIÓN DE TESIS

En Lima, Naña, Villa Unión, a los 16 días día(s) del mes de junio del año 2021 siendo las 10:30 horas, se reunieron en modalidad virtual u online sincrónica, bajo la dirección del Señor Presidente del Jurado: Mg. Iliana Del Carmen Gutiérrez Rodríguez, el secretario: Mg. Jackson Edgardo Pérez Carpio, y los demás miembros: Mg. Milda Amparo Cruz Huaranga, Ing. Nanoy Curaqi Rafael y el asesor: Dr. Noe Benjamín Pampa Gulspe, con el propósito de administrar el acto académico de sustentación de la tesis titulada: "Diseño de box-behken en la eficiencia del sistema venturi de nanomicroburbujeo de oxígeno para la remoción de materia orgánica y microbiológicas en aguas residuales domésticas"

de el(los/la(las) bachilleres: a) EVELYN JANET ATOCHE SAAVEDRA

.....b) BENJAMIN YERS HILAQUITA CRUZ

.....conducente a la obtención del título profesional de **INGENIERO AMBIENTAL**

(Nombre del Título profesional)

con mención en.....

El Presidente inició el acto académico de sustentación invitando al (los/la(la)(las) candidato(a)s hacer uso del tiempo determinado para su exposición. Concluida la exposición, el Presidente invitó a los demás miembros del Jurado a efectuar las preguntas, y aclaraciones pertinentes, las cuales fueron absueltas por el(los/la(las) candidato(a)s. Luego, se produjo un receso para las deliberaciones y la emisión del dictamen del Jurado.

Posteriormente, el Jurado procedió a dejar constancia escrita sobre la evaluación en la presente acta, con el dictamen siguiente:

Candidato (a): EVELYN JANET ATOCHE SAAVEDRA

CALIFICACIÓN	ESCALAS			Mérito
	Vigesimal	Líteral	Cualitativa	
APROBADO	18	A-	Muy Bueno	Sobrecaliente

Candidato (b): BENJAMIN YERS HILAQUITA CRUZ

CALIFICACIÓN	ESCALAS			Mérito
	Vigesimal	Líteral	Cualitativa	
APROBADO	18	A-	Muy Bueno	Sobrecaliente

(*) Ver parte posterior

Finalmente, el Presidente del Jurado invitó al(los/la(la)(las) candidato(a)s a ponerse de pie, para recibir la evaluación final y concluir el acto académico de sustentación procediéndose a registrar las firmas respectivas.

Presidente
Mg. Iliana del Carmen
Gutiérrez Rodríguez

Secretario
Mg. Jackson Edgardo
Pérez Carpio

Dedicatoria

A Dios por darme a mi madre Flor quien estuvo allí para brindarme su apoyo incondicional y su sacrificio durante estos largos años académicos, no fue fácil, tampoco difícil, pero todos los sueños planeados con esfuerzo se cumplen.

A mi hermano John, quien de una u otra manera estaba allí para apoyarme, a mi papi Zambo, mami Lucy, y a mi gran familia porque me motivaron a seguir adelante.

Con cariño Evelyn

A Dios por brindarme la oportunidad de nacer y crecer en un hogar cristiano y por darme a la mejor familia.

A Papá y Mamá, muchas gracias por enseñarme a amar a Dios por sobre todas las cosas, por brindarme los consejos precisos cuando más lo necesité, por estar conmigo en las buenas y en las malas, por ser mi ejemplo a seguir, ¡Gracias por ser mis padres!

A mis hermanos, Ely y Gerson, gracias porque me enseñaron a vivir cada día con una sonrisa en el rostro, por ser mis cómplices, confidentes y compañeros de juegos, gracias porque sé que siempre contaré con ustedes.

Ahora podremos decir juntos: ¡Lo Logramos!

Con mucho amor **Benjamin Y. H. C.**

Agradecimientos

A Dios por brindarnos la vida, sabiduría y fortaleza para poder completar la presente investigación.

A nuestra querida Universidad Peruana Unión que nos enseñó a ser misioneros, íntegros e innovadores.

A nuestro querido asesor PhD. Noé Pampa por su amistad, enseñanzas, paciencia y apoyo en cada parte de la ejecución de la tesis alentándonos a continuar al margen de la situación en la que nos encontráramos.

Al conjunto de maestros de la escuela de Ingeniería Ambiental que nos brindaron consejos y enseñanzas para ser mejores personas y profesionales, haciéndonos competitivos en el mundo laboral.

A nuestros dictaminadores que nos ayudaron a pulir esta investigación bajo los lineamientos establecidos.

A nuestros padres, por todo el sacrificio que hicieron al educarnos desde pequeños y aconsejarnos en todo momento

A nuestros amigos Charly y Lucho, que a pesar de tener clases u otros compromisos se dieron el tiempo para ayudarnos a transportar los materiales, sin importar el mojarnos o ensuciarnos.

Tabla de Contenido

Dedicatoria.....	ii
Agradecimientos	v
Tabla de Contenido.....	vi
Índice de Tablas	x
Índice de Figuras.....	xii
Índice de Anexos.....	xv
Símbolos usados.....	xvi
Resumen.....	xviii
Abstract.....	xix
CAPITULO I. EL PROBLEMA.....	1
1.1. Identificación y formulación del problema	1
1.2. Justificación.....	3
1.3. Presuposición Filosófica	3
1.4. Objetivos de la investigación	5
1.4.1. Objetivo General.....	5
1.4.2. Objetivo Específico	5
CAPITULO II. REVISIÓN DE LA LITERATURA.....	6
2.1. Antecedentes de la investigación	6
2.1.1. Revisión Internacional.....	6
2.1.2. Revisión Nacional	8
2.2. Marco Legal	10
2.3. Marco Conceptual	11
2.3.1. Agua	11
2.3.2. Conservación de aguas (lagos y lagunas).....	14

2.3.3. Aguas en represas	14
2.3.4. Características del agua residual.....	16
2.3.5. Determinación de la presencia de coliformes.....	21
2.3.6. Diseño de Box-Behnken.....	28
CAPITULO III. MATERIALES Y MÉTODOS	31
3.1. Descripción del área de estudio.....	31
3.2. Rutas de Acceso	31
Fuente: Elaboración Propia.	32
3.3. Materiales	33
3.4. Diseño y Construcción de Generador de Microburbujas	34
3.4.1. Diseño.....	34
3.4.2. Construcción.....	35
3.5. Procedimientos	36
3.5.1. Procedimiento para la toma de muestra.....	36
3.5.2. Procedimiento para la medición de las Imágenes Microscópicas	41
3.6. Tipo de Investigación	44
3.7. Diseño de Experimentos (DOE).....	44
3.7.1. Box - Behnken	45
3.7.2. Análisis estadístico	47
3.8. Análisis de Datos.....	48
3.8.1. Cálculo del caudal	48
3.8.2. Determinación de las velocidades	48
3.8.3. Cálculo del diámetro (tubería).....	49
3.8.4. Medición de las micro burbujas.....	49
3.8.5. Monitoreo de la temperatura del agua	49

3.8.6. Monitoreo de la turbidez del agua	50
3.8.7. Monitoreo de la conductividad del agua.....	50
3.8.8. Monitoreo de los Sólidos disueltos Totales del agua (TDS)	50
3.8.9. Monitoreo de PH del agua	50
3.8.10. Monitoreo del DQO del agua	51
3.8.11. Monitoreo de DBO ₅ del agua	51
3.8.12. Monitoreo de coliformes termotolerantes	51
3.8.13. Monitoreo de E. Coli	51
CAPÍTULO IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	53
4.1. Caracterización del agua residual.....	53
4.2. Resultados Velocidades del fluido	53
4.3. Resultados de los tratamientos	54
4.3.1. Resultados del Tratamiento 1	54
4.3.2. Resultados del Tratamiento 2	55
4.3.3. Resultados del Tratamiento 3	56
4.3.4. Resultados del Tratamiento 4	57
4.3.5. Resultados del Tratamiento 5	58
4.3.6. Resultados del Tratamiento 6	59
4.3.7. Resultados del Tratamiento 7	60
4.3.8. Resultados del Tratamiento 8	61
4.3.9. Resultados del Tratamiento 9	62
4.3.10. Resultados del Tratamiento 10	63
4.3.11. Resultados del Tratamiento 11	64
4.3.12. Resultados del Tratamiento 12	65
4.3.13. Resultados del Tratamiento 13	66

4.3.14. Resultados del Tratamiento 14	67
4.3.15. Resultados del Tratamiento 15	69
4.3.16. Resultados del Tratamiento 16	70
4.3.17. Resultados del Tratamiento 17	72
4.4. Resultados y discusiones del tamaño de las microburbujas	75
4.5. Resultados de parámetros físico-químicos del agua	75
4.5.1. Turbidez.....	75
4.5.2. Conductividad.....	77
4.5.3. Temperatura del agua	78
4.5.4. Sólidos Totales Disueltos	79
4.5.5. pH	80
4.5.6. DQO	81
4.5.7. DBO ₅	82
4.6. Resultados Microbiológicos del agua	83
4.6.1. Coliformes Termotolerantes y E. Coli.....	83
4.7. Resultados aplicando el diseño experimental Box- Behnken	84
4.7.1. Resultados de las microburbujas	84
4.7.2. Resultados de la conductividad	91
4.7.3. Resultados de la turbidez.....	95
CAPITULO V. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	101
4.1. Conclusiones	101
4.2. Recomendaciones.....	102
REFERENCIAS.....	103
ANEXOS	110

Índice de Tablas

Tabla 1. Estándares de Calidad Ambiental para Riego de Vegetales – Agua para riego no restringido	11
Tabla 2. Ubicación geográfica del lugar en ejecución del proyecto	31
Tabla 3. Conservación y preservación de muestras de agua.....	38
Tabla 4. Factores y niveles del diseño experimental de Box Behnken.....	46
Tabla 5. Diseño Box Behnken para cuantificar los tamaños de nanomicroburbujeo de oxígeno	46
Tabla 6. Resultados físico-químicos agua sin tratamiento.....	53
Tabla 7. Resultados microbiológicos del agua sin tratamiento.....	53
Tabla 8. Resultados Físico/Químicos T1	55
Tabla 9. Resultados Físico/ Químicos T2	56
Tabla 10. Resultados Físico/ Químicos T3	57
Tabla 11. Resultados Físico/ Químicos T4.....	58
Tabla 12. Resultados Físico/ Químicos T5	59
Tabla 13. Resultados Físico/ Químicos T6.....	60
Tabla 14. Resultados Físico/ Químicos T7	61
Tabla 15. Resultados Físico/ Químicos T8	62
Tabla 16. Resultados Físico/ Químicos T9	63
Tabla 17. Resultados Físico/ Químicos T10.....	64
Tabla 18. Resultados Físico/ Químicos T11	65
Tabla 19. Resultados Físico/ Químicos T12.....	66
Tabla 20. Resultados Físicos/ Químicos T13	67
Tabla 21. Resultados Físico/ Químicos T14.....	69
Tabla 22. Resultados Físico/ Químicos T15	70

Tabla 23. Resultados Físico/ Químicos T16.....	72
Tabla 24. Resultados Físico/ Químicos T17	75
Tabla 25. Resultados Microbiológicos del agua residual antes y post	83
Tabla 26. Resultados de los tamaños de microburbujas (μm)	84
Tabla 27. Resultados de la Anova de las microburbujas (μm)	85
Tabla 28. Resultados de coeficiente de regresión para la generación de microburbujas (μm)	86
Tabla 29. Resultados de Anova para la remoción de conductividad	91
Tabla 30. Resultados de coeficiente de regresión para la remoción de conductividad.....	91
Tabla 31. Resultados de Anova para la remoción de la turbidez.....	96
Tabla 32. Resultados de coeficiente de regresión para la reducción de turbidez	97

Índice de Figuras

Figura 1. Vista panorámica de un campo de cultivo de la Asociación Viques de Carapongo ..	2
Figura 2. Interacción entre las microburbujas y el medio.....	23
Figura 3. Efecto Venturi	28
Figura 4. El cubo para diseño de Box Behnken (Aslan & Cebeci, 2007).....	29
Figura 5. Tres diseños factoriales 3^{k-p} interconectados, (Aslan & Cebeci, 2007	29
Figura 6. Niveles de factores codificados para un diseño Box Behnken de un sistema de tres niveles	30
Figura 7. Ruta de Acceso	32
Figura 8. Puntos de muestreo- Los Viques de Carapongo.....	32
Figura 9. Diseño del generador de microburbujas	34
Figura 10. Contenedor Sedimentador	35
Figura 11. Tubos Venturi.....	36
Figura 12. Punto de muestreo 1	37
Figura 13. Punto 2 de muestreo	39
Figura 14. Punto 3 del muestreo	40
Figura 15. Punto 3 de muestreo	40
Figura 16. Punto 4 de muestreo	40
Figura 17. Punto 4 de muestreo	41
Figura 18. Barra de opción de Imagen J	42
Figura 19. Opción Línea Recta	42
Figura 20. Calibración de Imagen.....	43
Figura 21. Medición de la microburbuja.....	44
Figura 22. Reducción de las secciones	49
Figura 23. Medición de microburbujas T1/ Image J.....	55

Figura 24. Medición de microburbujas T2/ Image J.....	56
Figura 25. Medición de microburbujas T3/ Image J.....	57
Figura 26. Medición de microburbujas T4/ Image J.....	58
Figura 27. Medición de microburbujas T5/ Image J.....	59
Figura 28. Medición de microburbujas T6/ Image J.....	60
Figura 29. Medición de microburbujas T7/ Image J.....	61
Figura 30. Medición de microburbujas T8/ Image J.....	62
Figura 31. Medición de microburbujas T9/ Image J.....	63
Figura 32. Medición de microburbujas T10/ Imagen J.....	64
Figura 33. Medición de microburbujas T11/ Imagen J.....	65
Figura 34. Medición de microburbujas T12/ Imagen J.....	66
Figura 35. Medición de microburbujas T13/ Imagen J.....	67
Figura 36. Medición de microburbujas T14-1/ Imagen J.....	68
Figura 37. Medición de microburbujas T14-2/ Imagen J.....	68
Figura 38. Medición de microburbujas T15-1/ Imagen J.....	69
Figura 39. Medición de microburbujas T15-2/ Imagen J.....	70
Figura 40. Medición de microburbujas T16/ Imagen J.....	71
Figura 41. Medición de microburbujas T16/ Imagen J.....	72
Figura 42. Medición de microburbujas T17-1/ Imagen J.....	73
Figura 43. Medición de microburbujas T17-2/ Imagen J.....	74
Figura 44. Medición de microburbujas T17-3/ Imagen J.....	74
Figura 45. Resultado de las microburbujas por tratamiento (um).....	75
Figura 46. Resultados de la turbidez por cada tratamiento.....	76
Figura 47. Guía de la EPA para aguas residuales en el área agrícola.....	77
Figura 48. Resultados de la conductividad por cada tratamiento aplicado.....	78

Figura 49. Resultados de la temperatura del agua por tratamiento.....	79
Figura 50. Resultados de TDS del agua por tratamiento	80
Figura 51. Resultados de pH del agua por tratamiento.....	81
Figura 52. Resultados del análisis DQO sin tratamiento y con el tratamiento óptimo.....	82
Figura 53. Resultados del análisis de DBO ₅ sin tratamiento y con el tratamiento óptimo	83
Figura 54. Diagrama de Pareto de las microburbujas	87
Figura 55. Superficie de Respuesta de la relación de las microburbujas con el diámetro y la velocidad.....	88
Figura 56. Contorno de Respuesta para la generación de microburbujas en relación al diámetro y velocidad.....	88
Figura 57. Superficie de Respuesta de la relación de las microburbujas con el tiempo y la velocidad.....	90
Figura 58. Superficie de Respuesta de la relación de las microburbujas con el diámetro y el tiempo	90
Figura 59. Diagrama de Pareto en la remoción de conductividad	92
Figura 60. Superficie de Respuesta de la relación de la conductividad con el tiempo y la velocidad.....	93
Figura 61. Superficie de respuesta de la relación de la conductividad el diámetro y velocidad	94
Figura 62. Superficie de respuesta de la relación de la conductividad, tiempo y diámetro.....	95
Figura 63. Diagrama de Pareto con respecto a la remoción de turbidez.....	97
Figura 64. Superficie de Respuesta en relación de la Turbidez con el diámetro y el tiempo ..	98
Figura 65. Superficie de Respuesta en relación de la Turbidez con el tiempo y la velocidad.	99
Figura 66. Superficie de Respuesta en relación de la Turbidez con el diámetro y la velocidad	100

Índice de Anexos

Anexo 1. Puntos de muestreo de Agua Residual	110
Anexo 2. Toma de muestra y cadena de custodia del agua a tratar	111
Anexo 3. Tanque reservorio de agua residual.....	111
Anexo 4. Sistema Venturi de microburbujas	112
Anexo 5. Aplicación de Microburbujas de Oxígeno al agua residual	114
Anexo 6. Análisis de parámetros fisicoquímicos.....	114
Anexo 7. Resultados del análisis del agua residual sin tratamiento	115
Anexo 8. Resultados del análisis del agua residual tratada con el tratamiento óptimo	116
Anexo 9. Contorno de respuesta para la generación de microburbujas en relación a tiempo y velocidad.....	117
Anexo 10. Contorno de respuesta para la remoción de turbidez en relación a diámetro y velocidad.....	117
Anexo 11. Contorno de respuesta para la remoción de turbidez en relación a velocidad y tiempo	118
Anexo 12. Contorno de respuesta para la remoción de turbidez en relación tiempo y diámetro	118
Anexo 13. Contorno de respuesta para la remoción de conductividad en relación a diámetro y velocidad.....	119
Anexo 14. Contorno de respuesta para la remoción de conductividad en relación al tiempo y velocidad.....	119
Anexo 15. Contorno de respuesta para la remoción de conductividad en relación al tiempo y diámetro.	120

Símbolos usados

ANA	Autoridad Nacional del Agua
DBO	Demanda Bioquímica de Oxígeno
DQO	Demanda Química de Oxígeno
ECA	Estándar de Calidad Ambiental
FAO	Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura
HP	Horse Power, traducido al español “Caballos de Fuerza”
MO	Materia orgánica
Mg/L	Miligramos por litro
MINAM	Ministerio Nacional del Ambiente
Nm	nanómetros
NMP/100ml	Número más probable sobre 100 mililitros
NTU	Nephelometric Turbidity Unit, traducido al español “Unidad de turbidez nefelométricas
OH	Hidroxilo
O ₃	Oxono
pH	Potencial de Hidrogeno
TDS	Total Dissolved Solids, traducido al español “Solidos Totales Disueltos”
us/cm	microsiemes
um	micrómetro

Resumen

En la actualidad la agricultura cumple un rol fundamental en el crecimiento económico y la disminución de la pobreza en la localidad de Carapongo, por ello parte de los recursos hídricos son utilizados para el regadío de vegetales, sin embargo, la mayoría de cultivos utilizan el agua que se encuentra en las canaletas, mismas que son utilizadas por las familias para descargar aguas residuales domésticas sin previo tratamiento, estas tienen una gran cantidad de Materia Orgánica y microbiológica que resulta contaminante para el suelo, agua y plantas, esto se repite en distintos lugares del país, lo cual incentivó a muchos investigadores a proponer alternativas para el tratamiento de aguas de regadío. En la presente investigación se aplicó el diseño estadístico Box Behnken con la finalidad de evaluar la eficiencia del sistema Venturi de microburbujeo de oxígeno para remover la materia orgánica y microbiológica presente en las aguas residuales domésticas. En la remoción de los contaminantes mencionados se aplicó el diseño experimental de superficie de respuesta, bajo las siguientes condiciones: diámetro de la tubería en pulgadas (0.5, 0.75 y 1); tiempo en minutos (15, 30 y 45) y velocidad del fluido en L/min (3.2, 5.3, 7.5); se aplicaron 17 tratamientos de distintas combinaciones con las que se determinó el tratamiento 15 (0.75 pulg., 30 min, 5.3 L/min) como óptimo debido a que se logró generar microburbujas de hasta 0.076 μm , disminuyendo la DQO de 41 mg/L a 24 mg/L alcanzando una eficiencia del 41.46% , DBO de 21mg/L a 10 mg/L obteniendo 52.38% de eficiencia, se redujo también la cantidad de coliformes fecales de $1.1 \cdot 10^6$ NM/100ml a 1.8 NM/100ml y E. Coli de $1.1 \cdot 10^6$ NM/100ml a 1.8 NM/100ml; alcanzando en ambos casos una remoción del 99.9%; se determinó también que las variables de mayor influencia para la remoción de estos parámetros fueron el tiempo y la velocidad.

Palabras clave: Materia orgánica y microbiológica, microburbujas, Venturi.

Abstract

At present agriculture plays a fundamental role in economic growth and the reduction of poverty in the town of Carapongo, therefore part of the water resources are used to irrigate vegetables, however, most crops use water found in the gutters, which are used by families to discharge domestic wastewater without prior treatment, these have a large amount of organic and microbiological matter that is contaminating the soil, water and plants, this is repeated in different places of the country, which encouraged many researchers to propose alternatives for the treatment of irrigated water. In the present investigation, the Box Behnken statistical design was applied in order to evaluate the efficiency of the Venturi oxygen microbubble system to remove the organic and microbiological matter present in domestic wastewater. In the removal of the aforementioned contaminants, the response surface experimental design was applied, under the following conditions: diameter of the pipe in inches (0.5, 0.75 and 1); time in minutes (15, 30 and 45) and fluid speed in L / min (3.2, 5.3, 7.5); 17 treatments of different combinations were applied, with which treatment 15 (0.75 in., 30 min, 5.3 L / min) was determined as optimal because it was possible to generate microbubbles of up to 0.076 μm , decreasing the QOD of 41 mg / L at 24 mg / L reaching an efficiency of 41.46%, BOD of 21mg / L at 10 mg / L obtaining 52.38% efficiency, the amount of fecal coliforms was also reduced from 1.1×10^6 NM / 100ml to 1.8 NM / 100ml and E Coli from 1.1×10^6 NM / 100ml to 1.8 NM / 100ml; reaching in both cases a removal of 99.9%; It was also determined that the variables of greatest influence for the removal of these parameters were time and speed.

Keywords: Organic and microbiological matter, microbubbles, venturi.

CAPITULO I. EL PROBLEMA

1.1. Identificación y formulación del problema

La historia de la gestión del recurso hídrico en el territorio peruano, empezó con una actividad económica: la agricultura, con el fin de darle un mejor desarrollo al país; además de mejorar la defensa de los derechos del agua en todos sus usos. El agua está considerada como soporte y componente primordial para los seres vivos y ecosistemas (Autoridad Nacional del Agua [ANA], 2015)

Son muchos los usos destinados para el agua; pues los caudales de los ríos de la Amazonía y los elevados desniveles de la orografía andina promueven la generación de energía hidroeléctrica, este es estratégico y trascendente para el desarrollo del país. Otro ejemplo es el uso del agua para el sector industrial, porque contribuye de manera significativa al producto bruto interno (PBI) del país; sin embargo el retorno de los efluentes, en algunos casos puede ser contaminante para el medio ambiente, sin aplicación de algún tratamiento (ANA, 2015). Otro uso es la acuicultura, utilizada para la crianza de peces, mariscos y algas destinadas al consumo del ser humano; por sus cualidades y beneficios, teniendo en mente la posibilidad de alternativa para desarrollo del país y el mundo (Producción, 2009).

Milla (2002) revela que en la agricultura es de suma importancia que cada producto sembrado sea beneficioso para la población, por eso es indispensable que los cultivos no se dañen por organismos transmisores de enfermedades para el ser humano; no obstante existen grupos de bacterias que muestran la existencia de contaminación por materia fecal u orgánica, incrementando de esta manera el riesgo de salud pública, por el consumo de hortalizas, ya que cuanto más es la concentración de organismos patógenos en el recurso hídrico o los alimentos es más probable que se transmitan enfermedades a los seres humanos, (Hernandez, Espinoza, Malpica, & De Jesus, 2011). Asimismo, las aguas residuales son una alternativa que aporta gran cantidad de Materia Orgánica (MO); sin embargo, este tipo de aguas sin

previo tratamiento puede resultar contaminante para el suelo y agua, por lo tanto, es indispensable remover la MO antes de su regadío.

La localidad de Carapongo, pertenece al sub sector de riego de la junta de regantes del Rímac; además es dueño de un área de 400 hectáreas, de las cuales un 62% es dedicada al regadío mediante canaletas, es importante destacar que Carapongo es un área favorecida debido a que se encuentra a 13 km de los mercados mayoristas más grandes de todo Lima (Villaverde & Enciso, 2017).

En la Asociación los Viques de Carapongo, Lurigancho, se puede observar a diario, como las familias descargan sus aguas residuales domésticas en las canaletas que están ubicadas fuera de sus viviendas; el agua de estas mismas canaletas, (ver Figura 1) son utilizadas para el regadío de vegetales de tallo bajo; tal evento nos incitó a mostrar alternativas para el tratamiento de aguas; como el microburbujeo, el cual oxigenará el medio, y eliminará organismos patógenos, preservando la calidad requerida por (Estándares de calidad ambiental [ECA], (2017).



Figura 1. Vista panorámica de un campo de cultivo de la Asociación Viques de Carapongo

1.2. Justificación

Según Ayres & Duncan (1996), el uso de aguas residuales domésticas para el riego de cultivos es cada vez más común, esto se da debido a que el rendimiento de los cultivos son más altos, ya que las aguas residuales no solo contienen agua para los cultivos, también tienen nutrientes vegetales como el nitrógeno y el fósforo; sin embargo, existe el riesgo de que el riego de aguas residuales puede facilitar la transmisión de enfermedades relacionadas con la excreta; por su origen doméstico, comercial e institucional contiene desechos fisiológicos y otros provenientes de la actividad humana (Vivienda, 2009).

La aplicación de la nanotecnología en el tratamiento de aguas semi estancadas dio grandes frutos en nuestro país; Pareja (2012) menciona como el científico peruano recuperó el humedal “El Cascajo”, que debido a la falta de cuidado se había convertido en un reservorio de aguas residuales, además los análisis previos sobrepasaba los límites permisibles (LMP) de diversos parámetros como el DBO, nitrógenos totales, fósforos totales etc.; en el proyecto mencionado se logró oxigenar estas aguas con el sistema de nanomicroburbujeo, logrando disminuir el exceso de los LMP hasta en un 70% en un lapso de 6 meses, de igual manera Ventura (2017) utilizó la micro nano burbujas de oxígeno para el tratamiento de la sanguaza, con el que logró disminuir la turbidez casi en un 80%, la DBO₅ en un 45% y la DQO en un 44%; por lo tanto la tecnología de microburbujas es una alternativa de solución para el tratamiento de distintos problemas de contaminación con el que se podrá mejorar la calidad de los parámetros fisicoquímicos y microbiológicos, evitando el riego de vegetales con aguas contaminadas.

1.3. Presuposición Filosófica

Uno de los puntos resaltantes mencionados en la Biblia, es la mayordomía. En los comienzos de la historia, Dios pone a cargo a nuestros primeros padres al cuidado del huerto del Edén (su hábitat) referenciado en Génesis 2:15; sin embargo, tras codicia, engaños,

envidia fue que el enemigo (Satanás) los envolviera con mentiras a nuestros padres, cayendo en tentación y por consecuencia de su desobediencia hacia Dios fueron expulsados del huerto del Edén. A causa de lo que pasó es que hoy en día habitamos en una sociedad que solo se nos inculca a satisfacer nuestras necesidades a cualquier costo sin pensar que es lo que les pueda pasar a las generaciones futuras. El aumento de industrias, crecimiento incontrolable de la población, avance de tecnología hacen que también aumente la contaminación ambiental y poco a poco destruyamos todo el habitat que el Señor nos encargó a falta de compromiso y conciencia ambiental.

Son muchos los factores contaminantes que son afectados por causa del hombre; sin embargo, detallaremos uno; el agua, cualquier actividad desarrollada por el ser humano contamina este recurso hídrico; por ejemplo, si un agricultor utiliza agua para regar sus cultivos, estos son previamente bañados de pesticidas o fertilizantes para evitar plagas, mezclando así el agua con estos químicos para luego ser arrastrados hasta llegar a cuerpos de aguas más grandes. El agua útil para nuestro consumo son las aguas dulces; no obstante, el agua residual doméstica, industrial, agrícola, etc. llegan a estos cuerpos de agua afectando su calidad y dejando a más habitantes sin este consumo por la inadecuada administración del recurso hídrico.

En el libro de Ezequiel 34:18 da su comentario con respecto al párrafo anterior de la siguiente manera ¿Os parece poco el haberos alimentado con lo mejor de los pastos, para que también pisoteéis con vuestros pies lo que queda de vuestros pastos; y que, habiéndoos bebido las aguas claras, ¿enturbiéis además con vuestros pies las que quedan? Menciona como el hombre destroza por destrozar, manipulando los recursos para aprovechar y luego tirarlo por tal motivo, brindamos como opción el tratamiento de las aguas mediante las microburbujas producidas por el efecto Venturi para disminuir los contaminantes en el agua residual doméstica para regadío de vegetales.

1.4. Objetivos de la investigación

1.4.1. Objetivo General

Evaluar la eficiencia del sistema Venturi de Micro burbujas de oxígeno mediante el diseño experimental de Box Behnken para la remoción de materia orgánica y microbiológica en aguas residuales domésticas ubicada en la Asociación “Los Viques” de Carapongo para mejorar la calidad de agua de regadío de vegetales.

1.4.2. Objetivo Específico

- Diseñar el sistema de microburbujeo para el tratamiento de aguas residuales domésticas.
- Comparar los efectos de los tratamientos con respecto al diámetro de la tubería, velocidad de fluido y tiempo de contacto; para verificar los parámetros óptimos en la turbiedad, conductividad, tamaño de burbuja, aplicando el diseño experimental de Box Behnken.
- Determinar los parámetros microbiológicos (Coliformes Termotolerantes y E. Coli), antes y después de la aplicación de los tratamientos con los parámetros optimizados
- Determinar los parámetros químicos (DBO, DQO, pH, conductividad) antes y después de la aplicación de los tratamientos con los parámetros óptimos.

CAPITULO II. REVISIÓN DE LA LITERATURA

2.1. Antecedentes de la investigación

2.1.1. *Revisión Internacional*

Sjogreen (2015) realizó una caracterización de nanoburbujas de oxígeno en soluciones salinas de NaCl en la ciudad de Colombia, mediante el proceso de la cavitación, con el fin de analizar la concentración y tamaños en la solución, estudiando así en distintos tiempos el pH, temperatura.

A través de la inyección de oxígeno por rotación para su mejor distribución en la creación de las nanoburbujas. Se pudo comprobar que: es viable la obtención de nanoburbujas en una solución de NaCl, además se comprobó que el diámetro de las nanoburbujas crece con respecto al tiempo de evolución (1 hora) y suele estabilizarse alcanzando un diámetro crítico entre 1000 a 2000 nm.

Se observó que los diámetros de las nanoburbujas suelen estabilizarse a medida que aumenta el pH, y a los 4° C el diámetro de las nanoburbujas es constante y claramente más estables.

Por su parte Sánchez (2017) investigó sobre la producción de micro nano burbujas monodispersas en la ciudad de España, describiendo los principales dispositivos generadores de microfluidos, de este modo se propuso nuevos perfiles aerodinámicos para la mejor generación de micro burbujas.

Detalla el diseño y la fabricación de un dispositivo generador masivo de microburbujas basado en un perfil aerodinámico con orificios de inyección distribuidos a lo largo de la región del borde del tanque, con el que se pudo llegar a generar un diámetro idéntico entre las microburbujas.

Mientras que Beltrán y Jacinto (2012) muestran la efectividad de las micronanoburbujas para la remoción efectiva de los lodos de tratamiento químico del drenaje

ácido de la mina Huanuni en Bolivia, mediante el método de la flotación, estos lodos se caracterizan por tener un pH de 2.8 además de un gran contenido de metales pesado, por lo que primero se aplica el tratamiento con cal a un pH de 9.5 y una dosis de 2.32 kg/m³, logrando así una remoción de metales pesados mayor al 99%; y para la separación de los metales pesados por flotación con microburbujas se tiene que producir flóculos pequeños y compactos para evitar las roturas del flóculo.

Así mismo en Corea, Tekile, Kim y Lee (2016) examinaron el efecto de la variación del oxígeno inicial en distintos tipos de agua; analizando también el impacto de los sólidos disueltos y suspendidos en las micronanoburbujas; para llevar a cabo estos experimentos disolvieron cloruro de sodio (NaCl) y Caolín; para su investigación se establecieron los valores de la conductividad eléctrica, los sólidos en suspensión, (caolín y NaCl) y la turbidez resultante; la eficiencia del proceso se analizó basado en el porcentaje de la eliminación y reducción de la DQO; con esta investigación se logró comprobar que las microburbujas son eficientes para abastecer de oxígeno un cuerpo de agua debido a que pueden durar hasta días; para luego descubrieron que a mayor concentración de DO, la coalescencia entre las burbujas se repite para aumentar el número de burbujas. Por lo tanto, mayor concentración de DO.

Forero, Díaz y Blandon (1999) desarrollaron un nuevo sistema en la ciudad de Colombia, para el tratamiento de aguas residuales mediante sistemas combinados, Flotación por aire disuelto (DAF) y flotación por aire inducido (IAF), en este sistema se producirá una dispersión de burbujas finas superiores a 1000 μm ; las muestras de agua a tratar tenían concentraciones superiores a 100 mg/dm³ de aceite y las partículas en suspensión eran entre 30 μm y 100 μm ; los resultados obtenidos fueron que la remoción de hidrocarburos a una temperatura de 323 K (49.85 °C) se da prácticamente en los primeros 40 minutos luego llega a una fase estacionaria; sin embargo a 298 K (24.85 °C) la remoción es lenta, y a los 120

minutos llega a igual el porcentaje removido a alta temperatura, esto se da debido a que la temperatura logra que la diferencia de densidades entre el crudo y el agua incremente, favoreciendo rápidamente su separación.

Hernández (2019) realizó un proyecto en la localidad de Pasca-Colombia, utilizó el agua residual de la laguna de oxidación e insertó un proceso de inyección de micro y nano burbujas, de tal manera que incremente la cantidad y el tiempo de permanencia del oxígeno disuelto en el agua. Previamente inoculó microorganismos aeróbicos para así obtener una activación biológica, y obtener una eficiente degradación de materia orgánica. Inyectó micro y nano burbujas de aire en 3 muestras de 25 litros cada una por 2 minutos, cabe mencionar que este proceso se repitió cada 4 horas por 10 días. Para su conclusión de su proyecto logró disminuir de manera favorable los parámetros tales como DQO, DBO, SDT, SD, OD, pH, conductividad, al ser evaluados se obtuvo una reducción de hasta 75% de carga inicial.

2.1.2. Revisión Nacional

Agurto (2012) se enfatizó en las actividades de los campos de explotación de petróleo, debido a que estas actividades presentan altos niveles de agua en su producción neta; para esto se realizó el aprovechamiento por medio de la reinyección de agua salada en PIAS (Planta de Inyección de Agua Salada) en las que se remueve sus contaminantes como aceites, bacterias, grasas y sólidos presentes en el agua. Para lo que utilizó la tecnología de microburbujas mediante la cámara de flotación, en la que se generan micro-burbujas entre 5 a 50 micras, lo que permitió eliminar más del 80% de sólidos y aceites presentes en el agua; además de un menor tipo de retención de partículas pequeñas; finalmente concluyó que los costos del tratamiento del agua se redujeron hasta en un 50% lo cual fue favorable.

Por su parte Nuñez (2014) realizó una investigación en la ciudad de Lima, que tuvo por objetivo principal demostrar la influencia de la aplicación de las nanoburbujas de aire en el tratamiento de aguas residuales de una embotelladora de bebidas carbonatadas; para poder

disminuir tanto el DBO₅ y DQO, con la aplicación de las nanoburbujas de aire, para lo que utilizaron una metodología pre experimental y de tipo aplicada; usando solo 3 muestras agua divididas en 20 litros de agua residual cada una de la embotelladora de bebidas gaseosas; de estas se extrajeron 2 muestras; la primera a los 45 minutos de tratamiento y la segunda a los 90 minutos; con los resultados se pudo comprobar que las nanoburbujas lograron reducir la turbidez en un 8.4%, la turbidez en un 71.97%; la concentración de DBO₅ en un 99.89% y el DQO en un 99.13%.

Mientras que en la ciudad de Huancayo, Macassi (2017) investigó el comportamiento de un sistema de nanoburbujeo en el tratamiento de aguas residuales en la PTAR de nombre Doris Mendoza, lo cual logró reducir los niveles de contaminantes; mediante un sistema de generación de una electrobomba sumergible, además de un sistema de recirculación acoplado a la electrobomba y el tubo Venturi. Este sistema en conjunto logró generar las nanoburbujas, produciendo la cavitación hidrodinámica y la implosión de burbujas gracias a la inyección de aire y el agua residual para la interacción y formación de las nanoburbujas.

Evaluó el comportamiento del sistema para eliminar el DQO utilizó 1 m³ de agua residual. Teniendo en cuenta los tiempos de inyección de 2, 4, 6, 8, 10 horas; se va calculando y regulando el flujo del agua para lograr su eficiencia. Para las 2 horas de inyección de aire, su porcentaje de remoción es del 0.87%; sin embargo, para las 8 horas su eficiencia aumenta a un 79.92%. Se concluye que a mayor remoción de la implosión del oxígeno del aire será mejor su eficiencia. Por otro lado, recomienda realizar una evaluación con el mismo sistema y comportamiento entre 6 y 8 horas, de manera que se optimice el tiempo de aireación y reducción de energía. Además, se recomienda usar otros tipos de bombas de agua de acuerdo a su eficiencia.

Ventura (2017) realizó un proyecto que tiene como finalidad disminuir las concentraciones de parámetros físicos y químicos de aguas de Sanguaza, de procedencia de

un mercado de Ancón en la Ciudad de Lima, se tomaron 2 puntos de muestreo. Construyó un generador de micronano- burbujas de aire; con una presión de 90 PSI y 6.6 L/min de caudal. Durante el desarrollo se tomaron muestras cada 30 minutos, 45 minutos y 60 minutos, para así analizar aquella agua y obtener resultados de parámetros físicos, químicos y a su vez procesarlos en el programa estadístico SPSS y Excel.

Realizó 5 repeticiones, con diferente concentración de muestra, en donde la repetición con mayor eficiencia fue la repetición n.º 4, logrando así disminuir la turbidez en un 78.7%, la DBO₅ en un 45.12%, la DQO en un 44.03% todo está trabajando a una temperatura ambiente de 20.15 °C. Para lo cual concluye que las micronano-burbujas lograron reducir de manera eficaz las concentraciones en los parámetros de calidad del agua de sanguaza.

2.2. Marco Legal

En el Perú, respecto a leyes ambientales tenemos como cabeza principal a la Constitución Política del Perú, la que promueve la conservación y preservación por el medio ambiente.

Seguido a eso esta Ley general del Ambiente- N.º 28611, (2005) “El objetivo de mejorar la calidad de vida de la población y lograr el desarrollo sostenible del país.”

DIGESA (2018) “propuso establecer la clasificación de las aguas superficiales en todo el territorio nacional, con el fin de conservar y proteger la calidad de los recursos hídricos, de manera primordial las utilizadas para el consumo del ser humano y usada en tareas productivas del país, de tal manera que se aprobó la resolución directoral N° 1152-2005-DIGESA/SA.”

Posterior a ello, entra en vigencia la Autoridad Nacional del Agua, “el ente rector y máxima autoridad del Sistema Nacional de Gestión de los Recursos Hídricos, quien será el responsable de vigilar, controlar y fiscalizar con el fin de asegurar la preservación y

conservación de las fuentes de agua, con la ayuda de una gestión integrada” (Ley de recursos hídricos N° 29338, 2009).

Pasado un tiempo la Resolución Jefatural N.° 202-2010-ANA manifiesta que “la clasificación de los cuerpos de agua se realice de acuerdo a las características naturales y a los usos que se destinan dichas aguas”; todo ello conforme a las categorías nombradas en el Decreto Supremo N.° 002-2008 MINAM.

Después de ello, se presentó la modificatoria del Decreto Supremo N.° 004-2017-MINAM, “aprobando los Estándares Nacionales de Calidad Ambiental (ECA) para usos del agua, con la finalidad de codificar las disposiciones normativas que aprueban los ECA agua, modificando y suprimiendo algunos valores, parámetros, categorías y subcategoría; aprobando 4 categorías, 9. Subcategorías y 17 ítems”. De acuerdo a la investigación realizada, se tomó en cuenta los estándares de la categoría 3 mencionados anteriormente (ver Tabla 1).

Tabla 1. *Estándares de Calidad Ambiental para Riego de Vegetales – Agua para riego no restringido*

Parámetros	Unidad de Medida	E.C.A.
Potencial de Hidrogeno (pH)	Unidad de pH	6,5 – 8,5
Conductividad	uS/cm	2500
DQO	mg/L	40
DBO	mg/L	15
Coliformes termotolerantes	NMP/100ml	2000
Escherichia coli	NMP/100ml	1000
Temperatura	°C	Δ3

2.3. Marco Conceptual

2.3.1. Agua

En la Ley de recursos hídricos N.° 29338 (2009), se menciona que “el agua es un recurso natural renovable, indispensable para la vida, vulnerable y estratégico para el desarrollo sostenible, el mantenimiento de los sistemas y ciclo naturales que la sustentan y la seguridad de la nación.” En su mayoría, se obtiene de aguas subterráneas o superficiales. Su

disponibilidad es de mucha importancia para la vida y para la economía mundial, a lo largo de los años los recursos eran considerados disponibles para diversos usos antropológicos, sin considerar la calidad del mismo. Según Fernández (2012), menciona que más del 50% de los recursos hídricos son destinados a la agricultura, y luego con menor cantidad el sector industrial, minería, urbano, entre otros.

El país con mayor reserva a nivel América Latina, es el Perú, gracias a la cuenca del Amazonas. Sin embargo, el 65% de los pobladores peruanos costeros tienen disponibilidad al 1.7% del agua (Gonzales et al., 2014).

Usos del Agua.

Es utilizada para diversos fines y para cada uso se requiere una calidad en particular, y es de tener en cuenta, no utilizar agua de excelente calidad para el uso que no lo requiera. De acuerdo a las leyes establecidas en el territorio peruano; conforme al artículo 35 de la Ley de recursos hídricos N.º 29338 (2009) menciona tres tipos de usos del agua; siendo su otorgamiento y ejercicio de acuerdo a lo siguiente.

Uso Primario:

“El uso primario consiste en la utilización directa y efectiva de la misma, en las fuentes naturales y cauces públicos de agua, con el fin de satisfacer necesidades humanas primarias. Comprende el uso de agua para la preparación de alimentos, el consumo directo y el aseo personal; así como su uso en ceremonias culturales, religiosas y rituales.” Ley de recursos hídricos N.º 29338 (2009).

Uso para la Población.

“El uso poblacional consiste en la captación del agua de una fuente o red pública, debidamente tratada, con el fin de satisfacer las necesidades humanas básicas: preparación de alimentos y hábitos de aseo personal. Se ejerce mediante derechos de uso de agua otorgados por la Autoridad Nacional”, Ley de recursos hídricos N.º 29338, (2009). Cabe indicar que el

uso del agua para la población es el más exigente, referido a la calidad, seguridad y cantidad del mismo (Fernández, 2012).

Uso para el Sector Productivo:

“El uso productivo del agua consiste en la utilización de la misma en procesos de producción o previos a los mismos. Se ejerce mediante derechos de uso de agua otorgados por la Autoridad Nacional; Son tipos de uso productivo los siguientes: agrario, acuícola y pesquero, energético, industrial, medicinal, minero, recreativo, turístico y transporte” (Ley de recursos hídricos N° 29338, 2009).

Por otro lado, existen áreas reservadas para la protección del agua como las mencionadas a continuación:

Áreas Naturales Protegidas.

Llamado a la zona continental y/o marino del territorio peruano, puesto que es reconocido y declarado como tales, (Ley de Áreas Naturales Protegidas (ANP), Ley N.º 26834 de manera organizada que se incluyó su zonificación y categorías con la finalidad de conservar la diversidad biológica, cultural, paisajística, entre otros asociados. Además de su contribución al desarrollo sostenible del país. Cabe indicar que esta condición natural debe conservarse a perpetuidad permitiendo el uso regulado del área y su aprovechamiento de recursos (DIGESA, 2018).

Áreas de los Pueblos Indígenas.

“La ley del derecho a la consulta previa a los pueblos indígenas u Originarios, Ley N.º 29785; esta desarrolla una previa consulta a los pueblos indígenas y originarios respecto a medidas legislativas que les afecten directamente. Además, hay tratados que incluyen los derechos a la identidad cultural; conservando sus costumbres, tierras; es decir no se podrá almacenar ni realizar disposición final de materiales peligrosos en tierras de los pueblos

indígenas, ni emisión de medidas administrativas que autoricen dichas actividades” (DIGESA, 2018).

2.3.2. Conservación de aguas (lagos y lagunas)

“Las lagunas y lagos independientemente de su origen, son cuerpos de agua importantes ya sea como fuentes tanto para abastecimiento poblacional como para productivo; así mismo, constituyen ecosistemas acuáticos frágiles, en los que habitan diversidad de especies de organismos acuáticos (flora y fauna), los cuales cumplen una función importante en la dinámica de los ecosistemas, constituyendo en algunos casos fuente de recursos económicos para las poblaciones” (DIGESA, 2018).

2.3.3. Aguas en represas

“Las presas existentes en el Perú tienen como fin almacenar agua para usos en irrigación o para generar energía eléctrica mediante centrales hidroeléctricas y en algunos casos dotar de agua para uso poblacional, previo tratamiento. De acuerdo al Inventario de Presas del Perú elaborado por ANA en el año 2015, existen 743 presas, de las cuales 442 están destinadas al riego en agricultura, 31 al aprovechamiento hidroenergético y diez (10) al suministro de agua” (DIGESA, 2018).

2.3.3.1. Clasificación de aguas residuales.

Aguas Residuales Domésticas.

Son utilizadas en varias actividades humanas provenientes de viviendas, edificios, residencias, entre otras. De tal manera que cambian su composición original; y se recomienda que antes de ser vertidas a otro cuerpo de agua estas sean tratadas para no perjudicar su calidad (Romero, 2016). Se manifiesta que en el territorio peruano hay una generación de 2’217,946 m³ por día de aguas residuales que son desembocadas a la red de alcantarillado; solo el 32% de estas aguas son captadas para un tratamiento. Si reducimos de todo el territorio peruano y nos enfocamos en Lima, esta ciudad produce aproximadamente

1'202,286 m³/d que son descargadas a la red de alcantarillado, de esto solo el 20,5% son captadas para un tratamiento (OEFA, 2014).

Aguas grises.

Zambrano (2015), define a estas aguas las que provienen de duchas, lavadoras, lavaplatos, que suministran grandes cantidades de DBO, sólidos totales, fósforo, coliformes fecales y grasas. En contraparte, Lluís et al. (2016) incluye todas las aguas mencionadas anteriormente excluyendo a las de un cuarto de baño, resaltando así que estas aguas presentan bajas cargas de coliformes fecales.

La guía técnica española de recomendaciones para la reutilización de aguas extraída de edificios, define aguas grises procedentes de duchas, bañeras y lavamanos excluyendo a las aguas de cocinas, lavavajillas, lavadoras, procesos industriales o con algún producto químico.

Además, se clasificaron estas aguas en 3 tipos, para así poderlos diferenciar en su aproximación:

- a) Tipo 1: agua procedente de duchas, bañeras, lavatorios con baja carga microbiana.
- b) Tipo 2: agua procedente de lavadoras, duchas, lavatorios, bañeras con media carga microbiana.
- c) Tipo 3: agua procedente de lavavajillas, fregadero de cocina, lavadoras, duchas, lavatorios, con alta carga microbiana.

Los tipos de contaminantes presentes en aguas residuales, son diferentes de acuerdo a su procedencia, por lo que el tratamiento a aplicar se verá influenciado.

Aguas negras.

Solamente son las aguas provenientes de los inodoros, las que trasladan altos porcentajes de excrementos del ser humano; en otras palabras, altos porcentajes de Sólidos totales, coliformes totales y nitrógeno (Zambrano, 2015).

Aguas Residuales Municipales.

Todas las actividades humanas que requieren un uso del recurso hídrico generan aguas residuales, las cuales son trasladadas mediante redes de alcantarillado, para ser tratados en una planta de tratamiento con el fin de disminuir los contaminantes para el cumplimiento de la normativa vigente (Romero, 2016).

Aguas Residuales Industriales.

Son aguas resultantes de las descargas de industrias, estas fuentes son más contaminadoras, por lo que las sustancias utilizadas deterioran las fuentes receptoras, provocando pérdidas tanto económicas como enfermedades en los habitantes que utilizan el recurso hídrico aguas abajo. (Romero, 2016).

2.3.4. Características del agua residual

Cada cuerpo de agua se caracteriza por un conjunto de propiedades físico, químico y biológico. Es necesario tener en cuenta que cada propiedad está relacionada entre sí, como, por ejemplo; la temperatura afecta directamente a la actividad biológica como a la producción de gases disueltos en el agua (Orellana, 2005).

2.3.4.1. Parámetros Físico-Químicos.

PH.

Es la medida de concentración de iones hidrógeno presentes en el agua, a mayor aglomeración de estos iones el agua cambiará su naturaleza a alcalina y si disminuye cambia a ácida; generalmente las aguas obtenidas de fuentes naturales tienen un pH que oscila entre 6 y 8. La Comisión Nacional del Agua (CNA, 2007) indica que en los sistemas de distribución de agua, su objetivo es controlar este parámetro para disminuir la corrosión, por lo que afecta la relación entre la dureza, CO_2 , alcalinidad, temperatura; trayendo así consecuencias en la calidad del agua.

Si el agua utilizada para riego de vegetales presenta un pH fuera del rango estandarizado puede tener un ión tóxico o producir un desbalance (Sancha et al., 2005).

Temperatura.

Para Diaz,(2017) la temperatura está definida por la cantidad de energía calórica, es decir por ondas del infrarrojo absorbida por un cuerpo de agua. A mayor aumento de movimiento molecular en el agua habría variaciones de temperatura afectando la solubilidad de sales, gases en el agua y propiedades químicas como microbiológicas. Es considerable mencionar que la temperatura está influenciada de manera directa con otros parámetros de calidad del agua, como la demanda biológica de oxígeno (DBO), el oxígeno disuelto, etc.

La temperatura afecta a la porción de oxígeno que puede trasladar el agua de un punto a otro; es decir, si el agua tiene menos temperatura más oxígeno transportará, de esta manera está influenciada en la fotosíntesis de plantas y algas. De acuerdo a investigaciones se observó un aumento de temperatura en ríos o lagunas, aumentando la presencia bacterias y/o microorganismos causando enfermedades, todo ello debido a ciertos factores, como los vertidos de agua caliente de industrias, escurrimientos de caseríos (Anda, 2015).

Turbidez.

Los materiales suspendidos como los materiales orgánicos o inorgánicos, algas, entre otras partículas suspendidas encontrados en el agua son causados por la turbidez. La unidad métrica es en NTU (unidades de turbidez nefelométricas). Etienne (2009) indica que para la respectiva medición de este parámetro se realiza mediante la comparación entre la intensidad de la luz dispersada en una muestra de agua y la intensidad en una suspensión de referencia en las mismas condiciones.

Color, Sabor y Olor.

Para estas características se tiene que tener mucho cuidado, ya que en varios casos las aguas residuales domésticas e industriales conectadas clandestinamente a cuerpos de aguas, presentando una alta degradación de materia orgánica (Etienne, 2009).

Salinidad.

Es la capacidad que tiene el agua para transportar energía y al mismo tiempo aumentar su concentración de sales; es decir al medir la conductividad eléctrica con ayuda de dos electrodos, se apreciara la salinidad de forma eficaz. Hay una relación entre estos 2 parámetros, por lo que la conductividad dependerá de la temperatura referente, por lo general es de 25 °C, por consiguiente, a mayor conductividad, mayor será la salinidad, actuando de manera proporcional.

Por otro lado, un alto contenido de salinidad puede afectar la productividad de los cultivos, degradación del suelo, e incrementar la contaminación de aguas subterráneas (Sancha et al., 2005).

Conductividad.

Tiene la capacidad de conducir corriente eléctrica, mediante electrolitos disueltos en el agua; influenciada por la composición mineralógica, gases disueltos, pH y todo lo que dañe a la solubilidad de sales. Esta propiedad dependerá de la presencia de su concentración, movilidad iones y la temperatura. Si se presentan alteraciones, proporcionará información sobre su descomposición de la materia orgánica, y productividad primaria (Solís-Castro, Zúñiga-Zúñiga, & Mora-Alvarado, 2018).

Sólidos Disueltos Totales (TDS).

Definida como la medida de la materia en una muestra de agua, cabe mencionar que estos no pueden ser removidos por un filtro por lo que miden menos de 2 micrones. Está compuesta de sales disueltas, minerales, metales (Sigler & Bauder, 2014).

Estas se acumulan en la parte del fondo de un cuerpo de agua, tras haber trascurrido un cierto tiempo. Estos sólidos dan inicio a la formación de depósitos de fangos (Etienne, 2009).

Materia Orgánica.

La mayor parte encontrada en la parte inferior del cuerpo de agua es de naturaleza orgánica. Estos provienen de excretas de animales, plantas, hasta incluso de las tareas del ser humano enlazadas con la descomposición orgánica. Formados principalmente por grupos de hidrógeno, carbono y oxígeno; incluso hay presencia mínima de otros elementos (Etienne, 2009).

DBO (Demanda Bioquímica de Oxígeno).

Es la cantidad de oxígeno necesario para descomponer la materia orgánica presente en el agua, mediante la acción bioquímica aerobia. Para la transformación biológica es necesario precisar un tiempo mayor a los 20 días, realizando una incubación durante 5 días, a 20 °C, en la oscuridad y lejos del contacto del aire, con un pH de 7 a 7.5 con la presencia de nutrientes y oligoelementos que permitan el crecimiento de los microorganismos, denominándolo DBO₅. (Raffo & Ruiz, 2014).

DQO (Demanda Química de Oxígeno).

Determina la cantidad de materia orgánica presente en un cuerpo de agua; es decir, se mide el oxígeno equivalente a la materia orgánica oxidable utilizando un agente químico oxidante, por lo general se usa como agente oxidante el dicromato de potasio, esto se debe a sus características de oxidar en su mayoría a los compuestos orgánicos (Raffo & Ruiz, 2014).

El oxidante químico es capaz de reaccionar con sustancias de complicada biodegradación para los microorganismos, por tal motivo es que los valores de DQO son mayores que la DBO. También existe una relación entre ambos parámetros, su relación indica el tipo de contaminación en las aguas residuales. Es decir, al dividir DBO/DQO, si el resultado es menor a 0.2, el agua es procedente de aguas industriales (tipo inorgánico), pero si el resultado es mayor a 0.6, el agua es procedente de aguas residuales urbanas, ganado y/o industrias alimenticias (tipo orgánico).

Parámetros Microbiológicos.

En los cuerpos de agua, se pueden encontrar organismos patógenos de procedencia de los residuos del ser humano y estos pueden ser causantes de varias enfermedades sobre todo en lugares donde hay escasez de recursos económicos. Hay varias clases de organismos como los virus, las bacterias, los protozoos, entre otros; estos se presentan en tamaños muy pequeños por lo que resulta difícil extraerlos del cuerpo de agua. En ese caso se aplica como indicador el organismo coliforme, de tal manera que su existencia es muy numerosa y rápida de comparar. (Metcalf et al., 1995).

Bacterias coliformes.

Para la prevención de epidemias como resultantes de la contaminación del agua por lo que todas las aguas residuales son altamente peligrosas, por lo tanto, mediante el análisis bacteriológico se determinará la presencia de contaminación fecal. Estos organismos pueden fermentar lactosa con ayuda de la generación de gases (Metcalf et al., 1995).

a) Coliformes Totales.

Comprendido en todos los bacilos Gram- negativos aerobios o anaerobios facultativos no esporulados, este grupo está conformado por cuatro géneros primordialmente: *Enterobacter*, *Escherichia*, *Citrobacter* y *Klebsiella*. En su mayoría fermentan la lactosa con la producción de gas entre promedio de 48 h a $35^{\circ} \text{C} \pm 1^{\circ} \text{C}$ (Metcalf et al., 1995).

b) Coliformes Fecales.

Denominados también coliformes termotolerantes, estos son un subgrupo de coliformes totales, tienen la capacidad de tolerar temperaturas muy elevadas y de fermentar la lactosa a 44.5°C . Alrededor del 95% del grupo de los coliformes presentes en heces fecales, están formados por *Escherichia coli* (Metcalf et al., 1995).

c) Escherichia coli.

Este organismo es parte de la comunidad bacteriana y este es el más representativo de la fuente de contaminación fecal, (Metcalf et al., 1995). Esta bacteria pertenece a la familia

Enterobacteriaceae, es un bacilo corto Gram negativo presente en el intestino delgado de los seres humanos y animales. Hay que tener en cuenta que, hay algunas cepas de *E. coli* patógenas que causan enfermedades diarreicas.

2.3.5. Determinación de la presencia de coliformes.

Los más utilizados para determinar si hay presencia de coliformes es el método de fermentación por tubos múltiples y del filtro de membrana (Metcalf et al., 1995).

2.3.5.1. Muestreo de agua.

Tipos de muestreo para agua.

Según, el Protocolo Nacional para el Monitoreo de la Calidad de los Recursos Hídricos Superficiales (2016), para el muestreo de aguas, hay tres tipos mencionadas a continuación:

Muestreo simple o puntual.

“A esta muestra también se le denomina discreta. Consiste en la forma de una porción de agua en un punto o lugar determinado para su análisis individual. Representan las condiciones y características de la composición original del cuerpo de agua para el lugar, tiempo y circunstancias, particulares en el instante en el que se realizó su recolección” (ANA, 2016).

Muestreo compuesto.

“Es el resultado de la mezcla homogenizada de varias muestras simples colectadas durante un periodo determinado según proporciones concretas. Pueden ser de volumen fijo o de volumen proporcional, dependiendo del intervalo del muestreo y el volumen de cada muestra simple que lo conforma. Este tipo de muestras se emplea cuando se requieren conocer las condiciones promedio en un determinado periodo. Son generalmente usadas para la caracterización de aguas residuales” (ANA, 2016).

Muestreo integrado.

“Consiste en la homogenización de muestras puntuales tomadas en diferentes puntos simultáneamente, con la finalidad conocer las condiciones de calidad de agua promedio en

los cuerpos de agua. Dentro de esta clasificación, se ubican las muestras integradas de área que comprenden varias muestras simples tomadas en varios puntos de una determinada área acuática (ancho de río) y las muestras integradas de profundidad, que abarcan muestras simples o compuestas tomadas a lo largo de la columna de agua” (ANA, 2016).

Proyección del monitoreo.

Se define al diseño del trabajo de monitoreo, englobando los puntos de monitoreo, lugares de acceso, ubicación de la zona, equipos, reactivos, entre otros requisitos a aplicar.

2.3.5.2. Tratamiento de aguas residuales.

El crecimiento poblacional ha generado una inadecuada organización; por lo que la mayoría promueve la creación de asentamientos para su respectiva estadía. Estos lugares generan mucha contaminación como es el caso del agua y alcantarillado. A falta de una instalación de abastecimiento incrementaron las aguas residuales utilizadas por las viviendas; más aún si estos cuerpos de aguas son desembocados a un cuerpo de agua más grande como los ríos o lagunas para luego ser utilizados por la población aguas abajo, por lo que traen como consecuencia desde generación de olores hasta lo más grave de las enfermedades gastrointestinales (Romero, 2016).

Para dar un nuevo uso a las aguas residuales se ejecutaron técnicas para la aplicación de los diversos tratamientos con la finalidad de disminuir los riesgos para la salud humana y daños en el medio ambiente. No todas las poblaciones necesitan el mismo sistema, todo es de acuerdo a que se debe realizar una inspección preliminar detallada para ejecutar un buen diseño de tratamiento; de manera general se explicará los procesos utilizados para el tratamiento de aguas, empieza con pretratamiento, tratamiento primario, tratamiento secundario y tratamiento avanzado (Ramalho, 1996).

El pretratamiento tiene como finalidad remover aquellos residuos que pueden obstruir el paso del líquido además de causar daños a las operaciones siguientes. El siguiente paso es

el tratamiento primario, encargado de disminuir parcialmente los sólidos suspendidos, materia orgánica, utilizando la sedimentación; se afirma que este tratamiento disminuye en un promedio del 60% de los sólidos en suspensión y 35 a 40% de la DBO. Posteriormente el tratamiento secundario quien se encarga de remover la DBO soluble, DQO y Sólidos suspendidos, utilizando tratamientos biológicos como los filtros percoladores, lagunas de estabilización, lodos activados y la sedimentación. Y por último el tratamiento avanzado, más que todo es usado para agitar el cuerpo de agua para prevenir la eutrofización eliminando así contaminantes que no se pudieron eliminar en los procesos anteriores (Romero, 2016).

2.3.5.3. Nano burbujas y Micro burbujas

Las burbujas son cuerpos de gas rodeados de agua, y cuando las burbujas de tamaño macro suben y estallan rápidamente en la superficie de un cuerpo de agua, (ver Figura 2) vacían una cantidad significativa del contenido de gas en la atmósfera (Marui, 2013).

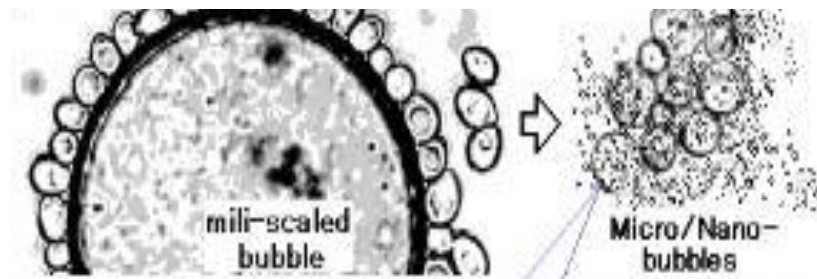


Figura 2. Interacción entre las microburbujas y el medio

Nota. Fuente: Marui, (2013)

El diámetro de las nano-burbujas suele ser inferior a 100 nm y sus propiedades físicas son únicas, porque difieren de un tipo de burbuja a otro, por lo cual, las nano-burbujas permiten su aplicación en múltiples campos. Mientras que las microburbujas tienen un diámetro entre 1 a 100 micras (1 μm a 100 μm) (Marui, 2013).

En los últimos años, el concepto de ultra-fina burbujas se caracteriza por ser extremadamente pequeñas burbujas. Estudios muestran que las burbujas con un diámetro

inferior a 50 μm son comprimidas por los iones en la interfaz gas-líquido a un diámetro crítico, mientras que aquellos que tienen valores por debajo de su aumento de diámetro crítico; como resultado de lo anterior, la concentración de iones en la interfaz gas-líquido, la presión interna y la temperatura del sistema aumentan, lo que conduce a varios tipos de fenómenos. Las burbujas ultra-finas son conocidas desde 1894, cuando se produjo la violenta vibración de la hélice de un barco torpedero, propiedad de la Real Marina. Mientras estaba en período de prueba, la superficie se encontraba significativamente oxidada, porque la hélice en movimiento generó una gran cantidad de burbujas que cubrió por completo su superficie. Mostrando que el ruido del agua caliente en las calderas antes del punto de ebullición alcanzó niveles altos en el rango de ultrasonido generado por las micro-burbujas (Wang et al., 2017).

Estas diminutas burbujas son por general de carga negativa, esto se debe al aumento de iones alrededor de la interfaz agua-gas de la misma, mientras que las micro-nano burbujas flotan, estas atrapan los contaminantes suspendidos en el agua hasta incluso se introducen en los espacios más pequeños de los sólidos, de esta manera los envuelven totalmente y poder flotar hacia a la superficie (Macassi, 2017).

Al introducir nano-burbujas con oxígeno en un área de remediación de aguas superficiales y aguas residuales, el tratamiento ha demostrado que las burbujas más pequeñas han logrado grandes efectos de transferencia de masas; de tal manera que aumenta significativamente la biodiversidad y la población de organismos en el medio ambiente (Marui, 2013).

Por otro lado, es importante investigar el tiempo de durabilidad que estas micro- nano burbujas pueden resistir al líquido en estudio, tras años atrás (Zimmerman et al., 2011) lograron asegurar solamente que estas nano-micro burbujas son altamente persistente; por su parte (Liu et al., 2013) mencionan que persistente hasta por horas, otros autores como (Liu et al., 2013) comentan que resisten hasta 7 días; mientras que (Duval, Adichtchev, Sirotkin,

& Mermet, 2012) afirman que son estables hasta por meses; todo esto siempre y cuando bajo ciertas condiciones adecuadas.

2.3.5.4. Aplicación de las micro-nanoburbujas.

La tecnología basada en la micro-nano-burbuja se puede aplicar en varios tipos de tratamientos médicos; como en el proceso de concentración y colapsar burbujas ultra pequeñas donde se activa el oxígeno en las moléculas de aire, formando productos tales como OH⁻ y O₃, que tiene propiedades esterilizantes. También, las nano-burbujas son aplicables en una amplia gama de industrias, en procesos de eliminación de residuos, productos farmacéuticos y Cosméticos, hidropónicos y en los sistemas de producción y filtración de alimentos. Por otro lado, la tecnología de nano-burbujas puede ser útil para la restauración de la naturaleza y la sostenibilidad ambiental proyectos. Otra de muchas aplicaciones para nano-burbujas, como agente de crecimiento de microorganismos, se está utilizando en varias enfermedades físicas humanas como el cáncer de esófago, cáncer de laringe, cáncer de piel, enfermedad de las encías, arterial esclerosis, infecciones, diálisis artificial y enfermedades como asma, enfermedad de Alzheimer y Parkinson, entre otros (Khuntia & Majumder, 2012).

Hay algunos métodos de generación de burbujas en el agua, como el caso del uso de un suministro de gas a través de pequeños poros por cuchillas giratorias. Sin embargo, es difícil generar micro burbujas más pequeñas que 50 micras de diámetro de manera eficiente. Para que un generador sea eficiente; el líquido es introducido en el aparato por una bomba colocada en espiral a lo largo de la pared, para que la fuerza centrífuga causada por la circulación introduzca un gas, el cuerpo se separa en finas burbujas en la salida para formar microburbujas. Otro ejemplo es el introducir el gas en el líquido que circula dentro de la bomba de vórtice, y se disuelve en nivel sobresaturado por una alta presión causada en el spew-boquilla. Es decir, las burbujas se producen a partir de la sobresaturación de gas-líquido

por la reducción de la presión en el exterior de la boquilla mejorada por la turbulenta (Marui, 2013).

2.3.5.5. El Principio de Bernoulli.

La ecuación de Bernoulli también conocida como Trinomio de Bernoulli o Principio de Bernoulli, fue estudiada por el médico, matemático, físico y estadístico Daniel Bernoulli de nacionalidad Neerlandés - Suiza en la década de 1700, el cual investigó el comportamiento y las fuerzas presentes en un fluido en movimiento, e indicó que en un flujo la presión dinámica más la presión estática es constante (Antolínez, 2016).

Esta ecuación es de suma importancia en la mecánica de fluidos; debido a que relaciona la presión, velocidad y altura en flujos incompresibles, constantes y con fuerza de fricción insignificantes; la ecuación de Bernoulli aplica únicamente a los fluidos con viscosidad mínima en comparación a la inercia y gravitación, dicho de otro modo solo se aplica en fluidos incompresibles con caudal constante y viscosidad mínima; de acuerdo a lo indicado tendremos el siguiente enunciado matemático del principio de Bernoulli (Sánchez et., 2013).

$$pgh_1 + P_1 + \frac{1}{2}pv_1^2 = pgh_2 + P_2 + \frac{1}{2}pv_2^2$$

Principio de la continuidad de la masa.

Este principio fundamental de la mecánica de fluidos, indica que la masa no puede ser creada ni destruida, es decir cuando un fluido que generalmente se expresa en litros/segundo, ingresa por el interior de una tubería en buenas condiciones, o sea sin agujeros, es la misma que sale al final del conducto tubular, esto sin importar si el tubo tiene variaciones de radio en el trayecto (Pérez, 2002).

Esta ecuación se utiliza constantemente para realizar distintos análisis de la influencia boquillas, tuberías, compresores, los cuales presentan diferentes tamaños de diámetro, en distintos fluidos (Martín, 2011).

Modon, (2017) indica que las bases ideales de la ecuación de la continuidad son las siguientes:

Durante el trayecto no deben de existir pérdidas por rozamiento en el fluido, es decir no hay viscosidad.

1. El flujo del fluido en estudio debe de ser laminar. No turbulento.
2. El fluido es incompresible.
3. La temperatura del fluido no cambia.
4. El flujo es continuo, es decir su velocidad y presión no dependen del tiempo.

Efecto Venturi.

El efecto Venturi es explicado por el principio de la continuidad de la masa y el principio de Bernoulli, por lo que si el caudal de un flujo es constante y la sección donde se desplaza disminuye de tamaño necesariamente la velocidad aumenta. Siguiendo el teorema de la conservación de la energía, si la energía cinética incrementa, la presión disminuye obligatoriamente; en consecuencia, si en la sección de menor tamaño se introduce un conducto se produce una aspiración en este segundo conducto (Khan Academy, 2021).

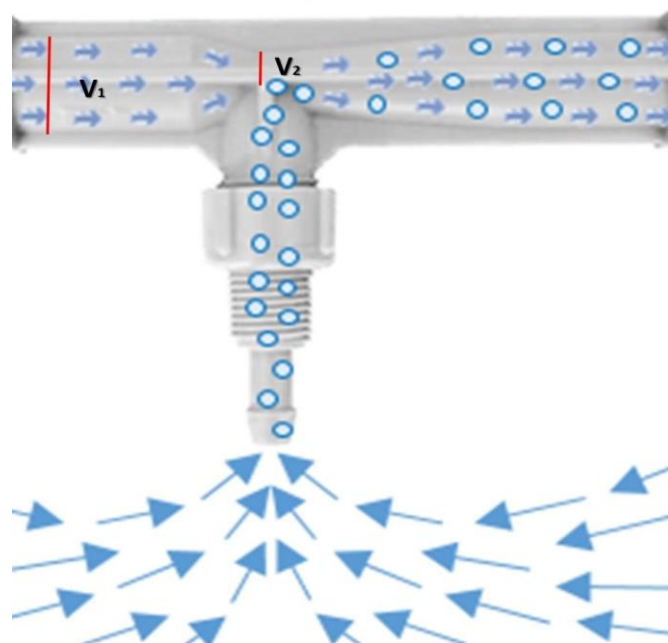


Figura 3. Efecto Venturi

Un claro ejemplo del efecto Venturi (ver Figura 3) es al observar una trompa de agua para hacer vacío, se transporta agua a través de un instrumento teniendo una salida menor que la entrada, el incremento de velocidad hará que el espacio reducido ocasiona una baja presión, y de esta manera se aprovechará el aire succionado mediante una boquilla, permitiéndoles hacer vacío (Potter et al., 2014).

2.3.6. Diseño de Box-Behnken.

Box- Behnken es un buen diseño de la metodología se superficie de respuesta, ya que permite; la estimación de los parámetros del modelo de segundo grado, el desarrollo de diseños secuenciales, la detección de la falta de ajuste del modelo y el uso de bloques (Ferreira et al., 2007).

El diseño de Box-Behnken es un diseño esférico y giratorio, consiste en un punto central y los puntos medios de los bordes del cubo circunscrito a la esfera, en base a tres niveles de diseños factoriales incompletos. Se ha aplicado para la optimización de varios procesos químicos y físicos, y el número de experimentos se decide en consecuencia (Kumar et al., 2008).

Comparando el diseño de Box-Behnken y otros diseños de superficie de respuesta (compuesto central, matriz Doehlert y de tres niveles de diseño factorial completo), ha demostrado que el diseño Box-Behnken y la matriz Doehlert son un poco más eficientes que el diseño compuesto central pero mucho más eficiente de los diseños factoriales completos de tres niveles (Ferreira et al., 2007).

Durante tres factores de su presentación gráfica se puede ver en dos formas:

Un cubo que consiste en el punto central y los puntos medios de los bordes, tal como se observa en la Figura 4.

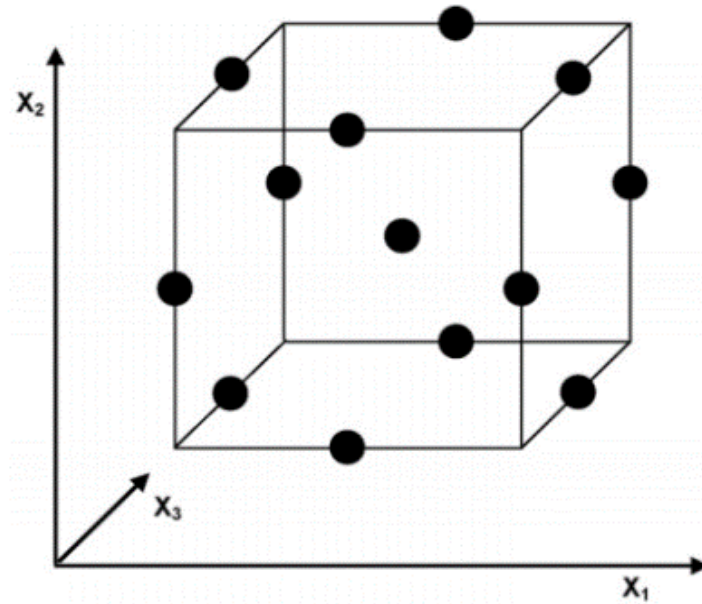


Figura 4. El cubo para diseño de Box Behnken (Aslan & Cebeci, 2007)

Nota. Fuente: Aslan & Cebeci, (2007)

Una figura que consiste en tres diseños factoriales 2^2 entrelazados y un punto central como se muestra en la Figura 5.

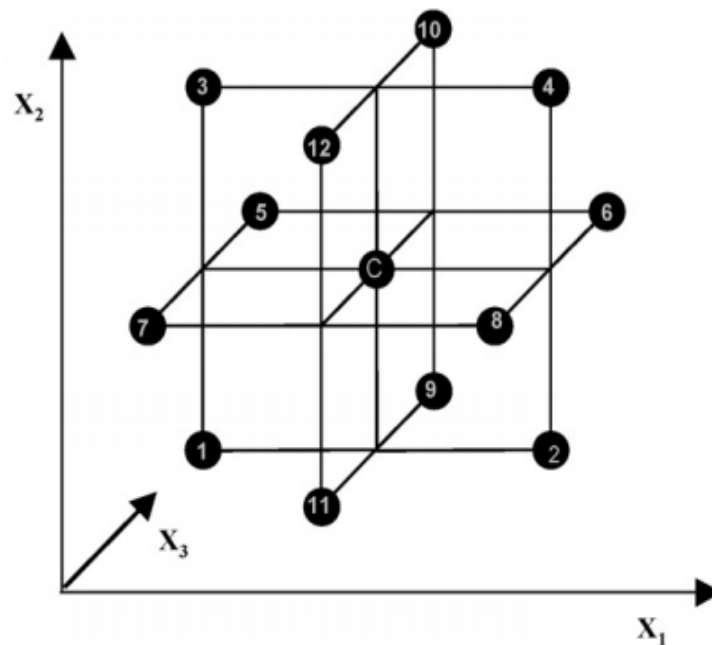


Figura 5. Tres diseños factoriales 3^{k-p} interconectados, (Aslan & Cebeci, 2007)

Nota. Fuente: Aslan & Cebeci, (2007)

Experiment	x_1	x_2	x_3
1	-1	-1	0
2	1	-1	0
3	-1	1	0
4	1	1	0
5	-1	0	-1
6	1	0	-1
7	-1	0	1
8	1	0	1
9	0	-1	-1
10	0	1	-1
11	0	-1	1
12	0	1	1
C	0	0	0
C	0	0	0
C	0	0	0
	0	0	0

Figura 6. Niveles de factores codificados para un diseño Box Behnken de un sistema de tres niveles

Nota. Fuente: Ferreira et al., (2007)

CAPITULO III. MATERIALES Y MÉTODOS

3.1. Descripción del área de estudio

La ejecución de la investigación de la presente tesis se realizó en los Laboratorios de Monitoreo Ambiental de la Facultad de Ingeniería Ambiental (FIA) de la Universidad Peruana Unión (UPeU), ubicada en el distrito de Lurigancho, Carretera Central Km 19.5 Ñaña, Chosica. (ver tabla 2). El sector presenta un clima variado seco, la temperatura máxima fue en febrero con 26.5 °C y la más baja fue en setiembre con 14.6 °C. Para el desarrollo de la investigación se llevó a cabo en el mes de setiembre (Senamhi, 2018).

Tabla 2. *Ubicación geográfica del lugar en ejecución del proyecto*

Ubicación Geográfica UTM WGS 84 Zona 18			
Lugar	Norte	Este	Altitud
Laboratorios de Monitoreo Ambiental UPeU	8674067,3	299484,7	543.31 msnm

3.2. Rutas de Acceso

Para poder llegar al centro de análisis experimental montado a espaldas del laboratorio de saneamiento ambiental, se accede tomando la Av. Bernardo Balaguer y se ingresa por la garita 1 de la Universidad Peruana Unión pasando por el colegio Unión de Ñaña, finalmente te diriges a los laboratorios de Ingeniería (ver Figura 7).

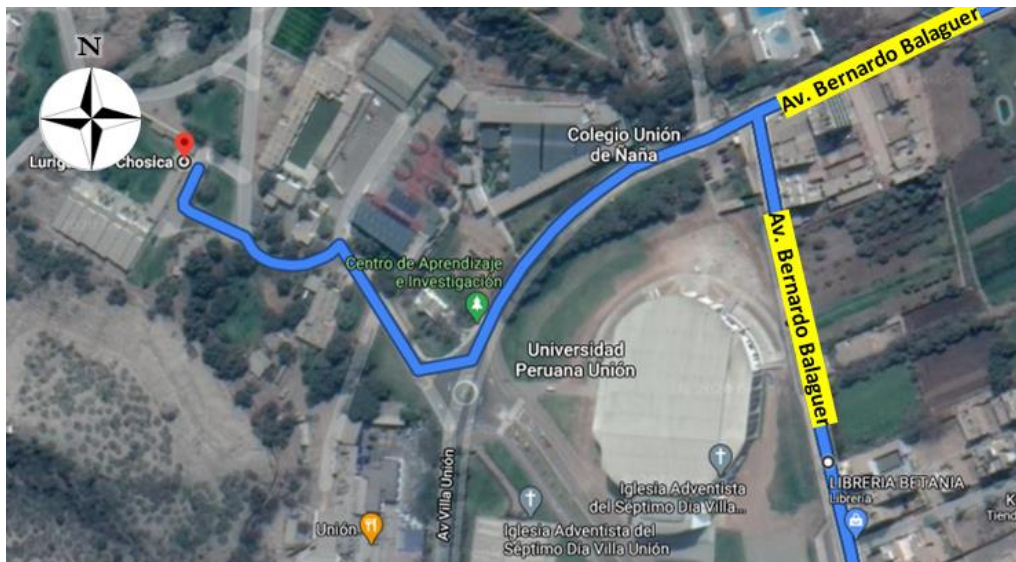


Figura 7. Ruta de Acceso

Fuente: Elaboración Propia.

La toma de muestras de agua se realizó en distintos puntos de la zona de Los Viques, Carapongo, con el objetivo de generar una muestra compuesta (ver Figura 8).

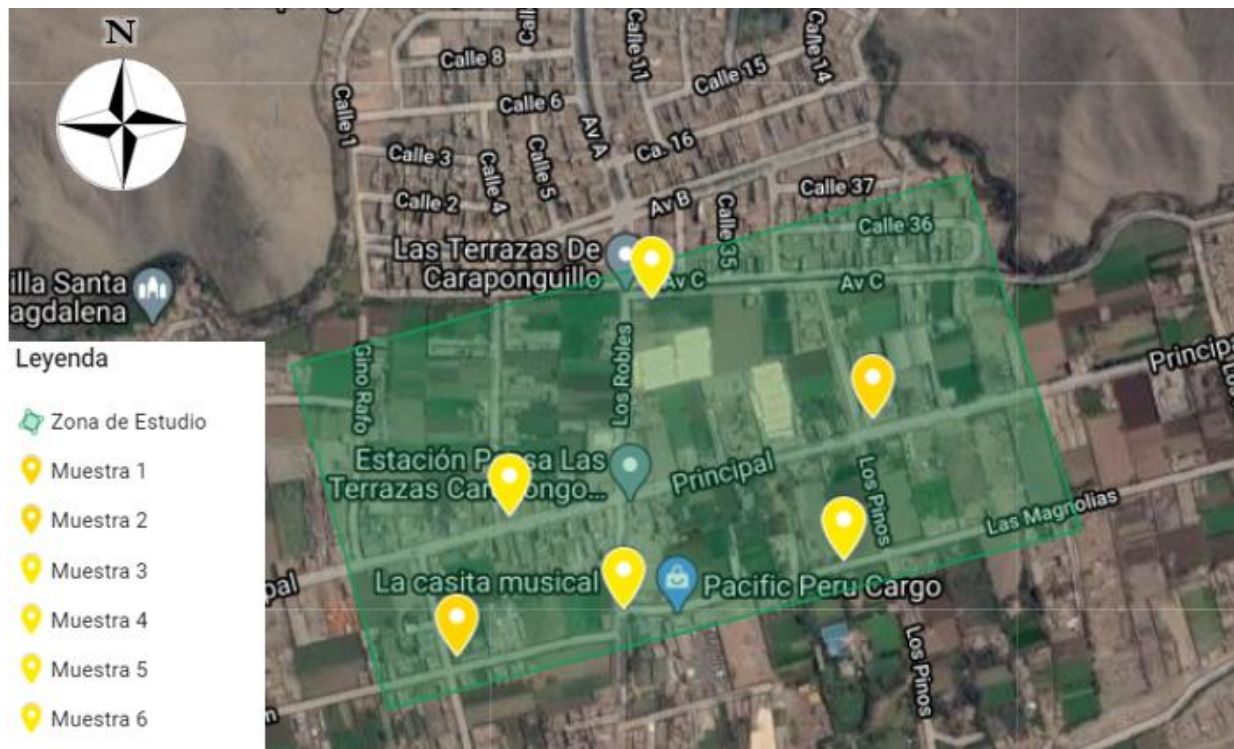


Figura 8. Puntos de muestreo- Los Viques de Carapongo

3.3. Materiales

- Contenedor de plástico de 1000 Lt.
- Contenedor de 80 Lt.
- Bomba periférica
- Tubería de PVC 1 ¼"
- Tubería de PVC ½"
- Tubería de PVC 1"
- Tubería de PVC ¼"
- 3 codos 1"
- Válvula Check
- 3 adaptadores 1"
- 2 unión universal
- Tubos venturi ()
- Reductores (1" a ½", ¾" 1 ¼)
- Huincha
- Teflón y Cinta aislante
- Pegamento
- Sierra
- **Equipos**
- Equipo Multiparámetro (Marca HANNA H1 48-5)
- Turbidímetro H -183414
- Microscopio Dino lite digital

3.4. Diseño y Construcción de Generador de Microburbujas

3.4.1. Diseño

Para el diseño del sistema de tratamiento se utilizó las recomendaciones dadas por (Macassi, 2017), además se utilizó una bomba periférica 0.5 hp para lograr la recirculación, y para el ingreso de oxígeno empleamos el efecto Venturi con el que logramos oxigenar el medio (ver Figura 9).

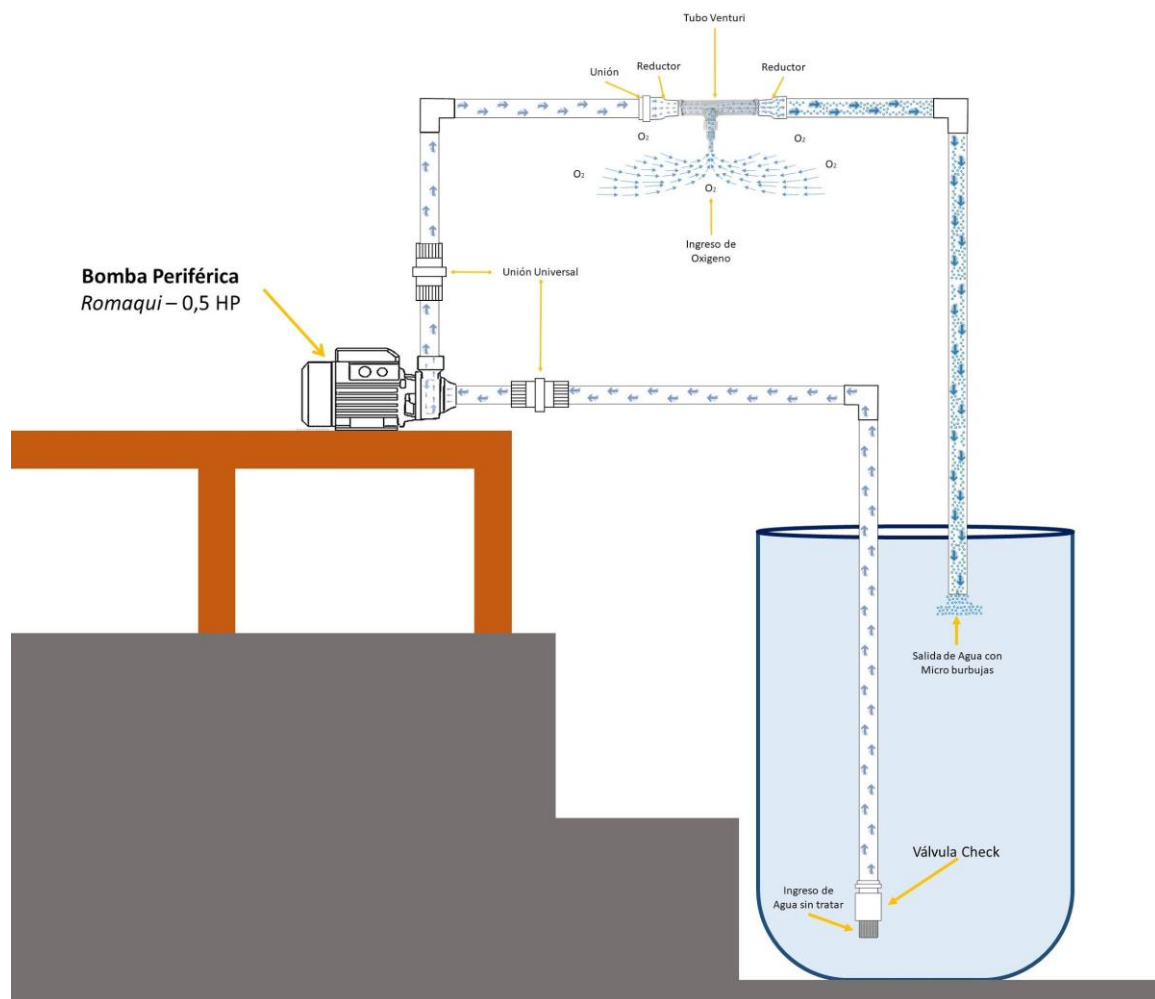


Figura 9. Diseño del generador de microburbujas

3.4.2. Construcción

Para la construcción del diseño tomamos como referencia el proyecto aplicado en Huancayo por (Macassi, 2017). Se utilizó un contenedor de plástico de 1000 litros, en el cual se almacenó 800 litros de las aguas residuales, además de cumplir su función como sedimentador primario (ver Figura 10).



Figura 10. Contenedor Sedimentador

Para la construcción del sistema de tratamiento de aguas y cumplir con el objetivo de generar microburbujas de distinto tamaño, se utilizó una bomba periférica de 0.5 HP que generaba un caudal constante de 85 L/min, además de diversas conexiones de 2.54 cm de diámetro por la zona de ingreso y salida de agua, como se detalla en la siguiente imagen. Cabe mencionar que para lograr una toma de aire efectiva que al contacto con el agua produzca una oxigenación eficiente y microburbujas en el medio, se utilizó tubos Venturi de $\frac{1}{2}$, $\frac{3}{4}$ y 1 pulgada respectivamente (ver Figura 11).



Figura 11. Tubos Venturi

3.5. Procedimientos

3.5.1. Procedimiento para la toma de muestra

De acuerdo al Protocolo Nacional para el Monitoreo de la Calidad de los Recursos Hídricos Superficiales, para el muestreo se aplicó la técnica de muestra compuesta; es decir, se recolectaron varias muestras simples durante una semana (lunes, miércoles y viernes), en horas de la mañana, con el fin de conocer las condiciones promedio del agua en la zona de estudio. Para las muestras microbiológicas es importante dejar un espacio de 10 % del volumen, facilitando así un adecuado suministro de oxígeno. Así mismo tener en cuenta que para las muestras de (DBO_5), se debe llenar el frasco de manera lenta para evitar la formación de burbujas.

De acuerdo el anexo VII, del Protocolo Nacional para el Monitoreo de la Calidad de los Recursos Hídricos Superficiales, se detallan que recipientes se pueden utilizar para la conservación y preservación de muestras de agua, de acuerdo a cada parámetro a analizar (ver Tabla 3).



Figura 12. Punto de muestreo 1

Tabla 3. *Conservación y preservación de muestras de agua*

Parámetro	Tipo de Recipiente	Condiciones de Preservación y Almacenamiento	Tiempo máx. de Almacenamiento
pH	Plástico o vidrio	Analizar preferentemente in situ	24 horas
Conductividad eléctrica	Plástico o vidrio	Analizar preferentemente in situ	24 horas
Turbiedad	Plástico o vidrio	Analizar preferentemente in situ	24 horas
DBO ₅	Plástico o vidrio	Llenar recipiente y sellas sin burbujas	24 horas
DQO	Plástico o vidrio	Acidificar a pH 1-2 con H ₂ SO ₄	6 meses
Coliformes Termotolerantes	Vidrio estéril	Dejar un espacio para aireación y mezcla de 1/3 del frasco de muestreo. Almacenar a 6°C y en oscuridad	24 horas
Escherichia Coli			

Nota. Fuente: Ana, 2016

Para los parámetros físico-químicos, Conductividad eléctrica, pH, DQO y DBO₅ se utilizaron envases de plástico y para los parámetros microbiológicos como Coliformes Termotolerantes y E. Coli se utilizaron envase de vidrio estéril.



Figura 13. Punto 2 de muestreo

Figura 14. Punto 3 del muestreo



Figura 15. Punto 3 de muestreo



Figura 16. Punto 4 de muestreo



Figura 17. Punto 4 de muestreo

3.5.2. Procedimiento para la medición de las Imágenes Microscópicas

Para la Medición de las imágenes microscópicas se utilizó el software Libre ImageJ, la cual es una herramienta ideal para utilizarla en diferentes tipos de estudios, debido a que permite hacer mediciones con gran precisión y calidad (Pérez, 2009).

Al realizar la medición del tamaño de las microburbujas, se debe de calibrar las imágenes adecuadamente en el software.

En la calibración de imagen se siguió las recomendaciones de (González, 2018), primero se debe de cargar la imagen en formato .jpg al programa. (ver Figura 18).

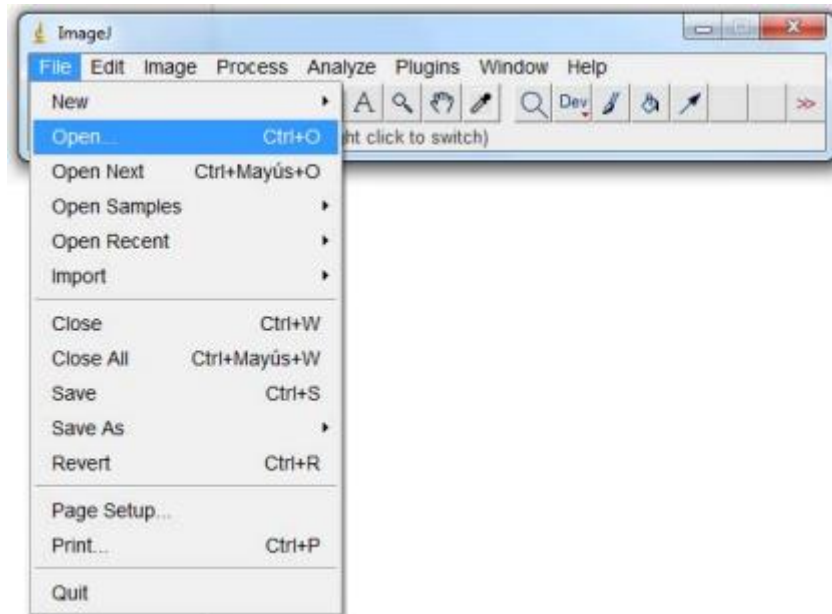


Figura 18. Barra de opción de Imagen J

Posteriormente debemos de seleccionar la opción de “Línea Recta” en el menú de botones y dibujar una línea de longitud conocida basándose en la escala guía (ver Figura 19).

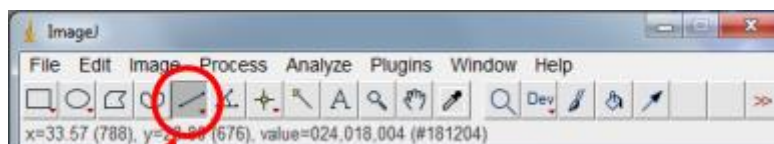


Figura 19. Opción Línea Recta

A continuación, debemos de dar click en Analyze en el menú desplegable y seleccionar Set Scale, e indicar la distancia conocida en la línea dibujada sobre la escala guía, indicando la unidad de medida y finalmente seleccionar Global, para que se utilice esta calibración en todas las mediciones de la imagen (ver Figura 20).

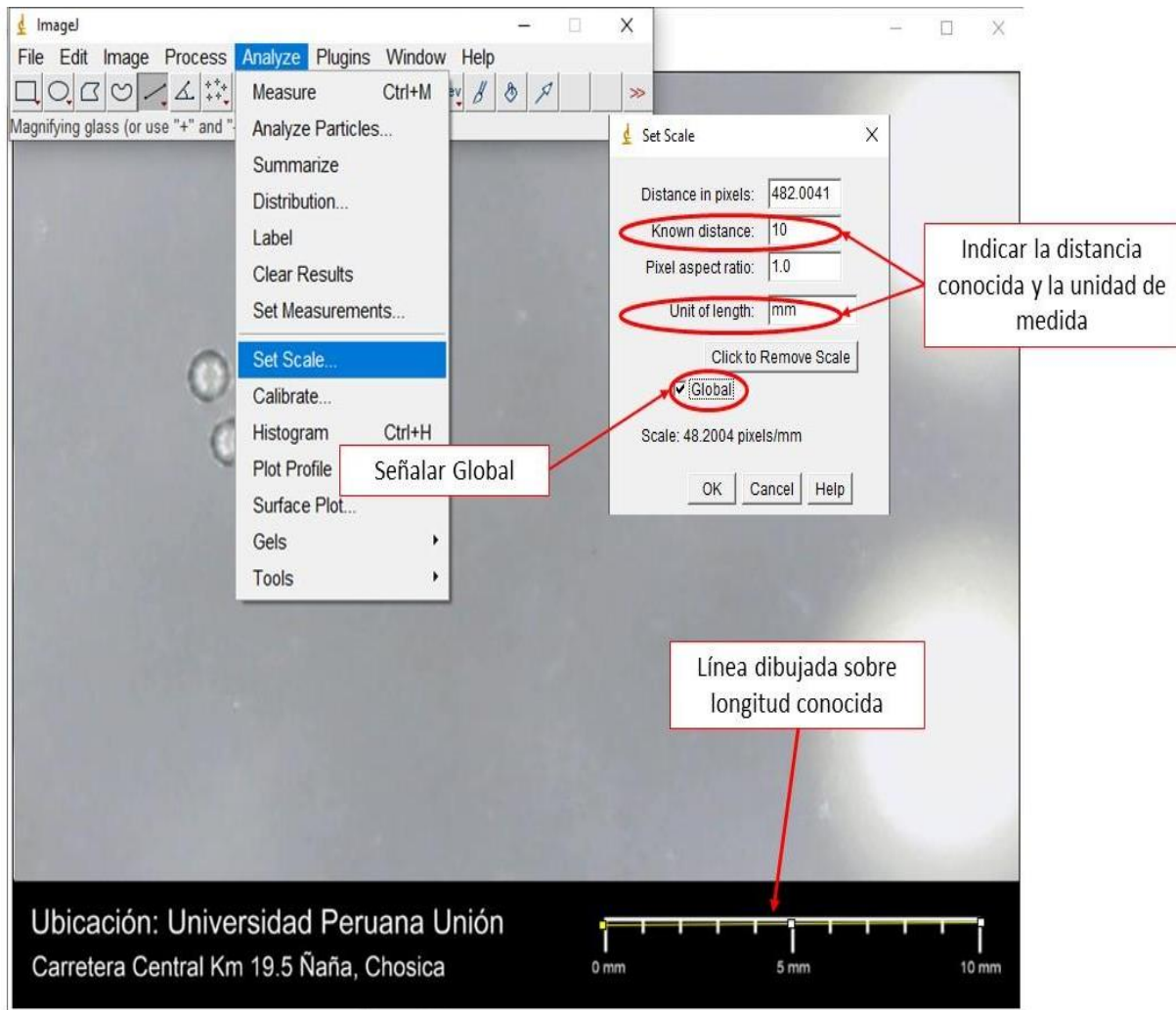


Figura 20. Calibración de Imagen

A continuación, para medir el diámetro de cada burbuja, seleccionamos la opción “Línea Recta” y acercamos la imagen para tener mayor precisión en la medida, hacemos una línea recta de extremo a extremo en la burbuja a medir y finalmente presionamos la tecla M, para que nos indiquen la longitud obtenida (ver Figura 21).

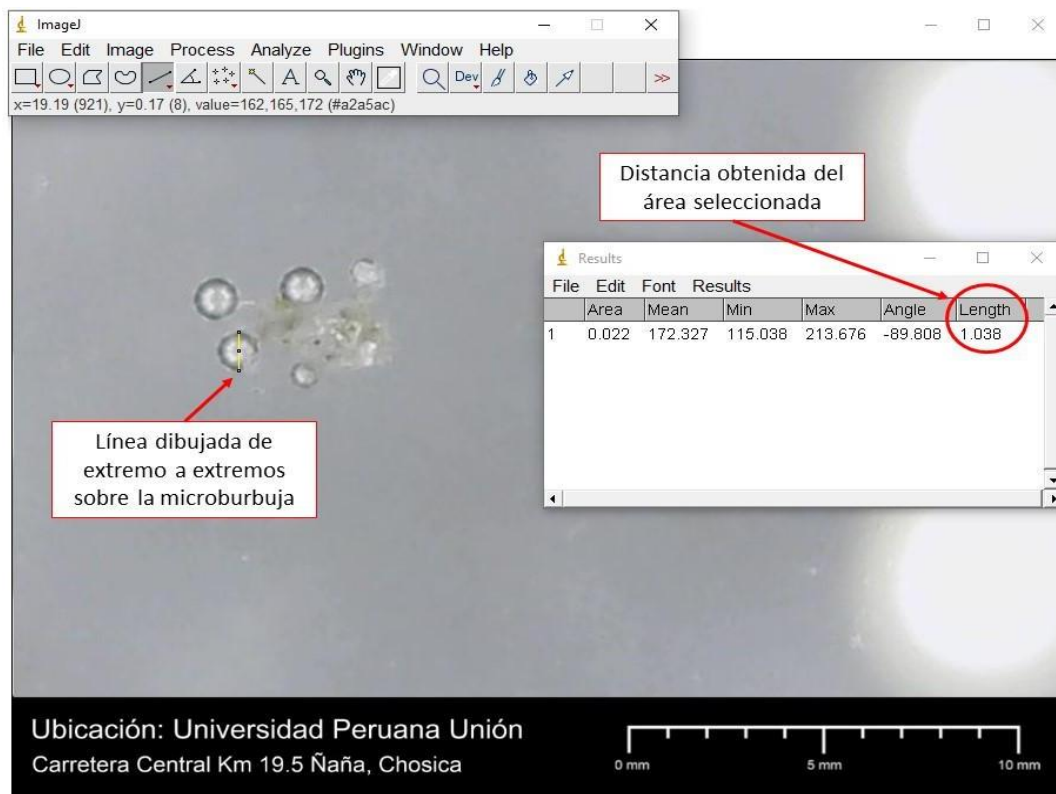


Figura 21. Medición de la microburbuja

3.6. Tipo de Investigación

La presente investigación es de tipo experimental, debido a que se manipularon las variables experimentales bajo condiciones controladas, con la finalidad de descubrir las causas que producen los cambios, por lo que se introdujeron variables independientes (Caudal, diámetro de tubería y tiempo de contacto) para analizar y evaluar su efecto en las variables dependientes (Diámetro de microburbujas, SST, Conductividad, Turbiedad, pH, DBO, DQO, Coliformes totales y termotolerantes).

3.7. Diseño de Experimentos (DOE)

Definida como el método para la aplicación sistemática de la estadística a la experimentación. Basada, en desarrollar una serie de exámenes en la que se persuaden cambios intencionales en las variables de entrada a un proceso, con la finalidad de que se puedan percibir y distinguir las causas de los cambios en la respuesta de salida. Este diseño es

efectivo para procesos, permitiendo evaluar el rendimiento si es afectado por diversos factores presentes. Además, se puede llegar a lograr, la mejoría del rendimiento de un proceso, disminuir su variabilidad o gastos de producción (Tanco, 2008).

3.7.1. Box - Behnken

Box & Behnken (1960) desarrollaron un conjunto de diseños eficientes para factores con 2 o 3 niveles en el que se elige un pequeño número entero de niveles “p” para cada uno de los factores “k” y se ejecutan todas las combinaciones “p y k” de estos niveles, este diseño permite una estimación eficiente y económica de los coeficientes de primer y segundo orden.

Siqueiros (2004) indica que el diseño propuesto por Box & Behnken (1960) tiene 3 niveles en cada factor, permitiendo la estimación completa de un modelo cuadrático; este diseño se construye con puntos centrales que son para examinar la curvatura, y brindar información sobre los efectos cuadráticos, también se puede escoger el número de puntos centrales para establecer la rotabilidad además de puntos sobre la superficie que tienen igual distancia al punto central por ejemplo, para 3 variables, las combinaciones de niveles representadas por (+ 1, + 1, +1), (0,0,0) y (-1, -1, -1) (Novaes et al., 2017).

Los rangos y niveles son mostrados en el Tabla 4 y las variables independientes utilizados en la forma codificada y no codificada y variables independientes se muestran en la Tabla 5.

Los experimentos serán ejecutados en orden aleatorio y el tratamiento de datos por análisis de varianza, para comparar el efecto de los tratamientos en la variable dependiente. La variable dependiente (Y) será generada en modelos de función lineal, cuadrática e interacción y los datos experimentales serán ajustados al modelo polinomial de segundo orden como se muestra en la siguiente ecuación (Rodrigues y Iemma, 2014):

$$Y = \beta_0 + \sum_{i=1}^2 \beta_i X_i + \sum_{i=1}^2 \beta_{ii} X_i^2 + \sum_{i \neq j=1}^2 \beta_{ij} X_i X_j$$

Donde Y es la variable dependiente predicha

β_0 : Coeficiente intercepto

β_i , β_{ii} y β_{ij} : Coeficientes del modelo lineal, cuadrático e interacción, respectivamente

X_i y X_j : Valores codificados de las variables independientes (Microburbujas, turbidez y Conductividad)

Tabla 4. Factores y niveles del diseño experimental de Box Behnken

	-1	0	1
Diámetro de tubería (Pulgadas)	1/2	3/4	1
Tiempo de contacto (min)	15	30	45
Velocidad del fluido (L/min)	3,2	5,3	7,5

Tabla 5. Diseño Box Behnken para cuantificar los tamaños de nanomicroburbujeo de oxígeno

Tratamientos	Variables independientes						Variables dependientes		
	Codificados			No codificados					
	X_1	X_2	X_3	Velocidad (L/min)	Diámetro (pul)	Tiempo (min)	Microburbujeo (μm)	Turbidez (UNT)	Conductividad eléctrica ($\mu\text{s/cm}$)
1	-1	-1	0	3,2	0,5	30	-	-	-
2	1	-1	0	7,5	0,5	30	-	-	-
3	-1	1	0	3,2	1	30	-	-	-
4	1	1	0	7,5	1	30	-	-	-
5	-1	0	-1	3,2	0,75	15	-	-	-
6	1	0	-1	7,5	0,75	15	-	-	-
7	-1	0	1	3,2	0,75	45	-	-	-
8	1	0	1	7,5	0,75	45	-	-	-
9	0	-1	-1	5,3	0,75	15	-	-	-

10	0	1	-1	5,3	1	15	-	-	-
11	0	-1	1	5,3	0,5	45	-	-	-
12	0	1	1	5,3	1	45	-	-	-
13	0	0	0	5,3	0,75	30	-	-	-
14	0	0	0	5,3	0,75	30	-	-	-
15	0	0	0	5,3	0,75	30	-	-	-
16	0	0	0	5,3	0,75	30	-	-	-
17	0	0	0	5,3	0,75	30	-	-	-

3.7.2. Análisis estadístico

Para la elaboración de esta investigación se está usando el diseño experimental, de tal manera que se analizará la variable dependiente; en este caso el análisis del agua del efluente Los Viques de Carapongo, para luego realizar el tratamiento con microburbujas y finalizar con un análisis a la variable dependiente mencionada anteriormente.

Será generado el gráfico de contorno de respuesta y superficie de respuesta tridimensional de los coeficientes de regresión de la ecuación polinomial reducida. Así mismo los gráficos serán usados para mostrar la relación entre la respuesta y los niveles de cada variable independiente y verificar los parámetros óptimos en las variables dependientes. El modelo de regresión polinomial será evaluado por el análisis de varianza (ANOVA), además de obtener la determinación de los modelos (R^2 y R_{adj}), gráficos de pareto a un intervalo de confianza de 95 % ($p \leq 0.05$) usando el software STATISTICA versión 13.1.

De acuerdo a Aravena, Caamaño y Giménez (2008); el coeficiente de determinación (R^2) evalúa la proporción de variación total de la respuesta indicada por el modelo, dando a entender que cuando el R^2 se acerca a la unidad, menor será el error, por lo tanto el ajuste del modelo matemático será mejor.

3.8. Análisis de Datos

3.8.1. Cálculo del caudal

De acuerdo a la ficha técnica de la bomba periférica Romaqui de 0.5 HP, el caudal es de $Q = 85 \text{ l/min}$, convertido a $0.0014 \text{ m}^3/\text{s}$

3.8.2. Determinación de las velocidades

En la presente tesis se aplicó la ecuación de la continuidad, en la que utilizamos el principio de conservación de la masa “La Masa no se crea ni se destruye solo se transforma” (Khan Academy, 2021), por lo tanto el caudal (Q) del fluido tiene que permanecer constante a lo largo del trayecto del agua.

El caudal es el producto de la superficie de una sección del conducto por la velocidad con que fluye, en dos puntos de la tubería se debe cumplir lo siguiente:

$$Q_1 = Q_2 \text{ --- } S_1 \cdot v_1 = S_2 \cdot v_2$$

Donde:

- S es la superficie de las secciones transversales de los puntos 1 y 2 de dicho conducto
- v es la velocidad del flujo en los puntos 1 y 2 de la tubería.

A continuación, se podrá apreciar que la sección se reduce de A_1 a A_2 , de acuerdo a la fórmula anterior operamos (ver Figura 22).

$$v_2 = v_1 \cdot S_1 / S_2$$

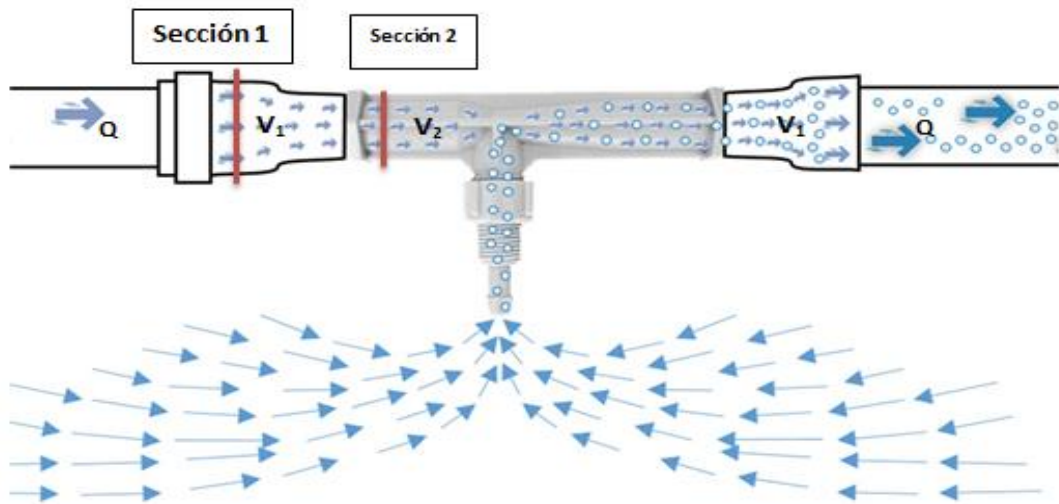


Figura 22. Reducción de las secciones

La velocidad en el estrechamiento aumenta de manera proporcional a lo que se reduce la sección. Concluyendo que, puesto que el caudal debe mantenerse constante durante el trayecto, si la sección disminuye la velocidad del fluido aumenta en la misma proporción y viceversa (Modon, 2017).

De acuerdo a lo anterior se hallaron las velocidades con las siguientes tuberías de $\frac{1}{2}$, $\frac{3}{4}$, y 1”.

3.8.3. Cálculo del diámetro (tubería)

Para determinar el diámetro de las tuberías, se midió en mm el espacio de las tuberías utilizadas para la generación de las microburbujas.

3.8.4. Medición de las micro burbujas

Después de la aplicación de cada tratamiento se recolectó una muestra, la cual se analizó utilizando el microscopio electrónico digital de modelo “Dino lite digital”, el cual nos permitió tomar fotos microscópicas con unidades de referencia para la respectiva medición de las microburbujas encontradas haciendo uso del programa ImageJ, como se indicó en el procedimiento para la medición de Imágenes Microscópicas.

3.8.5. Monitoreo de la temperatura del agua

Luego de la aplicación de cada tratamiento se tomó una muestra de 500 ml del agua tratada y se llevó al laboratorio de Saneamiento ambiental de la Universidad Peruana Unión, ahí se utilizó el Multiparámetro Si Analytcs de modelo HandyLand - 100, el que nos indicó la temperatura del agua tratada; se actuó de la misma manera para la medición de la temperatura del agua sin tratamiento.

3.8.6. Monitoreo de la turbidez del agua

Para determinar la turbidez del agua a tratar se tomó luego de cada tratamiento una muestra de 500 ml de agua y se transportó al laboratorio de Saneamiento ambiental de la Universidad Peruana Unión, ahí se utilizó el Turbidímetro Hanna de modelo HI83414 - Turbidity y free total Chlorine, donde se introdujo al frasco medidor 10 ml para su respectivo análisis; se operó de igual manera para la determinación de la turbidez del agua sin tratamiento.

3.8.7. Monitoreo de la conductividad del agua

A fin de identificar la conductividad del agua tratada, después de cada tratamiento se recolectó una muestra de 500 ml de agua y se llevó al laboratorio de Saneamiento Ambiental de la Universidad Peruana Unión, utilizando el Multiparámetro Si Analytcs de modelo HandyLand - 100, lo mismo se aplicó para determinar la conductividad de la muestra sin tratamiento.

3.8.8. Monitoreo de los Sólidos disueltos Totales del agua (TDS)

A fin de hallar los Sólidos Suspendedos totales presentes en el agua, se tomó una muestra de 500 ml de agua luego de cada tratamiento aplicado, llevada al laboratorio de Saneamiento Ambiental de la Universidad Peruana Unión, utilizando el Multiparámetro Si Analytcs de modelo HandyLand-100, de la misma manera se aplicó para identificar los TDS en la muestra de agua sin tratamiento.

3.8.9. Monitoreo de PH del agua

Para la identificación del pH presente en el agua, se recolectó una muestra de 500 ml de agua luego de cada tratamiento aplicado, llevada al laboratorio de Saneamiento Ambiental de la Universidad Peruana Unión, usando el Multiparámetro Si Analytcs de modelo HandyLand-100, del mismo modo se aplicó para identificar el pH en la muestra de agua sin tratamiento.

3.8.10. Monitoreo del DQO del agua

A fin de conocer la DQO del agua se tomó una muestra de 500 ml de agua sin tratamiento, además de recolectar una muestra del tratamiento óptimo, las cuales fueron llevadas al laboratorio “DELTALAB” ubicado en Km 9.3, carretera central Mz A- Lt 6/ Av. Nuestra Sra de la Merced para sus análisis respectivos.

3.8.11. Monitoreo de DBO₅ del agua

Para la determinación de la DBO₅ del agua se tomó una muestra de 500 ml de agua sin tratamiento, también de recolectar una muestra del tratamiento óptimo, las cuales fueron llevadas al laboratorio “DELTALAB” ubicado en Km 9.3, carretera central Mz A- Lt 6/ Av. Nuestra Sra de la Merced para sus análisis respectivos.

3.8.12. Monitoreo de coliformes termotolerantes

Para la identificación de los coliformes termotolerantes se tomó una muestra de 500 ml de agua sin tratamiento, y se recolectó una muestra del tratamiento óptimo, para luego ser llevadas para su respectivo análisis en el laboratorio “DELTALAB” ubicado en Km 9.3, carretera central Mz. A- Lt 6/ Av. Nuestra Sra. de la Merced.

3.8.13. Monitoreo de E. Coli

Con el fin de identificar las bacterias E. Coli, se recolectó una muestra de agua sin tratamiento, además se tomó una muestra del tratamiento óptimo, y al transportarlas al laboratorio DELTALAB ubicado en ubicado en Km 9.3, carretera central Mz A- Lt 6/ Av. Nuestra Sra de la Merced para su respectivo análisis microbiológico.

CAPÍTULO IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1. Caracterización del agua residual

En la Tabla 6 y 7, se detallan los resultados del agua a monitorear sin ningún tratamiento aplicado, ingresando con un pH de 6.35, 17.9 °C, 40.6 NTU de turbidez, 772 $\mu\text{s/cm}$ de conductividad, 41 mg/L de DQO, 21 mg/L de DBO₅, $1.1 \cdot 10^6$ NMP/100ml de coliformes termotolerantes

, $1.1 \cdot 10^6$ NM/100ml E. Coli.

Tabla 6. Resultados físico-químicos agua sin tratamiento

	pH	Temperatura	Turbidez	Conductividad	DQO	TDS	DBO
Agua sin tratamiento	6.35	17.9 °C	40.6	772	41	772	21

Tabla 7. Resultados microbiológicos del agua sin tratamiento

	Coliformes Termotolerantes	E. Coli
Agua sin tratamiento	$1.1 \cdot 10^6$	$1.1 \cdot 10^6$

4.2. Resultados Velocidades del fluido

Para la determinación de las velocidades en la sección inicial del tubo Venturi se utilizó la siguiente ecuación:

$$V_x = (P_i \cdot D) / Q$$

Donde:

V_x: Velocidad en la sección inicial de tubo Venturi

D: Diámetro del tubo Venturi

Q: Caudal del Fluido

Reemplazamos para las 3 diferentes tuberías aplicadas:

1 pulgada

$$D = 23.8\text{mm} = 0.0238\text{m}$$

$$Q = 85\text{L/s} = 0.0014\text{ m}^3/\text{s}$$

$$Q = V_1 * A_1$$

$$A = \frac{\pi D^2}{4}$$

$$\frac{\pi(0.0238\text{m}^2)}{4}$$

$$0.0014\text{m}^3/\text{s} = V * 0.00044\text{ m}^2$$

$$V_1 = \frac{0.0014\text{ m}^3/\text{s}}{0.00044\text{ m}^2} = 3.18\text{ m/s}$$

1/2 Pulgada

$$D = 13.4\text{ mm} = 0.0134\text{m}$$

$$D = 0.0134\text{ m}$$

$$V_2 = 10.05\text{ m/s}$$

3/4 Pulgada

$$D = 18.4\text{mm} = 0.0184\text{m}$$

$$D = 0.0184\text{ m}$$

$$V_3 = 5.33\text{ m/s}$$

4.3. Resultados de los tratamientos**4.3.1. Resultados del Tratamiento 1**

Al analizar las imágenes obtenidas por el microscopio en una gota de agua (ver Figura 23) se pudo evidenciar la formación de 2 microburbujas de tamaños 1.67 μm . y 0.7 μm ., con todos estos datos logramos obtener el promedio el cual será utilizado como tamaño de microburbuja de este tratamiento para fines estadísticos, además se analizó los parámetros de turbidez, ph, temperatura, conductividad y TDS, los cuales se pueden observar en la Tabla 8.

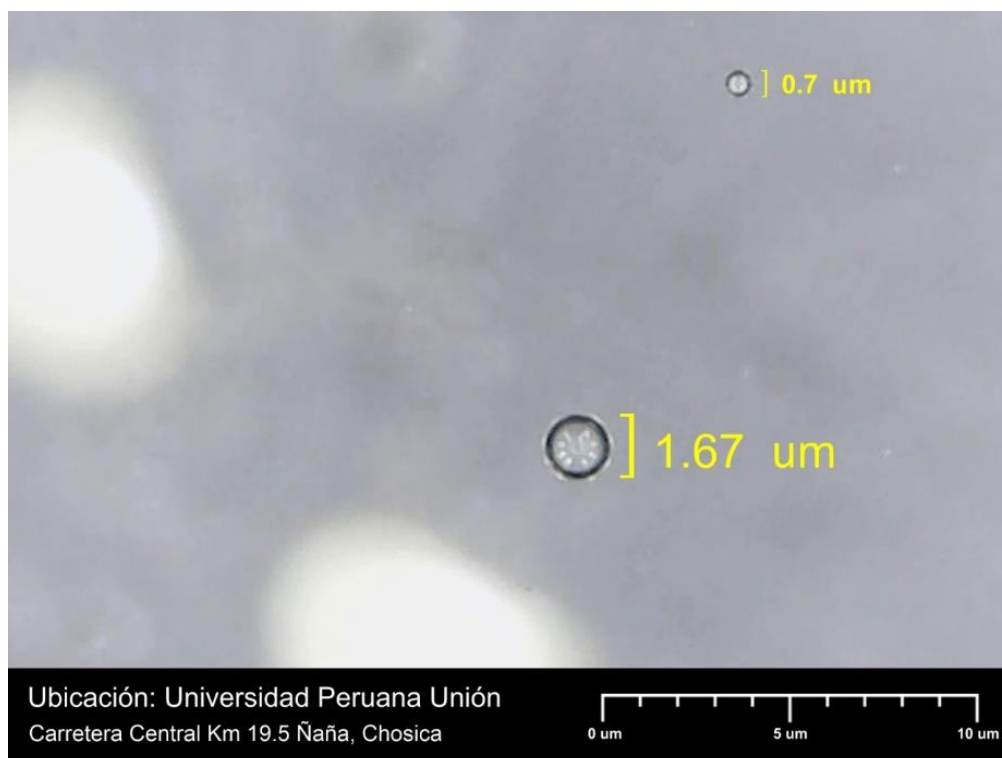


Figura 23. Medición de microburbujas T1/ Image J

Tabla 8. Resultados Físico/Químicos T1

Tratamiento	Microburbujas (micras)	Turbidez	PH	Temperatura	Conductividad	TDS
1	1.185	26.9	6.7	18	773	774

4.3.2. Resultados del Tratamiento 2

Analizando la imagen obtenida por el microscopio en una gota de agua del tratamiento 2 se pudo evidenciar la formación de 2 microburbujas de tamaños 1.53 μm . y 2.35 μm . (ver Figura 24), con todos estos datos logramos obtener el promedio el cual será utilizado como

tamaño de microburbuja de este tratamiento para fines estadísticos; además se analizó los parámetros de turbidez, ph, temperatura, conductividad y TDS, los cuales se pueden observar en la Tabla 9.

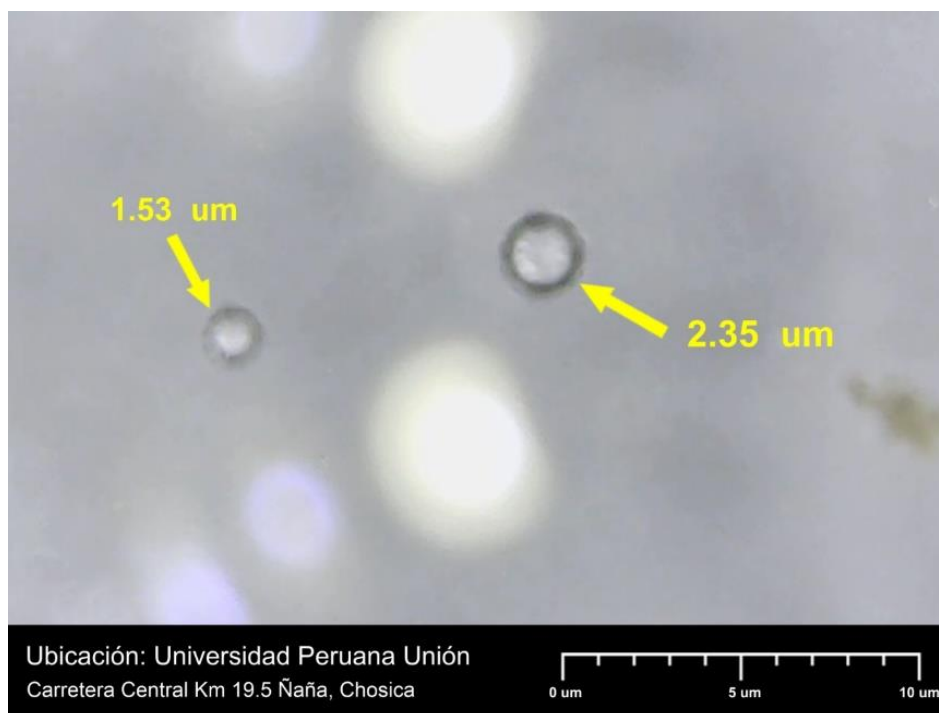


Figura 24. Medición de microburbujas T2/ Image J

Tabla 9. Resultados Físico/ Químicos T2

Tratamiento	Microburbujas (micras)	Turbidez	PH	Temperatura	Conductividad	TDS
2	1.94	29.1	6.8	19.3	769	769

Fuente: Elaboración Propia.

4.3.3. Resultados del Tratamiento 3

Después de revisar la imagen obtenida por el microscopio en una gota de agua del tratamiento 3 se pudo evidenciar la formación de 4 microburbujas de tamaños 1.25 um., 1.36 um., 1.76 um., y 2.08 um. (ver Figura 25), con todos estos datos logramos obtener el promedio el cual será utilizado como tamaño de microburbuja de este tratamiento para fines

estadísticos; además se analizó los parámetros de turbidez, ph, temperatura, conductividad y TDS, los cuales se pueden observar en la Tabla 10.

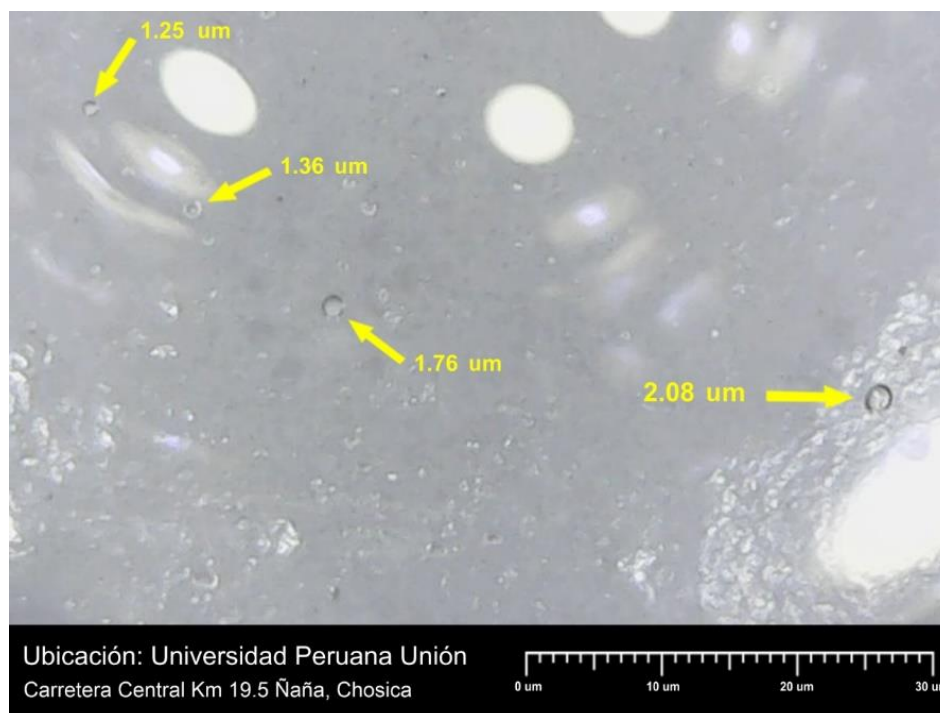


Figura 25. Medición de microburbujas T3/ Image J

Tabla 10. Resultados Físico/ Químicos T3

Tratamiento	Microburbujas (micras)	Turbidez	PH	Temperatura	Conductividad	TDS
3	1.613	27.9	7.8	18.8	775	777

4.3.4. Resultados del Tratamiento 4

Se verificó la imagen del microscopio en una gota de agua del tratamiento 4 se pudo evidenciar la formación de una microburbuja que medía 1.56 μm (ver Figura 26), además se analizó los parámetros de turbidez, ph, temperatura, conductividad y TDS, los cuales se pueden observar en la Tabla 11.

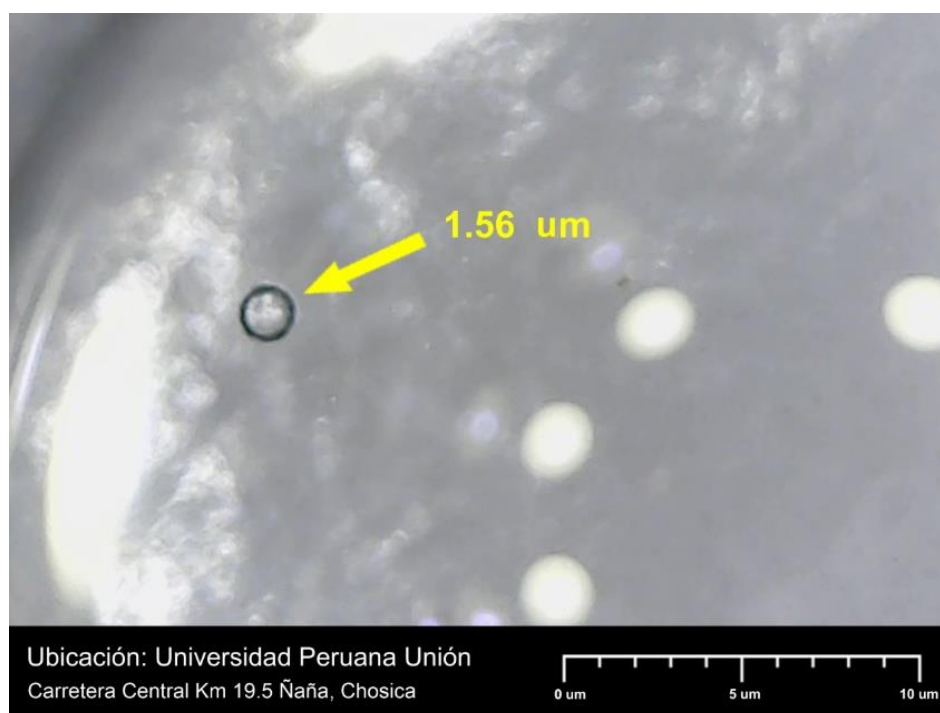


Figura 26. Medición de microburbujas T4/ Image J

Tabla 11. Resultados Físico/ Químicos T4

Tratamiento	Microburbujas (micras)	Turbidez	PH	Temperatura	Conductividad	TDS
4	1.56	27.8	8	19.8	773	774

4.3.5. Resultados del Tratamiento 5

Después de observar la imagen obtenida por el microscopio en una gota de agua del tratamiento 5 se pudo evidenciar la formación de 7 microburbujas de tamaños 2.27 μm ., 2.15 μm ., 2.68 μm ., 1.96 μm ., 1.28 μm ., 2.90 μm ., 2.02 μm . y 2.27 μm . (ver Figura 27); con todos

estos datos logramos obtener el promedio el cual será utilizado como tamaño de microburbuja de este tratamiento para fines estadísticos, además se analizó los parámetros de turbidez, ph, temperatura, conductividad y TDS, los cuales se pueden observar en la Tabla 12.

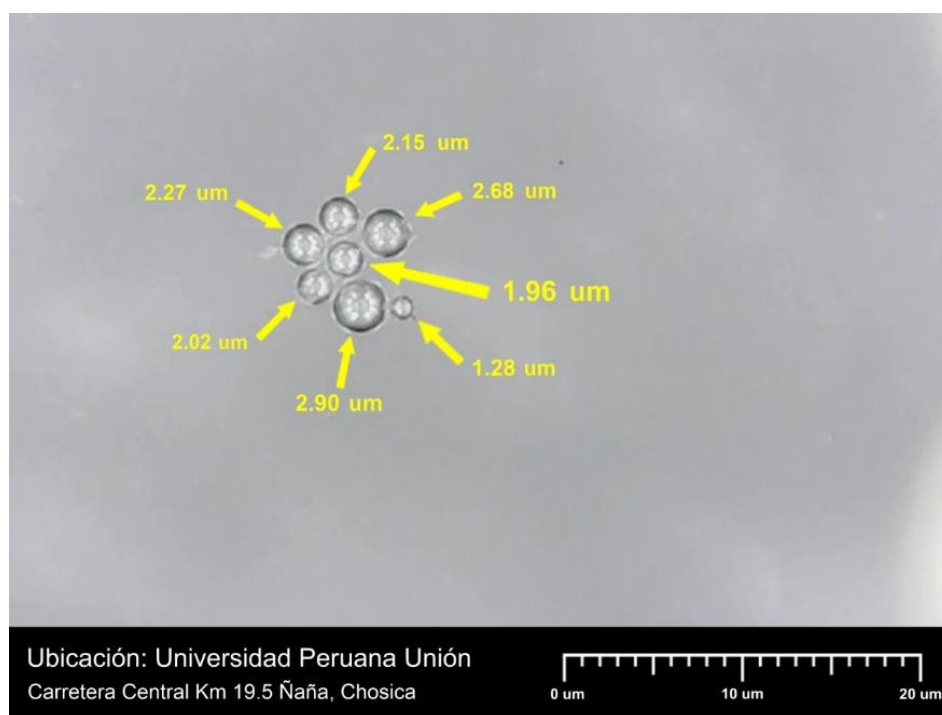


Figura 27. Medición de microburbujas T5/ Image J

Tabla 12. Resultados Físico/ Químicos T5

Tratamiento	Microburbujas (micras)	Turbidez	PH	Temperatura	Conductividad	TDS
5	2.18	32.3	6.9	18.6	789	789

4.3.6. Resultados del Tratamiento 6

Se verificó en la imagen obtenida por el microscopio en una gota de agua del tratamiento 6 se pudo evidenciar la formación de una microburbuja que medía 5.48 μm (Ver Figura 28), además se analizó los parámetros de turbidez, ph, temperatura, conductividad y TDS, los cuales se pueden observar en la Tabla 13.

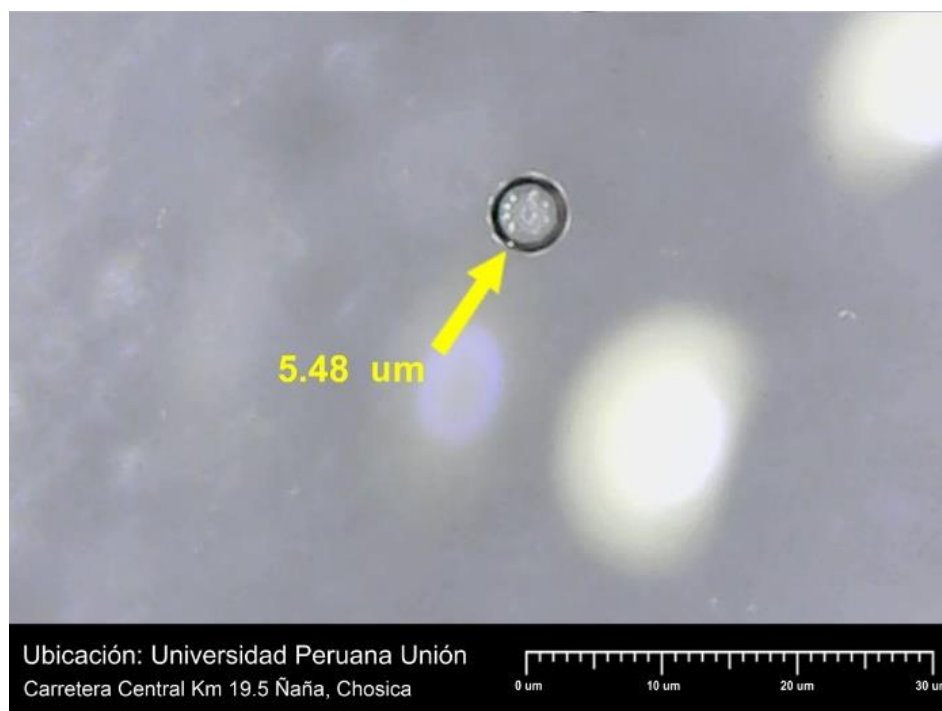


Figura 28. Medición de microburbujas T6/ Image J

Tabla 13. Resultados Físico/ Químicos T6

Tratamiento	Microburbujas (micras)	Turbidez	PH	Temperatura	Conductividad	TDS
6	5.48	38.6	7.4	19.9	786	786

4.3.7. Resultados del Tratamiento 7

Se verificó la imagen del microscopio en una gota de agua del tratamiento 7 se pudo evidenciar la formación de una microburbuja que medía 1.26 μm (ver Figura 29), además se analizó los parámetros de turbidez, ph, temperatura, conductividad y TDS, los cuales se pueden observar en la Tabla 14

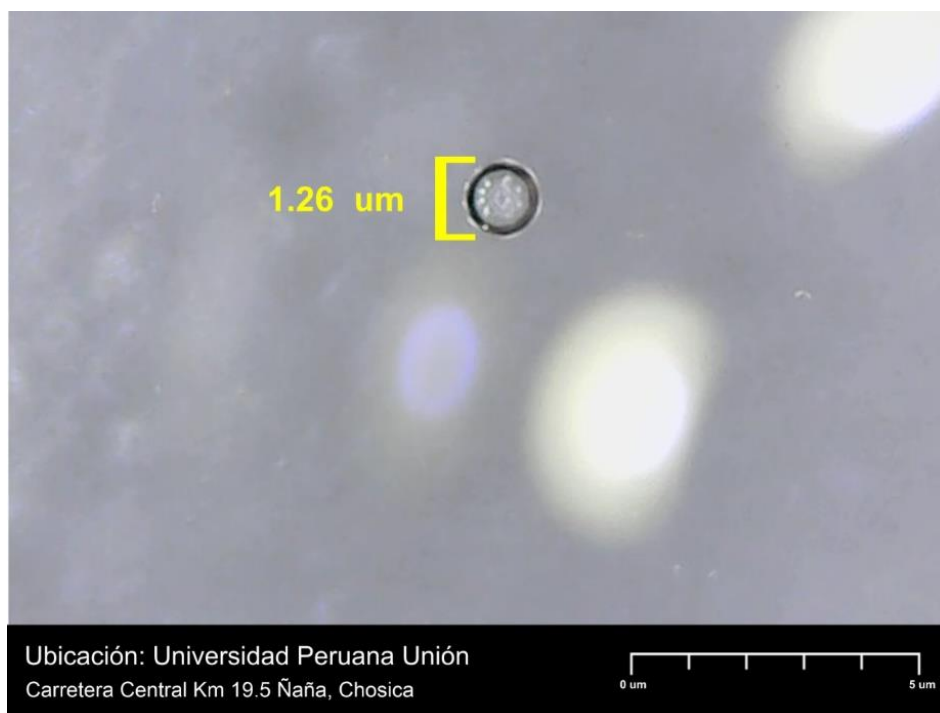


Figura 29. Medición de microburbujas T7/ Image J

Tabla 14. Resultados Físico/ Químicos T7

Tratamiento	Microburbujas (micras)	Turbidez	PH	Temperatura	Conductividad	TDS
7	1.26	27.7	8.3	21.1	771	772

4.3.8. Resultados del Tratamiento 8

Después de revisar la imagen obtenida por el microscopio en una gota de agua del tratamiento 8 se pudo evidenciar la formación de 3 microburbujas de tamaños 5.24 μm ., 2.36 μm . y 2.57 μm ., (ver Figura 30), con todos estos datos logramos obtener el promedio el cual será utilizado como tamaño de microburbuja de este tratamiento para fines estadísticos;

además se analizó los parámetros de turbidez, ph, temperatura, conductividad y TDS, los cuales se pueden observar en la Tabla 15.

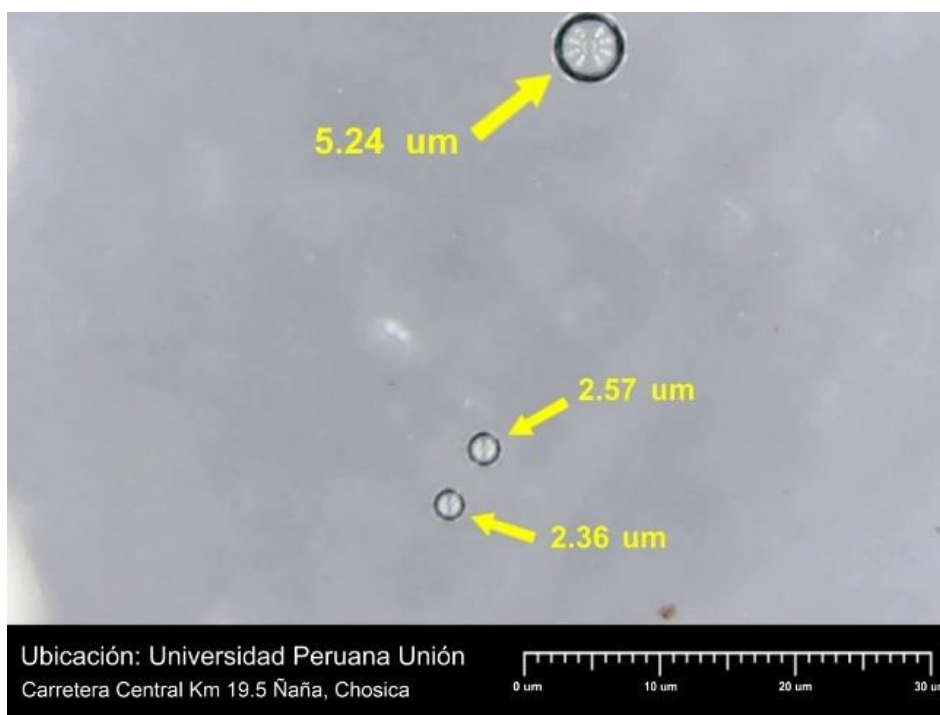


Figura 30. Medición de microburbujas T8/ Image J

Tabla 15. Resultados Físico/ Químicos T8

Tratamiento	Microburbujas (micras)	Turbidez	PH	Temperatura	Conductividad	TDS
8	3.39	37.5	8.4	22.4	770	772

4.3.9. Resultados del Tratamiento 9

Se verificó en la imagen obtenida por el microscopio en una gota de agua del tratamiento 9 se pudo evidenciar la formación de una microburbuja que medía 1.77 μm (ver Figura 31), además se analizó los parámetros de turbidez, ph, temperatura, conductividad y TDS, los cuales se pueden observar en la Tabla 16.

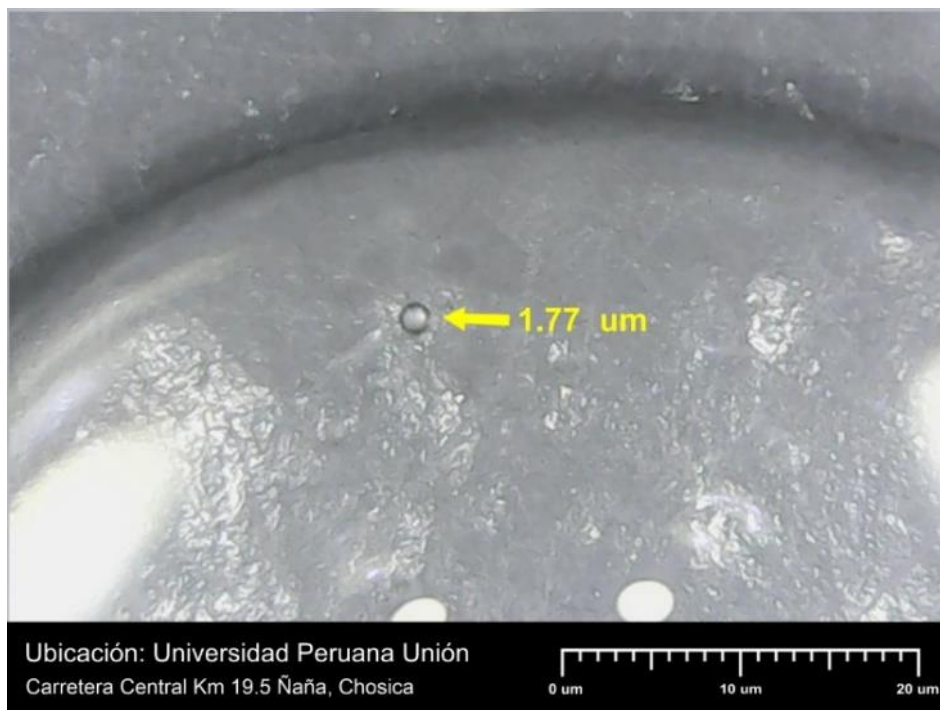


Figura 31. Medición de microburbujas T9/ Image J

Tabla 16. *Resultados Físico/ Químicos T9*

Tratamiento	Microburbujas (micras)	Turbidez	PH	Temperatura	Conductividad	TDS
9	1.77	28.2	8.2	20.3	776	776

4.3.10. Resultados del Tratamiento 10

Después de revisar la imagen obtenida por el microscopio en una gota de agua del tratamiento 10 se pudo evidenciar la formación de 3 microburbujas de tamaños 1.92 μm ., 1.69 μm ., y 2.71 μm . (ver Figura 32), con todos estos datos logramos obtener el promedio el cual será utilizado como tamaño de microburbuja de este tratamiento para fines estadísticos;

además se analizó los parámetros de turbidez, ph, temperatura, conductividad y TDS, los cuales se pueden observar en la Tabla 17.

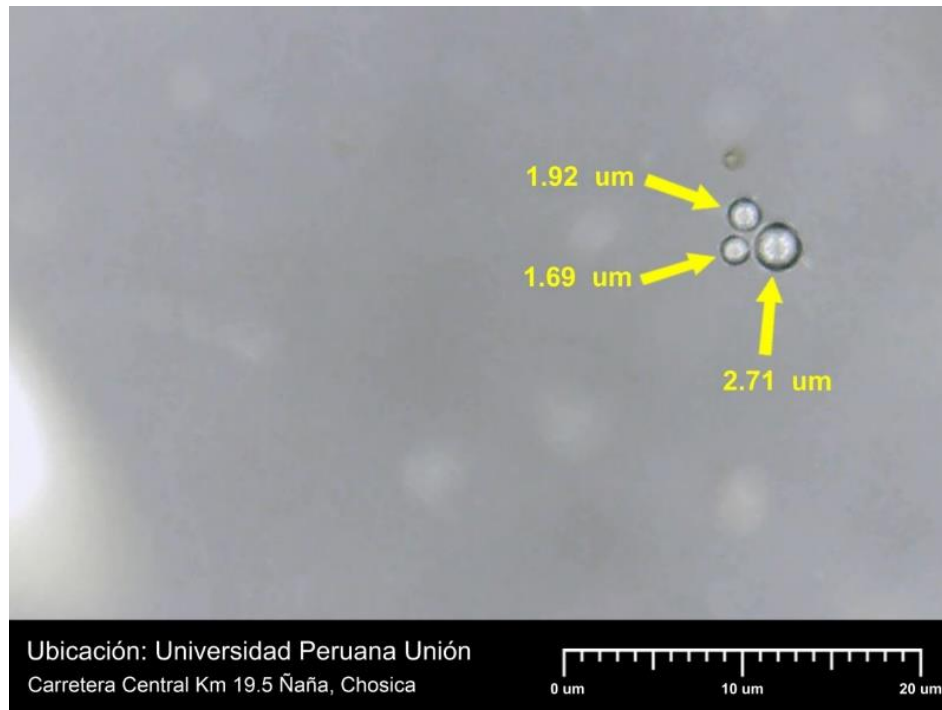


Figura 32. Medición de microburbujas T10/ Imagen J

Tabla 17. Resultados Físico/ Químicos T10

Tratamiento	Microburbujas (micras)	Turbidez	PH	Temperatura	Conductividad	TDS
10	2.107	29.9	8.3	21	773	773

4.3.11. Resultados del Tratamiento 11

Al analizar la imagen obtenida por el microscopio en una gota de agua del tratamiento 10 se pudo evidenciar la formación de 4 microburbujas de tamaños 0.93 μm ., 0.96 μm ., 1.97 μm ., y 0.78 μm . (ver Figura 33), con todos estos datos logramos obtener el promedio el cual será utilizado como tamaño de microburbuja de este tratamiento para fines estadísticos; además se analizó los parámetros de turbidez, ph, temperatura, conductividad y TDS, los cuales se pueden observar en la Tabla 18.

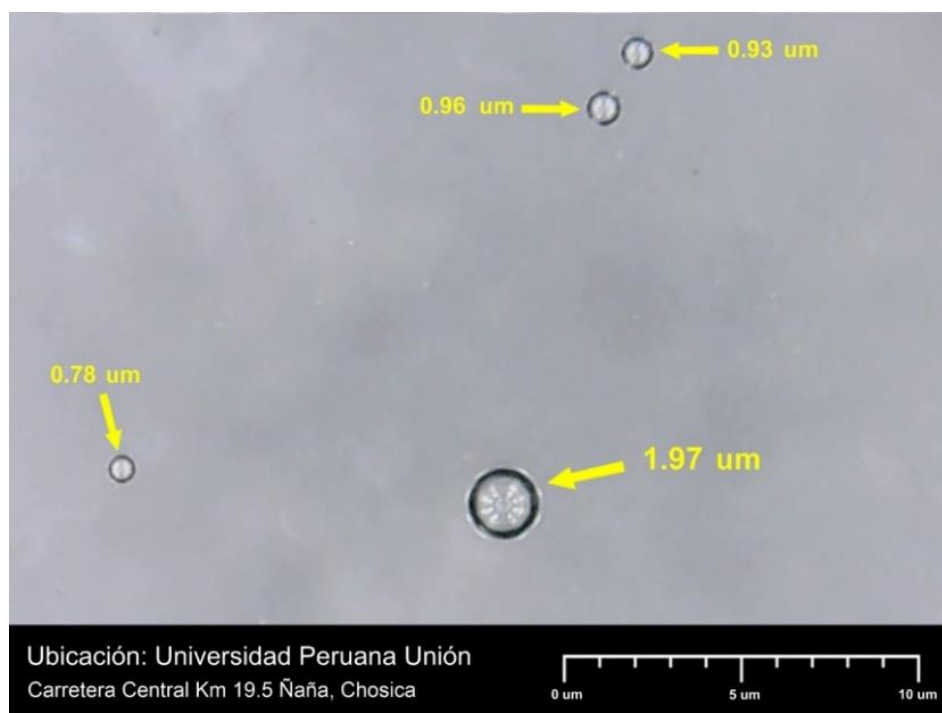


Figura 33. Medición de microburbujas T11/ Imagen J

Tabla 18. Resultados Físico/ Químicos T11

Tratamiento	Microburbujas (micras)	Turbidez	PH	Temperatura	Conductividad	TDS
11	1.16	25.6	8.4	22.6	773	773

4.3.12. Resultados del Tratamiento 12

Después de revisar la imagen obtenida por el microscopio en una gota de agua del tratamiento 12 se pudo evidenciar la formación de 3 microburbujas de tamaños 2.37 μm ., 1.56 μm . y 2.64 μm . (ver Figura 34), con todos estos datos logramos obtener el promedio el cual será utilizado como tamaño de microburbuja de este tratamiento para fines estadísticos; además se analizó los parámetros de turbidez, ph, temperatura, conductividad y TDS, los cuales se pueden observar en la Tabla 19.

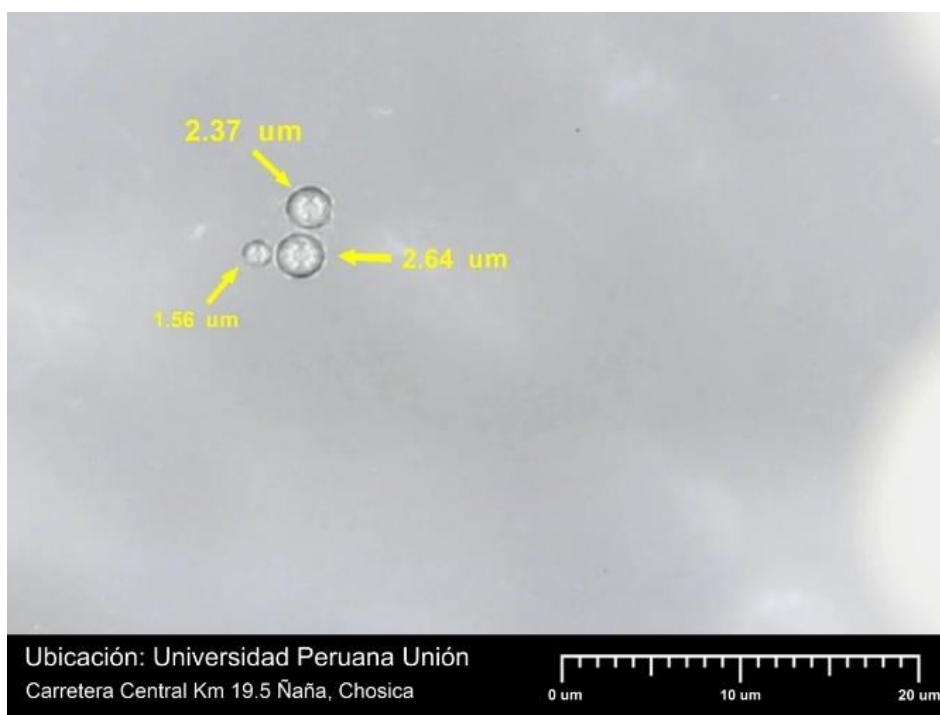


Figura 34. Medición de microburbujas T12/ Imagen J

Tabla 19. Resultados Físico/ Químicos T12

Tratamiento	Microburbujas (micras)	Turbidez	PH	Temperatura	Conductividad	TDS
12	2.19	31.9	8.4	23.2	771	772

4.3.13. Resultados del Tratamiento 13

Después de revisar la imagen obtenida por el microscopio en una gota de agua del tratamiento 13 se pudo evidenciar la formación de 4 microburbujas de tamaños 0.89 μm ., 1.81 μm ., 0.72 μm ., y 0.79 μm . (ver Figura 35), con todos estos datos logramos obtener el

promedio el cual será utilizado como tamaño de microburbuja de este tratamiento para fines estadísticos; además se analizó los parámetros de turbidez, ph, temperatura, conductividad y TDS, los cuales se pueden observar en la Tabla 20.

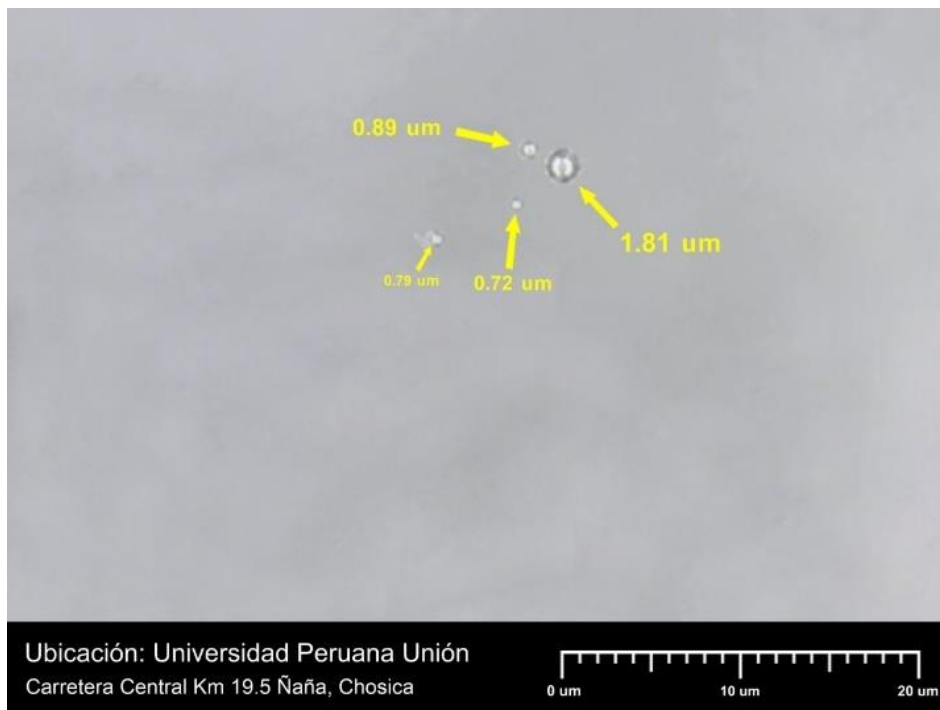


Figura 35. Medición de microburbujas T13/ Imagen J

Tabla 20. Resultados Físicos/ Químicos T13

Tratamiento	Microburbujas (micras)	Turbidez	PH	Temperatura	Conductividad	TDS
13	1.053	23.2	8.3	19.3	778	778

4.3.14. Resultados del Tratamiento 14

Al analizar las imágenes obtenidas por el microscopio en una gota de agua del tratamiento 14 se pudo evidenciar en la primera imagen la formación de 11 microburbujas de tamaños 0.74 um., 0.88 um., 0.60 um., 0.66 um., 0.51 um., 0.44 um., 0.59 um., 0.94 um., 0.71 um., 0.80 um. y 0.72 um. (ver Figura 36) y en la segunda imagen se verificó una microburbuja de tamaño 0.69 um. (ver Figura 37), con todos estos datos logramos obtener el promedio el cual será utilizado como tamaño de microburbuja de este tratamiento para fines

estadísticos; además se analizó los parámetros de turbidez, ph, temperatura, conductividad y TDS, los cuales se pueden observar en la Tabla 21.

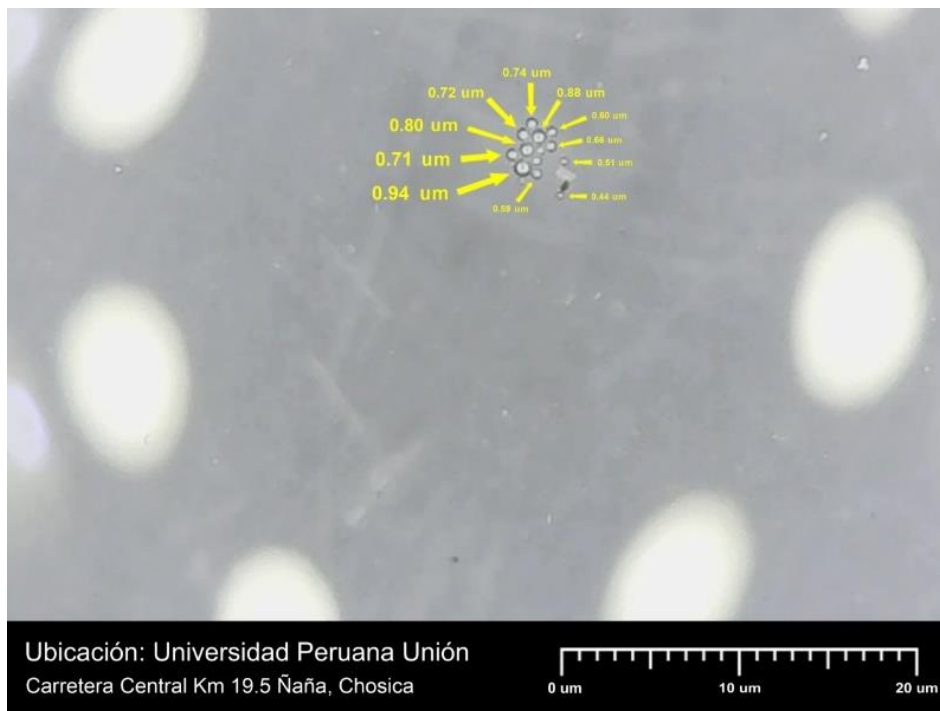


Figura 36. Medición de microburbujas T14-1/ Imagen J

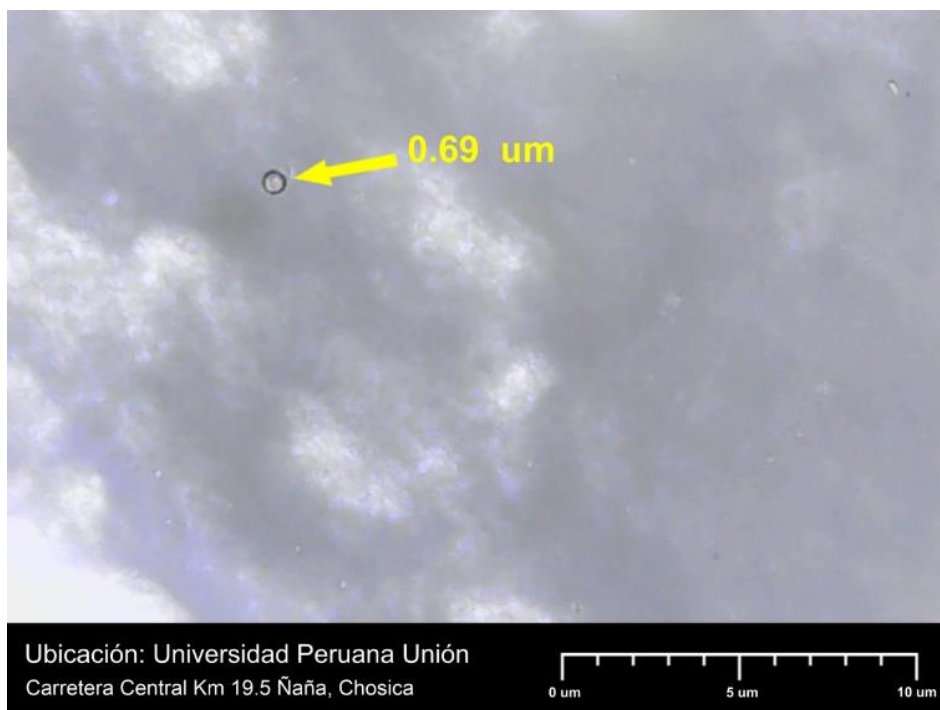


Figura 37. Medición de microburbujas T14-2/ Imagen J

Tabla 21. Resultados Físico/ Químicos T14

Tratamiento	Microburbujas (micras)	Turbidez	PH	Temperatura	Conductividad	TDS
14	0.69	21.5	8.3	19.6	774	774

4.3.15. Resultados del Tratamiento 15

Al analizar las imágenes obtenidas por el microscopio en una gota de agua del tratamiento 15 se pudo evidenciar en la primera imagen la formación de 1 microburbuja de tamaños 0.076 μm . (ver Figura 38) y en la segunda imagen se verificó otra microburbuja de tamaño 0.79 μm . (ver Figura 39), con todos estos datos logramos obtener el promedio el cual será utilizado como tamaño de microburbuja de este tratamiento para fines estadísticos; además se analizó los parámetros de turbidez, pH, temperatura, conductividad y TDS, los cuales se pueden observar en la Tabla 22.

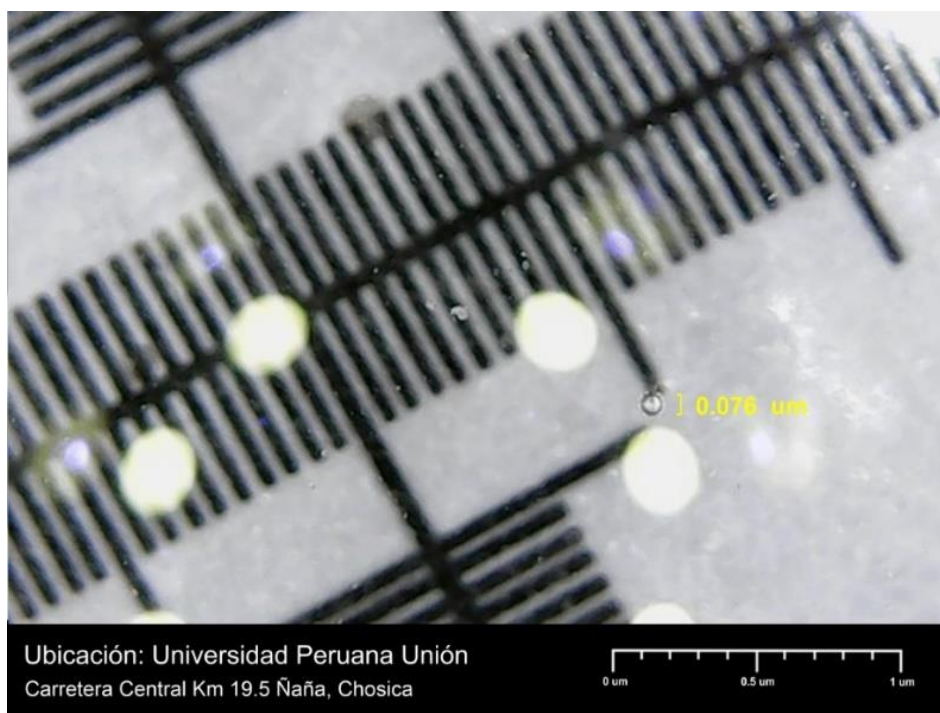


Figura 38. Medición de microburbujas T15-1/ Imagen J

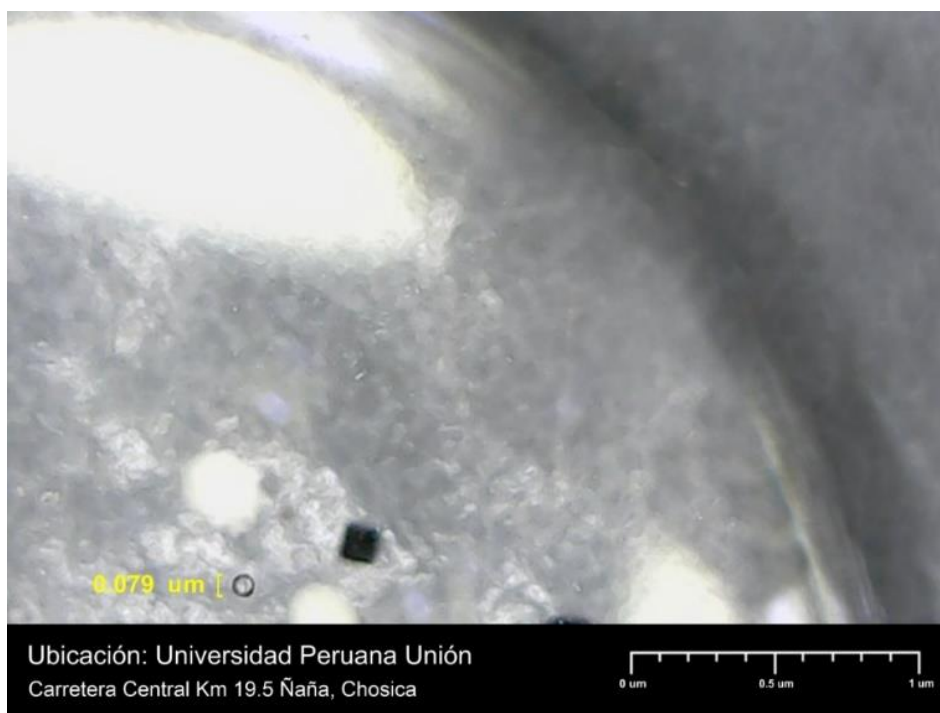


Figura 39. Medición de microburbujas T15-2/ Imagen J

Tabla 22. Resultados Físico/ Químicos T15

Tratamiento	Microburbujas (micras)	Turbidez	PH	Temperatura	Conductividad	TDS
15	0.076	18	8.2	19.7	778	776

4.3.16. Resultados del Tratamiento 16

Al analizar las imágenes obtenidas por el microscopio en una gota de agua del tratamiento 16 se pudo evidenciar en la primera imagen la formación de varias microburbujas de las cuales se pudo medir 4 con tamaños 1.10 um., 1.13 um., 0.67 um. y 1.04 um., (ver Figura 40) estas lograron atrapar contaminantes para posteriormente llevarlos a la superficie, tal como lo afirma Macassi (2017); y en la segunda imagen se verificó 16 microburbujas de tamaño 0.66 um., 1.31 um., 0.72 um., 0.73 um., 0.65 um., 1.46 um., 0.55 um., 1.18 um., 1.27 um., 1.91 um., 0.58 um., 0.71 um., 0.59 um., 0.56 um., 0.63 um. y 0.98 um., (ver Figura 41) las cuales se encuentran estables en la microburbuja oxigenando el medio; con todos estos datos logramos obtener el promedio del tamaño de las microburbujas el cual será utilizado

como tamaño de microburbuja de este tratamiento para fines estadísticos; además se analizó los parámetros de turbidez, ph, temperatura, conductividad y TDS, los cuales se pueden observar en la Tabla 23.

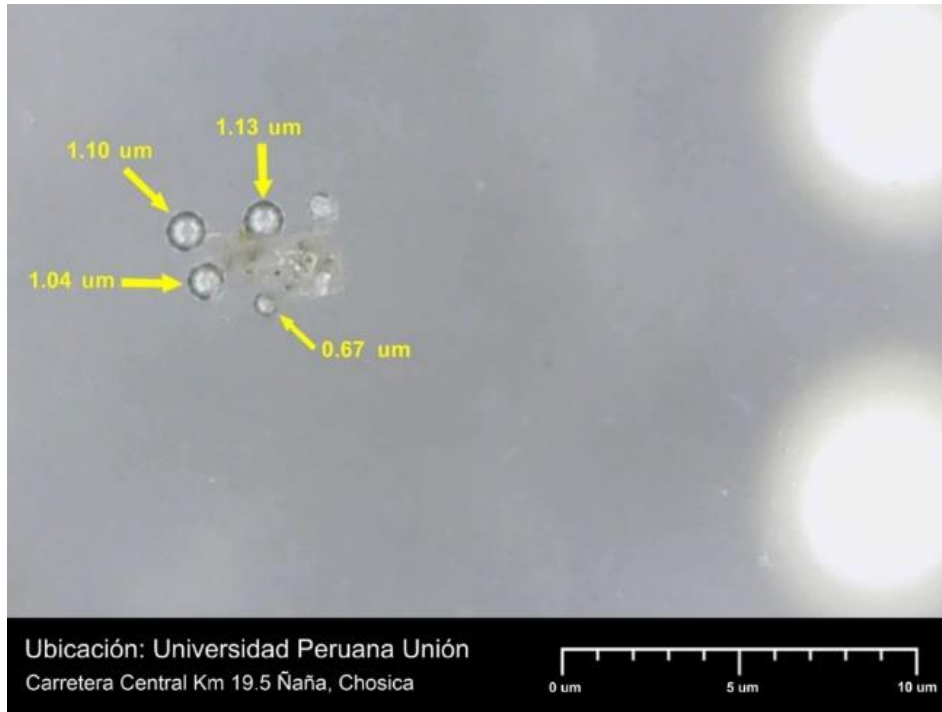


Figura 40. Medición de microburbujas T16/ Imagen J

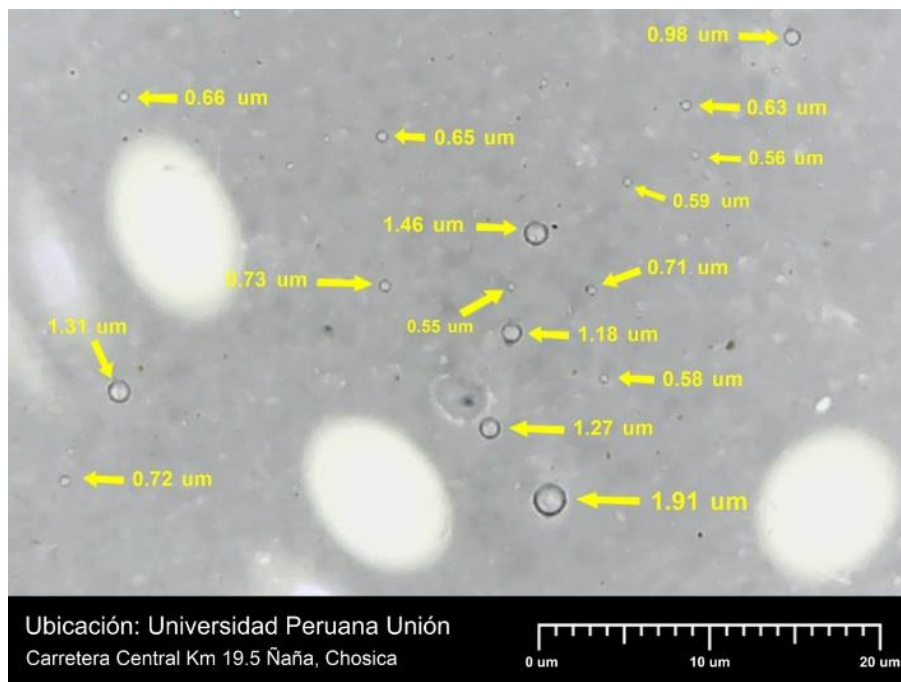


Figura 41. Medición de microburbujas T16/ Imagen J

Tabla 23. Resultados Físico/ Químicos T16

Tratamiento	Microburbujas (micras)	Turbidez	PH	Temperatura	Conductividad	TDS
16	0.906	20.3	8.3	21.9	777	777

4.3.17. Resultados del Tratamiento 17

Al analizar las imágenes obtenidas por el microscopio en una gota de agua del tratamiento 17 se pudo evidenciar en la primera imagen la formación de 7 microburbujas de tamaños 0.34 μm ., 0.33 μm ., 0.36 μm ., 0.57 μm ., 0.47 μm ., 0.31 μm ., y 0.36 μm ., (ver Figura 42), en la segunda imagen se verificó una microburbuja de tamaño 0.41 μm ., (ver Figura 43), y en la tercera imagen 5 microburbujas con medidas de 1.13 μm ., 0.28 μm ., 0.30 μm ., 0.26 μm ., y 0.23 μm ., (ver Figura 44), con todos estos datos logramos obtener el promedio el cual será utilizado como tamaño de microburbuja de este tratamiento para fines estadísticos; además se analizó los parámetros de turbidez, ph, temperatura, conductividad y TDS, los cuales se pueden observar en la Tabla 24.

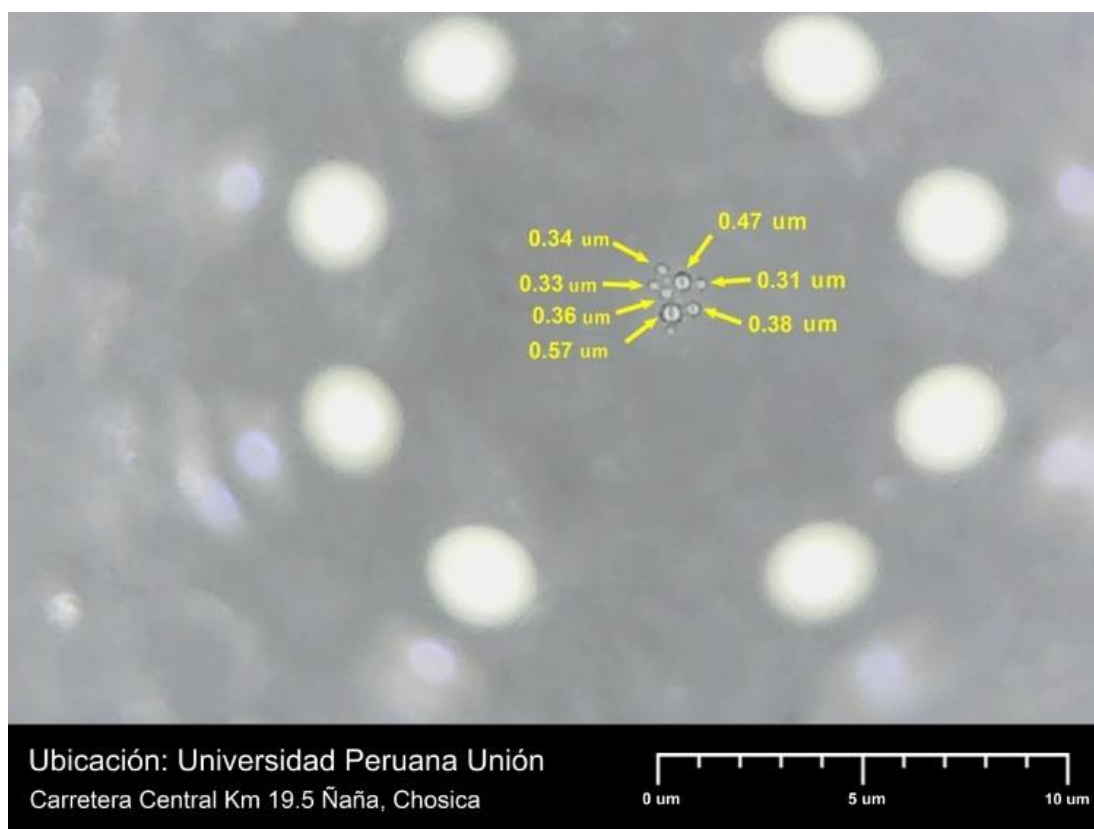


Figura 42. Medición de microburbujas T17-1/ Imagen J

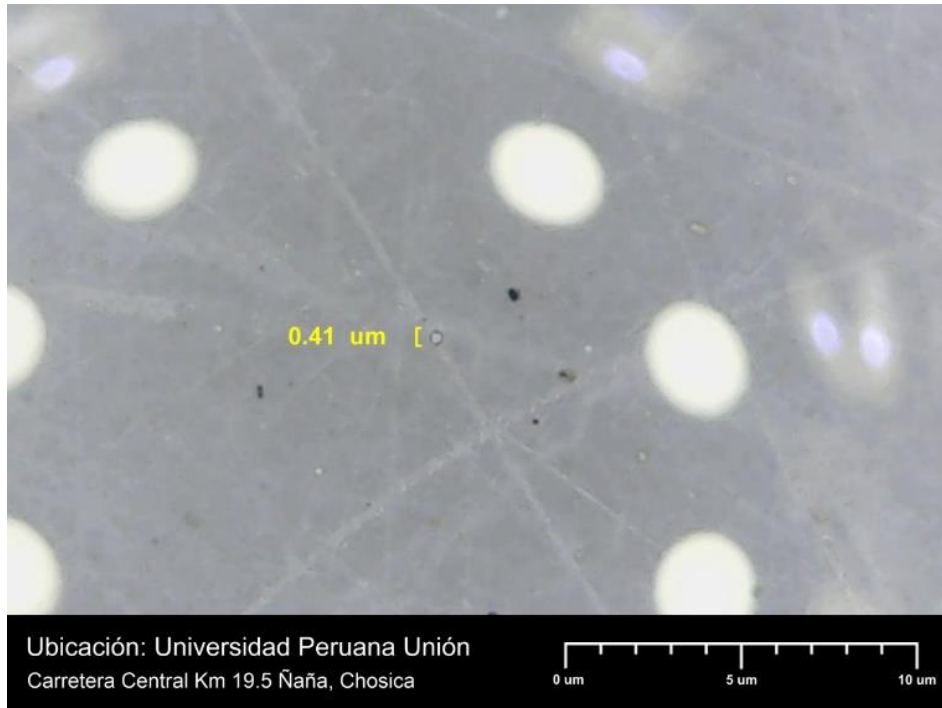


Figura 43. Medición de microburbujas T17-2/ Imagen J

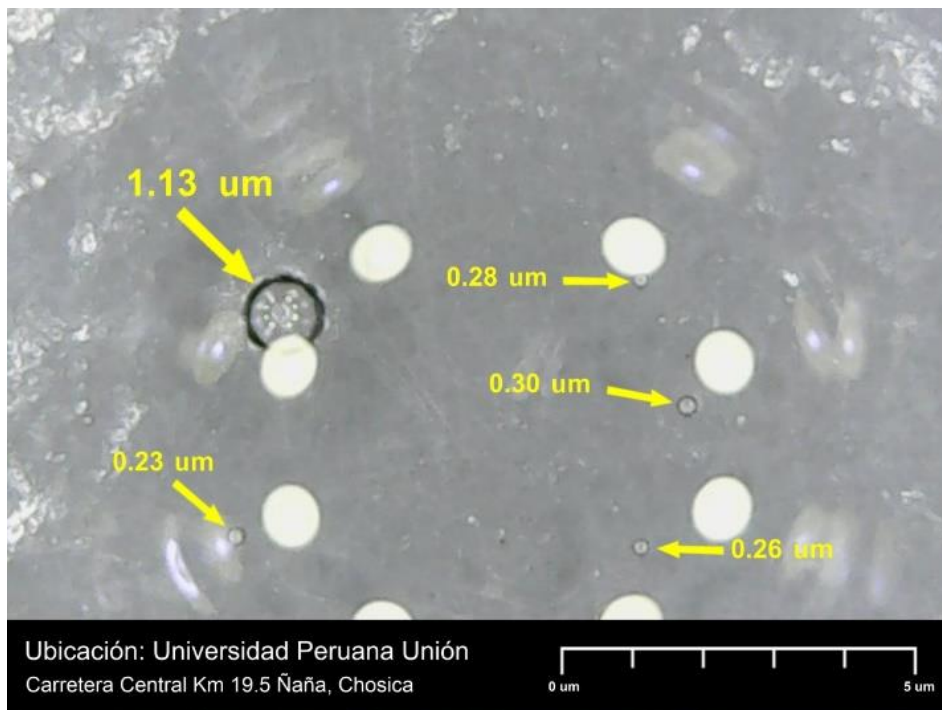


Figura 44. Medición de microburbujas T17-3/ Imagen J

Tabla 24. Resultados Físico/ Químicos T17

Tratamiento	Microburbujas (micras)	Turbidez	PH	Temperatura	Conductividad	TDS
17	0.394	19.7	8.3	23.1	774	772

Fuente: *Elaboración Propia.*

4.4. Resultados y discusiones del tamaño de las microburbujas

De acuerdo a los análisis realizados se obtuvieron los siguientes resultados que se puede apreciar en (ver Figura 45), donde se puede observar que los tratamientos 15 y 17 fueron los que lograron tamaños de 0.076 μm y 0.394 μm respectivamente. De acuerdo a lo mencionado anteriormente, cada tratamiento está influenciado entre la velocidad calculada, diámetro de la tubería y tiempo aplicado. Llegando a obtener que hay mayor presencia de microburbujas a una velocidad de 5,7 l/min; con un diámetro 0,75 y con un tiempo de 30 minutos; lo que permite disminuir la carga microbiana presente en el agua residual.

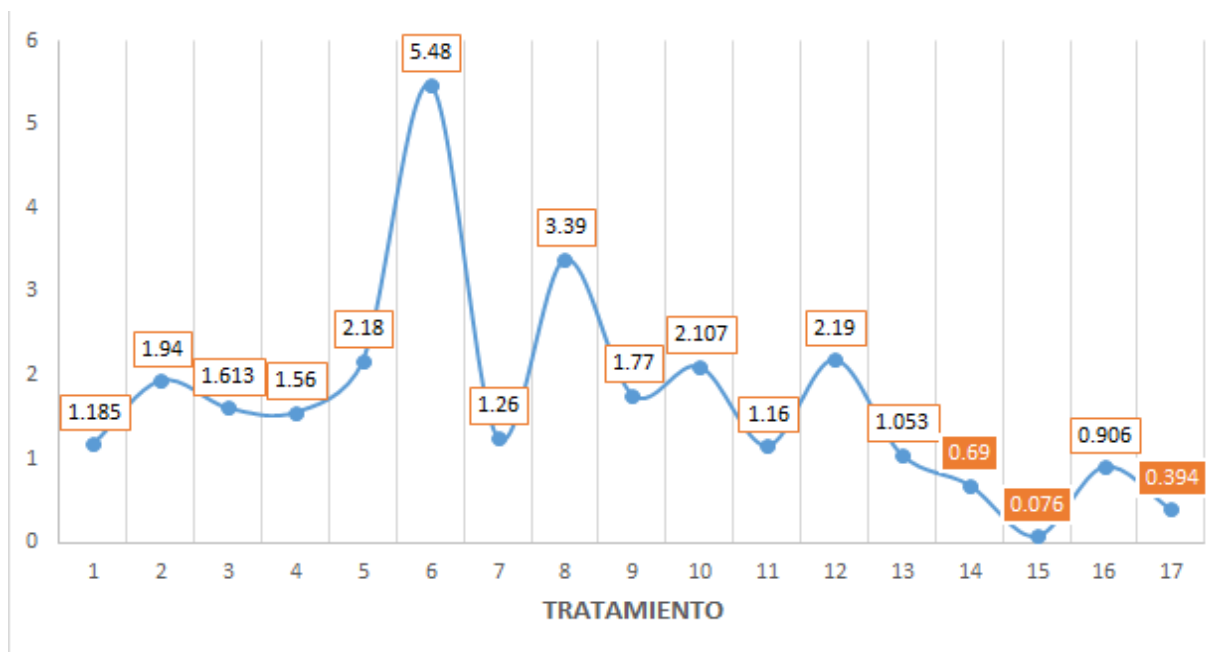


Figura 45. Resultado de las microburbujas por tratamiento (μm)

4.5. Resultados de parámetros físico-químicos del agua

4.5.1. Turbidez

En la figura 46, se puede observar los resultados de cada tratamiento aplicado. Los resultados son favorables en los tratamientos 15 y 17 logrando valores de 18 NTU y 19.7 NTU, obteniendo una eficiencia del 63.05% y 51.47% respectivamente en la remoción de la turbidez; por otro lado, cabe mencionar que, para la normativa peruana la turbiedad no es un parámetro considerado; sin embargo, para la U.S.EPA. (U.S. Environmental Protection Agency), menciona que la presencia de una alta turbidez o sólidos suspendidos encontrados en el agua destinada para riego, puede inhibir la infiltración del agua, disminuir la aeración del suelo e impedir el desarrollo normal de los vegetales (Soderberg, 2016).

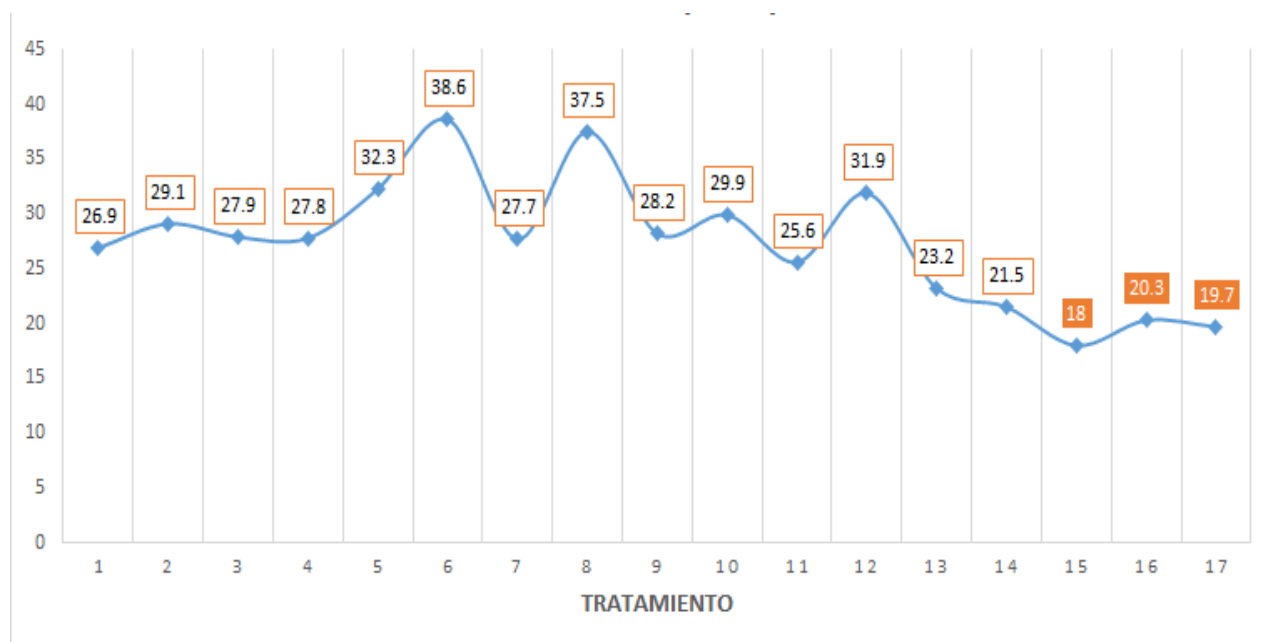


Figura 46. Resultados de la turbidez por cada tratamiento

En la figura 47, indicada por la U.S.EPA (Soderberg, 2016), se observa el detalle de los límites requeridos para el uso de riego de vegetales, donde se indica que para el parámetro de turbidez el límite es de menor igual a 2 NTP, sin embargo de acuerdo a lo indicado en el informe emitido por la Subdirección de Hidrología publicado por Carpio (2007), la mayoría de turbidímetros utilizan la intensidad de la luz dispersa la cual es en su mayoría en ángulos rectos, estos equipos cuentan con detectores de luz dispersa, su sensibilidad y aplicabilidad

hacen que su precisión sea muy alta sin embargo esta se ve afectada o limitada por ciertos factores como las burbujas de oxígeno, por lo tanto de acuerdo a la Organización Mundial de la Salud (OMS, 2006), el modo de determinación inmediata de la calidad del agua es mediante el Color y Olor.

Guías de la EPA para la reutilización de aguas residuales tratadas en el sector agrícola

Uso	Tratamiento	Calidad requerida
En riego superficial o por asperjado de cultivos de alimentos para consumo humano se ingiere crudo	Secundario Filtración Desinfección	pH = 6-9 DBO ≤ 10 mg/L Turbiedad ≤ 2 UNT Coliformes fecales = no detectable Cloro residual = 1 mg/L
Riego superficial para cultivos de alimento para consumo humano y que se procesan comercialmente	Secundario y desinfección	pH = 6-9 DBO ≤ 30 mg/L SST ≤ 30 mg/L Coliformes fecales ≤ 200/100mL Cloro residual = 1 mg/L
Riego de cosechas que no se consumen por humanos incluyendo fibras, semillas y pasto	Igual	Igual

Figura 47. Guía de la EPA para aguas residuales en el área agrícola

Nota. Fuente: Soderberg, (2016)

4.5.2. Conductividad

A continuación, se muestran los resultados de la conductividad para cada tratamiento aplicado, ver figura 48, mediante los cuales se puede evidenciar que se mantienen relativamente constantes a diferencia de los tratamientos 6 y 8, por lo que presentan un excedente; sin embargo, los valores obtenidos se mantienen dentro de 2000 uS/cm, límite permitido según el ECA categoría 3.

(Medina et al., 2016) pudo evidenciar experimentalmente con las investigaciones realizadas, que cuando la conductividad en el agua supera los 3000 uS/cm, pueden afectar de

manera proporcional el crecimiento de cultivos; de igual manera (Solís-Castro et al., 2018) afirma que, si hay un exceso de sales presentes en el agua, además de un clima inestable, estado del desarrollo del cultivo y el tipo de riego aplicado, traerá consigo consecuencias desfavorables de crecimiento y producción para el cultivo.

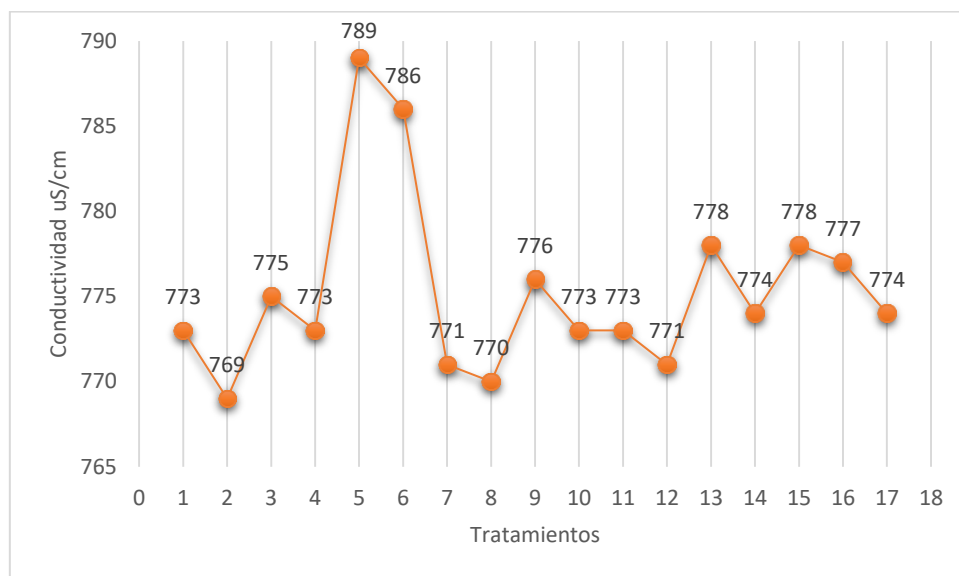


Figura 48. Resultados de la conductividad por cada tratamiento aplicado

4.5.3. Temperatura del agua

En la Figura 49 se puede visualizar los resultados de la temperatura que fue analizada en conjunto a cada tratamiento aplicado; de acuerdo a lo indicado por los ECA agua para la categoría 3 Regadío de Vegetales de tallo bajo, la temperatura debe de ser más menos 3 grados Celsius de la temperatura del ambiente por lo que se consideró la temperatura promedio del mes de setiembre; analizando los resultados se puede observar que en el tratamiento 17 se sobre pasa por 0.1 °C y el tratamiento 12 sobre pasa por 0.2 °C a la temperatura indicada por el ECA, esto se debe a la temperatura de la bomba periférica que se utilizó para la generación de microburbujas, ya que se realizaron 4 tratamientos seguidos por día ocasionando que incremente su temperatura, esto se evidencia gráficamente en la alza de la temperatura de los tratamientos 8, 12 y 17.

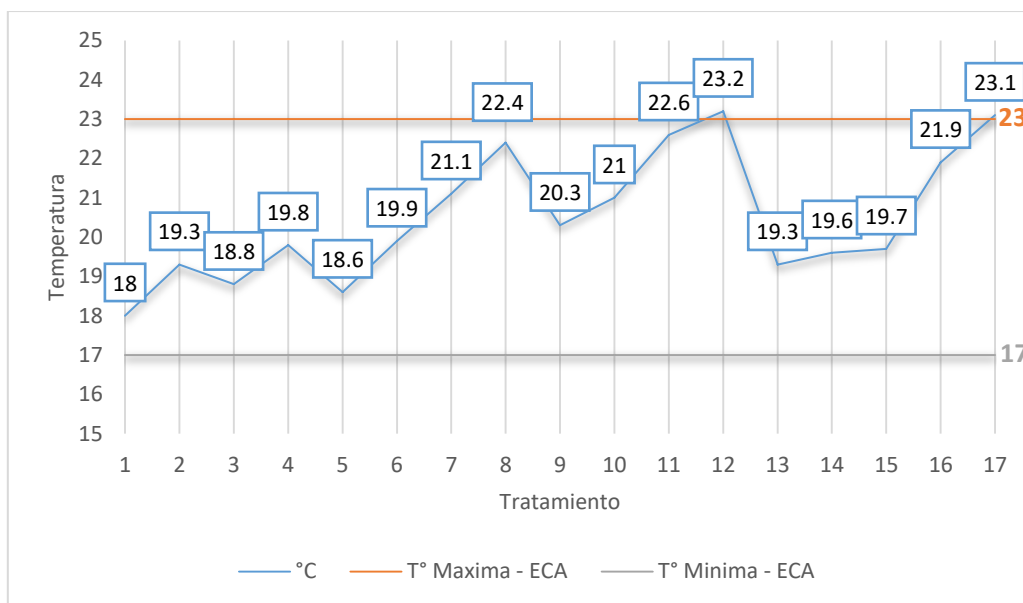


Figura 49. Resultados de la temperatura del agua por tratamiento

4.5.4. Sólidos Totales Disueltos

A continuación, se muestran los resultados de los sólidos totales (ver Figura 50), cabe indicar que este parámetro no está considerado dentro de los estándares permitidos según el ECA categoría 3; sin embargo, para la FAO (1994), describe que los TDS es uno de los parámetros a considerar y realizar el monitoreo correspondiente, porque puede ocasionar problemas de aireación y penetración de agua en los suelos de los cultivos, e incluso obstruir la emisión del riego. Este debe tener un límite entre 45 a 2000, considerado como ligero a moderado, si este excede los 2000 será considerado grave. De acuerdo con los resultados los valores no exceden a los límites establecidos por la FAO, se logró disminuir de mg/l a mg/l. De esta manera afirmamos lo que Hernández (2019) asegura, que las microburbujas penetran en las irregularidades de aquellos sólidos consiguiendo aglutinar las sustancias coloidales presentes en el medio, acelerando la decantación, proceso en el que actúa la carga eléctrica presente en las microburbujas de aire las cuales se formaron por el efecto de la cavitación,

incrementando en gran manera la presión interna, lo que origina una carga eléctrica negativa alrededor de la microburbuja que favorece el proceso.

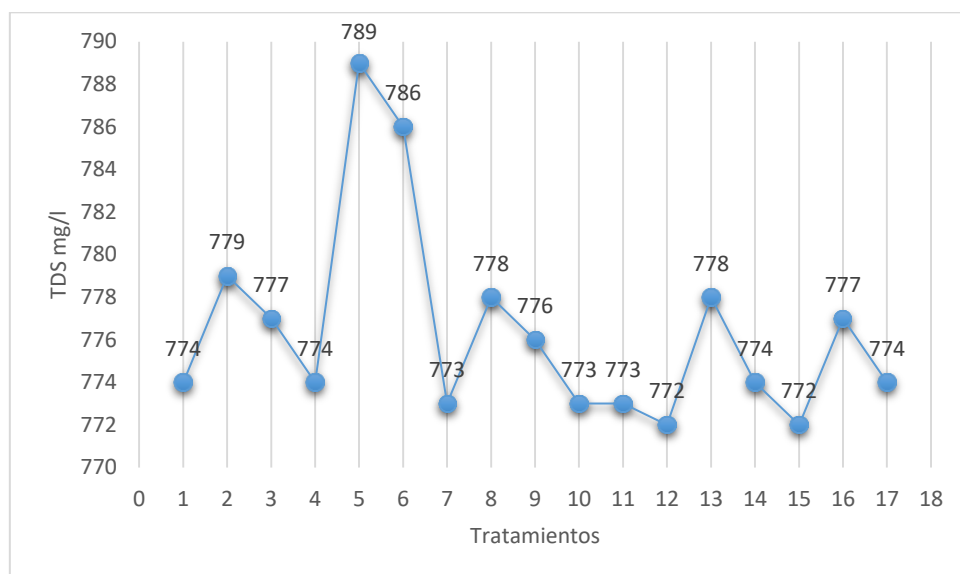


Figura 50. Resultados de TDS del agua por tratamiento

4.5.5. pH

A continuación, se mostrarán los resultados del pH, por cada tratamiento aplicado. En la Figura 51 se observa que hay un ligero aumento de pH; sin embargo, de acuerdo a los ECA's para riego de vegetales están dentro lo permitido, entre 6.5 y 8.5. De acuerdo a Liu et al. (2013), explica que el aumento de este parámetro se debe a que hay un exceso de iones hidroxilo en relación con los iones hidrógeno en la interfaz del medio, esto se debe que en la microburbuja se formó una doble capa eléctrica debido a la orientación de los dipolos del agua de hidrógeno y oxígeno apuntando hacia las fases de agua y gas, respectivamente; este cambio provoca la atracción de aniones a la interfaz y por consiguiente la elevación del pH.

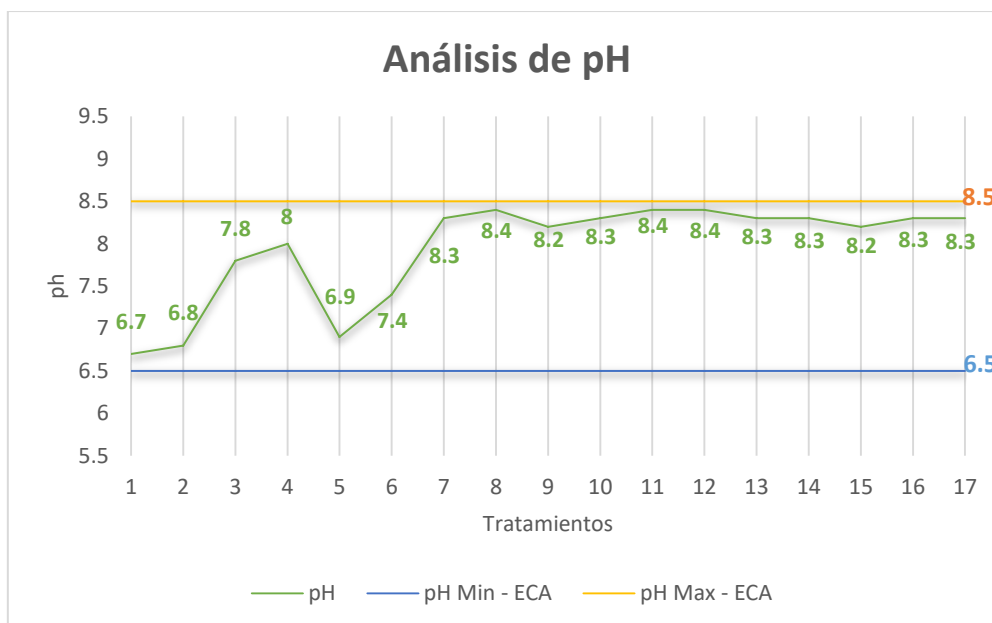


Figura 51. Resultados de pH del agua por tratamiento

4.5.6. DQO

En la Figura 52 se observa el análisis de la Demanda Química de Oxígeno de la muestra de agua residual sin tratamiento (T_0), el cual tiene un valor de 41 mg/L, y con el tratamiento 15 el cual se considera como tratamiento óptimo indicado por el diseño estadístico Box Behnken, donde se evidenció una eficiencia del 41.46 % de la DQO en 30 minutos de tratamiento. De esta manera se logró evidenciar la efectividad de las microburbujas, debido a que se consigue oxigenar el medio y por consiguiente las bacterias aerobias consumen la materia orgánica y rompen las cadenas de compuestos contaminantes encontrados en el agua residual, acelerando su descomposición (Gutiérrez, 2015).

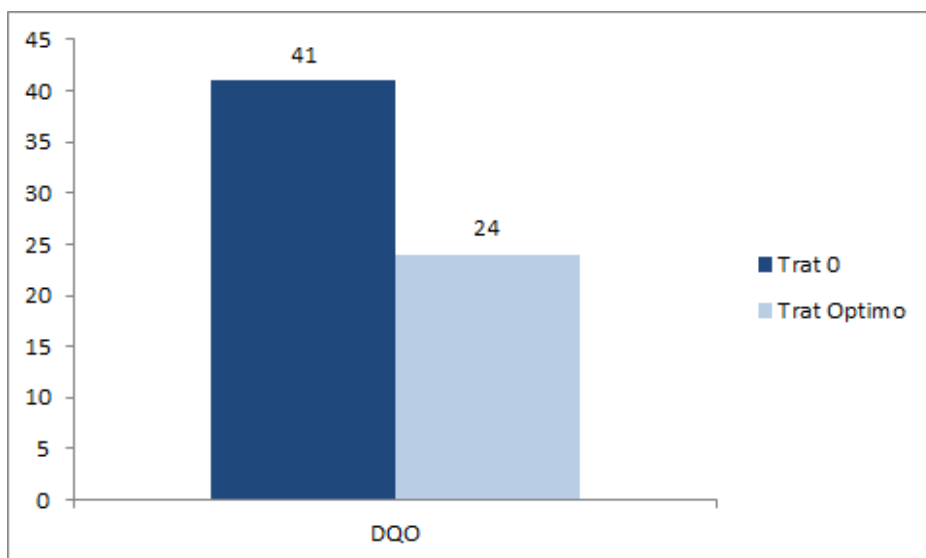


Figura 52. Resultados del análisis DQO sin tratamiento y con el tratamiento óptimo

4.5.7. DBO₅

Considerando el tratamiento número 15 como tratamiento óptimo de acuerdo al análisis estadístico, en la Figura 53 se puede apreciar la comparación de la DBO₅ entre la muestra “cero” y el tratamiento óptimo, se visualiza que la muestra “cero” antes de aplicar el tratamiento ingresa con 21 mg/l, a diferencia de la muestra del tratamiento óptimo el cual presenta una DBO₅ de 10 mg/l logrando una eficiencia del 52.38% en tan solo 30 minutos, lo cual es favorable para el medio, presentándose como alternativa de tratamiento para la remoción de DQO y DBO₅ ya que al comparar el tiempo de remoción de estos parámetros con las macrofitas acuáticas se puede evidenciar con el estudio de Vargas (2015), en la que se logra una remoción del 51.85% en 90 días. Cabe mencionar que la DBO está relacionada con la temperatura del medio, nutrientes y microorganismos presentes en el agua. (Çelik et al., 2018)

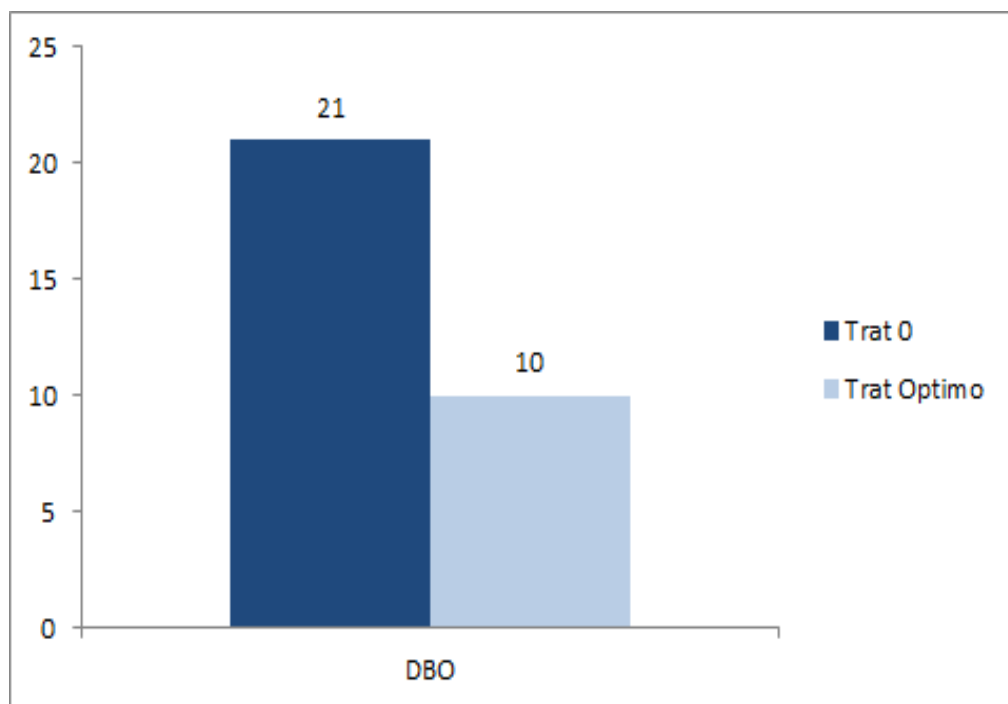


Figura 53. Resultados del análisis de DBO₅ sin tratamiento y con el tratamiento óptimo

4.6. Resultados Microbiológicos del agua

4.6.1. Coliformes Termotolerantes y *E. Coli*

Las muestras analizadas se pueden evidenciar en la Tabla 25, y a su vez se compararon con los estándares del ECA-Agua, mostrando que los valores obtenidos de la muestra inicial ingresan con valores excedentes tanto para coliformes termotolerantes ($1.1 \cdot 10^6$ NMP/100ml) y *E. Coli* ($1.1 \cdot 10^6$ NMP/100ml). Luego de obtener el tratamiento óptimo (T -15) se logró minimizar los valores obtenidos, llegando a 1.8 NMP/100ml en coliformes termotolerantes y 1.8 NMP/100ml en *E. Coli*. Alcanzando una eficiencia de remoción del 99.9% en solo 30 minutos. Es muy importante reducir los valores en los parámetros microbiológicos porque estos pueden ocasionar riesgos sanitarios para la población. (Vargas & Castro, 2018).

Tabla 25. Resultados Microbiológicos del agua residual antes y post

Tratamiento	Coliformes	<i>E. Coli</i>
-------------	------------	----------------

Termotolerantes		
Agua sin tratamiento	$1.1 * 10^6$	$1.1 * 10^6$
Tratamiento Optimo	1.8	1.8

4.7. Resultados aplicando el diseño experimental Box- Behnken

4.7.1. Resultados de las microburbujas

Tabla 26. Resultados de los tamaños de microburbujas (μm)

Tratamientos	Variables independientes						Variables dependientes		
	Codificados			No codificados					
	X ₁	X ₂	X ₃	Velocidad (L/min)	Diámetro (pul)	Tiempo (min)	Micro burbujeo (μm)	Turbidez (UNT)	Conductividad eléctrica ($\mu\text{s/cm}$)
1	-1	-1	0	3,2	0,5	30	1.185	26,9	772
2	1	-1	0	7,5	0,5	30	1.940	29,1	774
3	-1	1	0	3,2	1	30	1.613	27,9	772
4	1	1	0	7,5	1	30	1.560	27,8	778
5	-1	0	-1	3,2	0,75	15	2.180	32,3	771
6	1	0	-1	7,5	0,75	15	5.480	38,6	789
7	-1	0	1	3,2	0,75	45	1.260	27,7	770
8	1	0	1	7,5	0,75	45	3.390	37,5	786
9	0	-1	-1	5,3	0,75	15	1.770	28,2	773
10	0	1	-1	5,3	1	15	2.107	29,9	774
11	0	-1	1	5,3	0,5	45	1.160	25,6	769
12	0	1	1	5,3	1	45	2.190	31,9	773
13	0	0	0	5,3	0,75	30	1.053	23,2	778
14	0	0	0	5,3	0,75	30	0.690	21,5	774
15	0	0	0	5,3	0,75	30	0.076	18	778
16	0	0	0	5,3	0,75	30	0.906	22,3	777
17	0	0	0	5,3	0,75	30	0.394	19,7	774

En la Tabla 26, se muestran los resultados de los distintos tamaños de las microburbujas de oxígeno, de acuerdo a las diferentes concentraciones de las variables independientes, teniendo en cuenta las repeticiones en los tratamientos aplicados, se alcanzó obtener valores de microburbujas ($0.076 \mu\text{m}$) bajo las siguientes condiciones turbidez 18 UNT, $778 \mu\text{s/cm}$ de conductividad, siendo este el tratamiento de acuerdo a las condiciones mencionadas el mejor resultado obtenido, el cual representa el 56% de remoción.

Tabla 27. Resultados de la Anova de las microburbujas (μm)

Factor	SS	dF	MS	F	p
(1) Velocidad(L/min)(L)	4,70018	1	4,700178	30,26882	0,005322
Velocidad(L/min)(Q)	3,93172	1	3,931718	25,31999	0,007324
(2) Tiempo (Min)(L)	1,74160	1	1,741600	11,21578	0,028595
Tiempo (Min)(Q)	7,59477	1	7,594775	48,90981	0,002200
(3) Diámetro Pul(L)	0,00364	1	0,003644	0,02347	0,885667
Diámetro Pul(Q)	0,01458	1	0,014579	0,09389	0,774577
1L by 2L	0,35568	1	0,355682	2,29056	0,204718
1L by 3L	0,16375	1	0,163748	1,05452	0,362507
2L by 3L	0,48171	1	0,481708	3,10217	0,152985
Lack of Fit	3,63480	3	1,211601	7,80263	0,037937
Pure Error	0,62112	4	0,155281		
Total SS	25,03273	16			

$R^2 = 0.73$, R^2 ajustado= 0.57 donde SM: Suma de Cuadrados, GL: Grado de Liberada,

CM: Cuadrados medios.

El análisis de la varianza de las microburbujas (μm), el cual se observa en la Tabla 27, se logró obtener un coeficiente de determinación (R^2) = 0.73 y coeficiente de determinación ajustado ($R\text{-adj}$) = 0.57 a 95% de nivel de confianza. Además, se muestran los factores como la velocidad (L y Q), Tiempo (L y Q) son relativamente significativas en las microburbujas. Sin embargo, el diámetro (L y Q) no fue significativo ($p=0.88$, 0.77) respectivamente.

En la Tabla 28 muestra los resultados del coeficiente de regresión, donde la primera columna muestra los valores de los efectos, la segunda columna muestra los valores de la desviación estándar representada mediante el error puro. El valor p se muestra en la columna

cuatro, cuyos datos menores que el nivel de significancia, representan significancia a un 95% de nivel de confianza, el único que no resultó estadísticamente significativo fue el diámetro (L y Q).

La siguiente ecuación es el modelo generado de regresiones significativos para la generación de microburbujas a factores de velocidad y tiempo.

$$\text{GMB} = 11,95 + 0.22V - 0.45V^2 + 0.006T^2$$

Donde:

GMB: Generación de microburbujas (Mb) (μm)

V: Velocidad (L/min)

T: Tiempo

Tabla 28. Resultados de coeficiente de regresión para la generación de microburbujas (μm)

FACTORES	Regressn Coeff.	Std. Err. Pure Err	t(4)	P	-95% cnf.Limt	+95% Cof. Limt
Mean/Interc.	11,9523786	3,74346087	3,19286858	0,0331253818	1,55886498	22,3458922
(1) Velocidad (L/min) (L)	-1,44828989	0,577675852	-2,50709785	0,0662622892	-3,05217518	0,155595401
Velocidad (L/min)(Q)	0,220977488	0,0439153429	5,03189713	0,00732370162	0,0990489493	0,342906027
(2) Tiempo (Min)(L)	-0,451502521	0,0936498196	-4,82117876	0,00851571516	-0,711516104	-0,191488938
Tiempo (Min)(Q)	0,00621257225	0,000888328196	6,99355518	0,0021997096	0,00374617779	0,00867896672
(3) Diámetro (PUL)(L)	-3,2425393	6,78721618	0,477742158	0,657768749	-22,0868724	15,6017938
Diámetro (Pul)(Q)	1,05800681	3,45288071	0,306412789	0,774577454	-8,52872691	10,6447405
1L by 2L	0,00924535021	0,00610874735	-1,51346089	0,204718448	-0,0262059519	0,00771525146
1L by 3L	-0,376396132	0,366536364	-1,02689984	0,362506951	-1,39406422	0,641271961
2L by 3L	0,12570236	0,0713691843	1,76129741	0,152984988	-0,0724502624	0,323854982

En la Figura 54, se visualiza el diagrama de Pareto de la generación de microburbujas (μm), muestra que las variables tiempo (L y Q) y la velocidad (L y Q) son significativos estadísticamente ($p=0.05$); sin embargo, se excluye al diámetro (L y Q) como parámetro significativo en el tratamiento. De esta manera, Ventura (2017) asegura que el tiempo es el

que tiene mayor influencia en la remoción de los contaminantes. Por otro lado Sánchez, (2017) afirma que la velocidad es un factor de gran influencia en la remoción de contaminantes, lo cual hace que estos factores favorezcan al tratamiento de agua residual con el fin de disminuir los contaminantes presentes.

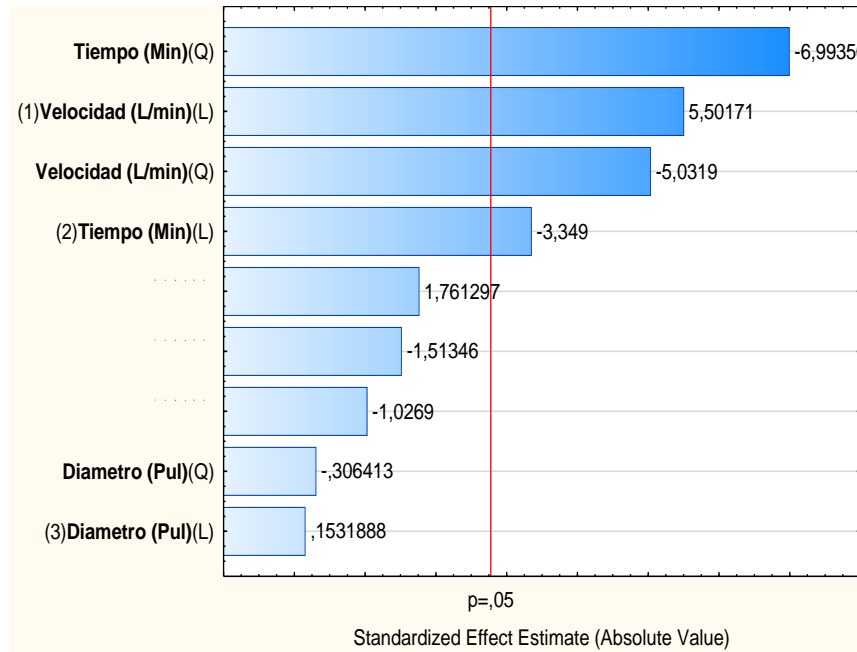


Figura 54. Diagrama de Pareto de las microburbujas

En la Figura 55, se muestra la superficie de respuesta y las curvas y en la Figura 56 se muestra el contorno de respuesta. Donde se evidencia la interacción entre el tamaño de las microburbujas (μm), el diámetro de la tubería y la velocidad. Mediante la ilustración ya mencionada se puede concluir que cuando el diámetro de la tubería es menor a (0.6 pulgadas) y la velocidad se encuentra entre (3.5 l/min y 5.5 l/min) muestran los resultados óptimos del tamaño de las microburbujas las cuales se generaron en tamaños menores a $0.25 \mu\text{m}$, como se puede verificar en la región verde oscuro del gráfico, estos resultados confirman las propuestas de mejora que indicada por (Muñoz, 2017), el cual recomienda que el diámetro de la boquilla de la tubería debe de ser menor a 0.62 pulgadas para lograr unas microburbujas

de menores tamaños, esto se produce porque al tener menor diámetro de tubería la fuerza de succión de aire es mayor, por consecuencia se incrementa la oxigenación del agua tratada.

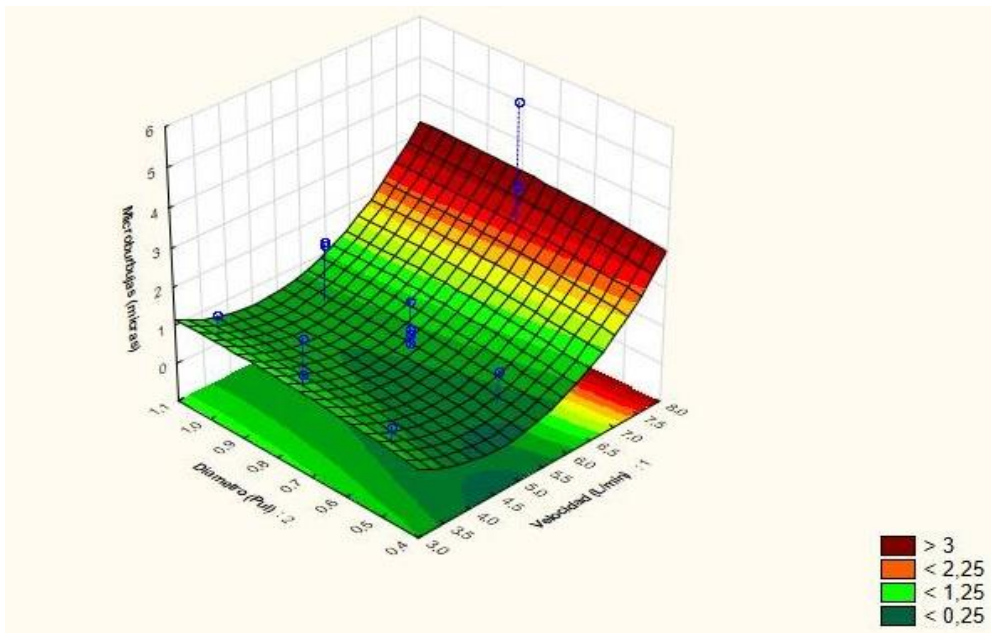


Figura 55. Superficie de Respuesta de la relación de las microburbujas con el diámetro y la velocidad.

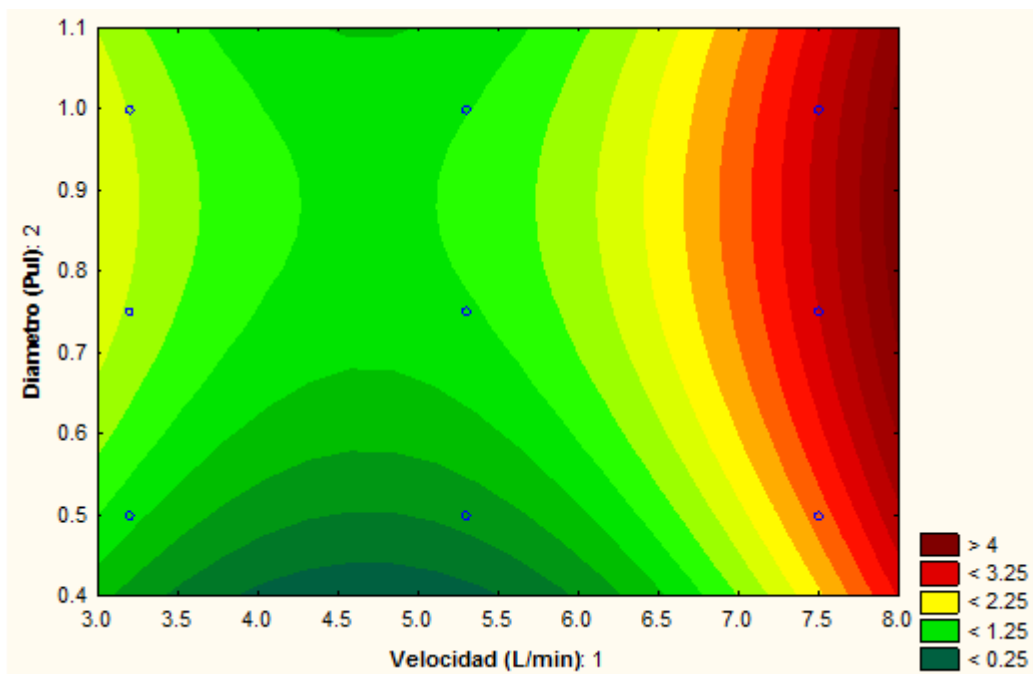


Figura 56. Contorno de Respuesta para la generación de microburbujas en relación al diámetro y velocidad

En la Figura 57 muestra la superficie de respuesta sobre la interacción de la velocidad y el tiempo de las microburbujas (μm), la combinación de velocidad (4.5 l/min) y tiempo (30 min) muestra que obtendremos resultados de microburbujas de tamaños menores a ($0.5 \mu\text{m}$) los cuales se encuentran en la región verde oscuro, además es posible encontrar una optimización en la región que abarca la relación del tiempo de (35 min) con una velocidad (5.0 l/min) donde se pueden obtener microburbujas de menor tamaño alcanzando la unidad de medida (nm), estos resultados se confirman al analizar los resultados de la tesis de Gonzales (2018), donde indica que el tamaño de las burbujas es directamente influenciado por el tiempo de inyección de oxígeno al medio, por lo que nuestros resultados confirma la eficiencia de las recomendaciones dadas por Muñoz (2017) donde indica que se debe de considerar tiempos mayores a 10 minutos, para lograr mejores resultados de microburbujas. Por su parte, Sánchez (2017) afirma que no es prudente aumentar la velocidad del fluido, debido a que esto podría ocasionar un efecto de coalescencia entre las microburbujas que se encuentran cercanas, trayendo como resultado un diámetro de microburbujas mucho mayor.

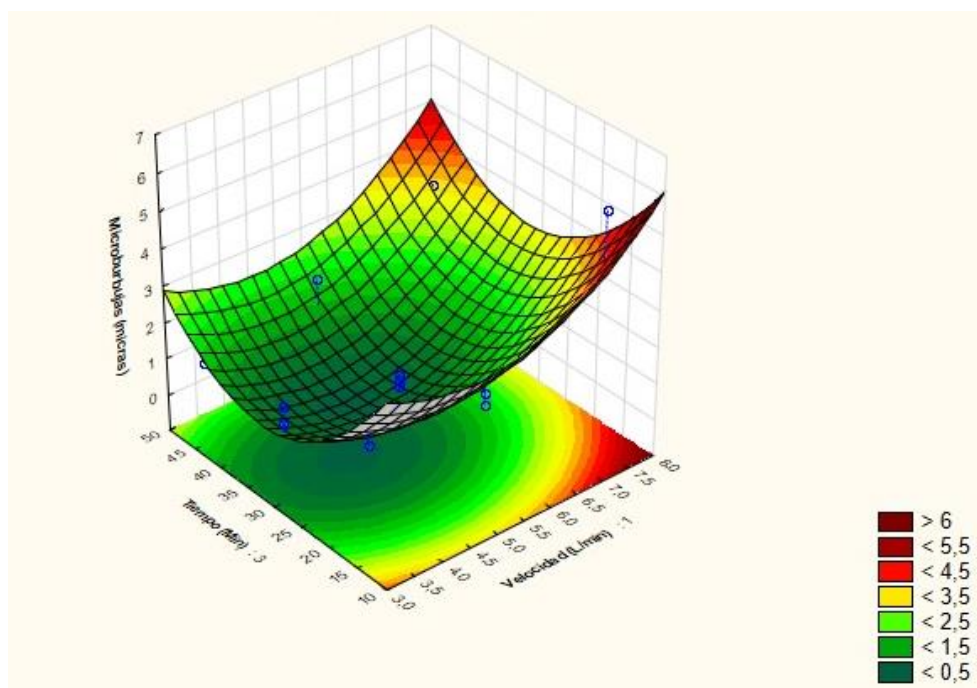


Figura 57. Superficie de Respuesta de la relación de las microburbujas con el tiempo y la velocidad

En la Figura 58 se puede visualizar la superficie de respuesta sobre la relación entre las microburbujas (μm), tiempo (min) y el diámetro (pul), donde se puede apreciar el tiempo es el factor más influyente con respecto a la generación de las microburbujas, dado que para obtener microburbujas menores a $0.25 \mu\text{m}$ es favorable trabajar entre 35 y 40 minutos, los cuales se pueden observar en la región verde oscuro. De acuerdo a Muñoz (2017) y Beltrán (2012), mencionan que mientras el diámetro de la tubería sea menor a $0.8(\text{pul})$ y que el tiempo aplicado sea menor a 40 (min), se formarán microburbujas menores a $20\mu\text{m}$ las cuales descenderán de manera lenta logrando incrementar su tiempo de resistencia lo cual le permitirá formar cargas eléctricas y así captar solidos suspendidos.

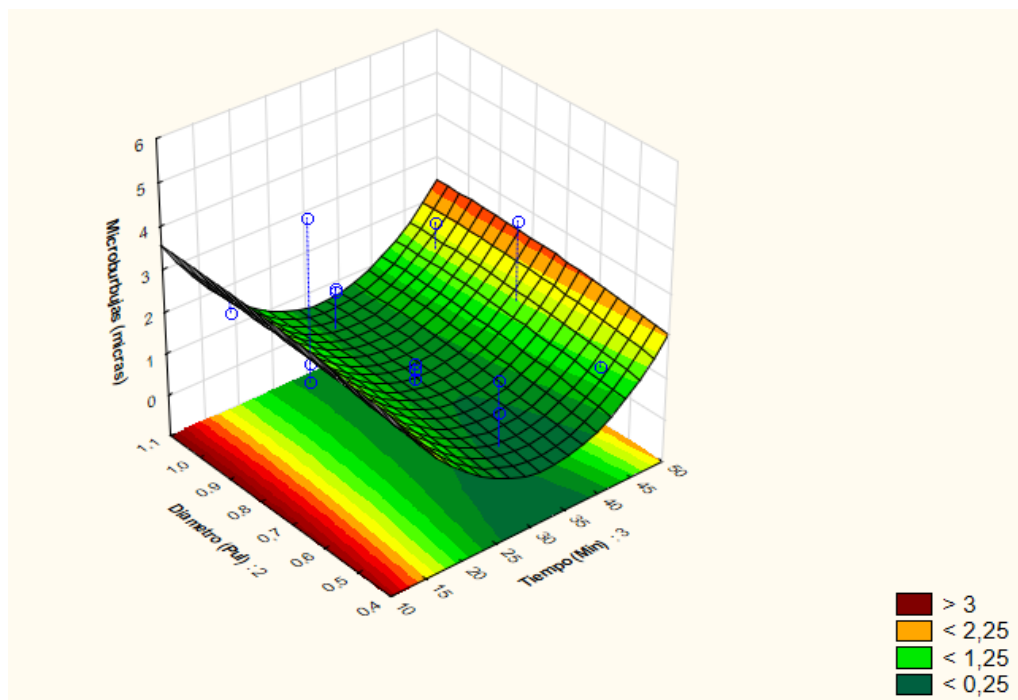


Figura 58. Superficie de Respuesta de la relación de las microburbujas con el diámetro y el tiempo

4.7.2. Resultados de la conductividad

El análisis de la varianza para la remoción de la conductividad ($\mu\text{s}/\text{cm}$) el cual se puede apreciar en la Tabla 29, se logró un coeficiente de determinación (R^2) = 0.73 y coeficiente de determinación ajustado ($R\text{-adj}$) = 0.57 a 95% de nivel de confianza. Las variables con mayor influencia son la velocidad (L y Q), diámetro (Q) aquellos son significativos para la remoción de conductividad. Sin embargo, el diámetro (L) y tiempo (L y Q) no fue significativo ($p=0.13$; 0.64; 0.80) respectivamente.

Tabla 29. Resultados de Anova para la remoción de conductividad

Factores	SS	df	MS	F	p
1 Velocidad (L/min)(L)	220,5000	1	220,5000	52,50000	0,001926
Velocidad (L/min)(Q)	33,1105	1	33,1105	7,88344	0,048428
2 Diámetro (Pul)/(L)	14,6564	1	14,6564	3,48962	0,135135
Diámetro (Pul)/(Q)	76,2306	1	76,2306	18,15015	0,013050
3 Tiempo (Min)/(L)	1,0515	1	1,0515	0,25036	0,643099
Tiempo (Min)/(Q)	0,2886	1	0,2886	0,06871	0,806176
Lack of Fit	104,3376	6	17,3896	4,14038	0,095172
Pure Error	16,8000	4	4,2000		
Total SS	452,1176	16			

$R^2= 0.732$, $R^2\text{-ajustado}= 0.571$, donde SM: Suma de Cuadrados, GL: Grado de

Liberada, CM: Cuadrados medios.

De acuerdo a la Tabla 30, se muestran los resultados con respecto al coeficiente de regresión de la conductividad, para la construcción de los modelos matemático que son predictivos.

Tabla 30. Resultados de coeficiente de regresión para la remoción de conductividad

Factores	Regressn Coeff	Std. Err.	T(7)	p	-95% Cnf. Limt	+95% Cnf. Limt

Mean/Interc.	740.1399	38.70046	19.12483	0.000000	677.577	802.7028
(1)Velocidad (L/min)(L)	-5.0925	5.97210	-0.85272	0.422030	-14.747	4.5619
Velocidad (L/min)(Q)	0.6200	0.45400	1.36564	0.214311	-0.114	1.3539
(2)Diametro (Pul)(L)	104.4101	70.16726	1.48802	0.180348	-9.022	217.8420
Diametro (Pul)(Q)	-72.1574	35.69640	-2.02142	0.082956	-129.864	-14.4509
(3)Tiempo (Min)(L)	0.1289	0.96817	0.13317	0.897806	-1.436	1.6941
Tiempo (Min)(Q)	-0.0012	0.00918	-0.12665	0.902777	-0.016	0.0137
1L by 2L	1.8384	3.78931	0.48516	0.642379	-4.287	7.9642
1L by 3L	-0.0159	0.06315	-0.25255	0.807868	-0.118	0.0861
2L by 3L	0.0010	0.73783	0.00132	0.998986	-1.192	1.1937

El diagrama de Pareto se puede visualizar en la Figura 59, el cual detalla de manera gráfica que el factor más influyente en la remoción de conductividad fue la velocidad (L).

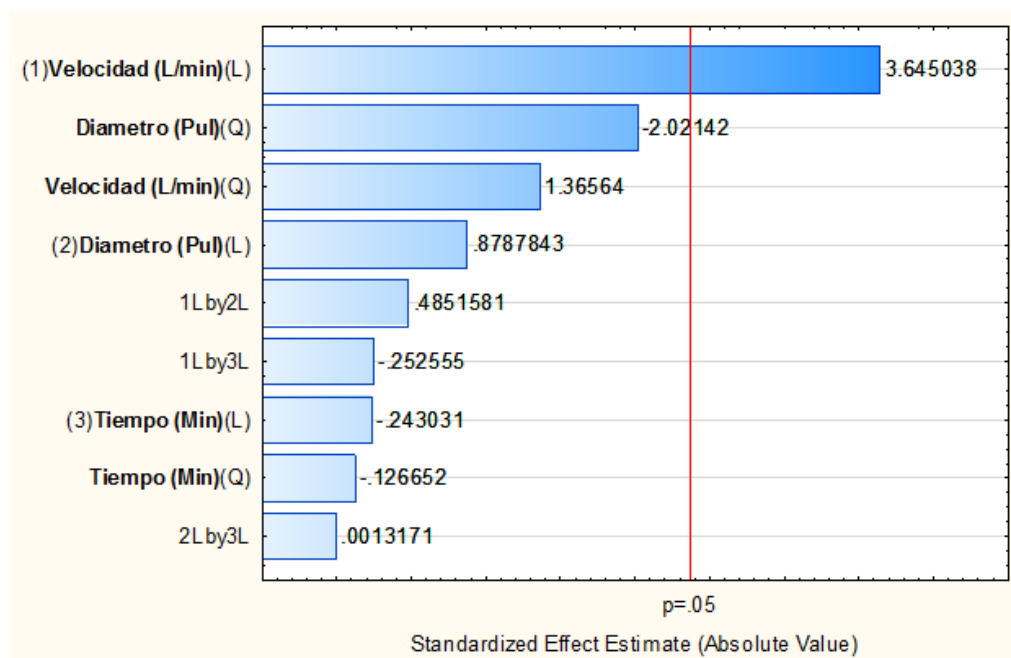


Figura 59. Diagrama de Pareto en la remoción de conductividad

En la Figura 60 se puede visualizar la superficie de respuesta sobre la relación entre la conductividad ($\mu\text{s/cm}$), el tiempo(min) y la velocidad (mg/l), donde se puede observar que la velocidad es un factor que influye de manera directa en la conductividad al igual que el tiempo, mediante la cual se puede evidenciar que mientras la velocidad sea menor a 5.3 l/min, generará valores menores a 773 ($\mu\text{s/cm}$) de conductividad, no obstante es importante mencionar que para este parámetro el tiempo es un factor que pasa desapercibido mientras

sea mayor a 15 de tratamiento. Esto se debe a que la conductividad se genera debido a los iones producidos por compuestos inorgánicos (minerales) presentes en el agua como indica Gonzales (2018), los cuales son atrapados debido a la carga eléctrica presente en las microburbujas las cuales al coalescer o decantar disminuyen en cierta manera la conductividad presente en el agua tratada.

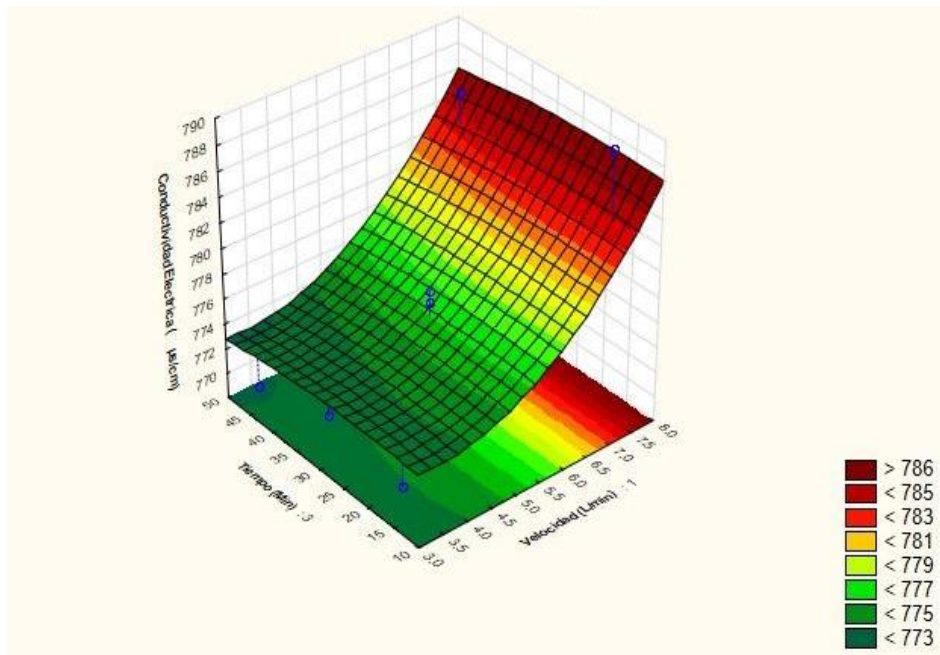


Figura 60. Superficie de Respuesta de la relación de la conductividad con el tiempo y la velocidad

En la Figura 61, se puede visualizar la superficie de respuesta sobre la interacción entre la conductividad, el diámetro de la tubería y la velocidad (l/min), la combinación de diámetro menores a 0.5 (pul) y velocidades menores a 5.3 (l/min) muestra que se obtendremos resultados menores a 763 ($\mu\text{s}/\text{cm}$) de conductividad, los cuales se encuentran en la región de color verde oscuro. De acuerdo a Muñoz (2017), mientras el diámetro de la tubería sea menor a 1(pul), la presión será menor por ende la velocidad aumentará, creando así gran cantidad de microburbujas, estas a su vez tendrán la capacidad de adherirse a los sólidos contaminantes y minerales presentes como la conductividad. Por su parte (Ueda et al., 2015), indican que la

generación de microburbujas generan iones los cuales atraen a los minerales, para finalmente con los efectos de la coalescencia y decantación facilitan la disminución de conductividad.

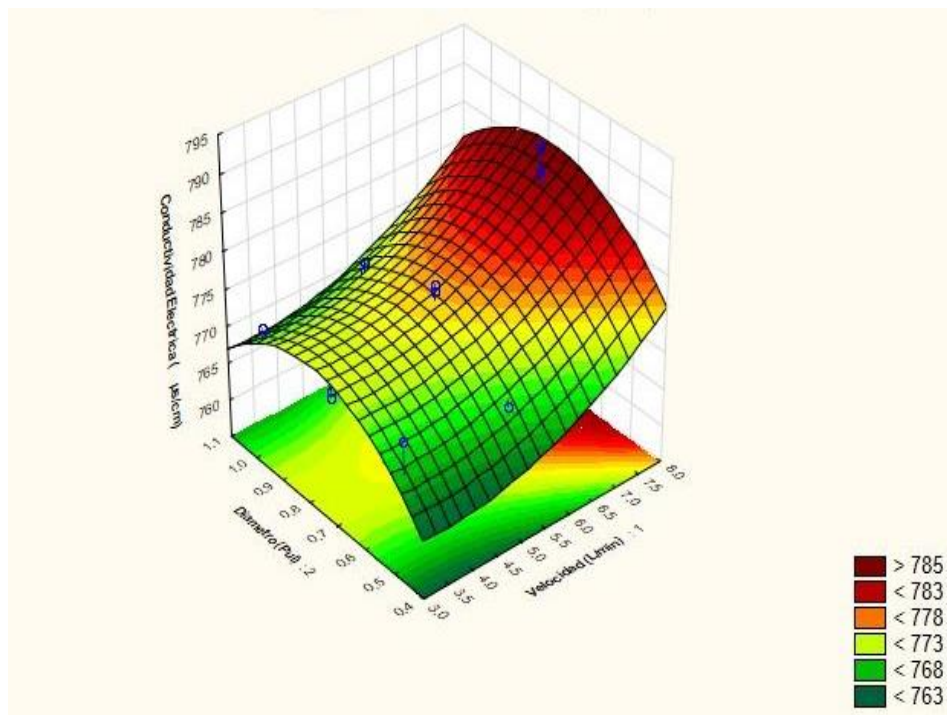


Figura 61. Superficie de respuesta de la relación de la conductividad el diámetro y velocidad

En la figura 62 se visualiza la superficie de respuesta de la relación entre la conductividad, el tiempo y el diámetro de la tubería. Para la disminución de conductividad, el factor de mayor influencia es el diámetro, el cual a diferencia del tiempo genera una disminución de la conductividad cuando se trabaja con diámetro menor a 0.5 pulgadas, tal como se puede observar en la región de color verde oscuro. Gonzales (2018) explica que la conductividad del agua se debe a la presencia de iones en su mayoría de compuestos inorgánicos (minerales), los cuales son capturados por las microburbujas por las cargas negativas que se forma alrededor de cada microburbuja y disminuyen debido a la coalescencia o decantación, este efecto se produce desde que las microburbujas ingresan al agua a tratar (Tiempo 0), y se mantienen constante durante todo el periodo de tratamiento;

por su lado Muñoz (2017) expresa que mientras el diámetro de la tubería que conduce el fluido es menor a 1 pulgada, generará microburbujas de menor tamaño (<20 μm) las cuales capturarán a las partículas coloidales presentes en el agua y los minerales que influyen de manera directa en la conductividad, reduciendo de esta manera la conductividad eléctrica.

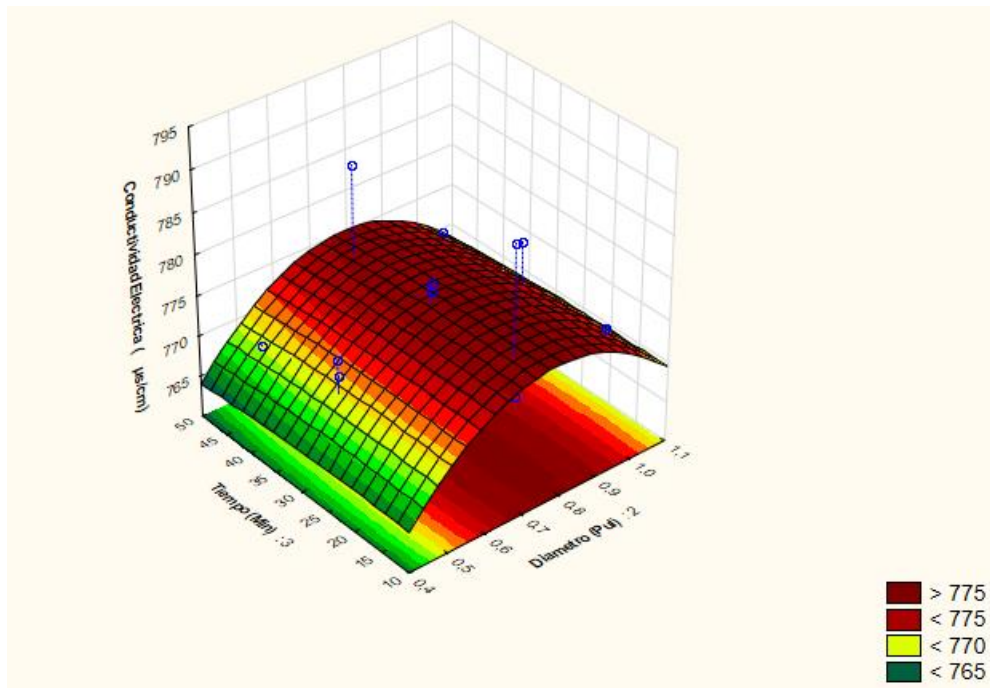


Figura 62. Superficie de respuesta de la relación de la conductividad, tiempo y diámetro

4.7.3. Resultados de la turbidez

En la Tabla 31, se detallan los resultados de Anova con respecto a la remoción de la turbidez, donde se logró obtener un coeficiente de determinación (R^2) = 0.73 y coeficiente de determinación ajustado ($R\text{-adj}$) = 0.57 a 95% de nivel de confianza, los factores principales como la velocidad (L y Q) y tiempo (Q) son significativos en la reducción de turbidez; sin embargo, el diámetro (L y Q) y tiempo (L) no fueron significativos (p = 0.34; 0.37; 0.34) respectivamente.

Tabla 31. Resultados de Anova para la remoción de la turbidez

Factor	SS	df	MS	F	p
1 Velocidad (L/min)(L)	41,4050	1	41,4050	9,49003	0,036910
Velocidad (L/min)(Q)	143,4513	1	143,4513	32,87906	0,004582
2 Diametro (Pul)/(L)	4,8784	1	4,8784	1,11814	0,349951
Diametro (Pul)/(Q)	4,4390	1	4,4390	1,01741	0,370195
3 Tiempo (Min)/(L)	5,0134	1	5,0134	1,14908	0,344111
Tiempo (Min)/(Q)	205,5599	1	205,5599	47,11436	0,002359
Lack of Fit	45,9383	6	7,6564	1,75484	0,305071
Pure Error	17,4520	4	4,3630		
Total SS	511,2788	16			

R²= 0.732, R²-ajustado= 0.571, donde SM: Suma de Cuadrados, GL: Grado de

Liberada, CM: Cuadrados medios

En la Tabla 32 se puede visualizar el coeficiente de regresión para la remoción de turbidez, muestran que la velocidad (L y Q) y tiempo (L y Q) son significativos estadísticamente a un 95% de nivel de confianza; sin embargo, el diámetro de la tubería (L y Q) no son significativos estadísticamente para (p=0.252 y 0.25) respectivamente.

La siguiente expresión es el modelo matemático generado en cuanto a las regresiones significativas para la remoción de turbidez a factores de velocidad y tiempo.

$$RT = 111.53 - 11.66V + 1.18V^2 - 2.72T + 0.033T^2$$

Donde:

RT: Reducción de turbidez

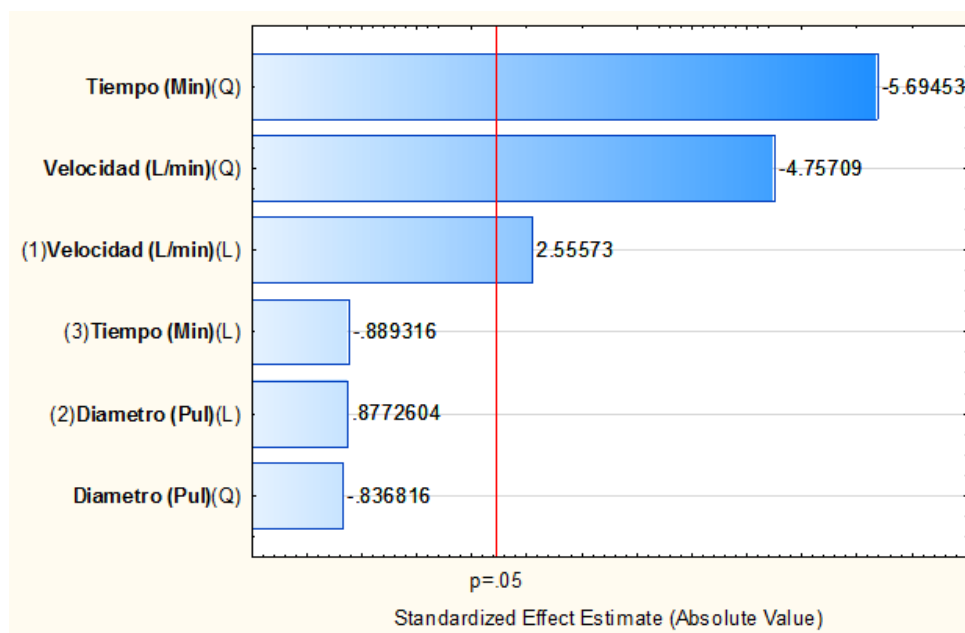
V: Velocidad (L/min)

T: Tiempo (min)

Tabla 32. Resultados de coeficiente de regresión para la reducción de turbidez

Factor	Regress n Coeff	Std. Err.	T(p)	p	-95% Cnf. Limt	+95% Cnf. Limt
Mean/Interc.	111.5313	24.2643 9	4.59650	0.002494	54.155	168.907 4
(1)Velocidad (L/min)(L)	-11.6618	3.74438	-3.11448	0.016974	-20.516	-2.8077
Velocidad (L/min)(Q)	1.1891	0.28465	4.17746	0.004150	0.516	1.8622
(2)Diametro (Pul)(L)	-54.9129	43.9934 2	-1.24821	0.252085	-158.941	49.1150
Diametro (Pul)(Q)	28.0282	22.3809 0	1.25233	0.250669	-24.894	80.9506
(3)Tiempo (Min)(L)	-2.7261	0.60702	-4.49092	0.002829	-4.161	-1.2907
Tiempo (Min)(Q)	0.0333	0.00576	5.79182	0.000669	0.020	0.0470
1L by 2L	-1.0856	2.37582	-0.45693	0.661561	-6.704	4.5323
1L by 3L	0.0270	0.03960	0.68237	0.516944	-0.067	0.1206
2L by 3L	0.6614	0.46260	1.42967	0.195886	-0.433	1.7552

En la figura 63, se observa el diagrama de Pareto, en donde se muestra de manera gráfica los factores significativos más importantes en la remoción de turbidez, como el tiempo (Q) y la velocidad (L y Q).

**Figura 63.** Diagrama de Pareto con respecto a la remoción de turbidez

En la Figura 64 se puede visualizar en la superficie de respuesta la interacción de la turbidez, diámetro y tiempo; donde se puede observar que el factor más influyente es el

tiempo a diferencia del diámetro de la tubería y podemos resaltar que a los 30 (min) se obtendrá resultados menores a 21 (UNT) de turbidez; todo esto se justifica con la investigación realizada por (Tekile et al., 2016) en la que explica que las partículas tanto disueltas como suspendidas contribuyen significativamente a la turbidez, de esta manera disminuirá la actividad hidrodinámica y por consecuente se impedirá el paso de moléculas de gas (oxígeno) en el medio; por lo que se recomienda que exista un mayor tiempo de inyección de oxígeno para que la barrera de paso de oxígeno generada por la turbidez no afecte en la oxigenación del medio.

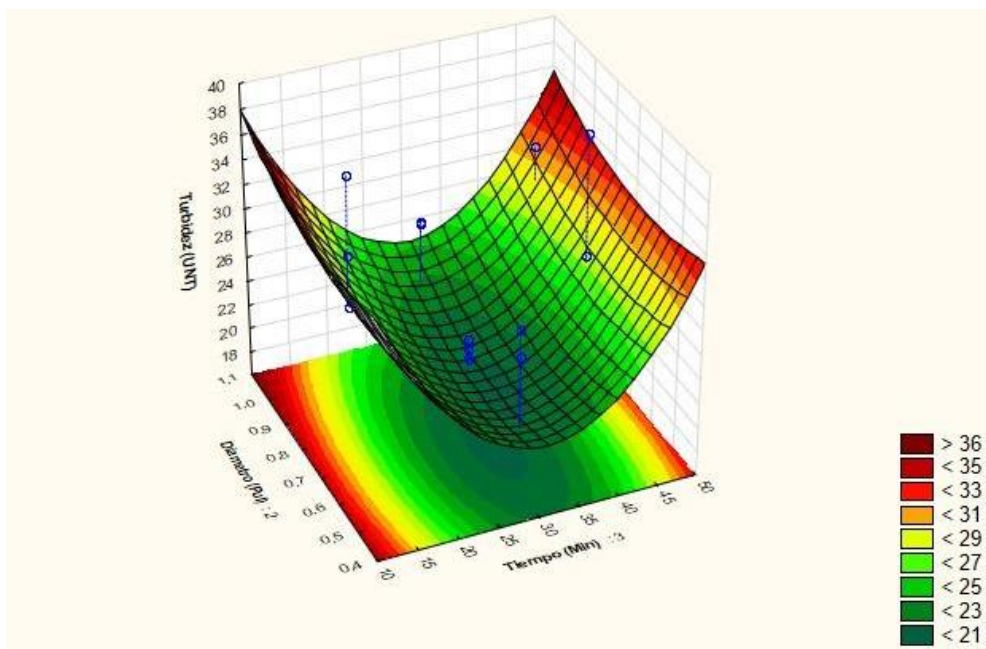


Figura 64. Superficie de Respuesta en relación de la Turbidez con el diámetro y el tiempo

En la Figura 65 se puede visualizar en la superficie de respuesta la interacción de la turbidez, tiempo y velocidad, donde se evidencia que el tiempo y la velocidad son los factores más influyentes con respecto a la turbidez, al considerar un tiempo de 30 minutos con una velocidad de 5(L/min) se lograra obtener valores menores a 21 UNT. De acuerdo a los estudios realizados por Torres (2015), se pudo evidenciar que la turbidez del agua a tratar disminuye cuando las microburbujas de oxígeno se encuentran en contacto con el agua a

tratar por un tiempo mayor a 20 minutos y menor a 40 minutos, esto se debe a que posterior al tiempo indicado se produce un efecto estacionario en cuanto a la disminución de turbidez; de igual manera Muñoz, (2017) indica que cuando la velocidad del fluido incrementa debido a la disminución del diámetro de la tubería se logra generar una gran cantidad de burbujas y microburbujas las cuales al coalescer atrapan las partículas coloidales presentes en el medio logrando de esta manera disminuir la turbidez.

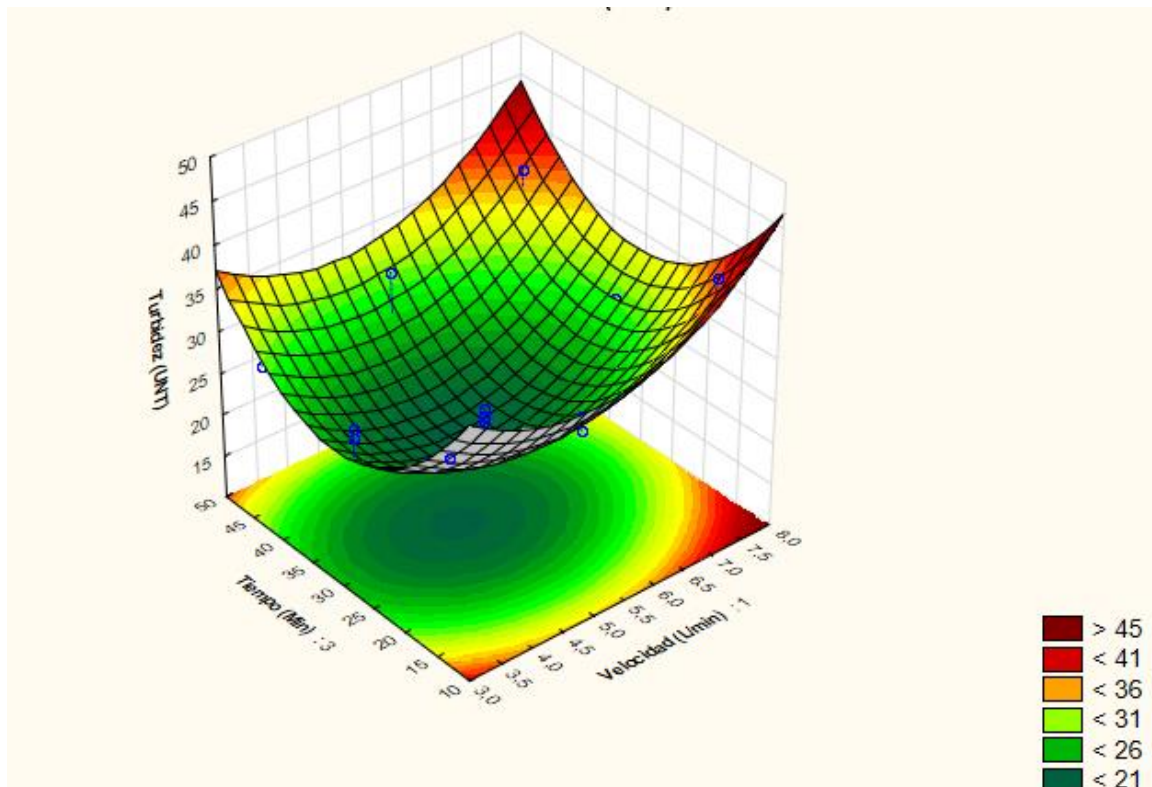


Figura 65. Superficie de Respuesta en relación de la Turbidez con el tiempo y la velocidad

En la Figura 66 se puede visualizar la superficie de respuesta entre la interacción de la turbidez, diámetro y velocidad. Ambos factores influyen con respecto a la turbidez, si se utiliza un diámetro entre 0.5 y 0.7 (pulgadas) con una velocidad de 5.0 (L/min) se obtendrán valores menores a 21 UNT de turbidez, tal como se puede apreciar en la región de color verde oscuro. De acuerdo a Muñoz (2017), mientras el diámetro de la tubería sea menor a 1(pul), la

presión será menor por ende la velocidad aumentará. Al ocasionar este efecto generaran una gran cantidad de microburbujas y el diámetro de estas será menor, por consiguiente, tendrán la capacidad de adherirse a los solidos contaminantes como la turbidez.

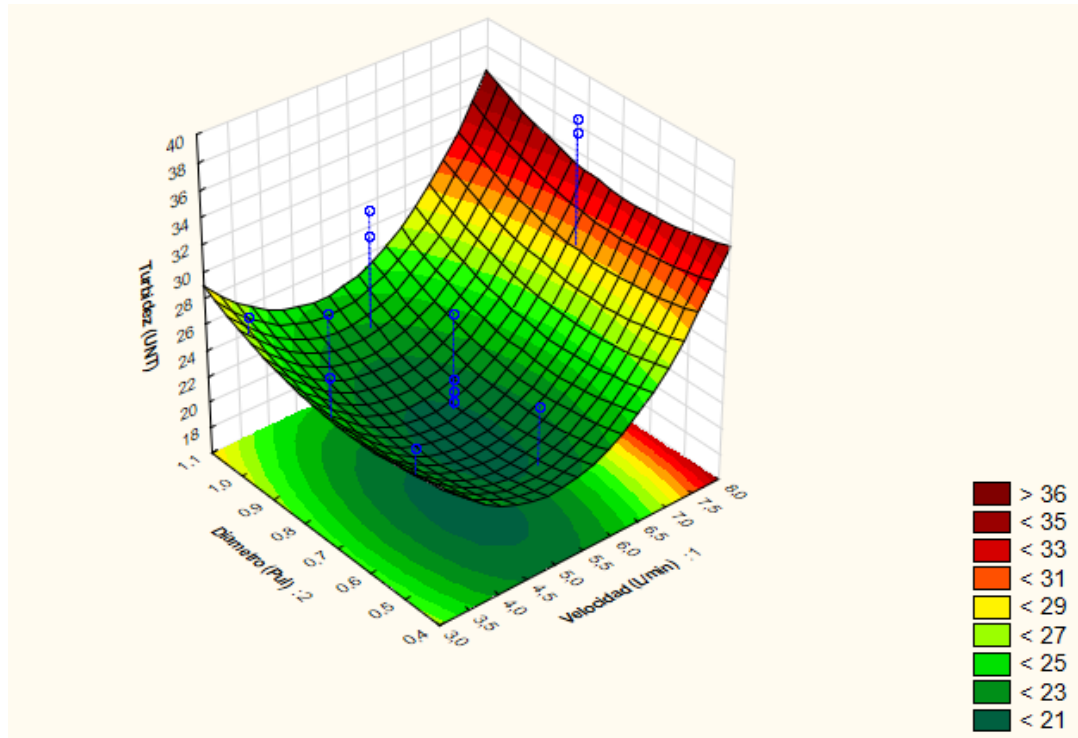


Figura 66. Superficie de Respuesta en relación de la Turbidez con el diámetro y la velocidad

CAPITULO V. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.

4.1. Conclusiones

Se logro evaluar la eficiencia del sistema Venturi de Microburbujeo de Oxigeno mediante el diseño experimental de Box Behnken. La construcción y diseño del sistema Venturi de microburbujeo de oxígeno demostró ser muy eficiente en la remoción de materia orgánica y parámetros microbiológicos.

Los niveles y factores significativos en la generación de microburbujas de menor tamaño generados al utilizar el sistema Venturi para la inyección de oxígeno son las variables centrales del diseño experimental de superficie de respuesta, obteniendo como resultado que las variables de mayor influencia para la generación de microburbujas son la velocidad (5.3 l/min) y el tiempo (30 min), a diferencia del diámetro de la tubería, el cual no fue significativo en la generación de microburbujas.

Al comparar los efectos del diámetro de tubería, velocidad de fluido y tiempo de contacto de cada tratamiento, se pudo demostrar que el tratamiento 15 del sistema Venturi de microburbujeo de oxígeno fue el óptimo, debido a que alcanzó una eficiencia del 99% en la remoción de coliformes termotolerantes y Escherichia Coli, esto se debe a que se redujo de $1.1 \cdot 10^6$ NMP/100ml a 1.8 NMP/100ml de ambos parámetros, de igual manera se alcanzó una eficiencia del 63.05 % en la remoción de turbidez, transformando una turbiedad de 40.6 NTU a 18 NTU; además disminuyó la DQO de 41mg/l a 24 mg/l, obteniendo una eficiencia del 41.46%; asimismo redujo la DBO5 de 21mg/l a 10 mg/l, consiguiendo una eficiencia del 52.38%; es necesario resaltar que las eficiencias anteriormente detalladas se alcanzaron a los 30 minutos de tratamiento.

De acuerdo al diseño estadístico Box Behnken, podemos concluir que se pueden obtener microburbujas menores a $0.25 \mu\text{m}$ si se trabaja a velocidades menores a 5.5 l/min y con un tiempo mayor a 30 minutos.

4.2. Recomendaciones

- Se recomienda realizar una próxima investigación en la que se incremente un tratamiento terciario para de esta manera evaluar su eficiencia de remoción de contaminantes de acuerdo con el ECA categoría I (Consumo humano).
- Recomendamos ejecutar investigaciones aplicando únicamente nano-burbujas de aire y ozono considerando las velocidades entre 4 y 5.5 l/min y tiempos de 30 minutos a más para estimar la eficiencia en la disminución de la DQO y DBO.
- Ejecutar estudios aplicando otros métodos de generación micro – nano burbujas como las cerámicas, esponjas, etc., y su efecto de remoción de contaminantes presentes en el agua.
- Se sugiere llevar a cabo investigaciones de la varianza eficiencia de las micro y nano-burbujas en el tratamiento de agua residual en distintas regiones para evaluar su efectividad con respecto a la temperatura, presión atmosférica y diversos factores que se presentan en el medio.

REFERENCIAS

- Agurto, E. (2012). *Mejoras en el tratamiento de agua de inyección para campos maduros de petróleo de usando microburbujas de gas natural*. Universidad Nacional de Ingeniería.
- ANA. La Importancia de la Gestión del Agua en el Perú (2015). Perú.
- ANA. Protocolo Nacional para el Monitoreo de la Calidad de los Recursos Hídricos Superficiales, Pub. L. No. R.J. N° 010-2016-ANA, 1 (2016). Perú.
- Anda, L. (2015). La temperatura de los ríos. Retrieved from <https://www.europapress.es/andalucia/noticia-temperatura-rios-sierra-nevada-aumentado-cambio-climatico-estudio-20141003122420.html>
- Antolínez, M. (2016). Principios de la ecuación de Bernoulli, aplicaciones y esquema del montaje experimental. Retrieved February 18, 2021, from https://www.academia.edu/34673817/Principios_de_la_ecuación_de_Bernoulli_aplicaciones_y_esquema_del_montaje_experimental
- Aravena, M., Caamaño, C., & Giménez, J. (2008). Modelos matemáticos a través de proyectos. *Revista Latinoamericana de Investigación En Matemática Educativa*, 11(1665–2436), 49–92. Retrieved from <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=335111103>
- Ayers, R. (1994). Calidad del agua para la agricultura. Retrieved March 1, 2021, from <http://www.fao.org/3/T0234E/T0234E00.htm#TOC>
- Ayres Rachel, & Duncan Mara. (1996). Analysis of Wastewater for Use in Agriculture - A Laboratory Manual of Parasitological and Bacteriological Techniques. *Department of Civil Engineering*, 1–35. Retrieved from https://www.who.int/water_sanitation_health/wastewater/labmanual.pdf?ua=1
- Beltrán, C., & Jacinto, N. (2012). Aplicación de microburbujas en la flotación de lodos de tratamiento de aguas ácidas de mina Parte I: neutralización y floculación. *Revista Metalúrgica*, 31–38.
- Box, G., & Behnken, D. (1960). Some new three level designs for the study of quantitative variables, 2(4), 455–475.
- Carpio, T. (2007). *Turbiedad Por Nefelometría (Metodo B)*. Instituto de Hidrología,

- Meteorología y Estudios Ambientales*. Colombia. Retrieved from <http://www.ideam.gov.co/documents/14691/38155/Turbiedad+por+Nefelometría..pdf/fc92342e-8bba-4098-9310-56461c6a6dbc>
- Çelik, A., Yaman, H., Turan, S., & Kara, A. (2018). Estándares de Calidad Ambiental de Agua. Retrieved from <http://dx.doi.org/10.1016/j.cirp.2016.06.001><http://dx.doi.org/10.1016/j.powtec.2016.12.055><https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2019.02.006><https://doi.org/10.1016/j.matlet.2019.04.024><https://doi.org/10.1016/j.matlet.2019.127252><http://dx.doi.org/10.1016/j.cirp.2016.06.001>
- CNA. (2007). *MANUAL DE AGUA POTABLE, ALCANTARILLADO Y SANEAMIENTO* (2007th ed.). Mexico. Retrieved from www.cna.gob.mx
- Diaz, S. (2017). *Parámetros Fisicoquímicos y Bacteriológicos del Agua*.
- DIGESA. Clasificación de los cuerpos de agua continentales superficiales (2018). Perú: Ministerio de Agricultura y Riego.
- Duval, E., Adichtchev, S., Sirotkin, S., & Mermet, A. (2012). Long-lived submicrometric bubbles in very diluted alkali halide water solutions. *Physical Chemistry Chemical Physics*, 14(12), 4125–4132. <https://doi.org/10.1039/c2cp22858k>
- Etienne, G. (2009). *Potabilización y Tratamiento de Agua*.
- Fernández, A. (2012). El agua: un recurso esencial. *Química Viva*, 11(3), 147–170.
- Ferreira, S. L. C., Bruns, R. E., Ferreira, H. S., Matos, G. D., David, J. M., Brandão, G. C., ... dos Santos, W. N. L. (2007). Box-Behnken design: An alternative for the optimization of analytical methods. *Analytica Chimica Acta*, 597(2), 179–186. <https://doi.org/10.1016/j.aca.2007.07.011>
- Forero, J., Diaz, J., & Blandon, V. (1999). Diseño de un nuevo sistema de flotación para tratamiento de aguas industriales. *CT y F - Ciencia, Tecnología y Futuro*, 1(5), 67–75.
- Gonzales, E. (2018). *MICROBURBUJAS DE AIRE PARA EL TRATAMIENTO DEL AGUA RESIDUAL INDUSTRIAL DE LA REFINERÍA LA PAMPILLA*. Universidad Cesar Vallejo.
- Gonzales, G. F., Zevallos, A., Gonzales-Castañeda, C., Nuñez, D., Gastañaga, C., Cabezas,

- C., ... Steenland, K. (2014). Environmental pollution, climate variability and climate change: A review of health impacts on the peruvian population. *Revista Peruana de Medicina Experimental y Salud Publica*, 31(3), 547–556.
<https://doi.org/10.17843/rpmesp.2014.313.94>
- González, F. (2018). *Guía Rápida del Programa ImageJ/Fiji 1,46*. México.
- Gutiérrez, J. (2015). Burbujas nanotecnológicas para recuperar lagos contaminados. Retrieved from <https://es.mongabay.com/2015/11/burbujas-nanotecnologicas-para-recuperar-lagos-contaminados/>
- Hernández, C. (2019). *Efectos de Micro y Nano Burbujas en Tratamientos de Aguas Residuales Domésticas: El caso de Pasca, Cundinamarca*. Universidad de Cundinamarca. Retrieved from <http://repositorio.ucundinamarca.edu.co/handle/20.500.12558/2334>
- Hernandez, J., Espinoza, Y., Malpica, L., & De Jesus, M. (2011). Calidad del agua de riego y parámetros microbiológicos y químicos del suelo de la zona agrícola de Barbacoas , estado Aragua, 37(1), 1–10.
- Khan Academy. (2021). ¿Qué es la ecuación de Bernoulli? Retrieved from <https://es.khanacademy.org/science/physics/fluids/fluid-dynamics/a/what-is-bernoullis-equation>
- Khuntia, S., & Majumder, S. (2012). Microbubble-aided water and wastewater purification : a review. *Rev Chem Eng 2012*, 191–221. <https://doi.org/10.1515/revce-2012-0007>
- Kumar, A., Prasad, B., & Mishra, I. M. (2008). Optimization of process parameters for acrylonitrile removal by a low-cost adsorbent using Box-Behnken design. *Journal of Hazardous Materials*, 150(1), 174–182. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2007.09.043>
- Ley de recursos hídricos N° 29338 (2009). Retrieved from http://www.ana.gob.pe/sites/default/files/publication/files/ley_29338_0.pdf
- Ley general del Ambiente- N° 28611 (2005). Perú: Ministerio del Ambiente.
- Liu, S., Kawagoe, Y., Makino, Y., & Oshita, S. (2013). Effects of nanobubbles on the physicochemical properties of water : The basis for peculiar properties of water containing nanobubbles. *Chemical Engineering Science*, 93, 250–256.
<https://doi.org/10.1016/j.ces.2013.02.004>

- Lluís, J., Oró, J., Tormo, V., Cinta, M., González, S., & Hernández, C. (2016). *Guía técnica de recomendaciones para el reciclaje de aguas grises en edificios*. Retrieved from https://aquaespana.org/sites/default/files/documents/files/Guia.tecnica_grises.pdf
- Macassi, G. (2017). *Comportamiento del sistema de nanoburbujeo en el tratamiento para reducir los niveles de contaminación de aguas residuales domésticas de la provincia de Concepción*. Universidad Nacional Del Centro Del Perú. Retrieved from http://repositorio.uncp.edu.pe/bitstream/handle/UNCP/3358/Solano_Ccanto_opt.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- Martín, A. (2011). *Mecánica de Fluidos. Revista de Ciência Elementar* (Vol. 6). California. <https://doi.org/10.24927/rce2018.071>
- Marui, T. (2013). An Introduction to Micro / ano-Bubbles and their Applications, *11*(4), 68–72.
- Medina, E., Mancilla, O., Larios, M., Guevara, R., Olguín, J., & Barreto, O. (2016). Calidad del agua para riego y suelos agrícolas en Tuxcacuesco , Jalisco Quality water for irrigation and agricultural land in Tuxcacuesco , Jalisco. *Idesia*, *34*(6), 51–60.
- Metcalf, Eddy, & Inc. (1995). *Ingeniería de Aguas Residuales; Tratamiento, vertido y Reutilización*. (A. García, Ed.). Madrid.
- Milla, O. (2002). *Niveles de Colinesterasa sérica en agricultores de la localidad de Carapongo (Perú) y determinación de residuos de plaguicidas inhibidores de la acetilcolinesterasa en frutas y hortalizas cultivadas*. Universidad Nacional Mayor de San Marcos.
- MINAM. (2017). Estandares de Calidad Ambiental (ECA) para Agua. *El Peruano*, 6–9. Retrieved from <http://www.minam.gob.pe/wp-content/uploads/2017/06/DS-004-2017-MINAM.pdf>
- Modon, A. (2017). Teoría de mecánica de los fluidos apuntes. *Universidad Nacional de Cuyo*, *1*, 42. Retrieved from <http://ingenieria.uncuyo.edu.ar/catedras/apuntes-teoricos-de-mecanica-de-los-fluidos-rev9-doc-prot.pdf>
- Muñoz, C. (2017). *PROPUESTA DE UN SISTEMA DE SEPARACIÓN CRUDO-AGUA POR LA TÉCNICA DE FLOTACIÓN POR INYECCIÓN DE GAS*. Universidad del Cauca.
- Novaes, C., Yamaki, R., De Paula, V., Baraquizio, J., Barreto, J., Valasques, G., & Bezerra,

- M. (2017). Otimização de métodos analíticos usando metodologia de superficies de resposta -parte I: variáveis de proceso. *Revista Virtual de Química*, 9(3), 1184–1215. <https://doi.org/10.21577/1984-6835.20170070>
- Núñez, T. (2014). *Tratamiento de aguas residuales de una Embotelladora de Bebidas Carbonatadas aplicando nanoburbujas de aire*. Universidad César Vallejo.
- OEFA. Fiscalización ambiental en Aguas Residuales (2014). Perú: www.oefa.gob.pe.
- OMS. (2006). Guías para la calidad del agua potable. In *Guía para la calidad del agua* (Vol. 1, pp. 104–108).
- Orellana, J. (2005). *Tratamiento de las aguas*.
- Pareja, S. (2012). Marino Morikawa, El defensor del sitio que a nadie le importo cuidar porque no se parece a una laguna azul. Retrieved from <http://etiquetanegra.com.pe/articulos/marino-morikawa-el-defensor-del-sitio-que-a-nadie-le-importa-cuidar%0A>
- Pérez, C. (2009). Procesamiento e interpretación de imágenes en micro-flujos bacterianos, 33.
- Pérez, L. (2002). Ecuaciones de Continuidad, (Cd), 1–8. Retrieved from <http://www.fadu.uba.ar/>
- Potter, M., David, W., & Ramadan, B. (2014). *Mecánica de Fluido* (cuarta edi). Mexico: Cosegraf.
- Producción, M. de la. Plan Nacional de Desarrollo Acuícola (2009). Perú.
- Raffo, E., & Ruiz, E. (2014). Caracterización de las aguas residuales y la demanda bioquímica de oxígeno. *Facultad de Ingeniería Industrial*, 17(22), 71–77. <https://doi.org/10.1021/ja00334a047>
- Ramallo, R. (1996). *Tratamiento de Aguas Residuales*. Barcelona: Editorial Reverté, S.A.
- Romero, J. (2016). *Tratamiento de Aguas Residuales: Teoría y principios de diseño*. Colombia: Ediciones S.A.
- Sancha, A. M., Castillo, G., Espinoza, C., Mena, M. P., Cornejo, J., Rivas, H., ... Valenzuela, J. (2005). Criterios de calidad de aguas o efluentes tratados para uso en riego. *Universidad de Chile*, 252. Retrieved from <http://bibliotecadigital.ciren.cl/handle/123456789/31537%0Ahttp://biblioteca->

digital.sag.gob.cl/documentos/medio_ambiente/criterios_calidad_suelos_aguas_agricolas/pdf_aguas/informe_final.pdf

- Sánchez, E. (2017). *Producción masiva de de microburbujas Superior de Ingeniería monodispersas para aplicaciones reales evitando la microfluídica*. Universidad de Sevilla.
- Sánchez, R., Mora, C., Barbosa, L., & Ensastiga, L. (2013). Tratado epistemológico del Principio de Bernoulli para estudiantes de ingeniería. *Revista Latinoamericana de Física Educativa ISSN 1870-9095*, 7(December), 561.
- Senamhi. (2018). Boletín Hidrometeorológico de la Dirección Zonal 4.
- Sigler, A., & Bauder, J. (2014). Alcalinidad , pH , y Sólidos Disueltos Totales. *Northern Plains & Mountains*, 8. Retrieved from http://region8water.colostate.edu/PDFs/we_espanol/Alkalinity_pH_TDS_2012-11-15-SP.pdf
- Siqueiros, A. (2004). *Aplicación de la metodología de superficies de respuesta para el mejoramiento de la calidad del aceite de soya*. Universidad de Sonora. Retrieved from <http://lic.mat.uson.mx/tesis/122TesisAlejandraSiq.PDF>
- Sjogreen, C. (2015). *Caracterización de nanoburbujas en soluciones salinas*. Universidad Nacional de Colombia. Retrieved from <http://www.bdigital.unal.edu.co/52247/>
- Soderberg, C. (2016). Guías de EPA-2012 para la Reutilización de Aguas Residuales para la Agricultura. In *Perspectivas en Asuntos Ambientales* (Vol. 5, pp. 13–21).
- Solís-Castro, Y., Zúñiga-Zúñiga, L. A., & Mora-Alvarado, D. (2018). La conductividad como parámetro predictivo de la dureza del agua en pozos y nacientes de Costa Rica. *Revista Tecnología En Marcha*, 31(1), 35. <https://doi.org/10.18845/tm.v31i1.3495>
- Tanco, P. (2008). *Metodología para la aplicación del diseño de experimentos (DoE) en la industria*. San Sebastián.
- Tekile, A., Kim, I., & Lee, J. Y. (2016). Extent and persistence of dissolved oxygen enhancement using nanobubbles. *Environmental Engineering Research*, 21(4), 427–435. <https://doi.org/10.4491/eer.2016.028>
- Torres, J. (2015). *Diseño y evaluación de un dispositivo basado en la caída de presión para*

- la aeración sustentable a nivel planta piloto para el tratamiento de agua*. Universidad Autónoma de Nuevo León. Retrieved from <http://eprints.uanl.mx/13714/1/1080238505.pdf>
- Ueda, Y., Tokuda, Y., Nihel, N., Sugiyam, A., & Ogawa, Y. (2015). Electric and electrochemical properties of fine bubble water and analysis of the correlation with applied research, 28, 555–562.
- Vargas Barrantes, P., & Castro Barquero, L. (2018). Aislamiento y evaluación de microorganismos solubilizadores de fósforo de Andisoles de Costa Rica. *Agronomía Costarricense*, 43, 47–68. <https://doi.org/10.15517/rac.v43i1.35649>
- Vargas, K. (2015). *Evaluación de Eichhornia crassipes y Lemna minor en la remoción de parámetros de las aguas residuales domésticas de la quebrada Azungue de la ciudad de Moyobamba*. Universidad Nacional de San Martín.
- Ventura, S. (2017). *Tratamiento de sanguaza de pescado del mercado de Ancón utilizando micronanoburbujas de aire a escala laboratorio*. Universidad Cesar Vallejo.
- Villaverde, M., & Enciso, L. (2017). *Preparémonos ante la ocurrencia de desastres en Carapongo*.
- Vivienda. Norma OS.090 (2009). Ministerio de Vivienda Construcción y Saneamiento. Retrieved from https://www.saludarequipa.gob.pe/desa/archivos/Normas_Legales/saneamiento/OS.090.pdf
- Wang, L., Li, Y., Xiong, Y., Mao, X., Zhang, L., & Xu, J. (2017). Spectroscopic characterization of dissolved organic matter from sludge solubilization treatment by micro-bubble technology. *Ecological Engineering*, 106, 94–100. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2017.05.032>
- Zambrano, N. (2015). *Recolección de Aguas Residuales* (Primera ed). Bogota: Lemoine editores.
- Zimmerman, W. B., Tesař, V., & Bandulasena, H. C. H. (2011). Towards energy efficient nanobubble generation with fluidic oscillation. *Current Opinion in Colloid and Interface Science*, 16(4), 350–356. <https://doi.org/10.1016/j.cocis.2011.01.010>

ANEXOS

Anexo 1. Puntos de muestreo de Agua Residual



Anexo 2. Toma de muestra y cadena de custodia del agua a tratar



Anexo 3. Tanque reservorio de agua residual



Anexo 4. Sistema Venturi de microburbujas



Anexo 5. Aplicación de Microburbujas de Oxígeno al agua residual



Anexo 6. Análisis de parámetros fisicoquímicos



Anexo 7. Resultados del análisis del agua residual sin tratamiento

DELTA LAB S.A.C.

INACAL
DA - Perú
Laboratorio de Ensayo
Acreditado

LABORATORIO DE ENSAYO ACREDITADO POR EL ORGANISMO PERUANO DE ACREDITACIÓN INACAL - DA CON REGISTRO N° LE-077

Registro N° LE-077

Pág. 1/1

INFORME DE ENSAYO N° 1909007

Cliente: **BENJAMIN HILAQUITA CRUZ**
Domicilio legal: Urb. La Alameda de Naña Mz. F Lote: 4, Lurigancho - Lima - Lima.
Producto: Agua Residual
Referencia del cliente: No Indica
Procedencia de las muestras: Muestras enviadas por el cliente indicando lugar de muestreo; 3 tiendas de Carapongo - Lurigancho Chosica, Lurigancho - Lima - Lima.
Referencia del plan de muestreo: No Aplica
Procedimiento de muestreo: No Aplica
Fecha de recepción de las muestras: 2019/09/05
Fecha de inicio del ensayo: 2019/09/05
Fecha de término del ensayo: 2019/09/11

Código de Laboratorio: 1909007-I Estación de Muestreo: M-01 Fecha de Muestreo: 2019/09/04 Hora: 13:30
Tipo de muestra: Agua Residual

Método de Referencia	Ensayo	Límite de Detección del Método	Límite de Cuantificación del Método	Resultado	Unidad
APHA 5210 B	Demanda Bioquímica de Oxígeno	2	8	21	mg/L
APHA 5220 B	Demanda Química de Oxígeno	5	20	41	mg/L
APHA 9221 E-1	Numeración de Coliformes fecales (NMP)	---	1,8	1,1 x 10 ⁶	NMP/100 mL
APHA 9221 F	Numeración de <i>Escherichia coli</i>	---	1,8	1,1 x 10 ⁶	NMP/100 mL

Ensayo: Descripción del Método de Referencia:
Demanda Bioquímica de Oxígeno: SMEWW - APHA-AWWA-WEF Part 5210 B, 23rd Ed. 2017. 5-Day BOD Test.
Demanda Química de Oxígeno: SMEWW - APHA-AWWA-WEF Part 5220 B, 23rd Ed. 2017. Open Reflux Method.
Numeración de Coliformes Fecales (NMP): SMEWW-APHA-AWWA-WEF Part 9221 E-1, 23rd Edition 2017. Multiple - Tube Fermentation Technique for Members of the Coliform Group. Fecal Coliform Procedure. Thermotolerant Coliform Test (EC Medium)
Numeración de *Escherichia coli*: SMEWW-APHA-AWWA-WEF 23rd Edition 2017 Part 9221 G 2 - Multiple-Tube Fermentation Technique for Members of the Coliform Group. Other *Escherichia coli* Procedures (Proposed). *Escherichia coli* Test (Indole Production)

Notas:

- Condición y estado de la muestra ensayada: Las muestras llegaron refrigeradas y preservadas.
- Las muestras llegaron en frascos de polietileno para ensayos fisicoquímicos y frascos esterilizados para ensayos microbiológicos.
- Las muestras se mantendrán por un periodo de 10 días luego entregado el informe de ensayo a excepción de las muestras perecibles.
- Toda corrección o enmienda física al presente informe de ensayo será emitido con la Declaración "Suplemento al informe de Ensayo"
- Estos resultados no deben ser utilizados como certificación de conformidad con normas del producto o como certificado del sistema de calidad de la entidad que lo produce.
- Resultados por debajo del límite de cuantificación del método son referenciales.
- El informe de control de calidad le será proporcionado a su solicitud.

Lima, 11 de setiembre del 2019.

DELTA LAB S.A.C.
EDSON CASTANEDA OSORIO
JEFE DE LABORATORIO DE FÍSICOQUÍMICA

DELTA LAB S.A.C.
JESSICA ANDREA WUKOHATSU
JEFE DE LAB DE MICROBIOLOGÍA Y MICROBIOLOGÍA

DELTA LAB S.A.C.
RAQUEL ROSALES TORRES
SUB GERENTE DE LA CALIDAD
CIP N° 209612

Este informe no podrá ser reproducido total o parcialmente sin la autorización de DELTA LAB S.A.C.
Los resultados presentados corresponden solo a la muestra indicada

Av. Carretera Central Km. 9.3 Mz. "A" Lt. 6 As. Ntra. Sra. de La Merced - Ate - Lima 03 - PERÚ
Telefax: (511) 3560230 Celular: 947148233 Email: servicioalcliente@deltalabsac.com www.deltalabsac.com

Anexo 8. Resultados del análisis del agua residual tratada con el tratamiento optimo

DELTA LAB S.A.C.

LABORATORIO DE ENSAYO ACREDITADO POR EL ORGANISMO PERUANO DE ACREDITACIÓN INACAL - DA CON REGISTRO N° LE-077

INACAL
DA - Perú
Laboratorio de Ensayo
Acreditado
Registro N° LE-077

Pág. 1/1

INFORME DE ENSAYO N° 1909006

Cliente	BENJAMIN HILAQUITA CRUZ
Domicilio legal	Urb. La Alameda de Naña Mz. F. Lote: 4, Lurigancho - Lima - Lima
Producto	Agua Residual
Referencia del cliente	No Indica
Procedencia de las muestras	Muestras enviadas por el cliente indicando lugar de muestreo: Universidad Peruana Unión Lurigancho - Lima - Lima
Referencia del plan de muestreo	No Aplica
Procedimiento de muestreo	No Aplica
Fecha de recepción de las muestras	2019/09/05
Fecha de inicio del ensayo	2019/09/05
Fecha de término del ensayo	2019/09/11

Código de Laboratorio:	Estación de Muestreo: M-02	Fecha de Muestreo: 2019/09/04
1909006-1		Hora: 16:15
		Tipo de muestra: Agua Residual

Método de Referencia	Ensayo	Límite de Detección del Método	Límite de Cuantificación del Método	Resultado	Unidad
APHA 5210 B	Demanda Bioquímica de Oxígeno	2	8	10	mg/L
APHA 5220 B	Demanda Química de Oxígeno	5	20	24	mg/L
APHA 9221 E-1	Numeración de Coliformes fecales	---	1,8	< 1,8	NMP/100 mL
APHA 9221 F	Numeración de <i>Escherichia coli</i>	---	1,8	< 1,8	NMP/100 mL

Ensayo: Descripción del Método de Referencia:

Demanda Bioquímica de Oxígeno: SMEWW - APHA-AWWA-WEF Part. 5210 B, 23rd Ed. 2017. 5-Day BOD Test.

Demanda Química de Oxígeno: SMEWW - APHA-AWWA-WEF Part 5220 B, 23rd Ed. 2017. Open Reflux Method.

Numeración de Coliformes Fecales (NMP): SMEWW-APHA-AWWA-WEF Part 9221 E-1, 23rd Edition 2017. Multiple - Tube Fermentation Technique for Members of the Coliform Group. Fecal Coliform Procedure. Thermotolerant Coliform Test (EC Medium)

Numeración de *Escherichia coli*: SMEWW-APHA-AWWA-WEF 23rd Edition 2017 Part 9221 G.2 - Multiple-Tube Fermentation Technique for Members of the Coliform Group. Other *Escherichia coli* Procedures (Proposed). *Escherichia coli* Test (Indole Production)

Notas:

- Condición y estado de la muestra ensayada: Las muestras llegaron refrigeradas y preservadas
- Las muestras llegaron en frascos de polietileno para ensayos fisicoquímicos y frascos esterilizados para ensayos microbiológicos.
- Las muestras se mantendrán por un periodo de 10 días luego entregado el informe de ensayo a excepción de las muestras perecibles.
- Toda corrección o enmienda física al presente informe de ensayo será emitido con la Declaración "Suplemento al informe de Ensayo"
- Estos resultados no deben ser utilizados como certificación de conformidad con normas del producto o como certificado del sistema de calidad de la entidad que lo produce.
- Resultados por debajo del límite de cuantificación del método son referenciales.
- El informe de control de calidad le será proporcionado a su solicitud.

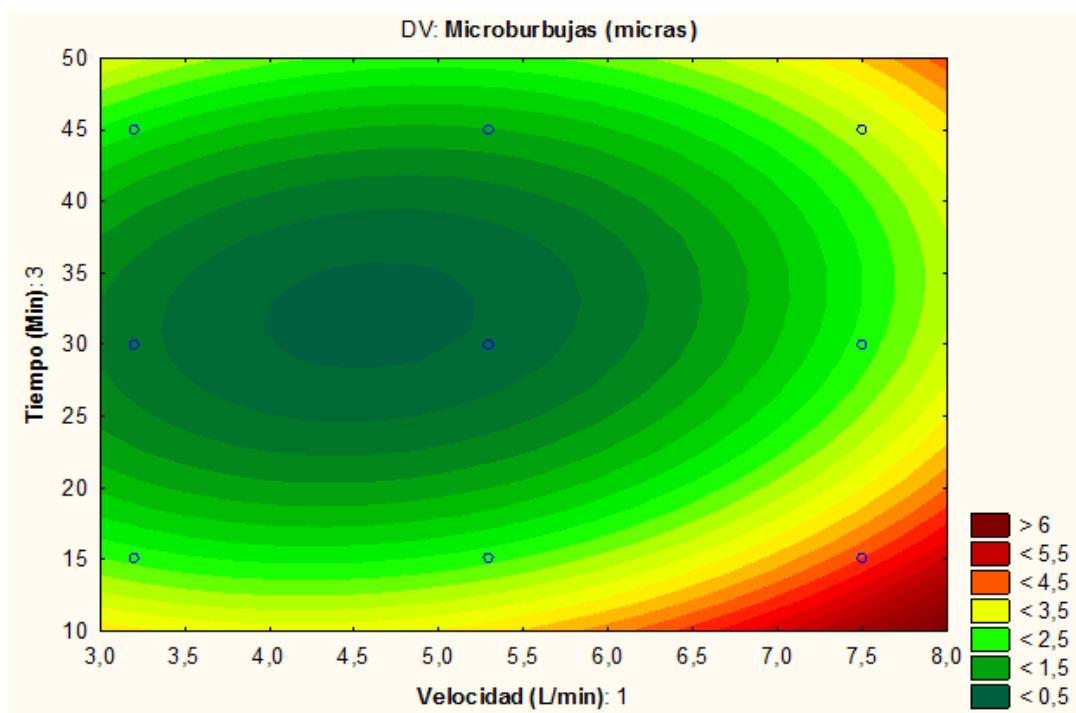
Lima, 11 de setiembre del 2019.

 DELTA LAB S.A.C. EDSON CASTAÑEDA OSORIO JEFE DE LABORATORIO DE FISICOQUIMICA	 DELTA LAB S.A.C. JESSICA ANDREA WUKOHATSU JEFE DE LAB DE HIDROBIOLOGIA Y MICROBIOLOGIA	 DELTA LAB S.A.C. AQUEL ROSALES TORRES SUB GERENTE DE LA CALIDAD CIP N° 209612
--	--	--

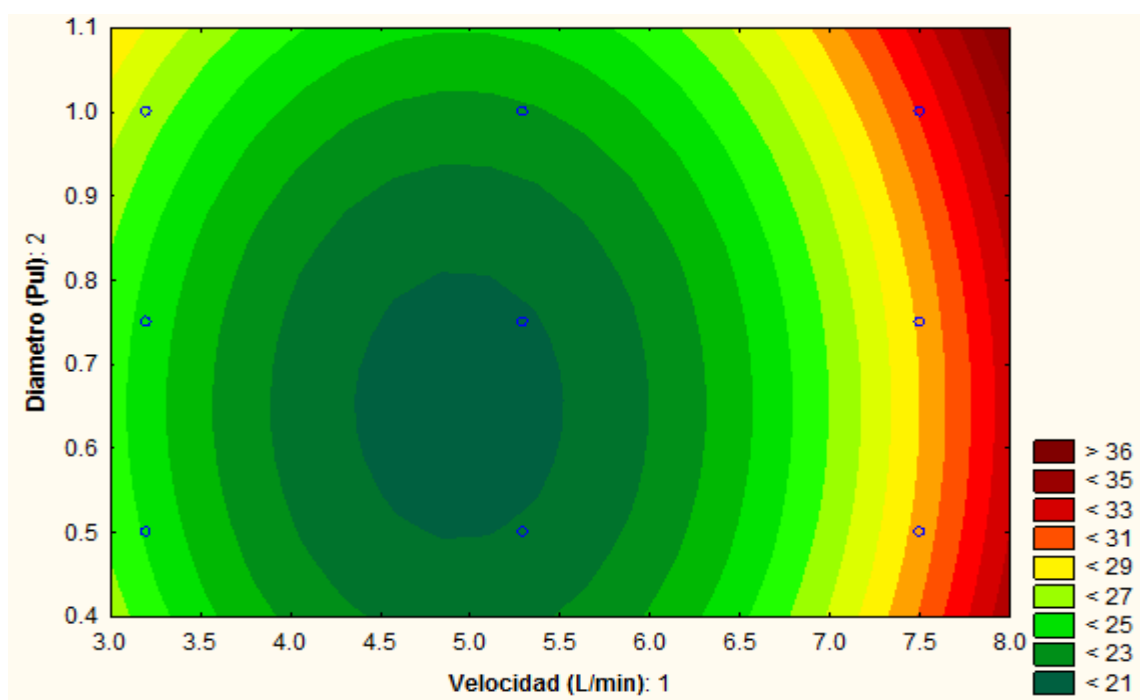
Este informe no podrá ser reproducido total o parcialmente sin la autorización de DELTA LAB S.A.C.
Los resultados presentados corresponden solo a la muestra indicada

Av. Carretera Central Km. 9.3 Mz. "A" Lt. 6 As. Ntra. Sra. de La Merced - Ate - Lima 03 - PERÚ
Telefax: (511) 3560230 Celular: 947148233 Email: servicioalcliente@deltalabsac.com www.deltalabsac.com

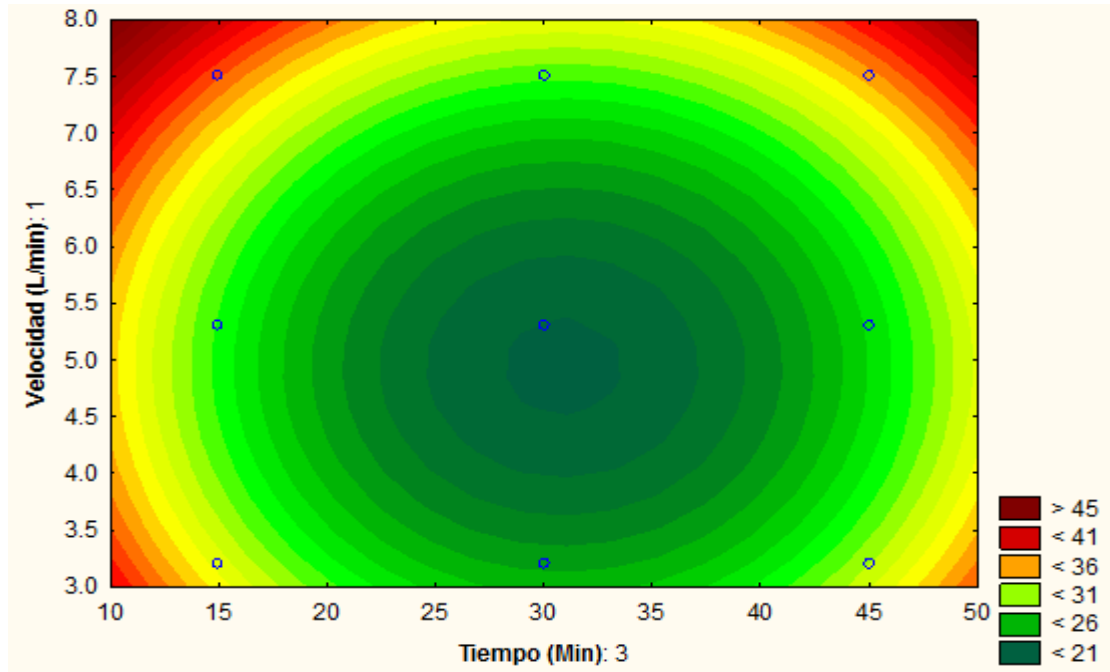
Anexo 9. Contorno de respuesta para la generación de microburbujas en relación a tiempo y velocidad



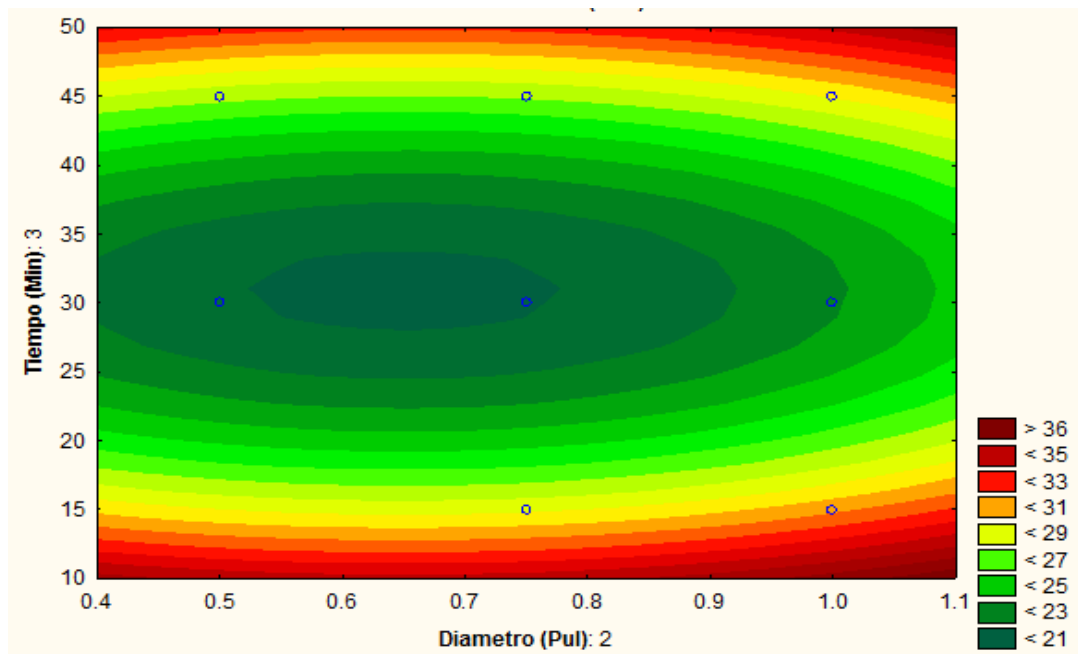
Anexo 10. Contorno de respuesta para la remoción de turbidez en relación a diámetro y velocidad



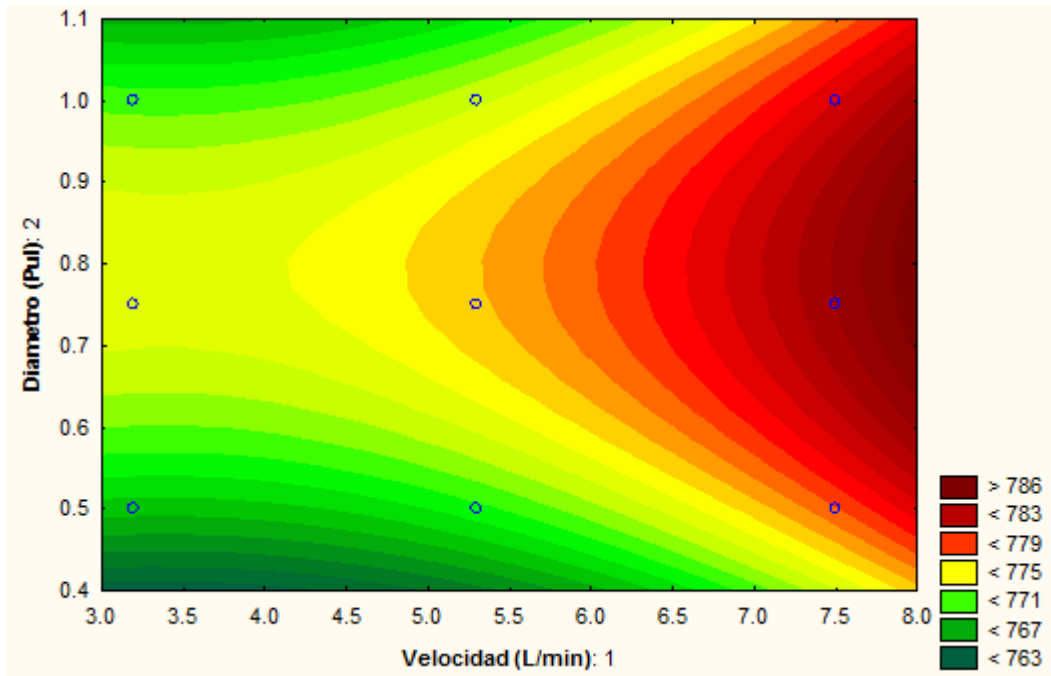
Anexo 11. Contorno de respuesta para la remoción de turbidez en relación a velocidad y tiempo



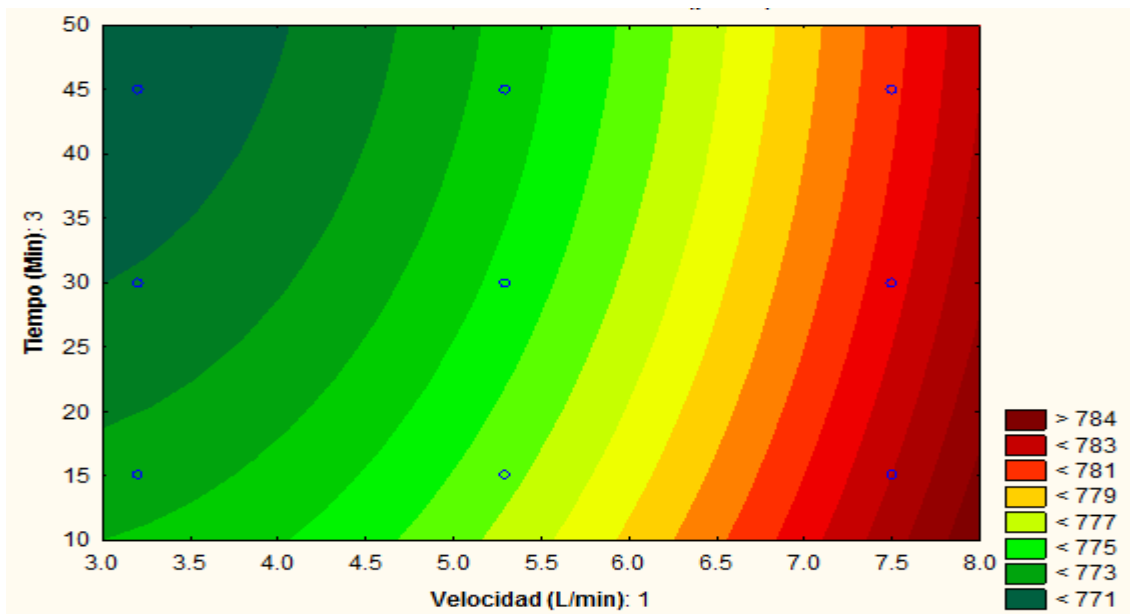
Anexo 12. Contorno de respuesta para la remoción de turbidez en relación tiempo y diámetro



Anexo 13. Contorno de respuesta para la remoción de conductividad en relación a diámetro y velocidad



Anexo 14. Contorno de respuesta para la remoción de conductividad en relación al tiempo y velocidad



Anexo 15. Contorno de respuesta para la remoción de conductividad en relación al tiempo y diámetro.

