

**UNIVERSIDAD DE HUANUCO**  
**FACULTAD DE INGENIERIA**  
**PROGRAMA ACADÉMICO DE INGENIERIA AMBIENTAL**



**Tesis**

---

**“Influencia de los parámetros operacionales del proceso de absorción del CO<sub>2</sub> asistida por cavitación hidrodinámica sobre la reducción de la dureza cálcica en aguas subterráneas del distrito de Luyando - 2023”**

---

**PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE INGENIERA  
AMBIENTAL**

**AUTORA: Aquino Romero, Alexandra Talía**

**ASESOR: Camara Llanos, Frank Erick**

**HUÁNUCO – PERÚ**

**2024**

# U

### TIPO DEL TRABAJO DE INVESTIGACIÓN:

- Tesis ( X )
- Trabajo de Suficiencia Profesional ( )
- Trabajo de Investigación ( )
- Trabajo Académico ( )

**LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN:** Contaminación Ambiental

**AÑO DE LA LÍNEA DE INVESTIGACIÓN (2020)**

### CAMPO DE CONOCIMIENTO OCDE:

**Área:** Ingeniería, Tecnología

**Sub área:** Ingeniería ambiental

**Disciplina:** Ingeniería ambiental y geológica

### DATOS DEL PROGRAMA:

Nombre del Grado/Título a recibir: Título Profesional de Ingeniera ambiental

Código del Programa: P09

Tipo de Financiamiento:

- Propio ( X )
- UDH ( )
- Fondos Concursables ( )

### DATOS DEL AUTOR:

Documento Nacional de Identidad (DNI): 76470816

### DATOS DEL ASESOR:

Documento Nacional de Identidad (DNI): 44287920

Grado/Título: Maestro en ciencias de la salud con mención en: salud pública y docencia universitaria

Código ORCID: 0000-0001-9180-7405

### DATOS DE LOS JURADOS:

N°	APELLIDOS Y NOMBRES	GRADO	DNI	Código ORCID
1	Morales Aquino, Milton Edwin	Maestro en ingeniería, con mención en: gestión ambiental y desarrollo sostenible	44342697	0000-0002-2250-3288
2	Cajahuanca Torres, Raul	Maestro en gestión pública	22511841	0000-0002-5671-1907
3	Valdivia Martel, Perfecta Sofía	Maestro en Ingeniería con mención en: gestión ambiental y desarrollo sostenible	43616954	0000-0002-7194-3714

# D

# H



# UNIVERSIDAD DE HUÁNUCO

## Facultad de Ingeniería

PROGRAMA ACADÉMICO DE INGENIERÍA AMBIENTAL

### ACTA DE SUSTENTACIÓN DE TESIS PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE INGENIERO(A) AMBIENTAL

En la ciudad de Huánuco, siendo las 08:30 horas del día 12 del mes de marzo del año 2024, en cumplimiento de lo señalado en el Reglamento de Grados y Títulos de la Universidad de Huánuco, se reunieron el sustentante y el **Jurado Calificador** integrado por los docentes:

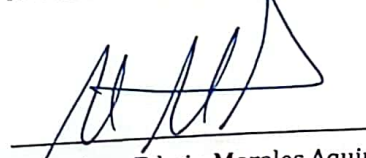
- Mg. Milton Edwin Morales Aquino (Presidente)
- Mg. Raul Cajahuanca Torres (Secretario)
- Mg. Perfecta Sofia Valdivia Martel (Vocal)

Nombrados mediante la Resolución N° 0496-2024-D-FI-UDH, para evaluar la Tesis intitulada: "INFLUENCIA DE LOS PARÁMETROS OPERACIONALES DEL PROCESO DE ABSORCIÓN DEL CO<sub>2</sub> ASISTIDA POR CAVITACIÓN HIDRODINÁMICA SOBRE LA REDUCCIÓN DE LA DUREZA CÁLCICA EN AGUAS SUBTERRÁNEAS DEL DISTRITO DE LUYANDO – 2023", presentado por el (la) Bach. AQUINO ROMERO, ALEXANDRA TALIA, para optar el Título Profesional de Ingeniero(a) Ambiental.

Dicho acto de sustentación se desarrolló en dos etapas: exposición y absolución de preguntas: procediéndose luego a la evaluación por parte de los miembros del Jurado.

Habiendo absuelto las objeciones que le fueron formuladas por los miembros del Jurado y de conformidad con las respectivas disposiciones reglamentarias, procedieron a deliberar y calificar, declarándolo(a) ~~aprobado~~. Por ~~Unanimidad~~ con el calificativo cuantitativo de...~~1.5~~... y cualitativo de...~~bueno~~..... (Art. 47)

Siendo las ~~09:40~~... horas del día...~~12~~... del mes de...~~Marzo~~... del año ~~2024~~..., los miembros del Jurado Calificador firman la presente Acta en señal de conformidad.

  
Mg. Milton Edwin Morales Aquino  
DNI: 44342697  
ORCID: 0000-0002-2250-3288  
Presidente

  
Mg. Raul Cajahuanca Torres  
DNI: 22511841  
ORCID: 0000-0002-5671-1907  
Secretario

  
Mg. Perfecta Sofia Valdivia Martel  
DNI: 43616954  
ORCID: 0000-0002-7194-3714  
Vocal



**UNIVERSIDAD DE HUÁNUCO**

## **CONSTANCIA DE ORIGINALIDAD**

Yo, FRANK ERICK CAMARA LLANOS, asesor(a) del PA. de INGENIERIA y designado(a) mediante documento: **RESOLUCIÓN Nº 1893-2022-D-FI-UDH** del 23 de SETIEMBRE del 2022; del Bachiller **AQUINO ROMERO Alexandra Talia**, de la investigación titulada; "INFLUENCIA DE LOS PARÁMETROS OPERACIONALES DEL PROCESO DE ABSORCIÓN DEL CO<sub>2</sub> ASISTIDA POR LA CAVITACIÓN HIDRODINÁMICA SOBRE LA REDUCCIÓN DE LA DUREZA CALCICA EN AGUAS SUBTERRÁNEAS DEL DISTRITO DE LUYANDO 2023

Puedo constar que la misma tiene un índice de similitud del **18%** verificable en el reporte final del análisis de originalidad mediante el Software Antiplagio Turnitin. Por lo que concluyo que cada una de las coincidencias detectadas no constituyen plagio y cumple con todas las normas de la Universidad de Huánuco.

Se expide la presente, a solicitud del interesado para los fines que estime conveniente.

Huánuco, 26 de MARZO del 2024



Mg. Frank E. Cámara Llanos  
MÉDICO VETERINARIO  
CMV. 7188

---

Apellidos y Nombres

Código Orcid: 0000-0001-9180-7405

DNI: 44287920

# Tesis Final-Alexandra Talia Aquino Romero-2023.docx

## INFORME DE ORIGINALIDAD

18%

INDICE DE SIMILITUD

18%

FUENTES DE INTERNET

3%


PUBLICACIONES

5%

TRABAJOS DEL ESTUDIANTE

## FUENTES PRIMARIAS

1	<a href="https://repositorio.udh.edu.pe">repositorio.udh.edu.pe</a> Fuente de Internet	5%
2	<a href="https://repositorio.unac.edu.pe">repositorio.unac.edu.pe</a> Fuente de Internet	2%
3	<a href="https://repositorio.ucv.edu.pe">repositorio.ucv.edu.pe</a> Fuente de Internet	2%
4	<a href="https://blogs.nippongases.es">blogs.nippongases.es</a> Fuente de Internet	2%
5	<a href="https://alicia.concytec.gob.pe">alicia.concytec.gob.pe</a> Fuente de Internet	1%
6	<a href="https://distancia.udh.edu.pe">distancia.udh.edu.pe</a> Fuente de Internet	1%
7	<a href="https://hdl.handle.net">hdl.handle.net</a> Fuente de Internet	<1%
8	<a href="https://unaj.edu.pe">unaj.edu.pe</a> Fuente de Internet	<1%
9	<a href="https://hmong.es">hmong.es</a> Fuente de Internet	<1%

  
Mg. Frank E. Cámara Llanos  
MEDICO VETERINARIO  
CMV. 7185

Apellidos y Nombres

Código Orcid: 0000-0001-9180-7405

DNI: 44287920

## **DEDICATORIA**

A mis padres, por no soltar mi mano en todo este camino y quienes me impulsan a ser mejor cada día.

A mis hermanos, por su amor y apoyo incondicional.

Y, finalmente, a los que creyeron en mí, con su actitud lograron que tomara más impulso.

## **AGRADECIMIENTOS**

A Dios por permitirme materializar mis metas

A mis padres que siempre me han brindado su apoyo incondicional para poder cumplir todos mis objetivos personales y académicos.

A mi asesor por brindarme su tiempo valioso y compartir conocimientos.

A mis jurados por sus críticas constructivas.

A todas aquellas personas que me apoyaron en el proceso.

# ÍNDICE

DEDICATORIA .....	II
AGRADECIMIENTOS.....	III
ÍNDICE.....	IV
ÍNDICE DE TABLAS.....	VII
ÍNDICE DE FIGURAS.....	VIII
RESUMEN.....	X
ABSTRACT.....	XI
INTRODUCCIÓN.....	XII
CAPÍTULO I.....	14
PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN.....	14
1.1. DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA.....	14
1.2. FORMULACIÓN DEL PROBLEMA.....	17
1.2.1. PROBLEMA GENERAL.....	17
1.2.2. PROBLEMAS ESPECÍFICOS.....	18
1.3. OBJETIVOS.....	18
1.3.1. OBJETIVO GENERAL.....	18
1.3.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	18
1.4. JUSTIFICACIÓN.....	19
1.5. LIMITACIONES DE LA INVESTIGACIÓN.....	20
1.6. VIABILIDAD DE LA INVESTIGACIÓN.....	21
CAPÍTULO II.....	23
MARCO TEÓRICO.....	23
2.1. ANTECEDENTES DEL PROBLEMA.....	23
2.1.1. ANTECEDENTES INTERNACIONALES.....	23
2.1.2. ANTECEDENTES NACIONALES.....	26
2.1.3. ANTECEDENTES LOCALES.....	27
2.2. BASES TEORICAS.....	28
2.2.1. AGUAS SUBTERRÁNEAS.....	28
2.2.2. CONTENIDO SOCIAL, POLITICO AMBIENTAL DE LA AGUAS SUBTERRANEAS.....	29
2.2.3. CALIDAD DE LAS AGUAS SUBTERRANEAS.....	31
2.2.4. CONTAINACIÓN DE LAS AGUAS SUBTERRANEAS.....	32



2.2.5. COMPOSICIÓN QUÍMICA DE LAS AGUAS SUBTERRÁNEAS	34
2.2.6. LA DUREZA EN LAS AGUAS SUBTERRÁNEAS .....	35
2.2.7. CONSECUENCIAS GENERADAS DEL USO DE AGUAS CON ALTAS CONCENTRACIONES DE CA <sup>++</sup> Y MG <sup>++</sup> .....	36
2.2.8. NORMATIVAS Y REGULACIONES SOBRE LA DUREZA CALCICA Y MAGNÉSICA EN AGUA POTABLE A NIVEL NACIONAL E INTERNACIONAL.....	37
2.2.9. PROCESO DE ABSORCIÓN DEL DIOXIDO DE CARBONO....	40
2.2.10. MINERALIZACIÓN DEL CO <sub>2</sub> COMO PARTE DEL TRATMIENTO DE AGUA EMPLEANDO LA TECNOLOGÍA DE CAVITACIÓN HIDRODINÁMICA.....	40
2.2.11. REACTOR DE CAVITACIÓN HIDRODINÁMICA .....	42
2.2.12. REACTOR DE CAVITACIÓN HIDRODINÁMICA TIPO ORIFICIO.....	44
2.2.13. EFECTOS DE PARÁMETROS MAS INFLUYENTES EN LA CAVITACIÓN HIDRODINÁMICA TIPO ORIFICIO.....	45
2.2.14. CAMBIOS FISICOQUÍMICOS DE LA ABSORCIÓN DEL CO <sub>2</sub> SOBRE AGUA DURA ASISTIDA CON CAVITACIÓN HIDRODINÁMICA TIPO ORIFICIO .....	46
2.3. DEFINICIONES CONCEPTUALES.....	49
2.4. HIPÓTESIS .....	51
2.4.1. HIPÓTESIS GENERAL.....	51
2.4.2. HIPÓTESIS ESPECÍFICAS .....	51
2.5. VARIABLES .....	52
2.5.1. VARIABLE DEPENDIENTE .....	52
2.5.2. VARIABLE INDEPENDIENTE .....	52
2.6. OPERACIONALIZACIÓN DE VARIABLES .....	53
CAPÍTULO III .....	54
METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN.....	54
3.1. TIPO DE INVESTIGACIÓN .....	54
3.1.1. ENFOQUE .....	54
3.1.2. ALCANCE O NIVEL .....	54
3.1.3. DISEÑO .....	55
3.2. POBLACIÓN Y MUESTRA .....	56

3.2.1. POBLACIÓN .....	56
3.2.2. MUESTRA .....	56
3.3. TÉCNICAS E INSTRUMENTOS DE RECOLECCIÓN DE DATOS.	57
3.3.1. PARA LA RECOLECCIÓN DE DATOS .....	57
3.3.2. PARA LA PRESENTACIÓN DE DATOS.....	66
3.3.3. PARA EL ANALISIS E INTERPRETACIÓN DE LOS DATOS ...	66
CAPÍTULO IV.....	68
RESULTADOS.....	68
4.1. RESULTADOS DESCRIPTIVOS .....	68
4.2. RESULTADOS INFERENCIALES .....	89
4.3. CONTRASTACIÓN DE HIPÓTESIS Y PRUEBA DE HIPÓTESIS ..	92
4.3.1. HIPÓTESIS GENERAL.....	92
4.3.2. HIPÓTESIS ESPECÍFICA.....	96
CAPÍTULO V.....	102
DISCUSIÓN DE RESULTADOS.....	102
5.1. DISCUSIÓN DE RESULTADOS .....	102
CONCLUSIONES .....	105
RECOMENDACIONES.....	107
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	108
ANEXOS.....	116

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 Composición de especies disueltas en aguas subterráneas.....	34
Tabla 2 Clasificación de constituyentes en las aguas subterráneas .....	35
Tabla 3 Valores mínimas requeridas y recomendadas de minerales en agua blanda o desmineralizada (desalinizada), propuesto por varios estados miembros para refundición de la Directiva de agua potable de la UE.....	39
Tabla 4 Tabla de Operacionalización de Variables.....	53
Tabla 5 Factores y sus respectivos niveles .....	55
Tabla 6 Diseño experimental L8 de Taguchi para este estudio. ....	56
Tabla 7 Métodos empleados para cuantificar el agua subterránea.....	60
Tabla 8 Dimensiones de la placa con orificio.....	63
Tabla 9 Soluciones preparadas para cuantificar la dureza cálcica por volumetría y sus estandarizaciones .....	66
Tabla 10 Valores fisicoquímicos de muestras en los 3 pozos antes del tratamiento .....	68
Tabla 11 Valores finales de los parámetros después de su tratamiento mediante el diseño Taguchi .....	71
Tabla 12 Características fisicoquímicas de las muestras en función al tiempo para 7 PSI de presión de entrada al sistema cavitación con valores promedio.....	74
Tabla 13 Características fisicoquímicas de las muestras en función al tiempo para 22 PSI de presión de entrada al sistema cavitación con valores promedio.....	75
Tabla 14 Análisis descriptivo para el % de reducción de la dureza cálcica ..	88
Tabla 15 Análisis de la Varianza intersujetos para el % reducción de dureza cálcica.....	93
Tabla 16 Resultados de los subconjuntos homogéneos en la reducción cálcica.....	94
Tabla 17 Resultados de la ANOVA.....	95

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 Etapas de la investigación para reducir la dureza cálcica.....	58
Figura 2 Toma de muestras en los tres puntos.....	59
Figura 3 Caracterización de las muestras tomadas en los 3 puntos de agua subterránea.....	60
Figura 4 Sistema de cavitación del tipo de placas con orificio y venturi.....	62
Figura 5 Placa utilizada en el sistema de ablandamiento .....	63
Figura 6 Concentración de la dureza total en los tres pozos frente a las normativas .....	69
Figura 7 Valores de los parámetros fisicoquímicos después de su tratamiento .....	72
Figura 8 Efecto generado sobre pH, T°C, conductividad y % de reducción de dureza cálcica operado a condiciones de 7 PSI para T1 .....	76
Figura 9 Efecto generado sobre pH, T°C, conductividad y % de reducción de dureza cálcica operado a condiciones de 7 PSI para T2 .....	77
Figura 10 Efecto generado sobre pH, T°C, conductividad y % de reducción de dureza cálcica operado a condiciones de 7 PSI para T3 .....	78
Figura 11 Efecto generado sobre pH, T°C, conductividad y % de reducción de dureza cálcica operado a condiciones de 7 PSI para T4 .....	79
Figura 12 Efecto generado sobre pH, T°C, conductividad y % de reducción de dureza cálcica operado a condiciones de 22 PSI para T5.....	80
Figura 13 Efecto generado sobre pH, T°C, conductividad y % de reducción de dureza cálcica operado a condiciones de 22 PSI para T6.....	81
Figura 14 Efecto generado sobre pH, T°C, conductividad y % de reducción de dureza cálcica operado a condiciones de 22 PSI para T7 .....	82
Figura 15 Efecto generado sobre pH, T°C, conductividad y % de reducción de dureza cálcica operado a condiciones de 22 PSI para T8 .....	83
Figura 16 Efecto de las presiones de entrada al sistema de cavitación a diferentes condiciones sobre el % R.D.Ca.....	84
Figura 17 Gráfica de influencia generada por bicarbonato de sodio sobre %R.D.Ca.....	85
Figura 18 Gráfica de influencia generada por el tiempo de tratamiento sobre %R.D.Ca.....	86

Figura 19 Gráfica de influencia generada por el flujo de CO <sub>2</sub> sobre %R.D.Ca .....	87
Figura 20 Resultado de verificación de la normalidad .....	90
Figura 21 Diagramas para los residuos con respecto al %R.D.Ca .....	91
Figura 22 Diagramas de Pareto con respecto al %R.D.Ca .....	99
Figura 23 Efectos principales para la media sobre %R.D.Ca .....	100
Figura 24 Diagrama de contornos sobre %R.D.Ca .....	101

## RESUMEN

Este estudio tuvo como objetivo demostrar las influencias de los parámetros operacionales del proceso de absorción del CO<sub>2</sub> asistida por cavitación hidrodinámica sobre la reducción de la dureza cálcica en aguas subterráneas del Distrito de Luyando. La técnica de cavitación hidrodinámica se ha utilizado con éxito para su mineralización del CO<sub>2</sub>, pero hasta la fecha muy poco se conoce sus aplicaciones en el ablandamiento de aguas subterráneas. Por este motivo, el autor decidió demostrar las influencias operacionales. Con respecto a la metodología, la tesis es de nivel explicativo, del tipo experimental y enfoque cuantitativo. Su demostración se realizó sobre muestras de agua subterránea mediante un módulo de 6 litros, que tiene acoplado un balón de CO<sub>2</sub> con su respectivo venturi para su ingreso al módulo y una bomba hidráulica que genera la recirculación. Mediante el diseño experimental ortogonal Taguchi de L<sub>8</sub>, se evaluaron la influencia de la presión de entrada en sus niveles 7 PSI y 22 PSI, el tiempo de tratamiento para sus niveles 20 minutos y 40 minutos, el flujo de CO<sub>2</sub> en sus niveles de 0 L/min y 2L/min y por último el NaHCO<sub>3</sub> en sus niveles de 0mg/L y 530mg/L. Los resultados nos indican que si hay una relación de influencia significativa entre los parámetros operacionales para los 16 experimentos, donde la reducción mínima alcanzó a 28.26 % a condiciones de 7 PSI, tiempo 20 minutos, 0 L/min CO<sub>2</sub> y 0 mg/L NaHCO<sub>3</sub> y la reducción máxima fue de 59.035 % a condiciones de 22 PSI, 40 minutos, 2 L/min de CO<sub>2</sub> y 530 mg/L de NaHCO<sub>3</sub>. Así mismo los factores de mayor influencia sobre la reducción cálcica de mayor a menor están: el NaHCO<sub>3</sub> en la proporción de 530 mg/L, seguido la Presión de alimentación a 22 PSI, después el tiempo de tratamiento en 40 minutos y finalmente el CO<sub>2</sub> para el flujo de 2 L/min, aunque este último no es muy significativo. Se concluye que mediante el procedimiento estadístico ANOVA se demostró que la relación entre los parámetros de presión, tiempo, CO<sub>2</sub> y NaHCO<sub>3</sub> tiene una influencia muy significativa sobre el % de reducción cálcica en las aguas subterráneas del Distrito Luyando.

**Palabras claves:** dureza cálcica, cavitación hidrodinámica, dióxido de carbono, CO<sub>2</sub>, aguas subterráneas.

## ABSTRACT

This study aimed to demonstrate the influences of the operational parameters of the CO<sub>2</sub> absorption process assisted by hydrodynamic cavitation on the reduction of calcium hardness in groundwater of the Luyando District. The hydrodynamic cavitation technique has been used successfully for CO<sub>2</sub> mineralization, but to date very little is known about its applications in groundwater softening. For this reason, the author decided to demonstrate operational influences. Regarding the methodology, the thesis is explanatory level, experimental type and quantitative approach. The demonstration was carried out on groundwater samples using a 6-liter module, which has a CO<sub>2</sub> balloon attached to it with its respective venturi for entry into the module and a hydraulic pump that generates recirculation. Using the Taguchi orthogonal experimental design of L8, the influence of the inlet pressure at its 7 PSI and 22 PSI levels, the treatment time for its 20 minute and 40 minute levels, and the CO<sub>2</sub> flow at its 0 L levels were evaluated. /min and 2L/min and finally NaHCO<sub>3</sub> at its levels of 0mg/L and 530mg/L. The results indicate that there is a significant influence relationship between the operational parameters for the 16 experiments, where the minimum reduction reached 28.26% at conditions of 7 PSI, time 20 minutes, 0 L/min CO<sub>2</sub> and 0 mg/L NaHCO<sub>3</sub> and the maximum reduction was 59.035% at conditions of 22 PSI, 40 minutes, 2 L/min of CO<sub>2</sub> and 530 mg/L of NaHCO<sub>3</sub>. Likewise, the factors with the greatest influence on the calcium reduction from highest to lowest are: NaHCO<sub>3</sub> in the proportion of 530 mg/L, followed by the supply pressure at 22 PSI, then the treatment time in 40 minutes and finally the CO<sub>2</sub> for the flow of 2 L/min, although the latter is not very significant. It is concluded that through the ANOVA statistical procedure it was demonstrated that the relationship between the parameters of pressure, time, CO<sub>2</sub> and NaHCO<sub>3</sub> has a very significant influence on the % calcium reduction in the groundwater of the Luyando District.

**Keywords:** calcium hardness, hydrodynamic cavitation, carbon dioxide, CO<sub>2</sub>, groundwater

## INTRODUCCIÓN

Las aguas subterráneas en su mayor parte se encuentran en la clasificación de duras (121 a 180 mg/L) y muy duras (mayor de 180 mg/L), estos recursos al ser utilizado como agua potable causan daños económicos negativos a los hogares y la industria. Según las Naciones Unidas (2022), actualmente, las aguas subterráneas aportan la mitad del volumen de agua extraída para uso doméstico por la población mundial (Robillard & Sharpe, 2017). El Perú no está exento de ello, en la región costa, donde el crecimiento población es exponencial y además se encuentran las mayores industrias, la demanda por el agua es mayor, razón por la cual, el mayor porcentaje de extracción de aguas subterráneas se encuentran en los alrededores de los ríos y cercanías al mar, seguido de la zona sierra y la selva.

Según la Organización Mundial de la Salud, mayores a 200 mg/L como dureza, generan efectos adversos, ello hace que su uso sea limitado para sus diversos fines, estas aguas al ser utilizados sin ningún tratamiento traen como consecuencias repercusiones sobre la salud, formación de incrustaciones a nivel doméstico e industrial. (Hori et al., 2021).

En base a los trabajos publicados sobre caracterización de aguas subterráneas, tanto en la costa como en la sierra, casi en todos ellos se evidenciaron altas concentraciones de calcio, el cual los lleva a la clasifican como aguas duras y muy duras (Valenzuela & Yucra, 2022), (Pacheco, 2019). Muchos de estos valores se encuentran fuera de los límites máximos permisibles generados por la normativa de la calidad de agua D.S. N°031-2010-SA para consumo humano, además la Organización Mundial de la Salud recomendó preservar las concentraciones de  $\text{Ca}^{2+}$  y  $\text{Mg}^{2+}$  inferiores a 75 mg/L y 50 mg/L en el agua potable respectivamente (Rabeh, Ali, Bedai, Sadik, & Ismail, 2018).

En los últimos años, se han trabajado diversas investigaciones relacionados en el ablandamiento de aguas con tecnologías sustentables, vinculado a la utilización de dispositivos de cavitación hidrodinámica como medio de absorción del dióxido de carbono, cuyo objetivo en la reducción de



iones calcio mediante la formación de carbonato de calcio a partir de las reacciones químicas que se dan entre el  $\text{CO}_2$  y  $\text{CO}_3^{2-}$  y los cambios de temperatura al interior del dispositivo.

En esta investigación realizada, la utilidad es exponer una ciencia amigable con el medio ambiente, empleando la cavitación hidrodinámica como medio del proceso de absorción del  $\text{CO}_2$  sobre la reducción cálcica en aguas subterráneas de la zona selva. El trabajo se realizó a una escala laboratorio tipo batch con recirculación. Los análisis de los indicadores se realizaron en el mismo lugar de experimento con las condiciones adecuadas.

# CAPÍTULO I

## PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN

### 1.1. DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA

El calcio como quinto elemento y el tercer metal más abundante en la tierra; se encuentra como compuesto en un 3.64% en la corteza terrestre, eso hace que su distribución sea muy amplia (Calcium (CA)). Este mineral al igual que el magnesio ( $Mg^{2+}$ ) y otros aniones como bicarbonato, sulfatos y otros se disuelven fácilmente en el agua, por lo que a concentraciones altas estas iones generan posibles problemas de salud asociados al agua dura, como los cálculos renales, dermatitis, problemas de salud reproductiva y cáncer de páncreas (Kadir et al., 2017). Por otra parte estas iones  $Ca^{2+}$  y el  $Mg^{2+}$  disueltos son los principales responsables de la mayoría de las incrustaciones en tuberías y calentadores de agua causando numerosos problemas en la lavandería, la cocina y el baño (Izzah et al., 2019).

Actualmente, las aguas subterráneas aportan la mitad del volumen de agua extraída para uso doméstico por la población mundial (Naciones Unidas, 2022). De acuerdo a estudios realizados por Aquae Fundación (2021), señalan que dentro de los depósitos subterráneos se encuentra el 0.5% de agua dulce, mientras que en ríos y lagos solo el 0.01% de la misma. En Perú, una de las fuentes de abastecimiento de recursos hídricos son las aguas superficiales, aunque en varios lugares utilizan el agua subterránea como fuente alternativa. Las regiones del Perú con mayor extracción de acuíferos subterráneos son la costa, donde se encuentra el mayor número de pozos de aguas subterráneas, así mismo hacia el sur, donde los recursos hídricos subterráneos de los Andes constituyen un gran reservorio de agua subterránea y por último, la selva, en esta región, aunque el recurso hídrico superficial es abundante, las aguas subterráneas son empleadas para el abastecimiento de agua potable a las principales ciudades, centros poblados menores, comunidades indígenas y para cubrir las necesidades de la industria (Sayán et al., 2006).

Diversos estudios realizados en las diversas regiones del Perú, han demostrado que la mayor parte de las aguas subterráneas presentan concentraciones mayores a 200 ppm de dureza total, valores considerados como aguas duras y muy duras. Estudios realizados por Valenzuela y Yucra (2022), al caracterizar las aguas subterráneas del Distrito de Juliaca encontraron que los valores de la dureza total no se encontraban dentro de los límites máximos permisibles generados por la normativa de la calidad de agua D.S. N°031-2010-SA, llegando a un valor de 573 mg/L. por consiguiente considerado como agua no apto para consumo humano. Otros estudios también confirmaron concentraciones altas de dureza por encima de los límites permisibles (Pancca, 2021) y (Tacuri, 2018). Estudios realizados en Lima, en el Distrito de Comas, al evaluarse la dureza total de las aguas subterráneas, se encontraron valores promedio de 604 ppm, concentraciones consideradas para aguas muy duras y que sobrepasan el LMP para consumo humano (Bendezu, 2017). Así mismos estudios realizados por Pacheco (2019), encontraron 581.20 mg/L(CaCO<sub>3</sub>) en Villa el Salvador, por Ramos (2017), observaron valores de dureza total (724mg/L) en el Distrito de Comas, todos ellos sobrepasan valores recomendados para consumo humano.

Según el INEI (2010), Huánuco como Departamento tiene más de 543 188 habitantes sin acceso al agua, de ellos la mayor parte se encuentra en el área rural correspondiente en un 77.9% y el 22.1% se encuentra en la zona urbana. Para zonas donde el agua potable es inaccesible, las aguas subterráneas forman parte importante de fuentes hídricas para diversos usos; Sin embargo, estas aguas en su mayor parte contienen minerales como el calcio en concentraciones no recomendadas para sus diversos usos. El distrito de Luyando, perteneciente a la provincia de Leoncio Prado, Departamento de Huánuco, está catalogada con nivel alto de pobreza, con sectores de pésimo servicio de agua y desagüe, etc. la mayor parte de la población consume agua subterránea con fines domésticos.

La Organización Mundial de la Salud recomendó preservar las concentraciones de Ca<sup>2+</sup> y Iones Mg<sup>2+</sup> inferiores a 75 mg/L y 50 mg/L en el agua potable respectivamente; Por otra parte la actual Directiva sobre agua

potable de la UE no incluye límites para la dureza del Ca y el Mg, sin embargo algunos miembros de la Unión Europea regulan estos parámetros, por ejemplo Portugal recomienda valores de calcio no superior a 100 mg/L, como dureza total ( $\text{CaCO}_3$ ) debe estar entre 150 y 500 mg/L. Para Inglaterra el valor objetivo para el agua potable producida debe tener la concentración de calcio entre 20-60 mg/L. Para Polonia la dureza (expresada en  $\text{CaCO}_3$ ) debe estar entre 60-500 mg/L (0,6 - 5 mmol/L). Para Austria, la concentración recomendada para la dureza total como límite superior debe estar entre ( $400 \pm 40$  mg/L) y de magnesio entre ( $150 \pm 15$  mg/L) ( Kozisek, 2020).

Conocer la dureza del agua es importante a la hora de evaluar su uso como suministro de agua doméstico o industrial, ya que el agua subterránea contiene más minerales que el agua superficial, por lo que es más dura que el agua superficial. La mayoría de las empresas de agua consideran un nivel de dureza entre 50 y 150 ppm de  $\text{CaCO}_3$  como públicamente aceptable (Ahn, Chilakala, Han, & Thenepalli, 2018).

Frente a la contextualización del problema, en la actualidad existen numerosos estudios para reducir la dureza cálcica, estos incluyen el intercambio de cationes (intercambiadores de bases inorgánicas, carbonosas u orgánicas), la separación por membranas (Nanofiltración), la precipitación mediante cal-sosa y la adsorción, son técnicas habituales para ablandar el agua (Mahasti et al., 2017). Sin embargo, muchos de ellos no se consideran comercialmente rentables debido a sus elevados costos. Recientemente, en el sector del tratamiento de aguas residuales y no residuales, la tecnología de la absorción y mineralización del dióxido de carbono se utilizaron para poder reducir la concentración del catión calcio asistida mediante la cavitación hidrodinámica y como posterior tratamiento una filtración para separar los productos formados.

La mineralización de  $\text{CO}_2$  es un proceso que puede almacenar el  $\text{CO}_2$  como un mineral sólido de forma permanente, los metales terrestres presentan una oportunidad para atrapar el  $\text{CO}_2$  en forma de carbonatos insolubles. Además, estos se pueden lograr utilizando concentraciones de  $\text{CO}_2$  de gases de combustión y a temperaturas cercanas al ambiente,

eliminando el paso de captura de CO<sub>2</sub> que consume mucha energía.

La cavitación hidrodinámica ha despertado interés como tecnología en procesos físicos y químicos para el control de diversos contaminantes presentes en el agua, además esta tecnología es recomendada para el tratamiento del agua, debido a que su proceso de mantenimiento es bajo, facilidad operativa y de un rendimiento óptimo (Redekar et al., 2020). La cavitación hidrodinámica es la formación, crecimiento y posterior colapso de micro burbujas o cavidades en un intervalo de tiempo específico, lo que libera grandes cantidades de energía (Patent, 2010). Durante la cavitación, se generan puntos calientes con una temperatura y una presión extremadamente altas, de unos 5000 K y 1000 atm respectivamente (Thanekar et al., 2021). Los resultados de estudios previos revelaron que la cavitación hidrodinámica se utiliza habitualmente en diversas aplicaciones, como el ablandamiento (Crum et al., 2013), (Bubulis et al., 2010) y (Redekar et al., 2020). El rendimiento de la cavitación hidrodinámica se ve afectado por diversos parámetros como la presión, dispositivo de cavitación, ubicación del dispositivo de cavitación y su alineación en la tubería, flujo, diámetro de la tubería y material, etc.

Para este estudio, el experimento por partida se realizó a temperatura ambiente utilizando agua subterránea proveniente del Distrito de Luyando, para estudiar los parámetros como la presión de entrada y tiempo de tratamiento en la absorción del dióxido de carbono. El propósito de este estudio es investigar la posible influencia de dos de los parámetros más importantes del proceso de absorción de CO<sub>2</sub> en un sistema asistido por cavitación hidrodinámica tomando como indicador la reducción cálcica en agua subterránea.

## **1.2. FORMULACIÓN DEL PROBLEMA**

### **1.2.1. PROBLEMA GENERAL**

¿Cuál será el grado de influencia de los parámetros operacionales del proceso de absorción del CO<sub>2</sub> asistida por cavitación hidrodinámica sobre la reducción de la dureza cálcica en aguas subterráneas del Distrito de Luyando – 2023?

## **1.2.2. PROBLEMAS ESPECÍFICOS**

¿Cuál es la influencia significativa del flujo de dióxido de carbono sobre el porcentaje promedio de reducción de la dureza cálcica en aguas subterráneas del Distrito de Luyando – 2023?

¿Cuál es la influencia significativa de la presión de entrada sobre el porcentaje promedio de reducción de la dureza cálcica en aguas subterráneas del Distrito de Luyando – 2023?

¿Cuál es la influencia significativa del tiempo de tratamiento sobre el porcentaje promedio de reducción de la dureza cálcica en aguas subterráneas del Distrito de Luyando – 2023?

¿Cuál es la influencia significativa del bicarbonato de sodio sobre el porcentaje promedio de reducción de la dureza cálcica en aguas subterráneas del Distrito de Luyando – 2023?

## **1.3. OBJETIVOS**

### **1.3.1. OBJETIVO GENERAL**

Demostrar la influencia de los parámetros operacionales del proceso de absorción del CO<sub>2</sub> asistida por cavitación hidrodinámica sobre la reducción de la dureza cálcica en aguas subterráneas del Distrito de Luyando – 2023.

### **1.3.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

Demostrar la influencia significativa del flujo de dióxido de carbono sobre el porcentaje promedio de reducción de la dureza cálcica en aguas subterráneas del Distrito de Luyando – 2023.

Demostrar la influencia significativa de la presión de entrada sobre el porcentaje promedio de reducción de la dureza cálcica en aguas subterráneas del Distrito de Luyando – 2023.

Demostrar la influencia significativa del tiempo de tratamiento sobre

el porcentaje promedio de reducción de la dureza cálcica en aguas subterráneas del Distrito de Luyando – 2023.

Demostrar la influencia significativa del bicarbonato de sodio sobre el porcentaje promedio de reducción de la dureza cálcica en aguas subterráneas del Distrito de Luyando – 2023.

#### **1.4. JUSTIFICACIÓN**

Muchas regiones de pobreza y extrema pobreza carecen de agua potable o tienen un mal abastecimiento de agua y el saneamiento es deficiente, para estas zonas el agua subterránea es la fuente principal para beber y otros fines domésticos. Por otro lado, la disponibilidad de agua subterránea de calidad es un problema debido a la contaminación de las aguas subterráneas por diversas fuentes.

Ante la inminente situación de la calidad de las aguas subterráneas con presencia de los iones calcio, algunos con concentraciones muy elevadas, clasificadas como duras y muy duras, diversos estudios de caracterización realizados en diversas provincias demostraron que la mayoría de ellas presentan concentraciones de dureza que se encuentran fuera de los límites máximos permisibles generados por la normativa de la calidad de agua D.S. N°031-2010-SA, así mismo, entidades internacionales como la Organización Mundial de la Salud recomienda preservar las concentraciones de  $\text{Ca}^{2+}$  y  $\text{Mg}^{2+}$  inferiores a 75 mg/L y 50 mg/L en el agua potable respectivamente; valores que están muy por debajo de los encontrados. Por lo tanto, conocer la dureza del agua es importante a la hora de evaluar su uso como suministro de agua doméstico o industrial, por otra parte, la mayoría de las empresas comerciales de agua consideran un nivel de dureza entre 50 y 150 ppm de  $\text{CaCO}_3$  como públicamente aceptable (Ahn, Chilakala, Han, & Thenepalli, 2018).

Por otra parte, la demanda de agua blanda no está exenta del impacto ambiental y esto sucede cuando se emplea en muchos hogares el ablandamiento por intercambio iónico, ya que esta técnica tiene la desventaja de generar altos concentrados de sales que estaban presente originalmente en el agua (sales de calcio y magnesio), así como la sal de sodio, y que

finalmente son vertidos sin ningún tratamiento al medio ambiente, contribuyendo a los demás factores causantes de altas concentraciones de dureza en las aguas subterráneas. Como alternativa a la técnica de intercambio iónico y otros sistemas de ablandamiento, el sistema propuesto es recomendada para el tratamiento del agua, debido a que su proceso de mantenimiento es bajo, facilidad operativa, rendimiento óptimo y sobre todo se obtiene como producto final el carbonato de calcio y magnesio a partir de  $\text{Ca}^{2+}$  y  $\text{Mg}^{2+}$  más  $\text{CO}_2$  que son insumos de valor para otros procesos comerciales (Redekar et al., 2020).

Por otra parte, cada año lamentablemente se ven nuevos record de aumento de temperatura sobre la superficie de la tierra, Según la NASA la temperatura global de la tierra (superficie terrestre y océano) para el mes de diciembre 2020 fue del  $0.78^\circ\text{C}$  muy por encima del valor promedio del siglo XX, y la octava desviación del promedio del mes de diciembre entre los años 1880 – 2020 (Davidson et al., 2020). El principal contribuyente al calentamiento global es el dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ). Según un informe del Panel Intergubernamental sobre Cambio Climático (IPCC), la concentración de  $\text{CO}_2$  en la atmósfera puede ser de hasta 570 ppm, provocando un aumento de la temperatura media global de  $1,9^\circ\text{C}$  (Mohammad, 2015). La captura y almacenamiento de carbono (CAC) ha sido ampliamente reconocida como una estrategia eficaz para reducir las emisiones de gases de efecto invernadero y mitigar el calentamiento global. Por lo tanto, el sistema propuesto como parte de la estrategia y medida preventiva para regular el grado de contaminación y reducir la concentración del  $\text{CO}_2$  en la atmósfera, puede utilizarse para la mineralización del dióxido de carbono mediante la cavitación hidrodinámica en forma de platos perforados utilizando los iones de calcio y magnesio presentes en las aguas subterráneas como captores del  $\text{CO}_2$ , y de esta forma ser almacenado en forma de carbonato de calcio y magnesio de forma segura y con beneficios económicos.

## **1.5. LIMITACIONES DE LA INVESTIGACIÓN**

Una de las limitaciones que se presentó para poder realizar la parte experimental de acuerdo al cronograma planificado, fue la falta de tiempo con



respecto a mi persona, por razones de trabajo y por otro lado tuve problemas con uno de los jurados, como consecuencia se me alargó el periodo de ejecución y aprobación y a esto se adiciona la falta de tiempo de alguno de los jurados para la coordinación de la parte experimental.

Por otra parte, no se tuvo acceso a los datos sobre la calidad de dureza, registrados por la municipalidad de Luyando de las aguas subterráneas de los años anteriores, de igual forma no se encontraron evidencias de estudios realizados sobre la calidad de las aguas subterráneas del Distrito de Luyando, razón por la cual se tomó como referencia y fundamentación estudios realizados en otras provincias sobre la alta concentración en dureza que tienen las aguas subterráneas.

## **1.6. VIABILIDAD DE LA INVESTIGACIÓN**

La viabilidad del trabajo de investigación realizado se enfoca bajo el principio de la creciente concienciación sobre el medio ambiente y a las estrictas regulaciones de normativas implementadas sobre el uso del agua para diversos fines.

Con respecto a la viabilidad económica, la investigación realizada, no requiere de mucha inversión, ya que su costo total de su operatividad; integrada por materiales usados, energía eléctrica, mano de obra, mantenimiento y costos fijos son mínimos, con lo cual su implementación está asegurada, por lo tanto, su acceso a todos los niveles socioeconómicos es viable, ello hace que su escalamiento se puede realizar a diferentes niveles de capacidad generando una rentabilidad segura.

Con respecto al medio ambiente, la técnica estudiada no afecta al ecosistema, al contrario, utiliza como materia prima al CO<sub>2</sub>, un gas con efecto invernadero y causante del calentamiento global, con lo cual este gas se mineraliza utilizando iones de calcio y magnesio, asegurando su disminución en la atmósfera.

La investigación es viable socialmente; mediante esta investigación personas de diferentes recursos tendrán acceso a agua segura, con calidad

que se encuentra dentro de los límites recomendados por las autoridades nacionales e internacionales, generando una vida equilibrada y segura.

## CAPÍTULO II

### MARCO TEÓRICO

#### 2.1. ANTECEDENTES DEL PROBLEMA

##### 2.1.1. ANTECEDENTES INTERNACIONALES

Redekar et al. (2020), India. En su trabajo publicado: “*Feasibility Study of Combined Softening and Disinfection of Water by Hydrodynamic Cavitation*”. Universidad Savitribai Phule Pune, su **objetivo** de la investigación fue evaluar el sistema de cavitación hidrodinámica para el ablandamiento y desinfección del agua subterránea. Para ello como parte de la **metodología**, adoptaron un análisis con muestreo aleatorio y método de muestreo compuesto con variación en la presión y diámetro del orificio para cada ciclo respectivo, previo al tratamiento analizaron la caracterización del afluente, además como variable respuesta, se hizo un estudio paramétrico basado en pH, dureza, alcalinidad, TDS y MPN. Como **resultado** se observó una eliminación efectiva de la dureza aproximadamente en el rango de 75 a 85% con aplicación del método compuesto, en caso de desinfección, se observa reducción de la bacteria de 80 hasta 90%. **Concluyendo** que, debido a su facilidad de aplicabilidad y rentabilidad, puede ser aplicable a pequeños municipios o áreas residenciales donde el método de tratamiento convencional no se puede aplicar de manera efectiva.

Anaokar y Khambete (2021), India. En su investigación realizada “*Fuzzy rule base approach to evaluate performance of hydrodynamic cavitation for borewell water softening*”. Instituto Nacional de Tecnología Sardar Vallabhbhai, SVNIT, Con cuyo **objetivo** planteado fue reducir la dureza del agua de pozo mediante dos tipos de cavitación. Como parte de la **metodología**, se enfocaron en el montaje experimental de un conjunto de red de tuberías en material UPVC. Los manómetros necesarios fueron instalados en los puntos respectivos para monitorear la presión del nivel de entrada. Cada línea paralela consistía en un

dispositivo HC separado como medidor de riesgo, con orificios de 1 mm, 1,5 mm, 2 mm y 2,5 mm de diámetro. Así mismo se evaluaron los factores de presión, diámetro del orificio, velocidad, material de la tubería, etc. Para evaluar la reducción de la dureza bajo múltiples combinaciones de los parámetros, emplearon como diseño experimental una metodología en base a la regla difusa. Como **resultado** se obtuvieron una reducción de dureza alrededor del 83 %, a una presión de 3 bar utilizando el venturi, en cambio para la placa con orificios, la dureza se redujo en un 91% a 2 bares de presión, en cambio a las condiciones de 1,5 mm de diámetro y presión de 3 bar, la eliminación fue del 93%. Haciendo una comparación con el cálculo de eficiencia estadística; basado en reglas difusas, este enfoque proporciona resultados más prácticos y aceptables. **Concluyendo** que, en base a los datos analizados mediante la lógica difusa, la cavitación hidrodinámica genera una buena eficiencia en amplios rangos correspondientes a los parámetros operacionales.

Tithe & Gode (2020), India. En su investigación realizada “*A Reliable Solution for Treatment of River Water Using Hydrodynamic Cavitation in Combination with Chemical Additives*”. La Academia de Ingeniería del MIT, cuyo **objetivo** de su investigación fue realizar el tratamiento del ablandamiento del agua del río Indrayani mediante la cavitación hidrodinámica en combinación con cal sodada. Como **metodología**, para su desarrollo de la investigación usaron un dispositivo de cavitación del tipo placas, a diferentes orificios (1, 6 y 9 orificios). Se evaluó el efecto de los parámetros operativos, desde la presión, el número de cavitación (Cv), el flujo volumétrico hasta la concentración básica de cal sodada sobre la reducción de DQO, dureza y STD. Como **resultado** obtuvieron un incremento de la variable respuesta a medida que el número de agujeros aumenta y el número de cavitación baja. Utilizando la placa de 9 orificios, redujeron como máximo en 71,4% de DQO, 85% de STD y 82,5% de dureza total a las condiciones de 2 atm y caudal de 3 m<sup>3</sup>/h durante 2 horas de funcionamiento. **Concluyendo** que la técnica de cavitación

hidrodinámica como tratamiento y como método reducen los valores estudiados a niveles adecuados y recomendados por los organismos nacionales e internacionales.

Bang et al. (2019), Corea del Sur. En su publicación “*Sequential carbonate mineralization of desalination brine for CO<sub>2</sub> emission Reduction*”, Instituto Coreano de Geociencias y Recursos Minerales (KIGAM). El **objetivo** de esta investigación fue estudiar la mineralización del CO<sub>2</sub> en fuentes de plantas desalinizadoras ya que estas fuentes contienen altas concentraciones de Ca y Mg mayores que el mar y de pasada reducir las emisiones de CO<sub>2</sub>. La **metodología** empleada para esta investigación fue de enfoque experimental cuantitativo de tipo longitudinal, para ello la precipitación tanto de calcio magnesio se realizaron por separado, si no la eficiencia disminuye por competencia en la precipitación entre ambos. Como **resultado** se elevó la eficiencia en la mineralización de Ca Y Mg en la conversión del CO<sub>2</sub> de 12% a 57% de un proceso secuencial, del mismo modo también se experimentó con un gas de combustión real que contiene un 15% en CO<sub>2</sub>, llegando a precipitar el 69% del gas dióxido de carbono en mineral de calcio y magnesio, en relación a la concentración de calcio y magnesio se logró reducir en 99% y 69% respectivamente, Como **conclusión** se llegó a que los hallazgos de este estudio pueden ayudar a abordar los problemas ambientales causados por las grandes plantas desaladoras de agua de mar y las centrales térmicas.

**Sonawane et al. (2010)**, Australia. En su publicación “Hydrodynamic Cavitation-Assisted Synthesis of Nanocalcite”. Universidad de Melbourne. Con el **objetivo** de hacer un estudio sistemático sobre la síntesis de Nanocalcite utilizando un reactor de cavitación hidrodinámico. La **metodología** para este estudio se enfocó en la evaluación de los efectos de los parámetros operacionales como el diámetro y lo geométrico del orificio, caudal del dióxido de carbono y la concentración de la solución alcalina. La metodología empleada para esta investigación tiene una visión cuantitativa de tipo experimental

longitudinal. Los factores de mayor influencia sobre la carbonatación fueron el diámetro del agujero y la geometría del equipo e igual forma la velocidad de reacción fue mucho más rápida que el tradicional. Como **resultado** las placas de 5 agujeros de 1 mm de diámetro reportaron partículas de 35 nm de tamaño, además el tamaño medio de grano de la calcita sintetizada sin cavitación fue de 101 nm. Se ve que existe una amplia distribución del tamaño de partículas en el rango de 90 a 168 nm para la configuración sin orificio. El cambio en la geometría del orificio ha tenido un efecto significativo sobre el tamaño de los cristalitas. En el caso de 5 orificios de 1 mm de tamaño, se encontró que el orificio daba un tamaño reducido de 37 nm. **Concluyendo** que esta técnica de cavitación hidrodinámica es eficientemente energética con la cual se pueden sintetizar diferentes tamaños de nanocalcita.

### 2.1.2. ANTECEDENTES NACIONALES

Medina et al. (2023), Lima. En su investigación realizada “*Hydrodynamic Cavitation as Pretreatment for Removal of Hardness from Reverse Osmosis Reject Water*”. Universidad Nacional del Callao, Cuyo **objetivo** de su investigación fue reducir la dureza total del rechazo como muestra proveniente del proceso de ósmosis inversa a la cual antes de su tratamiento se le adicionó bicarbonato de sodio. Como parte de la **metodología** empleada, se utilizó el diseño factorial de dos factores con tres niveles cada uno, el factor evaluado fue las placas de (3, 5 y 9 orificios) y un caudal de recirculación de (0,6, 1 y 1,5 L/min) con un tiempo de tratamiento de 60 minutos, además evaluaron a parte de la dureza, los sólidos disueltos totales, el pH y la temperatura del líquido en función del tiempo. Como **resultado** obtuvieron que a medida que se aumenta el caudal y el número de orificios, el porcentaje de eliminación de dureza total aumenta, además para un caudal de alimentación de 1,5 L/min y la placa con 9 orificios, la eliminación máxima se llegó a 66,76 %, también con respecto a la temperatura, se observó un incremento, llegando hasta un valor de 75°C, mientras que tanto el pH y la conductividad disminuyeron a medida que el tiempo transcurre.

**Concluyendo** que la cavitación hidrodinámica como tecnología amigable y sustentable representa una solución a la problemática medioambiental de los residuos industriales con altas concentraciones de dureza cálcica o como una alternativa de pretratamiento generando una eficiencia superior en la reducción de la dureza en 60%.

Bendezú (2017). Universidad César Vallejo – Lima. En su publicación de tesis “Reducción de la dureza de aguas subterráneas mediante micro-nanoburbujas de aire-ozono en la urbanización Villa el Pinar – Comas”. Con el **objetivo** de reducir la concentración de dureza del agua subterránea mediante la aplicación de las micro/nano burbujas de aire, en la urbanización Villa el Pinar- Comas, 2017. La metodología se enmarca en el uso del método pre-experimental y la validación del instrumento se realizó a juicio de expertos; una vez recolectada los datos estos fueron procesados y analizados en el programa estadístico SPSS y Excel 2013. Se tomaron 3 muestras y realizó un tratamiento en un periodo de 10, 15 y 20 min. Como **resultado** de la investigación se encontró que las muestras de agua del sector Villa El Pinar, presentaron una concentración de dureza total de 610ppm (M-01), 600ppm (M-02) y 602ppm (M-03), lo cual se considera como agua muy dura y se encuentra sobrepasando el límite máximo permisible que es de 500ppm para consumo humano. Se obtuvieron porcentajes de reducción de la dureza total después del tratamiento mediante las micro/ nano burbujas en un 17% para la muestra M-01 y M-02; y para la M-03 se obtuvo un 16% de porcentaje de remoción. **Concluyendo** que las micro/nano burbujas lograron remover un porcentaje de la dureza total, manteniéndose cerca al límite máximo permisible que es 500 ppm.

### **2.1.3. ANTECEDENTES LOCALES**

No se encontraron trabajos relacionados a las dos variables de investigación en la región de Huánuco.

## **2.2. BASES TEORICAS**

### **2.2.1. AGUAS SUBTERRÁNEAS**

El agua subterránea se puede definir como cualquier agua que se encuentre en vacíos naturales en el subsuelo. El agua subterránea es la fuente de aproximadamente el 40% de todas las extracciones de agua humana y es esencial para la biota de agua dulce en ríos, lagos y humedales. Si bien miles de millones de personas dependen del agua subterránea como fuente accesible de agua potable y riego, especialmente en tiempos de sequía y presión continua debido al cambio climático, su abundancia y distribución global siguen siendo inciertas y un desafío para futuras investigaciones (Reinecke, 2022).

El agua subterránea se encuentra en el subsuelo, debajo del nivel freático, donde todos los poros de los sedimentos y las rocas están saturados. La tasa de flujo de agua subterránea depende tanto de la caída en la elevación del nivel del agua, o carga hidráulica, a lo largo de la trayectoria del flujo (gradiente hidráulico) como de la capacidad de diferentes sedimentos o rocas para transmitir agua (conductividad hidráulica). Los valores altos de conductividad hidráulica están asociados con acuíferos, que suministran agua a pozos o manantiales, mientras que los valores bajos están asociados con unidades confinantes que separan los acuíferos no confinados (nivel freático) de los acuíferos confinados más profundos (Fryar & Mukherjee, 2019). La cantidad de agua subterránea cambia según diferentes parámetros, como la profundidad del nivel freático, la composición de las sales disueltas, la geología de un área particular, los cambios estacionales, etc.

A escala regional, el agua subterránea fluye desde zonas de recarga en áreas de tierras altas, donde la lluvia o el deshielo se infiltra hasta el nivel freático, hasta zonas de descarga en áreas de tierras bajas, donde el agua emerge en manantiales y se filtra. El relieve topográfico a escala local y la variabilidad espacial en la conductividad hidráulica



(heterogeneidad) pueden afectar las posiciones de los sistemas de flujo de agua subterránea. El transporte de solutos es impulsado por el flujo de agua subterránea y, en menor medida, por la difusión o movimiento de masas. Siguiendo gradientes de concentración. En consecuencia, la heterogeneidad afecta la dispersión de solutos en las aguas subterráneas.

Aunque el 54% del agua subterránea de la Tierra es salina y sólo alrededor del 46% es agua dulce, los reservorios totales de agua dulce subterránea siguen siendo aproximadamente 100 veces más grandes que los reservorios de agua dulce superficial. A pesar de la importancia de las aguas subterráneas para el suministro mundial de agua, no se conoce bien su volumen real y las estimaciones publicadas varían según las propiedades del acuífero, como la porosidad y el espesor del acuífero. Las estimaciones Globales del volumen de agua subterránea varían considerablemente, oscilando entre 15.300.000 km<sup>3</sup> y 22,6 mkm<sup>3</sup>. Un volumen de almacenamiento de agua subterránea de 22,6 mkm<sup>3</sup> corresponde al volumen total de agua subterránea en el 2 km superiores de la corteza continental, y equivale a 180 m de agua subterránea repartidos sobre la superficie terrestre mundial (Ajami, 2020).

### **2.2.2. CONTENIDO SOCIAL, POLITICO AMBIENTAL DE LA AGUAS SUBTERRANEAS**

Los recursos de agua dulce son el agua de lluvia recolectada en el suelo y el agua subterránea recolectada a varias profundidades debajo de la superficie del suelo. El agotamiento de las aguas subterráneas es un problema fundamental en muchos acuíferos de todo el mundo. Varios grandes acuíferos en todo el mundo están mostrando rápidas disminuciones en el almacenamiento de agua subterráneas debido a los efectos del aumento del bombeo de aguas subterráneas y las sequías (Rockström et al., 2023). Estas pérdidas de aguas subterráneas ponen en peligro la seguridad alimentaria mundial y la sostenibilidad de los ecosistemas limitando la adaptación humana al cambio climático.

Además, en la sociedad contemporánea, el descenso del nivel de las aguas subterráneas parece problemático y podría amenazar la futura resiliencia hídrica del agua. Aparte de estos, hay también implicaciones socio ecológicas a escala local cuando persisten las pérdidas de agua subterránea. Estos incluyen la vulnerabilidad a flujos ambientales limitados, menor resiliencia de los ecosistemas a la sequía, mayor frecuencia de sequía, pérdida de ecosistemas que dependen de aguas subterráneas (por ejemplo, arroyos y manantiales) y sitios culturales importantes, agua limitada para fines domésticos, intensificación de las desigualdades sociales. (el acceso de los pobres al agua será limitado) y conflictos sociales, entre otros (Scanlon et al., 2023).

Los efectos potencialmente perjudiciales y de estos impactos refuerzan la necesidad de adoptar un enfoque de gestión integrada de los recursos y las mejores prácticas contemporáneas para coordinar las aguas subterráneas y la administración de los recursos hídricos superficiales. Dado que las aguas subterráneas y las superficiales parecen estar considerablemente vinculadas, y pueden verse limitadas por cambios climáticos (por ejemplo, evapotranspiración, precipitaciones) y antropogénicos (por ejemplo, bombeo de aguas subterráneas) (Dangar & Mishra, 2023).

Pero la gestión de los recursos hídricos subterráneos plantea algunos problemas generales de gobernanza debido a su invisibilidad y a la falta de una arquitectura de control sólida. A diferencia de las aguas superficiales los procesos de las aguas subterráneas son más difíciles de observar y cuantificar. La escasez de datos sobre aguas subterráneas limita la comprensión de los sistemas de aguas subterráneas (por ejemplo, la recarga) y de cómo se ven limitados por el cambio climático y la extracción de agua, por el cambio climático y la extracción de agua. Aunque se han empleado modelos empleado para mejorar el conocimiento de la disponibilidad y el uso del agua a escala regional, el reto de la disponibilidad de datos, y la evaluación de los impactos de la extracción de agua en los sistemas acuíferos a escalas espaciales

pequeñas se están abordando ahora mediante observaciones por satélite (Ndehedehe et al., 2021).

El uso de estos datos para rastrear los impactos de la teleconexión climática en las aguas subterráneas globales es potencialmente factible y puede reforzar nuestra comprensión de los impactos del clima global en global sobre las aguas subterráneas, así como la forma en que los cambios en las aguas superficiales ocurren durante la sequía. Sin embargo, un marco que mejore la viabilidad de identificar, no se ha desarrollado plenamente que mejore la viabilidad de la identificación y evaluación de los cambios provocados por el clima en las aguas subterráneas a escala mundial.

### **2.2.3. CALIDAD DE LAS AGUAS SUBTERRANEAS**

La calidad del agua subterránea es fundamental para garantizar el uso seguro y a largo plazo de este recurso para cualquier actividad, especialmente para beber, irrigar, etc. Sin embargo, la rápida urbanización e industrialización del país ha resultado frecuentemente en la contaminación de las aguas subterráneas como resultado de la descarga de efluentes industriales sin procesar y aguas residuales municipales al río.

La calidad del agua subterránea está controlada por la mineralogía a lo largo de la trayectoria del flujo del agua subterránea y el contacto agua-roca. Normalmente el 90% de la carga disuelta en el agua subterránea consta de seis especies principales: calcio, magnesio, sodio, sulfato, bicarbonato y cloruro. Se infiltra agua dulce de lluvia (1 parte por millón (ppm) de sólidos disueltos) en la zona del suelo donde la degradación de la materia orgánica por bacterias produce dióxido de carbono. La disolución del  $\text{CO}_2$  en agua produce  $\text{H}_2\text{CO}_3$  (un ácido débil), que disuelve vigorosamente los minerales en solución. Agua subterránea potable con cargas totales disueltas de 10s a 100 s ppm normalmente están dominados por calcio y bicarbonato, lo que refleja la firma de carbonatos y silicatos de rápida disolución. Con tiempos de

contacto más largos, los minerales que se disuelven más lentamente hacen que la calidad del agua subterránea se acerque a la del agua de mar dominado por sodio y cloruro. Se pueden alcanzar concentraciones de varios cientos de ppt, 10 veces más que el agua de mar en entornos de roca cristalina profundos (>2000 m). De hecho, el agua potable generalmente está restringida a varios cientos de metros de altura de subsuperficie. Se pueden esperar salmueras en sistemas de tiempo de residencia más profundos o prolongados ( Beckie, 2013).

Según Voutchkov y Kaiser (2020), el agua subterránea puede verse afectada negativamente por la intrusión de concentrado salino donde un acuífero poco profundo subyace al área irrigada. A menos que el área de riego esté muy cerca de la costa, es probable que los acuíferos poco profundos sean menos salinos que concentrados. La mayor parte del agua subterránea presenta buena calidad, pero puede contaminarse como resultado de las actividades humanas o como resultado de las condiciones naturales (Palit & Hussain, 2021).

#### **2.2.4. CONTAINACIÓN DE LAS AGUAS SUBTERRANEAS**

La contaminación de las aguas subterráneas ha aumentado debido a actividades antropogénicas y está directamente relacionada con el uso de la tierra. La contaminación de las aguas subterráneas, causada o inducida por actividades humanas, es un fenómeno que se ha producido desde principios del Holoceno, hace unos 10.000 años, cuando la humanidad se volvió sedentaria y comenzó a establecer aldeas y cultivar la tierra. En consecuencia, relevante se liberaron grandes cantidades de nitrógeno en las aguas subterráneas debido a las actividades agrícolas, y también se propagaron patógenos microbianos y bacterias en los acuíferos procedente de la disposición sanitaria de residuos domésticos. Desde entonces, la agricultura y la urbanización se han expandido e intensificado a través del tiempo debido al crecimiento demográfico y, con ello, a la consiguiente contaminación de las aguas subterráneas (Postigo et al., 2018). Por otra parte, la contaminación del agua subterránea permanece durante mucho tiempo debido al bajo caudal de

agua subterránea en el sistema acuífero.

La industria es otra actividad relevante que perjudica la calidad del agua subterránea, en este sentido, las civilizaciones antiguas que extraían piedras preciosas como, oro, plata, cobre y plomo eran responsables de la liberación de compuestos esencialmente inorgánicos en las masas de agua subterránea. Después de la revolución industrial y con el desarrollo posterior de las industrias petroquímicas y farmacéutica, los desechos que llegaron a las aguas subterráneas también incluyeron desechos de compuestos orgánicos, como alquitranes, fenoles, aceites y mezclas complejas de productos químicos orgánicos sintéticos. Debido al crecimiento demográfico, la contaminación de las aguas subterráneas ha aumentado dramáticamente en los últimos 50 años como resultado de una intensa y explotación extensiva de este recurso hídrico para consumo humano (potable y saneamiento) y usos económicos diversos (turismo, paisajismo, agricultura, producción de energía y otros fines industriales) y cambios radicales en el uso del suelo. La extracción excesiva de agua subterránea reduce el nivel freático. Esto puede resultar en una reducción del agua superficial de flujos de descarga, hundimientos del terreno e incluso deterioro de la calidad del agua subterránea. Los cambios en el patrón de flujo de agua subterránea pueden desplazar aguas salinas y desplazar la interfaz agua de mar-agua subterránea hacia el interior y, además, aumentar la infiltración de aguas superficiales. Además, aguas de diferentes calidades podrían mezclarse en pozos y perforaciones, afectando incluso la calidad del agua de los acuíferos profundos (Morris et al., 2003).

Las masas de agua subterránea suelen estar estrechamente relacionadas con la actividad que se realiza en la superficie terrestre. Por ejemplo, en el caso de las zonas urbanizadas, en estas áreas, es probable que compuestos de nitrógeno, químicos orgánicos sintéticos y patógenos se filtren al agua subterránea. Por otro lado, la intensificación de la producción de cultivos será responsable de la liberación de

agroquímicos (es decir, pesticidas y fertilizantes) en el medio ambiente acuífero. Además, en el caso de los cultivos de regadío, surge un peligro adicional cuando se utiliza agua recuperada para el riego porque los contaminantes orgánicos persistentes derivados de las aguas residuales pueden eventualmente llegar a las aguas subterráneas.

Los contaminantes que se encuentran en las aguas subterráneas se pueden clasificar en dos grandes grupos: biológicos y químicos, y dentro de este último se pueden clasificar además sub clasificados en otros dos grupos: inorgánicos y orgánicos. Los contaminantes biológicos incluyen bacterias, virus y parásitos que son responsables de enfermedades transmitidas por el agua, como la fiebre tifoidea, cólera, disentería, polio, hepatitis y esquistosomiasis. La presencia de bacterias coliformes es indicador de contaminación fecal reciente (Chakraborty et al., 2015).

Con respecto a las fuentes de calcio y magnesio en las aguas subterráneas.

## 2.2.5. COMPOSICIÓN QUÍMICA DE LAS AGUAS SUBTERRÁNEAS

Las sales disueltas en las aguas subterráneas, se encuentran principalmente en forma de iones, según (Garrels & Christ, 1965), las especies disueltas se muestran en la tabla 1.

**Tabla 1**

*Composición de especies disueltas en aguas subterráneas*

<b>CONSTITUYENTE DISUELTO</b>	<b>mg/L</b>
Ca	136
Mg	63
Na	325
K	9
Cl	40
SO <sub>4</sub> <sup>=</sup>	640
HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	651
CO <sub>3</sub> <sup>=</sup>	0.12

*Nota:* (Garrels & Christ, 1965)

Según Freeze y Cherry (1979), las aguas subterráneas se clasifican en tres dimensiones, en la tabla 2 se muestra la clasificación.

**Tabla 2**

*Clasificación de constituyentes en las aguas subterráneas*

CLASIFICACIÓN	TIPO	ESPECIES
<b>CONSTITUYENTES MAYORITARIOS O FUNDAMENTALES</b>	ANIONES	(CO <sub>3</sub> <sup>-</sup> + CO <sub>4</sub> <sup>=</sup> ), Cl <sup>-</sup> , SO <sub>4</sub> <sup>=</sup> , NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>
	CATIONES	Ca <sup>++</sup> , Mg <sup>++</sup> , Na <sup>+</sup> , k <sup>+</sup> , NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>
	OTROS	CO <sub>2</sub> , O <sub>2</sub> , SiO <sub>4</sub> H <sub>4</sub> , SiO <sub>2</sub>
<b>CONSTITUYENTES MINORITARIOS O SECUNDARIOS</b>	ANIONES	F <sup>-</sup> , S <sup>=</sup> , SH <sup>-</sup> , Br <sup>-</sup> , I <sup>-</sup> , NO <sub>2</sub> <sup>-</sup> , PO <sub>4</sub> <sup>=</sup> , BO <sub>3</sub> <sup>-</sup>
	CATIONES	Mn <sup>++</sup> , Fe <sup>++</sup> , Li <sup>+</sup> , Sr <sup>++</sup> , Zn <sup>++</sup>
<b>CONSTITUYENTES TRAZAS</b>		Al <sup>+++</sup> , Ti <sup>+4</sup> , Co <sup>++</sup> , Cu <sup>++</sup> , Pb <sup>++</sup> , Ni <sup>++</sup> , Cr <sup>+++</sup> , etc.

*Nota:* (Freeze & Cherry, 1979)

## 2.2.6. LA DUREZA EN LAS AGUAS SUBTERRÁNEAS

Los recursos de agua subterránea se consideran un proveedor esencial de agua dulce para una bebida segura y uso urbano en la mayoría de los países. La lixiviación de elementos de diferentes especies de rocas naturales, minerales y perfiles del suelo durante la extracción y los procesos agrícolas resultó en una contaminación peligrosa de los recursos hídricos (Abukhadra & Mohamed, 2019).

El agua es un gran disolvente para el calcio (Ca<sup>2+</sup>) y el magnesio (Mg<sup>2+</sup>), por lo que los iones de Ca<sup>2+</sup> y Mg<sup>2+</sup> pueden permanecer en el agua a diferentes concentraciones. Con fines de un buen manejo, según la Asociación de Calidad del Agua (WQA) y el Servicio Geológico de los Estados Unidos (USGS), el agua dura se clasifica según la concentración de iones Ca<sup>2+</sup> y Mg<sup>2+</sup> como equivalente de carbonato cálcico de la siguiente manera: 0 a 60 mg/L (miligramos por litro) como blandas, de 61 a 120 mg/L como moderadamente duras, de 121 a 180 mg/L como duras y más de 180 mg/L como muy duras (Robillard & Sharpe, 2017). Para Abd Aziz et al, (2019) La razón esencial del agua dura son las concentraciones excesivas de Ca<sup>2+</sup> y Mg<sup>2+</sup> superiores a 60 mg/L. Se informó que el aumento en la dureza total (Ca<sup>2+</sup> + Mg<sup>2+</sup>) se

asoció con numerosos efectos secundarios ambientales, de salud y económicos. Por otra parte, la presencia de los principales acuíferos subterráneos en las rocas carbonatadas provoca aumentos excesivos en los niveles de  $\text{Ca}^{2+}$  y  $\text{Mg}^{2+}$ . A sí mismo, para Morris (2011) el agua potable suele ser dura cuando las aguas subterráneas han atravesado tiza o piedra caliza, que deposita calcio y magnesio en el agua.

Estudios realizados por Valenzuela y Yucra (2022), al caracterizar las aguas subterráneas del Distrito de Juliaca encontraron que los valores de la dureza total no se encontraban dentro de los límites máximos permisibles generados por la normativa de la calidad de agua D.S. N°031-2010-SA, llegando a un valor de 573 mg/L. por consiguiente considerado como agua no apto para consumo humano. Otros estudios también confirmaron concentraciones altas de dureza por encima de los límites permisibles (Pancca, 2021) y (Tacuri, 2018). Estudios realizados en Lima, en el Distrito de Comas, al evaluarse la dureza total de las aguas subterráneas, se encontraron valores promedio de 604 ppm, concentraciones consideradas para aguas muy duras y que sobrepasan el LMP para consumo humano (Bendezu, 2017). Así mismos estudios realizados por Pacheco (2019), encontraron 581.20 mg/L( $\text{CaCO}_3$ ) en Villa el Salvador, por Ramos (2017), observaron valores de dureza total (724mg/L) en el Distrito de Comas, todos ellos sobrepasan valores recomendados para consumo humano.

#### **2.2.7. CONSECUENCIAS GENERADAS DEL USO DE AGUAS CON ALTAS CONCENTRACIONES DE $\text{Ca}^{++}$ Y $\text{Mg}^{++}$**

Concentraciones muy bajas o muy altas de calcio (Ca) y magnesio (Mg) o dureza total en el agua potable han sido reconocidas empíricamente como la causa de los problemas de corrosión, incrustaciones o sabor del agua. Las aguas con altas concentraciones de dureza, comúnmente causan incrustaciones en las tuberías y en los calentadores de agua, lo que resulta en complicaciones operativas y efectos adversos en el rendimiento de la máquina. La sobre deposición de  $\text{Ca}^{2+}$  y  $\text{Mg}^{2+}$  como capas de carbonato con un espesor superior a 1



mm dentro de las máquinas provocando un aumento en el consumo de energía en un 12% y una disminución significativa en su eficiencia (Alghamdi et al., 2019). Para Abd Aziz et al. (2019), el  $\text{Ca}^{2+}$  y el  $\text{Mg}^{2+}$  disueltos son los principales responsables de la mayoría de las incrustaciones en tuberías y calentadores de agua y causan numerosos problemas en la lavandería, la cocina y el baño.

Un gran conjunto de evidencia científica de los últimos 60 años también ha atribuido problemas de salud a ambos extremos de estos minerales en el agua. Por ejemplo, beber agua baja en Mg aumenta significativamente la probabilidad de sufrir enfermedades cardiovasculares. En cuanto a los efectos secundarios para la salud, la dureza del  $\text{Ca}^{2+}$  y del  $\text{Mg}^{2+}$  puede provocar enfermedades diarreicas, dermatitis, cáncer de páncreas, mortalidad cerebrovascular, enfermedades cardiovasculares, enfermedad de Alzheimer, diabetes, malformaciones del sistema nervioso central, dermatitis atópica infantil, cálculos renales, salud digestiva, estreñimiento, salud reproductiva y densidad mineral ósea (Ghadamnan & Nabavi, 2019). Para Kadir et al. (2017), los posibles problemas de salud asociados al agua dura son cálculos renales, dermatitis, problemas de salud reproductiva y cáncer de páncreas. Los investigadores introdujeron varias tecnologías de ablandamiento que incluyen evaporación, precipitación química, reducción química, floculación, filtración por extracción de solventes, intercambio iónico y adsorción (Szymanek et al., 2020).

#### **2.2.8. NORMATIVAS Y REGULACIONES SOBRE LA DUREZA CALCICA Y MAGNÉSICA EN AGUA POTABLE A NIVEL NACIONAL E INTERNACIONAL**

El agua potable no es ni puede ser  $\text{H}_2\text{O}$  pura como el agua destilada u osmótica. La presencia de ciertas cantidades de sólidos disueltos totales (TDS) y algunos elementos son necesarios no sólo para evitar que las tuberías se corroen sino también para garantizar un sabor aceptable, prevenir la corrosión subaguda y prevenir efectos adversos crónicos para la salud derivados del consumo del agua a largo plazo (

Kozisek, 2020).

Podemos encontrar un amplio rango de durezas desde muy blanda a extremadamente dura, y aunque estas aguas potables pueden cumplir con todos los requisitos microbiológicos y toxicológicos, el consumo puede influir en la salud de las poblaciones abastecidas, por lo tanto, es muy importante que se hagan ciertas regulaciones sobre las concentraciones de Ca y Mg.

Aunque la actual Directiva sobre agua potable de la UE no incluye límites de dureza, Ca o Mg, la mayoría de los estados miembros regulan estos parámetros ya sea a través de leyes (12 países) o de orientación técnica (7 países), y varios países han emitido información educativa para el público. Sin embargo, las regulaciones en la mayoría de los países no se basan en investigaciones actuales y no son comparables porque algunos proporcionan un rango recomendado mientras que otros proporcionan valores límite mínimos o máximos obligatorios

Según la Organización Mundial de la Salud, recomendó preservar las concentraciones de iones  $\text{Ca}^{2+}$  y el  $\text{Mg}^{2+}$  inferiores a 75 mg/L y 50 mg/L en el agua potable respectivamente.

**Tabla 3**

Valores mínimas requeridas y recomendadas de minerales en agua blanda o desmineralizada (desalinizada), propuesto por varios estados miembros para refundición de la Directiva de agua potable de la UE

Parámetro	Unidad	Concentración mínima requerida en ablandados o desmineralizados (desalinizada) del agua (a)	Concentración óptima recomendada desde el punto de salud (b)
Calcio (Ca)	mg/L	30	40 - 80
Magnesio (Mg)	mg/L	10	20 - 40
Sólidos disueltos totales (TDS)	mg/L	100	200 - 500

(a) El agua que contiene una concentración más baja de Ca, Mg o TDS no debe someterse a ablandamiento o desmineralización (desalinización)

(b) Los valores se basan en estudios epidemiológicos que muestran que la incidencia de enfermedades relacionadas es la más baja en estos rangos de calidad del agua.

Según la Organización Mundial de la Salud:

Calcio (Ca)	mg/L	< 75
Magnesio (Mg)	mg/L	< 50

*Nota. Concentraciones mínimas recomendadas. Extraído de (Kozisek, 2020).*

Con respecto a las normativas peruanas, establecen sólo valores con respecto a la dureza total, mas no de la dureza cálcica y magnésica, por ejemplo, con la finalidad de la conservación y aprovechamiento sostenible de los recursos del agua, se establecieron estándares nacionales de calidad ambiental del agua, específicamente para la categoría 1, sobre población y recreación, donde indican que aquellas aguas superficiales destinadas a la producción del agua potable con tan sólo una desinfección deben tener como máximo una dureza de 500 mg/L. Con respecto al reglamento de la calidad del agua para el consumo humano, según el DS N° 031-2010-SA. Indican que, como límite máximo permisible de dureza total, el agua potable debe tener 500 mg/L.

### **2.2.9. PROCESO DE ABSORCIÓN DEL DIOXIDO DE CARBONO**

Como lo hace notar Jimoh et al. (2023), el proceso de absorción (tecnología basada en solventes) es un método de captura de carbono que parece ser el método más cercano a ser aplicado a escala industrial y se espera que reduzca las emisiones de CO<sub>2</sub> de fuentes estacionarias puntuales. La absorción es una de las tecnologías comercialmente más maduras para lograr objetivos de reducción de emisiones de carbono de forma económica y sostenible.

Aunque ya existen tecnologías de captura de CO<sub>2</sub>, pero están limitadas por procedimientos de recuperación de CO<sub>2</sub> que consumen mucha energía, junto con la purificación, el transporte y el almacenamiento del CO<sub>2</sub>. Entre los nuevos métodos de captura de CO<sub>2</sub> que están evolucionando en la actualidad se encuentran los siguientes, incluyen los procesos de pre combustión, las tecnologías de carbonato o de bucle de calcio y el proceso de oxidación, sin embargo, como cualquier tecnología, existen pros y contras en la captura de CO<sub>2</sub> a escala industrial como tecnología (Ngu, 2022).

Al emplearse la tecnología de carbonatación, en la literatura se han utilizado diferentes reactores, con configuraciones y diseños diversos, como el homogeneizador de chorro de alta presión, el reactor de flujo mixto, el reactor de tubo de aspiración y el reactor de flujo de chorro, para producir partículas de CaCO<sub>3</sub>. Estudios anteriores han revelado que, en comparación con los reactores discontinuos tradicionales, estos reactores tienen ventajas superiores debido a una mayor reproducibilidad del CaCO<sub>3</sub> con las cualidades deseadas en condiciones químicas controladas (Blue, y otros, 2017).

### **2.2.10. MINERALIZACIÓN DEL CO<sub>2</sub> COMO PARTE DEL TRATAMIENTO DE AGUA EMPLEANDO LA TECNOLOGÍA DE CAVITACIÓN HIDRODINÁMICA**

De acuerdo con Altiner (2018), la carbonatación mineral es una de las tecnologías de captura y almacenamiento de carbono (CAC) que

ofrece un gran potencial para la mitigación de CO<sub>2</sub> y se basa en la carbonatación de minerales o relaves que contienen Ca o Mg (fuentes naturales) mediante procesos de MC directos o indirectos. La carbonatación directa es muy baja en su eficiencia debido a muchas limitaciones como la cinética, además se trabaja a temperaturas y presiones altas. Por el contrario, el proceso de CM indirecta se divide en dos etapas: (i) la extracción de calcio (Ca) o magnesio (Mg) de materias primas en medio alcalino o ácido, (ii) la precipitación de iones extraídos como carbonatos minerales mediante el burbujeo de CO<sub>2</sub> en la solución.

La tasa de la mineralización del CO<sub>2</sub> se puede acelerar cuando la reacción tiene lugar en fase acuosa, como ocurre en reacciones químicas típicas de Ionización de CO<sub>2</sub> a CO<sub>3</sub><sup>2-</sup> y que tienen lugar en condiciones alcalinas. Esto es esencial para la mineralización del CO<sub>2</sub>, ya que permite reacciones iónicas entre el CO<sub>3</sub><sup>2-</sup> y Ca<sup>2+</sup> y/o Mg<sup>2+</sup>. Asimismo para que las reacciones tengan eficiencia se requieren aplicar químicos alcalinos como NaOH o NH<sub>4</sub>OH para aumentar el pH de la fase acuosa en la mineralización de CO<sub>2</sub> (Bang et al., 2014). Por otro lado, el uso de Ca y Mg presentes en residuos sólidos industriales como restos de hormigón, escorias de acero, todavía requieren algunos pasos de pretratamiento, como trituración, tamizado, activación y/o digestión para extraer Ca y Mg, en cambio cuando usas residuos líquidos, tales procedimientos de pretratamiento no son necesarios porque el Ca y/o Mg ya están presentes como iones. Por esta razón, el uso de salmuera y otras soluciones con presencia de Ca<sup>2+</sup> y/o Mg<sup>2+</sup> es una ruta prometedora para la mineralización de CO<sub>2</sub> (Sanna et al., 2014) y (Jun-Hwan et al., 2017).

Por otra parte, presencia de iones como Ca<sup>2+</sup>, Mg<sup>2+</sup>, CO<sub>3</sub><sup>-</sup>, CO<sub>4</sub><sup>=</sup>, Cl<sup>-</sup>, SO<sub>4</sub><sup>=</sup>, NO<sub>3</sub><sup>-</sup>, Na<sup>+</sup>, K<sup>+</sup>, NH<sub>4</sub><sup>+</sup>, F<sup>-</sup>, S<sup>=</sup>, SH<sup>-</sup>, Br<sup>-</sup>, I<sup>-</sup>, NO<sub>2</sub><sup>-</sup>, PO<sub>4</sub><sup>=</sup>, BO<sub>3</sub><sup>-</sup>, Al<sup>+++</sup>, Ti<sup>+4</sup>, Co<sup>++</sup>, Cu<sup>++</sup>, Pb<sup>++</sup>, Ni<sup>++</sup>, Cr<sup>+++</sup>, etc. en las aguas pueden causar un daño tanto a la salud humana y el medio ambiente, para ello métodos convencionales de tratamiento como (adsorción, degradación ultravioleta (UV) y filtración por membrana) no pueden degradar

eficazmente los componentes persistentes, inclusive otros presentan un inconveniente de sólo separarlos de las aguas contaminadas, lo que provocará contaminación secundaria, tal es el caso de la tecnología de las membranas; por lo tanto, estas tecnologías dependen de la incorporación de productos químicos y generan altas cargas de lodos en el proceso (Wang et al., 2021).

Para resolver este problema, durante muchos años, la gente ha estado trabajando en sistemas de alta eficiencia, económicos y tecnologías de tratamiento de aguas contaminadas que ahorran energía. Como forma eficaz de tratamiento de aguas contaminadas, la cavitación considerada como una tecnología eficaz y prometedora y ser parte del proceso de oxidación avanzada (POA), ha recibido amplia atención que ha atraído el interés de muchos investigadores y se ha usado ampliamente en muchos campos, incluida la desinfección, la alteración celular, tratamiento de lodos, síntesis de biodiesel, producción de nanoemulsiones, degradación de polímeros, degradación de diversos compuestos orgánicos, pesticidas, tintes textiles y fenólicos (Wang et al., 2021). Así mismo, la reacción de iones  $\text{Ca}^{2+}$  con gas  $\text{CO}_2$  para producir partículas de carbonato de calcio precipitado (PCC,  $\text{CaCO}_3$ ) se llevaron a cabo en un tubo Venturi, esto no sólo proporciona un flujo de turbulencia, sino que crea pico-nano burbujas de  $\text{CO}_2$  durante la carbonatación. En particular, el tubo Venturi se ha utilizado para mejorar la interacción entre burbujas de aire y partículas finas en un proceso de flotación (Altiner, 2018).

### **2.2.11. REACTOR DE CAVITACIÓN HIDRODINÁMICA**

En la opinión de Gogate y Pandi (2004), La cavitación es el fenómeno de la nucleación, el crecimiento y la implosión de cavidades llenas de vapor o gas en un corto período de tiempo (generalmente milisegundos).

Para Ferrar (2017), La cavitación es el paso de la fase líquida a la fase de vapor porque la presión del líquido local cae hasta la presión de

saturación a una temperatura dada.

Cuando la burbuja de cavitación estalla, debido a la inercia y compresibilidad del contenido de la burbuja de gas-vapor, generará una enorme fuerza de implosión, causando puntos calientes locales y liberando grandes magnitudes de energía. La temperatura puede alcanzar entre 500 y 15000 K y la presión está dentro del rango 100 a 5000 atmósferas, y estos cambios de temperatura y la presión se generan como resultado del cambio de fase (Suslick, 1990).

El colapso de las burbujas de cavitación puede provocar diversos efectos fisicoquímicos que inducen numerosos cambios físico-químicos. Bajo estas condiciones de cavitación, las moléculas de agua se pueden descomponer en una variedad de especies con un alto potencial de oxidación, incluidos los radicales hidroxilos ( $^{\circ}\text{OH}$ ),  $^{\circ}\text{OOH}$  y  $\text{H}_2\text{O}_2$ , que pueden reaccionar con diversos compuestos contenidos en las aguas contaminadas (Wu et al., 2018).

Según el modo de generación, la cavitación se puede dividir en cuatro categorías: cavitación óptica (OC), cavitación de partículas (PC), cavitación acústica (AC) y cavitación hidrodinámica (HC). En comparación con las demás cavitaciones, la tecnología de cavitación hidrodinámica tiene las características de operación a gran escala, mejor eficiencia energética y equipo simple.

La cavitación hidrodinámica puede generarse por alteraciones en el flujo y la presión, que generalmente son causados por construcciones específicas (como tubo de riesgo, boquilla y placa de orificio), dispositivos basados en vórtice como diodo de vórtice, o rotación mecánica de los dispositivos de tipo giratorio que se basan principalmente en el diseño de un rotor y un estator. En HC, la intensidad de la cavitación depende de la intensidad de la turbulencia y del número de cavidades generadas. El Número de cavitación ( $C_v$ ), un número adimensional, se definen para describir la condición de cavitación hidrodinámica, viene dada por la siguiente ecuación:

$$Cv = \frac{P_2 - P_v}{\left(\frac{1}{2}\right)\rho V_0^2} \quad (1)$$

Donde  $P_2$  es la presión aguas abajo totalmente recuperada,  $P_v$  es la presión de vapor presión del líquido,  $v_0$  es la velocidad en la garganta del líquido en cavitación dispositivo, y  $\rho$  es la densidad del líquido.

Según los estudios realizados por Rajoriya et al. (2017) han demostrado que el inicio de la cavitación ocurre típicamente cuando  $Cvi = 1$  en condiciones ideales, y hay efectos cavitacionales significativos cuando el valor de  $Cv$  es  $<1$ . Sin embargo, en muchos casos, debido a la existencia de pequeñas cantidades de gases disueltos y partículas en suspensión, se pueden generar cavidades a  $Cv$  mayor que 1. Se ha informado que un  $Cv$  en el rango de 0,1 a 0,2 proporciona una mejor eficiencia de degradación. Sin embargo, no se puede ignorar que existen algunos argumentos que indican que el número de cavitación no es una indicación adecuada del inicio o intensidad de la cavitación, según Sarc et al. (2017) señaló que existen grandes inconsistencias en los informes sobre el número de cavitación. No se puede utilizar como parámetro único que proporciona la condición de cavitación ya que la geometría, la velocidad del flujo, la temperatura y el contenido de gas son factores vitales que influyen en el tamaño, la dinámica y la agresividad de la cavitación.

#### **2.2.12. REACTOR DE CAVITACIÓN HIDRODINÁMICA TIPO ORIFICIO**

La placa de orificio es simple y fácil de diseñar y puede acomodar más agujeros en un área determinada de la sección transversal de la tubería. A diferencia del venturi que tiene secciones convergentes y divergentes suaves, la cavitación en un orificio es transitoria debido a la repentina contracción y divergencia. También, debido a la repentina expansión de la tubería, la presión se recupera inmediatamente y la cavidad colapsa rápidamente, lo que provoca un intenso colapso de la cavidad (Wang et al., 2021).



El número de orificios son factores importantes en el diseño de la placa de orificios. Por lo general, la investigación sobre el efecto cavitacional de la placa de orificio principalmente se concentra en los siguientes parámetros: 1. La relación del perímetro total al área de flujo total ( $\alpha$ ); 2. La relación entre el área de la garganta y la sección transversal del área de la tubería ( $\beta$ ).

$$\alpha = \frac{\text{Perímetro total de los agujeros}}{\text{Área total abierta}} = \frac{4}{d_0}(\text{mm}^{-1}) \quad (2)$$

$$\beta = \frac{\text{Suma de las áreas de los orificios en la placa de orificios}}{\text{Área de la sección transversal de la tubería}} = n\left(\frac{d_0}{D}\right)^2 \quad (3)$$

Donde,  $d_0$  = diámetro del orificio,  $D$  = diámetro de la tubería y  $n$ = número de orificios en la placa del orificio. La definición del parámetro  $\alpha$  cuantifica el efecto de la geometría de los dispositivos HC sobre el comportamiento de cavitación y facilita el análisis del efecto del parámetro de geometría sobre el rendimiento cavitacional es más intuitivo. Generalmente, el valor de  $\beta$  está relacionado con la intensidad de la turbulencia afectando así la vida de la burbuja. A veces el parámetro  $\beta'$  (el valor de la relación entre el orificio y el diámetro de la tubería) también es empleado en lugar de  $\beta$  (Wang et al., 2021).

### **2.2.13. EFECTOS DE PARÁMETROS MAS INFLUYENTES EN LA CAVITACIÓN HIDRODINÁMICA TIPO ORIFICIO**

La presión de entrada de los dispositivos de cavitación es la más importante de los parámetros operativos que pueden alterar significativamente el comportamiento de la burbuja o cavitación y la intensidad de la cavitación. La intensidad del colapso de la cavidad depende principalmente de la tasa de cambio de la presión turbulenta en la sección de aguas abajo del orificio y la magnitud final de la presión recuperada aguas abajo del orificio. Un aumento de la presión aguas

arriba del orificio provoca un aumento de la presión aguas debajo, además un aumento del caudal de líquido y también la tasa de disipación de energía en el sistema, lo que resulta en una mayor caída de presión permanente a través del orificio y un aumento en la entrada de energía por unidad de masa de líquido (Sharma et al., 2008).

El tiempo de tratamiento determina el número de pasadas del líquido a través del dispositivo de cavitación cuando el caudal de líquido es constante. Cuanto mayor sea el número de pasadas, más tiempo permanecerán las moléculas contaminantes expuestas a la zona de cavitación. De ahí que muchos investigadores han informado que el grado de eliminación de contaminantes aumenta con el aumento del tiempo de tratamiento y, por lo general, utilizan modelos de reacción mecánica dinámica de pseudoprimer orden para describir los efectos de la operación a condiciones sobre la degradación de los contaminantes (Rajoriya et al., 2017).

#### **2.2.14. CAMBIOS FISICOQUÍMICOS DE LA ABSORCIÓN DEL CO<sub>2</sub> SOBRE AGUA DURA ASISTIDA CON CAVITACIÓN HIDRODINÁMICA TIPO ORIFICIO**

La presencia de iones calcio (Ca<sup>2+</sup>) y magnesio (Mg<sup>2+</sup>) es la principal causa de la dureza en el agua. Aunque existen otros cationes como aluminio y hierro en ella, lo cierto es que su presencia es menos crítica. Esta dureza puede ser temporal debido a la asociada a la presencia de calcio en forma de carbonatos/bicarbonatos en el agua Ca(HCO<sub>3</sub>) y también existe la dureza permanente que está ligada a sulfatos y cloruros.

Cuando hay presencia de altas concentraciones de cal y magnesio en el agua y éstas no se separan o precipitan correctamente para eliminar su dureza, se produce la formación de cristales e incrustaciones en los circuitos, pudiendo provocar manchas y obstrucciones y llegando incluso a afectar gravemente al proceso y a los costes de mantenimiento asociados a los mismos (pérdidas de carga,

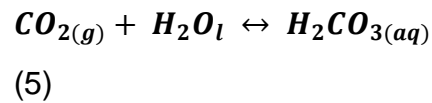
mantenimiento de bombas, canalizaciones equipos mecánicos de separación de sólidos...etc).

Para determinar el carácter agresivo o incrustante del agua normalmente se tiene en cuenta los diversos equilibrios en el agua del ácido carbónico, la relación bicarbonatos-carbonatos, el pH, temperatura, concentración de calcio y alcalinidad. Comúnmente se utilizado es el Índice de Langelier para proporcionar un indicador del grado de saturación del agua con respecto al carbonato de calcio.

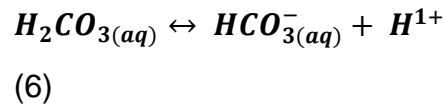
Por tanto, para reducir la dureza se debe llevar el equilibrio del  $\text{CO}_2$  a la formación de carbonatos para que a un pH determinado precipite en forma de carbonato cálcico y con una correcta separación del precipitado se reduzca a su vez la dureza sin afectar por incrustaciones los procesos posteriores.

Las aguas pueden contener diferentes cantidades de  $\text{CO}_2$  libre, el cual influye en el comportamiento del carbonato de calcio contenido en tales aguas. Se dice que el  $\text{CO}_2$  de equilibrio es la cantidad de dióxido de carbono que debe estar presente en el agua para mantener en solución al bicarbonato que se encuentra en dicha agua. Si existe  $\text{CO}_2$  en exceso, éste ataca al  $\text{CaCO}_3$  para aumentar la concentración del bicarbonato y mantener el equilibrio; por otro lado, si hay deficiencia de  $\text{CO}_2$ , el  $\text{CaCO}_3$  se precipita para disminuir la concentración de bicarbonato, aumentando así el  $\text{CO}_2$  y restableciendo el equilibrio. Si el  $\text{CO}_2$  libre es mayor que el  $\text{CO}_2$  de equilibrio, existe exceso, por lo que se considera que el agua es agresiva. Si el  $\text{CO}_2$  libre es igual al de equilibrio, el agua está en equilibrio. Sin embargo, cuando el  $\text{CO}_2$  libre es menor que el de equilibrio, existe deficiencia en el  $\text{CO}_2$  de equilibrio, y se dice que el agua es incrustante (Blogsadm, 2019). Cuando el  $\text{CO}_2$  se disuelve en el agua, reacciona con ella para formar ácido carbónico, disociándose en iones hidrógeno y el ion bicarbonato siguiendo la reacción:

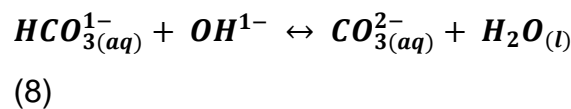
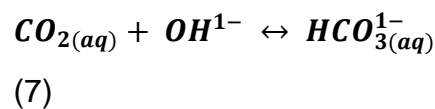
Etapa 1, el gas dióxido carbono reacciona con el agua formando ácido carbónico como se indica en la siguiente ecuación.



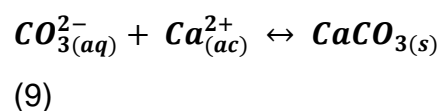
Etapa 2, el ácido se disocia en ion bicarbonato con la liberación de iones hidronio.



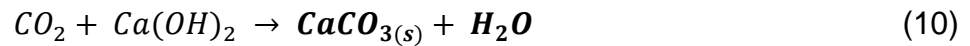
Etapa 3, el dióxido de carbono acuoso reacciona con los iones oxidrilos ( $OH^-$ ) para generar ion bicarbonato  $HCO_3^-$  y ion carbonato  $CO_3^{2-}$  como se expresa en las ecuaciones siguientes.



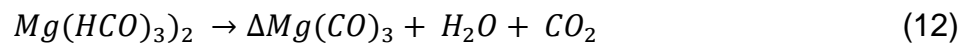
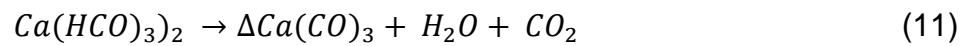
Según (Fleischer et al., 1996), las ecuaciones anteriores son reacciones reversibles con velocidades de reacción muy rápidas en un rango de pH alto. La Reacción se lleva a cabo inmediatamente después de la formación de bicarbonato (Junhyeok & Myoung-Jin, 2019). El  $CO_2$  acuoso no existe en la solución durante la reacción, después de su formación se reacciona inmediatamente con  $OH^-$ . Una vez que se genera  $CO_2$  acuoso en la solución, se consume instantáneamente a través de las reacciones (Fleischer et al., 1996).



En aguas con elevada dureza cálcica, dosificando de manera óptima  $CO_2$ , precipitamos los iones causantes de la misma mediante la reacción:



El cambio físico que ocurre en la muestra, cuando la temperatura se incrementa por efecto de la cavitación: Los bicarbonatos solubles se convierten en carbonatos insolubles a medida que la temperatura sube y después se eliminan mediante filtración.



### 2.3. DEFINICIONES CONCEPTUALES

#### ➤ Agua Subterránea

Es aquella proporción del agua real en la parte inferior de la extensión terrestre que puede ser recaudada por perforaciones, galerías de drenaje o la que emana naturalmente hacia el exterior a través de manantiales o filtraciones a los cursos fluviales (Ordoñez, 2012).

#### ➤ Dureza

Es una característica que surge de la mayor o menor proporción de sales disueltas presentes, principalmente  $Ca^{2+}$  y  $Mg^{2+}$ , su grado de dureza es directamente proporcional a la concentración de sales de calcio y magnesio presentes pueden hallarse junto a diferentes aniones, si se encuentran asociados de  $HCO_3^-$  componen la dureza temporaria o carbónica, si lo están de  $SO_4^-$ ,  $Cl^-$ , etc. Componen la dureza permanente o no carbonatada (Bottani & Odetti, 2006).

#### ➤ Calcio

El calcio ( $Ca^{2+}$ ) es un catión con capacidad multifuncional como segundo mensajero en diferentes grupos celulares del sistema inmunitario que incluyen los linfocitos T y B, los macrófagos, los mastocitos, entre otras (Rigola, 1990).

### ➤ Dioxido de Carbono

El dióxido de carbono es un gas que se obtiene como producto final de un sin número de procesos químicos y biológicos. Su concentración en la atmósfera es más bien baja, aunque ha aumentado mucho en los últimos años. El dióxido de carbono, de modo que su fórmula química es  $\text{CO}_2$ . Esta molécula es de geometría lineal y está constituido por dos átomos de oxígeno y uno de carbono simétrica, la estructura de Lewis que la representa es:  $\text{O}=\text{C}=\text{O}$  (Máxima-Uriarte, 2020).

### ➤ Absorción Química

Los sistemas de absorción química se basan en principios de transferencia de masa líquida-biogás similares a los de los sistemas de depuración con agua y disolventes orgánicos. La eliminación de  $\text{CO}_2$  se realiza utilizando absorbentes como alcanolaminas (monoetanolamina, dimetiletanolamina, piperazina, etc.) o soluciones acuosas alcalinas ( $\text{NaOH}$ ,  $\text{KOH}$ ,  $\text{CaOH}$ , etc.) (Venkiteshwaran et al., 2022).

### ➤ Ablandamiento

El ablandamiento del agua es la eliminación del calcio, el magnesio y algunos otros cationes metálicos del agua dura. El agua blanda resultante requiere menos jabón para el mismo esfuerzo de limpieza, ya que el jabón no se desperdicia uniéndose a los iones de calcio. El agua blanda también prolonga la vida útil de las tuberías al reducir o eliminar la acumulación de sarro en tuberías y accesorios. El ablandamiento del agua generalmente se logra mediante ablandamiento de cal o resinas de intercambio iónico, pero cada vez se logra más mediante Nanofiltración, ósmosis inversa con membranas (Szymanek et al., 2020).

### ➤ Cavitación

El fenómeno de cavitación se puede definir ampliamente como el desarrollo, crecimiento y posterior caída de cavidades que liberan cantidades de energía durante una fracción de tiempo, crean situaciones como climas

tropicales y también producen condiciones de alta oxidación mediante la producción de  $^{\circ}\text{OH}$  y  $\text{H}_2\text{O}_2$  (Suslick, 1990).

### ➤ Cavitación Hidrodinámica

La cavitación hidrodinámica es un proceso mediante el cual la presión local dentro del fluido cae bruscamente, que está por debajo de la presión de vapor saturado de este estado, y el gas se disuelve en el agua a separarlo que conduce a la generación y crecimiento de burbujas de cavitación. (Rajoriya et al., 2017).

### ➤ Mineralización del $\text{CO}_2$

La carbonatación mineral (MC) es una de las tecnologías de captura y almacenamiento de carbono (CAC) que ofrece un gran potencial para la mitigación de  $\text{CO}_2$  y se basa en la carbonatación de minerales o relaves que contienen Ca o Mg (fuentes naturales) mediante procesos de MC directos o indirectos (Altiner, 2018).

## 2.4. HIPÓTESIS

### 2.4.1. HIPÓTESIS GENERAL

**Hi:** Existe una relación de influencia significativa entre los parámetros de operación y el proceso de absorción del  $\text{CO}_2$  asistida por cavitación hidrodinámica sobre la reducción de la dureza cálcica en aguas subterráneas del Distrito de Luyando – 2023.

**Ho:** No existe una relación de influencia significativa entre los parámetros de operación y el proceso de absorción del  $\text{CO}_2$  asistida por cavitación hidrodinámica sobre la reducción de la dureza cálcica en aguas subterráneas del Distrito de Luyando – 2023.

### 2.4.2. HIPÓTESIS ESPECÍFICAS

**Hi.1:** Hay influencia significativa del flujo de dióxido de carbono sobre el porcentaje promedio de reducción de la dureza cálcica en aguas subterráneas del Distrito de Luyando – 2023.

**Ho.1:** No hay influencia significativa del flujo de dióxido de carbono sobre el porcentaje promedio de reducción de la dureza cálcica en aguas subterráneas del Distrito de Luyando – 2023.

**Hi.2:** Hay influencia significativa de la presión de entrada sobre el porcentaje promedio de reducción de la dureza cálcica en aguas subterráneas del Distrito de Luyando – 2023.

**Ho.2:** No hay influencia significativa de la presión de entrada sobre el porcentaje promedio de reducción de la dureza cálcica en aguas subterráneas del Distrito de Luyando – 2023.

**Hi.3:** Hay influencia significativa del tiempo de tratamiento sobre el porcentaje promedio de reducción de la dureza cálcica en aguas subterráneas del Distrito de Luyando – 2023.

**Ho.3:** No hay influencia significativa del tiempo de tratamiento sobre el porcentaje promedio de reducción de la dureza cálcica en aguas subterráneas del Distrito de Luyando – 2023.

**Hi.4:** Hay influencia significativa del bicarbonato de sodio sobre el porcentaje promedio de reducción de la dureza cálcica en aguas subterráneas del Distrito de Luyando – 2023.

**Ho.4:** No hay influencia significativa del bicarbonato de sodio sobre el porcentaje promedio de reducción de la dureza cálcica en aguas subterráneas del Distrito de Luyando – 2023.

## **2.5. VARIABLES**

### **2.5.1. VARIABLE DEPENDIENTE**

Dureza cálcica en agua subterránea del Distrito de Luyando.

### **2.5.2. VARIABLE INDEPENDIENTE**

Parámetros operacionales del proceso de absorción del CO<sub>2</sub> asistida por cavitación hidrodinámica.



## 2.6. OPERACIONALIZACIÓN DE VARIABLES

“INFLUENCIA DE LOS PARÁMETROS OPERACIONALES DEL PROCESO DE ABSORCIÓN DEL CO<sub>2</sub> ASISTIDA POR CAVITACIÓN HIDRODINÁMICA SOBRE REDUCCIÓN DE LA DUREZA CÁLCICA EN AGUAS SUBTERRANEAS DEL DISTRITO DE LUYANDO - 2023”

**Tabla 4**

*Tabla de Operacionalización de Variables*

Variable	Dimensión	Indicadores	Valor final	Escala de medición
<b>Variable independiente</b>		-Presión de alimentación a la CH tipo placa orificio	Psi	Numérica continua
Parámetros operacionales del proceso de absorción del CO <sub>2</sub> asistida por cavitación hidrodinámica	Parámetros de operación	-Tiempo de operación	minutos	Numérica continua
		-Flujo de dióxido de carbono	L/min	Numérica continua
		-Bicarbonato de sodio	ppm	Numérica continua
Variable	Dimensión	Indicadores	Unidades	Instrumento
<b>Variable dependiente</b>				
Dureza cálcica en agua subterránea del Distrito de Luyando	Concentración del ión calcio	Porcentaje de reducción de la concentración del catión calcio en unidad de tiempo	%	Numérica continua

## **CAPÍTULO III**

### **METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN**

#### **3.1. TIPO DE INVESTIGACIÓN**

De acuerdo con el criterio de Supo (2014), la siguiente investigación se encuentra clasificado en los siguientes principios taxonómicos. Con respecto a la planificación de las mediciones de la variable de estudio, este estudio pertenece al criterio prospectivo, porque los datos se recabaron en el campo experimental, correspondiente a la dureza cálcica, pH, temperatura y conductividad. En base al criterio de número de mediciones de la variable de estudio, es de carácter longitudinal, ya que se realizaron mediciones de la variable en diferentes tiempos de tratamiento. De acuerdo al número de variables analíticas, corresponde al análisis analítico, porque presenta dos variables, una de ellas el agua subterránea con dureza y la otra los parámetros operacionales del proceso de tratamiento y por último según el criterio de la intervención del investigador, la investigación es del tipo experimental porque se evaluó la influencia de los factores sobre la reducción de la dureza.

##### **3.1.1. ENFOQUE**

Este estudio tiene un enfoque cuantitativo, todos los datos adquiridos son numéricos, recogidos en el campo experimental a diferentes intervalos de tiempo, además se hizo uso de la estadística para su análisis y posterior modelamiento de la variable dependiente y su relación con la variable independiente (Supo, 2014).

##### **3.1.2. ALCANCE O NIVEL**

El estudio tiene la característica de ser de nivel explicativo, porque mediante la manipulación de una de las variables se conocerá la influencia sobre la otra variable como respuesta generando la relación de causa y efecto, por lo tanto, se busca proponer una solución para mejorar la calidad de agua subterránea mediante la aplicación de la técnica de absorción del CO<sub>2</sub> asistida con cavitación, buscando mejorar

la situación inicial después de su aplicación (Supo, 2014).

### 3.1.3. DISEÑO

El estudio realizado tiene la particularidad de ser un diseño de experimento avanzado, se trabajaron con varios grupos con las mismas características a los cuales se le intervino en diferentes condiciones operacionales, variando algunos parámetros evaluativos del proceso de tratamiento con la finalidad de cambiar las condiciones iniciales de la muestra (Supo, 2014).

Para conocer la influencia de las cuatro variables independientes sobre la variable dependiente (dureza cálcica), se utilizó el diseño estadístico experimental del arreglo ortogonal de Taguchi  $L_8 (2^4)$ , con la cual resultó un total de 8 corridas más su réplica adicionado por experimento, llegando en total 16 experimentos ejecutados (Al et al., 2013).

Los valores correspondientes a los niveles de las variables en estudio se muestran en la tabla 5, estos valores referenciales se tomaron en cuenta de acuerdo a los trabajos publicados por Medina et al. (2023), Anaokar & Khambete (2021), Redekar et al. (2020) y Tithe & Gode (2020).

**Tabla 5**  
*Factores y sus respectivos niveles*

CÓDIGO	PARÁMETROS OPERACIONALES	Unidades	NIVELES	
			(-1)	(+1)
<b>A</b>	Presión de entrada	PSI	7	22
<b>B</b>	Tiempo de tratamiento	Min.	20	40
<b>C</b>	Flujo de dióxido de carbono	L/min	0	2
<b>D</b>	Bicarbonato de sodio NaCO <sub>3</sub>	ppm	0	530

Nota: En esta tabla se muestran los valores de cada una de las variables a estudiar, sobre su influencia en la reducción cálcica.

Mediante el diseño experimental propuesto de Taguchi L<sub>8</sub>, utilizando del software Minitab se generó la matriz experimental, donde indica el número de corridas a realizar, la tabla 6 muestra el diseño robusto de Taguchi de la investigación realizada.

**Tabla 6**

*Diseño experimental L8 de Taguchi para este estudio*

Núm. de exp.	diseño experimental L8 (codificado)				diseño experimental L8 (sin codificar)			
	A	B	C	D	A	B	C	D
1	1	1	1	1	7	20	0	0
2	1	1	2	2	7	20	2	530
3	1	2	1	2	7	40	0	530
4	1	2	2	1	7	40	2	0
5	2	1	1	2	22	20	0	530
6	2	1	2	1	22	20	2	0
7	2	2	1	1	22	40	0	0
8	2	2	2	2	22	40	2	530

Nota: La tabla contiene las 8 corridas realizadas en toda la investigación.

## 3.2. POBLACIÓN Y MUESTRA

### 3.2.1. POBLACIÓN

La población estuvo conformada por las aguas subterráneas del Distrito de Luyando, Provincia Leoncio Prado, Departamento Huánuco, estas aguas actualmente son usadas para el consumo humano y contienen una cierta cantidad de dureza, la muestra recogida de la población se realizó en la fecha de 7 de setiembre del 2023.

### 3.2.2. MUESTRA

Como muestra se consideró por cada experimento un volumen de 6 litros, como se realizaron 8 experimentos más una réplica, en total se necesitaron 96 litros de muestra de agua subterránea que se sacaron del Distrito de Luyando. Así mismo por cada experimento realizado se sacaron 100 ml cada 10 minutos como unidad de análisis para su respectiva caracterización de dureza cálcica. Esta caracterización se

realizó en el mismo lugar donde se realizó la parte experimental con las adecuaciones correspondientes.

Por otra parte, las muestras provenientes de las aguas subterráneas del Distrito de Luyando, previamente se hicieron un análisis de la caracterización de la dureza actual en los tres pozos subterráneas, con la finalidad de ver cuál de ellos tiene mayor dureza, en base a los resultados obtenidos, se trabajó con la muestra que tiene mayor dureza, en este caso el pozo 2.

Así mismo la cantidad de volumen de trabajo por muestra está en función a los antecedentes y recomendaciones dadas por los investigadores Medina et al. (2022), y por otra parte, tener en cuenta el dimensionamiento del módulo construido, cabe recordar si uno quiere analizar más parámetros el volumen de trabajo quizás se incremente, ya que por cada análisis de cada parámetro, según la técnica empleada se requieren diferentes volúmenes y eso hace que la muestra sea un poco más.

### **3.3. TÉCNICAS E INSTRUMENTOS DE RECOLECCIÓN DE DATOS**

#### **3.3.1. PARA LA RECOLECCIÓN DE DATOS**

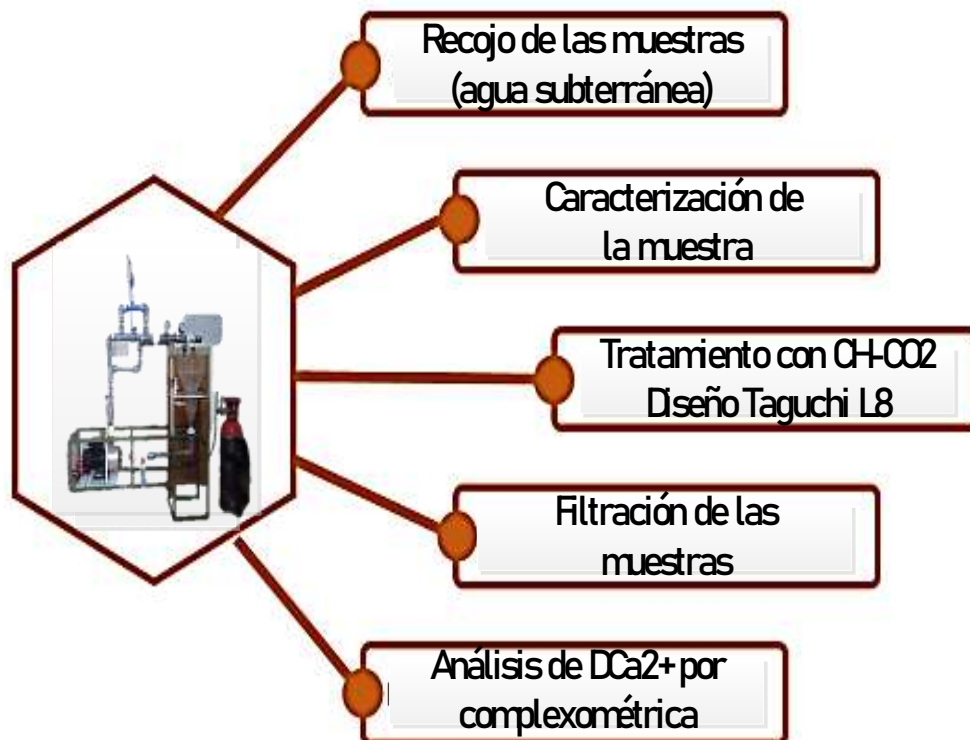
##### **A.- Técnicas**

Una de las técnicas familiares que se utilizaron fueron la observación y análisis, ya que la investigación fue monitoreada desde el inicio hasta el final, observando los diferentes fenómenos que ocurrieron en el proceso debido a la manipulación de los factores y que finalmente estos datos recogidos fueron analizados para su posterior conclusión.

Las observaciones y los análisis fueron aplicados en cada una de las etapas que conforma la investigación, la siguiente Figura muestran las etapas de la investigación.

**Figura 1**

*Etapas de la investigación para reducir la dureza cálcica*



*Nota:* La Figura muestra las diferentes etapas de la investigación que se hicieron para llegar a los objetivos de la investigación.

## **B.- Instrumentos**

Los instrumentos que se utilizaron para su caracterización, llenado de datos y su posterior análisis se muestran a continuación.

- Ficha de campo: Para llenar datos relacionados al lugar de muestreo de la muestra.
- Fichas de custodio: Para su envío al laboratorio.
- Etiquetas para la muestra del agua subterránea: De acuerdo a la Guía metodológica para muestreo del agua.
- Ficha para recolección de datos en el lugar del experimento.

## 1.- Metodología utilizada en el progreso de la investigación

### a.- Acopio de las muestras correspondientes al agua subterránea

Como primer paso, se sacaron muestras pequeñas de los tres pozos, luego estas muestras fueron enviadas a un laboratorio con la finalidad de conocer que pozo tenía la mayor concentración de dureza total y cálcica. En base a los resultados, se sacaron 96 litros de muestra del pozo 2. Para las tres muestras recolectadas de los tres pozos se utilizaron frascos de plástico de boca ancha con cierre hermético, limpios y luego se preservaron y conservaron en cajas protectoras de plástico a 4 °C aproximadamente envasados en depósitos esterilizados, para su respectivo análisis y proceso experimental.

#### Figura 2

*Toma de muestras en los tres puntos*



*Nota:* Foto tomada en los 3 puntos de recolección de las muestras para su posterior análisis y tratamiento.

## b.- Métodos usados para la caracterización del agua subterránea

Los métodos empleados en la caracterización de las aguas subterráneas provenientes del Distrito de Luyando para las etapas anteriores y posteriores al tratamiento con la cavitación hidrodinámica de placas con orificios se muestran en la siguiente tabla 7.

**Tabla 7**

*Métodos empleados para cuantificar el agua subterránea*

Análisis fisicoquímico	Método
Dureza cálcica	Volumetría, EDTA titrimetric method APHA-AWWWA-WEF 2510 B21
Dureza total	Volumetría, EDTA titrimetric method APHA-AWWWA-WEF 2510 B22
pH	Potenciometría, electrometric method, APHA-AWWWA-WEF
temperatura	Método Estándar 2550 B APHA-AWWWA-WEF 2510
Conductividad	Conductivimetría APHA-AWWWA-WEF 2510 B21 st edición

*Nota: Métodos empleados en la caracterización del agua*

**Figura 3**

*Caracterización de las muestras tomadas en los 3 puntos de agua subterránea*



*Nota: Foto de la caracterización de la dureza total, cálcica y otros para los 3 puntos de muestreo.*



### **c.- Tratamiento con la cavitación hidrodinámica mediante la absorción del CO<sub>2</sub>**

Antes de realizar las 8 corridas experimentales según el diseño experimental de Taguchi L<sub>8</sub>, se verificó su normal funcionamiento del módulo construido, con respecto a la fuga de agua, instalación eléctrica, y en especial el sistema de plato perforado por donde se ingresa el CO<sub>2</sub> y a la vez ocurre la cavitación hidrodinámica, una vez revisado estos factores, se verificó si la bomba tenía un funcionamiento continuo de 40 minutos como máximo, ya que el tiempo de tratamiento como máximo fue de 40 minutos como nivel superior.

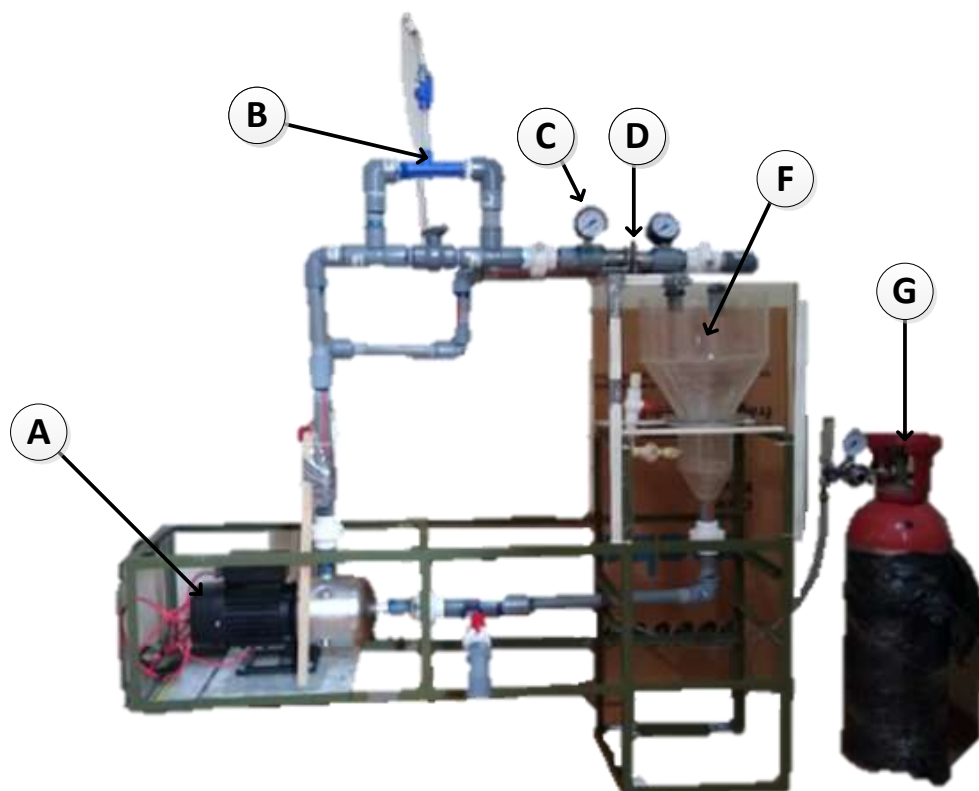
Antes de empezar con el primer experimento, lo primero que se hizo fue adecuar los factores de acuerdo a los valores seleccionados en base al diseño experimental, en este caso se graduó la presión de entrada al sistema cavitación, seguido la dosificación del CO<sub>2</sub>, dosificación de bicarbonato de sodio y luego el tiempo de tratamiento, una vez calibrados estos parámetros, se empezó hacer el tratamiento del ablandamiento siguiendo los siguientes pasos: primero se pone la muestra de los 6 litros al depósito y luego se prende la bomba hidráulica, luego cada 10 minutos se sacó una muestra para ser caracterizada los parámetros de dureza cálcica, pH, conductividad y temperatura.

El mecanismo del funcionamiento del módulo sigue los siguientes pasos, una vez prendida la bomba, la muestra es succionada del depósito hacia la bomba, del cual una parte ingresa nuevamente al depósito y la otra parte ingresa al sistema de cavitación y luego vuelve nuevamente al depósito, este mecanismo de ciclo se repite hasta terminar el tiempo de tratamiento. Todos los experimentos siguieron los mismos pasos.

Así mismo, antes de cada experimento y después de cada experimento, el módulo experimental ha sido lavado con agua destilada varias veces con la finalidad de no alterar los resultados.

**Figura 4**

*Sistema de cavitación del tipo de placas con orificio y venturi*



*Nota:* Módulo experimental para ablandar agua subterránea, donde: A viene hace la bomba hidráulica, B entrada del CO<sub>2</sub> mediante tuvo venturi, C manómetro que controla la presión de entrada al sistema de cavitación, D cavitación hidrodinámica, F depósito de capacidad de 12 litros y G balón de CO<sub>2</sub>.

#### **d.- Dimensiones de la placa de orificio**

Las características geométricas de las placas con orificio influyen y generan diferentes magnitudes de cavitación, por lo tanto, tanto la forma, el tamaño y el número de orificios se han tenido en cuenta para este estudio. La placa metálica de acero inoxidable de 9 agujeros se unió a los 2 extremos de una base metálica de acero inoxidable, la unión entre los extremos se aseguró con arandela de jebe, para evitar la fuga de la muestra y finalmente para mejorar el prensado entre el metal y la arandela se aseguró con cuatro pernos y roscas, en la siguiente tabla se muestra la característica de la placa.

**Tabla 8**

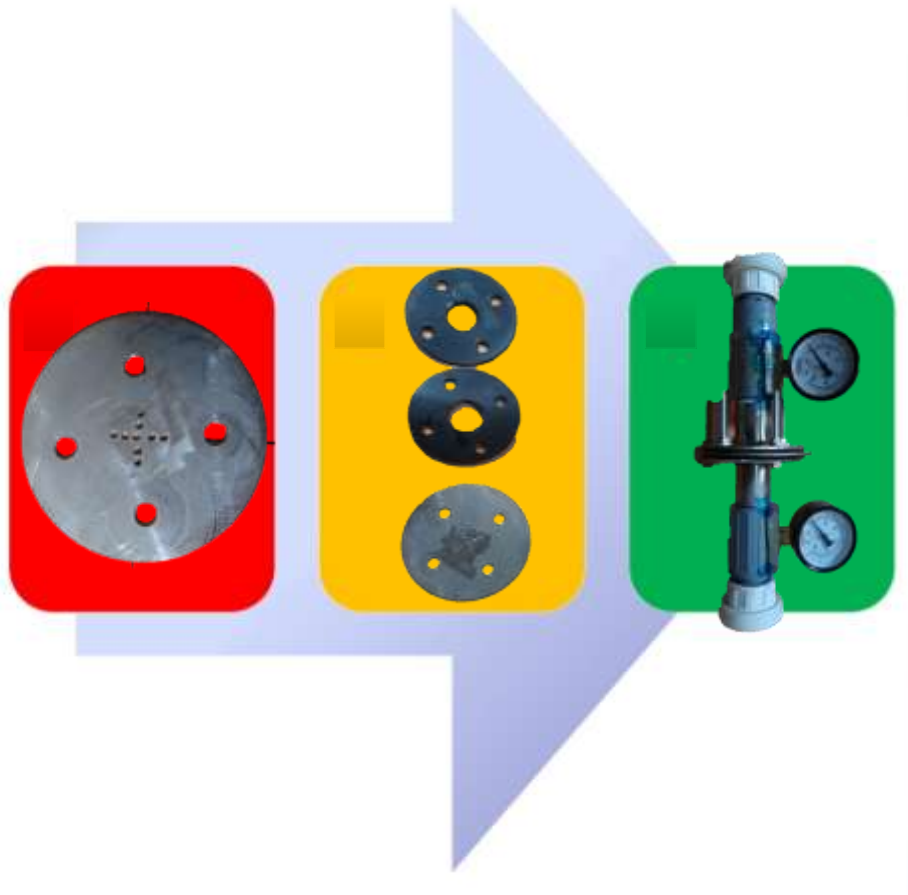
*Dimensiones de la placa con orificio*

Tipo de placa	N° de orificios	Diámetro de orificio (mm)	Área total de los orificios (mm <sup>2</sup> )	Perímetro del orificio (mm)	$\alpha$	$\beta$
Placa con orificio	9	2,5	44,177	7,853	1,4	0,223

*Nota:* Valores correspondiente a la placa con orificios calculados mediante la ecuación 2 y 3.

**Figura 5**

*Placa utilizada en el sistema de ablandamiento*



*Nota:* La Figura muestra la placa con sus respectivos agujeros y su arandela de jebes.

#### **e.- Insumos y reactivos químicos**

Hidróxido de sodio (1N), Murexida, etilen diamino tetraacético (EDTA) 0.01M, agua destilada,  $\text{NaHCO}_3$  (10 g), soluciones estándar de pH, conductividad y dióxido de carbono, la mayoría de los reactivos utilizados fueron de la marca Merck Milipore.

#### **f.- Materiales de laboratorio**

Pipetas graduadas de 5 y 10 mL, probetas, matraces, tubos de ensayo, fiolas, embudo, espátula, probetas, soporte universal, bureta de 10 ml, varilla de vidrio, mangueras, piseta, Papel filtro AP40 Millipore o equivalente a 934AH Whatman), vasos descartables y cuchara espátula dosificadora.

#### **g.- Equipos e instrumentos**

Balanza analítica Adventurer (OHAUS), Multiparámetro HI98195 (HANNA), agitador magnético INTLLAB MS-500, Módulo de cavitación hidrodinámica de platos.

#### **h.- Método analítico para la dureza cálcica**

Hay muchos métodos para monitorear la dureza cálcica del agua, que se pueden dividir principalmente en método de análisis químico y método de análisis instrumental. En análisis químico con la titulación complexométrica de EDTA, es un método común. En este método, la reacción de complejación de EDTA reacciona con iones de calcio y magnesio, el cual se utilizó para determinar el punto final de la titulación utilizando indicador como Murexida y mediante la decoloración como un indicador de metal. (Wu et al., 2021).

Para la investigación desarrollada, todas las unidades de análisis han sido cuantificados para determinar la dureza cálcica mediante la técnica de método volumétrico de EDTA, para ello se han retirado por muestreo un volumen de 100 ml. En la parte del anexo se muestran los pasos para preparar las soluciones necesarias para desarrollar la técnica

de volumetría.

Para cuantificar la concentración de la dureza cálcica se emplearon la siguiente ecuación: Para EDTA = 0.01N.

$$\text{Dureza Ca mg/L}_{CaCO_3} = \frac{mL_{EDTA} * 1000}{mL_{muestra}} \quad (13)$$

Donde, ml EDTA viene hacer el volumen gastado al titular con la solución EDTA y ml muestra viene hacer el volumen de muestra tratado que se puso para titular con la solución de EDTA.

Para determinar el cálculo del % de reducción de la dureza cálcica se utilizó la ecuación 14.

$$\%D. Ca \text{ mg/L}_{CaCO_3} = \frac{(D.C_a^{inicial} - D.C_a^{final}) * 100}{D.C_a^{inicial}} \quad (14)$$

Donde, % D. Ca viene hacer el porcentaje de reducción de la dureza cálcica en la muestra,  $D.C_a^{inicial}$  viene hacer la dureza inicial de la muestra antes de su tratamiento y  $D.C_a^{final}$  viene hacer la dureza cálcica después de su tratamiento.

**Tabla 9**

*Soluciones preparadas para cuantificar la dureza cálcica por volumetría y sus estandarizaciones*

<b>Para dureza cálcica</b>	<b>Para titular dureza cálcica</b>
Preparación de carbonato de calcio y estandarización (Ca <sup>++</sup> )	Solución de EDTA (0,01N) Solución de NaOH 1N
Preparación de la muestra de control (Ca <sup>++</sup> )	Indicador de MUREXIDA

*Nota. Soluciones preparadas tanto para estandarizar el EDTA y titular la dureza cálcica.*

### **3.3.2. PARA LA PRESENTACIÓN DE DATOS**

#### **a.- Técnicas**

Una de las técnicas que se emplearon y se utilizaron en la ostentación y ordenamiento de aquellos datos cuantitativos fueron a través de las tablas, ordenadas correctamente, y a la vez gráficas, con lo cual, fueron analizados e interpretados de forma que se haga entender los resultados obtenidos.

#### **b.- Instrumentos**

Los instrumentos empleados para el procesamiento, organización y mejor comprensión visual de los datos fueron las tablas y la barra de gráficos, instrumentos claves para un buen procesamiento de datos de campo.

### **3.3.3. PARA EL ANALISIS E INTERPRETACIÓN DE LOS DATOS**

Mediante el software de Excel, Minitab y software SPSS, los datos recabados del campo experimental en base al diseño Taguchi, fueron ordenados y analizados con la finalidad de conocer su naturaleza. Mediante la estadística descriptiva se formaron gráficas, tablas, media estadística, error estándar, límite inferior y superior estándar. Mediante la estadística inferencial se realizaron la prueba de la normalidad, también así para datos paramétricos se realizó las pruebas de DOE

factorial y ANOVA con un factor Inter sujetos con la finalidad de analizar su influencia de los parámetros evaluados sobre la variable respuesta, por otro lado, se utilizaron el diagrama de Pareto para conocer el grado de influencia de los factores en estudio y el diagrama de efectos principales para conocer el orden de influencia sobre la reducción de la dureza cálcica.

## CAPÍTULO IV

### RESULTADOS

#### 4.1. RESULTADOS DESCRIPTIVOS

##### Resultados de la caracterización de las muestras del Distrito de Luyando

Las muestras provenientes de los tres pozos fueron analizadas para conocer su grado de dureza y en base a ello se trabajaron los experimentos. En la siguiente tabla 10 se muestran los valores existentes las cuales fueron comparadas con las normativas existentes.

**Tabla 10**

*Valores fisicoquímicos de muestras en los 3 pozos antes del tratamiento*

		Parámetros Fisicoquímicos				
		pH	T. (°C)	Conduct. (µs/cm)	Dureza Total (mg/L)	Dureza Cálcica (mg/L)
Puntos de muestreo	P.M.1	7,74	25,5	1268,8	558,6	362,5
	P.M.2	7,81	25,2	1278,6	578,7	382,5
	P.M.3	7,9	24,8	1253,4	543,5	345,4

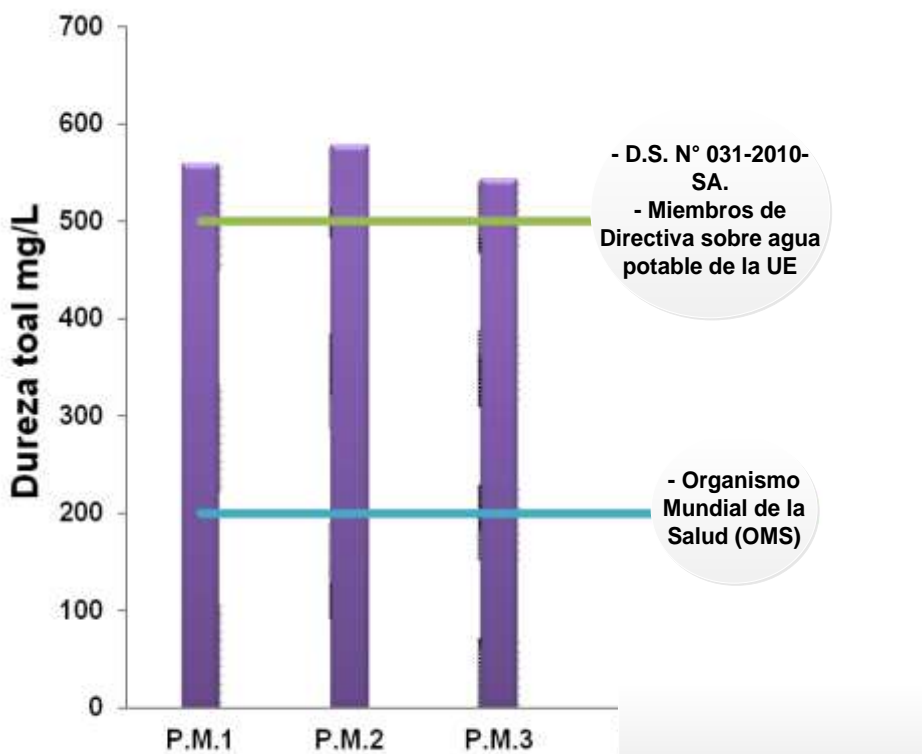
D.S. N° 031-2010-S.A. Reglamento de la calidad de agua para consumo (LMP)	6,5 - 8,5		1500	500	
Estándares Nacionales de calidad de agua: Categoría 1, aguas que pueden ser potabilizadas con sólo desinfección	6,5 - 8,5		1500	500	
Organización Mundial de la Salud (OMS) para agua potable					< 75 Ca <sup>++</sup>
Directiva sobre agua potable de la UE - como miembro - Portugal				150-500	<100 Ca <sup>++</sup>
Directiva sobre agua potable de la UE - como miembro - Polonia				60-500	

*Nota.* La tabla muestra valores de durezas en los 3 pozos y algunos valores regulados por las normativas nacionales e internacionales relacionados al agua potable.



**Figura 6**

Concentración de la dureza total en los tres pozos frente a las normativas



*Nota:* Las barras muestran la concentración de dureza total en cada pozo y las líneas representan las concentraciones recomendadas por algunas entidades nacionales e internacionales.

### **Análisis e interpretación**

En base a la Organización Mundial de la Salud (OMS), los valores de dureza encontrados en los tres pozos del agua subterránea del Distrito de Luyando son consideradas aguas muy duras, por lo tanto, estas aguas se encuentran fuera de los límites máximos permisibles generados por la normativa de la calidad de agua D.S. N°031-2010-SA para consumo humano. Así mismo, si se toma en cuenta la normativa de las ECAs, estos valores tampoco lo harían no aptos para ser usado como fuente para la producción de agua potable con tan sólo una desinfección correspondiente a la categoría 1 de población y recreación.

Por otra parte, según la Organización mundial de la Salud (2004), estos valores de dureza encontrados en las aguas subterráneas, se encuentran por

encima de lo recomendado, ya que estos organismos consideran que valores mayores a 200 mg/L como dureza generan efectos adversos de incrustaciones en las redes de distribución, en cambio, concentraciones inferiores a 75 mg/L de  $\text{Ca}^{++}$  son aptos para agua potable. Si se compara estos valores de la dureza encontradas con respecto a las normativas extranjeras para agua potable, se encuentran por encima de los países como Portugal, Polonia, etc. que son miembros de los estados para la refundición de la Directiva de agua potable de la UE. Además, si estos líquidos con alta dureza fueran empleadas por las empresas de aguas, serían rechazadas, ya que muchos de ellos consideran un nivel de dureza entre 50 y 150 ppm de  $\text{CaCO}_3$  como públicamente aceptable (Ahn et al., 2018).

Frente a ello, estas aguas fueron sometidas a un tratamiento mediante el sistema propuesto, para ello se eligió a la muestra del pozo 2, ya que tiene mayor dureza con respecto a los demás.

### **Resultados en la variación de los parámetros de dureza cálcica, pH, conductividad y temperatura después del tratamiento**

En la siguiente tabla se muestran los resultados obtenidos en la reducción de la dureza cálcica y otros parámetros, evaluados en base al diseño ortogonal de Taguchi  $L_8$ ,

**Tabla 11**

Valores finales de los parámetros después de su tratamiento mediante el diseño Taguchi

Núm. de exp.	Parámetros operacionales				pH (0-14)			Temperatura (°C)			Conductividad (μs/cm)			% R. D. cálcica		
	A	B	C	D	R1	R2	Prom.	R1	R2	Prom.	R1	R2	Prom.	R1	R2	Prom.
1	7	20	0	0	8,01	8,05	8,03	40,5	40,6	40,55	1138,6	1134,1	1136,35	28,21	28,31	28,26
2	7	20	2	530	6,4	6,3	6,35	42,1	42,2	42,15	1588,9	1584,6	1586,75	39,03	39,09	39,06
3	7	40	0	530	8,5	8,6	8,55	47,8	47,6	47,7	1388,4	1387,9	1388,15	44,99	45,13	45,06
4	7	40	2	0	6,2	6,3	6,25	50,1	50,5	50,3	1078,4	1071,9	1075,15	37,36	37,54	37,45
5	22	20	0	530	8,3	8,35	8,325	41,3	42,8	42,05	1542,9	1539,6	1541,25	48,13	49,93	49,03
6	22	20	2	0	6,5	6,9	6,7	43,8	44,7	44,25	1095,1	1091,6	1093,35	35,79	36,5	36,15
7	22	40	0	0	8,58	8,61	8,595	51,7	52,98	52,34	1089,9	1085,6	1087,75	38,41	39,4	38,9
8	22	40	2	530	6,3	6,5	6,4	53,1	54,82	53,96	1402,7	1409,6	1406,15	58,51	59,56	59,04

Nota. La tabla muestra los resultados obtenidos de los 5 parámetros después de su tratamiento con el sistema propuesto obtenidos en el campo experimental.

\* A: Parámetro correspondiente a la presión de entrada al sistema cavitación.

\* B: Parámetro correspondiente al tiempo de tratamiento.

\* C: Parámetro correspondiente al flujo de dióxido de carbono.

\* D: Parámetro correspondiente a la masa de bicarbonato de sodio.

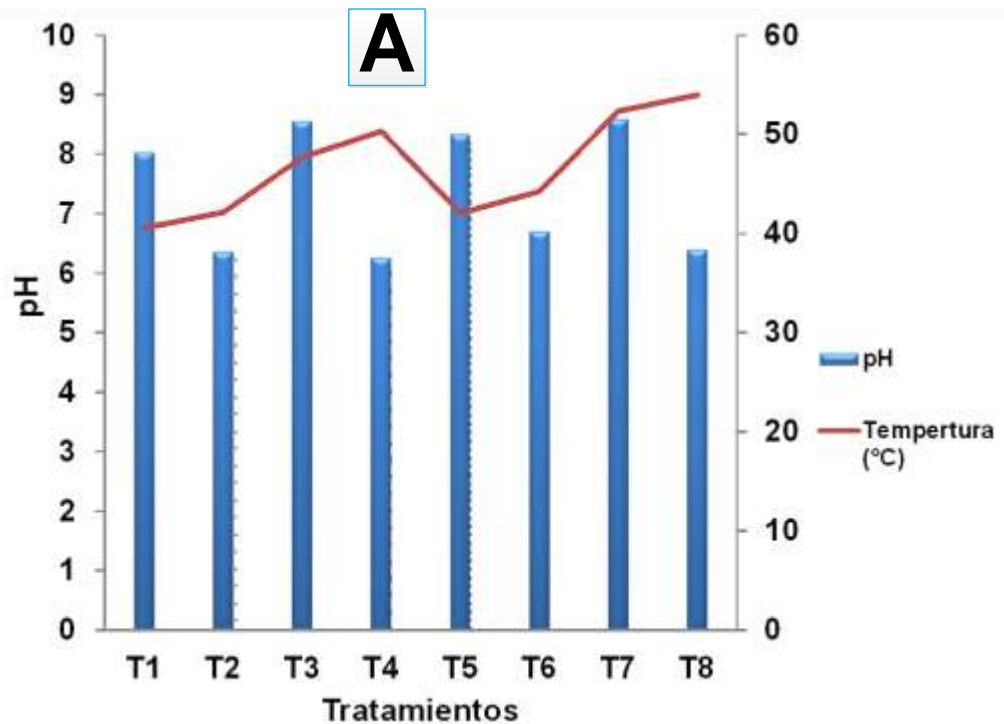
\* R1 y R2: Vienen hacer las corridas y su réplica correspondiente.

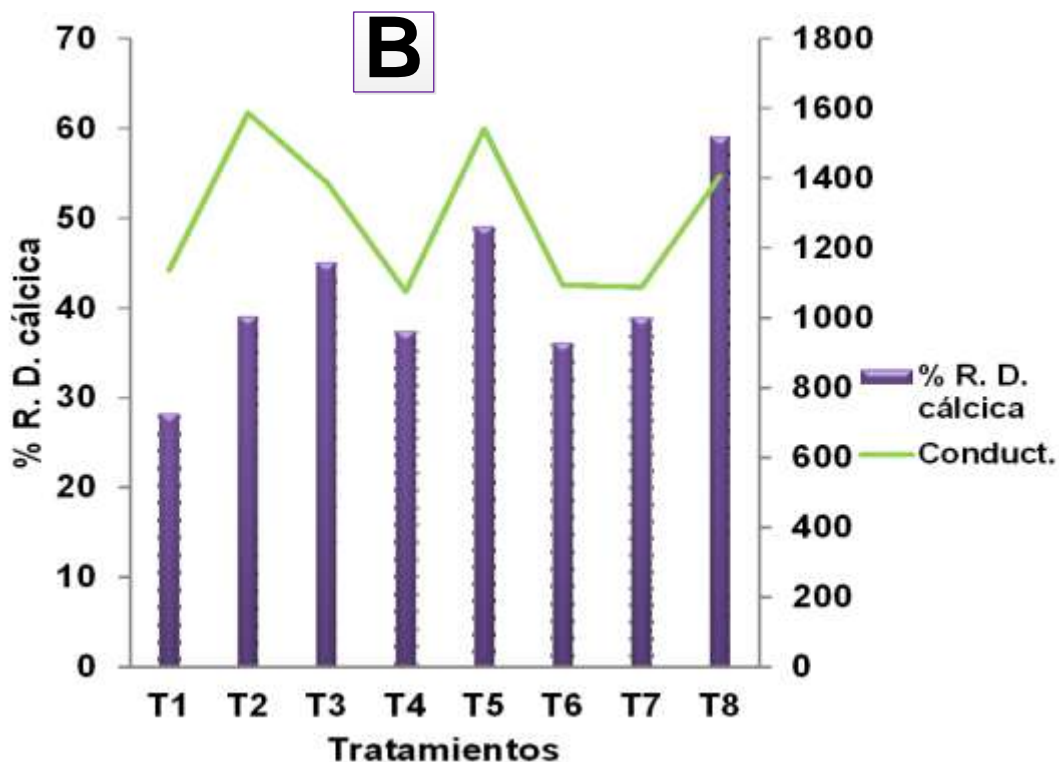
\* Prom.: Viene hacer el promedio de los valores entre la corrida y su réplica.

En base a la tabla 11, podemos apreciar que la mínima reducción de la dureza cálcica se da en 28.26% y la máxima reducción está en 59.04%, con lo cual a primera vista podemos decir que a mayor presión hay mayor reducción de la dureza cálcica. Por otra parte con respecto a los demás parámetros, casi todos los valores de pH finales obtenidos se encuentran dentro de los límites permisibles generados por la normativa de la calidad de agua según el D.S. N°031-2010-SA, el más alejado se encuentra en el valor de 6.25, lo cual es mínimo, además este valor con el paso del tiempo es más probable que el pH de la muestra empiece a aumentar, ya que el dióxido presente en el agua empezaría a buscar el equilibrio con la atmósfera liberándose.

**Figura 7**

*Valores de los parámetros fisicoquímicos después de su tratamiento*





Nota. Las barras de la Figura A, muestran los valores finales del pH de las muestras después de su tratamiento, en cambio la línea muestra los valores finales de temperatura en las muestras; A sí mismo la Figura B, las barras muestra valores finales del porcentaje de reducción de la dureza cálcica en los 8 experimentos y las líneas muestran la conductividad final de las muestras después de su tratamiento.

### Análisis e interpretación

En la Figura 7 la parte A podemos apreciar que el tratamiento 4 presenta un pH más bajo que los demás tratamientos llegando a un valor de 6.25, en cambio el tratamiento 7 muestra una tendencia a un pH más elevado correspondiente a un valor de 8.59, muchos de estos valores se encuentran dentro de los LMP de la calidad de agua según el D.S. N°031-2010-SA para consumo humano. Con respecto a la temperatura, el tratamiento 1 tiene un valor menor correspondiente a 40.5 °C, en cambio el tratamiento con mayor magnitud de temperatura es el T8, llegando a un valor de 53.9°C. En la Figura 7B, se muestra que el tratamiento 8 ha reducido en mayor porcentaje la dureza cálcica, logrando llegar a 59.04%, en cambio el tratamiento de mejor eficiencia fue en T1, llegando a un valor mínimo de 28.26%. Así mismo los tratamientos que sobrepasan los valores recomendados de Conductividad (<1500 us/cm)

son el T2 y T5, el resto de los tratamientos se encuentran dentro de los LMP para agua de consumo humano.

### Resultados sobre los cambios de las características fisicoquímicas de las muestras con el paso del tiempo de tratamiento

**Tabla 12**

*Características fisicoquímicas de las muestras en función al tiempo para 7 PSI de presión de entrada al sistema cavitación con valores promedio*

N° de exp.	Parámetros de operación en sus niveles			Tiempo (min)	pH (0-14)	Temperatura (°C)	Conductividad (us/cm)	D. cálcica (mg/L)	% R. D. cálcica (mg/L)
	B	C	D						
1	20	0	0	0	7,82	22,15	1274,9	381,6	0
				10	7,905	33,05	1235,4	311,6	18,34
				20	8,03	40,55	1136,35	273,75	28,26
2	20	2	530	0	8,085	22,35	1865,4	381,45	0
				10	7,015	34,15	1745	294,05	22,91
				20	6,35	42,15	1586,75	232,45	39,06
3	40	0	530	0	8,09	23,1	1866,6	381,6	0
				10	8,145	33,05	1776,75	300,65	21,21
				20	8,25	40,75	1596,3	240,25	37,04
				30	8,3	45,25	1465,35	231,75	39,27
				40	8,55	47,7	1388,15	209,65	45,06
4	40	2	0	0	7,805	23,15	1277,25	381,7	0
				10	6,45	34,45	1215,55	305,45	19,98
				20	6,425	42,35	1120,6	268,7	29,6
				30	6,4	47,55	1095,4	241,4	36,76
				40	6,25	50,3	1075,15	238,75	37,45

*Nota.* La tabla contiene los valores de los parámetros como pH, temperatura, conductividad y Dureza cálcica a medida que avanza el tratamiento para la condición de 7 PSI de presión de entrada al sistema cavitación.

**Tabla 13**

*Características fisicoquímicas de las muestras en función al tiempo para 22 PSI de presión de entrada al sistema cavitación con valores promedio*

N° de exp.	Parámetros de operación en sus niveles			Tiempo (min)	pH (0-14)	Temperatura (°C)	Conductividad (us/cm)	D. cálcica (mg/L)	% R. D. cálcica (mg/L)
	B	C	D						
5	20	0	530	0	8,05	22,5	1864,75	383,1	0
				10	8,19	33,05	1715,2	292,75	23,58
				20	8,32	42,05	1541,25	195,25	49,03
6	20	2	0	0	7,83	23,65	1280,6	381,65	0
				10	6,7	35,9	1199,05	293,35	23,14
				20	6,7	44,25	1093,35	243,7	36,15
7	40	0	0	0	7,89	23,58	1275,1	381,6	0
				10	8,02	34,35	1216,8	304,75	20,14
				20	8,36	43,18	1126	255,15	33,14
				30	8,45	48,27	1101,2	245,2	35,75
				40	8,59	52,34	1087,75	233,15	38,9
8	40	2	530	0	8,18	24,03	1865,8	381,55	0
				10	7,2	35,73	1714,45	280,6	26,46
				20	6,72	44,11	1526,6	177,1	53,59
				30	6,55	49,08	1474,05	164,9	56,78
				40	6,4	53,96	1406,15	156,3	59,04

*Nota.* La tabla contiene los valores de los parámetros como pH, temperatura, conductividad y Dureza cálcica a medida que avanza el tratamiento para la condición de 22 PSI de presión de entrada al sistema cavitación.

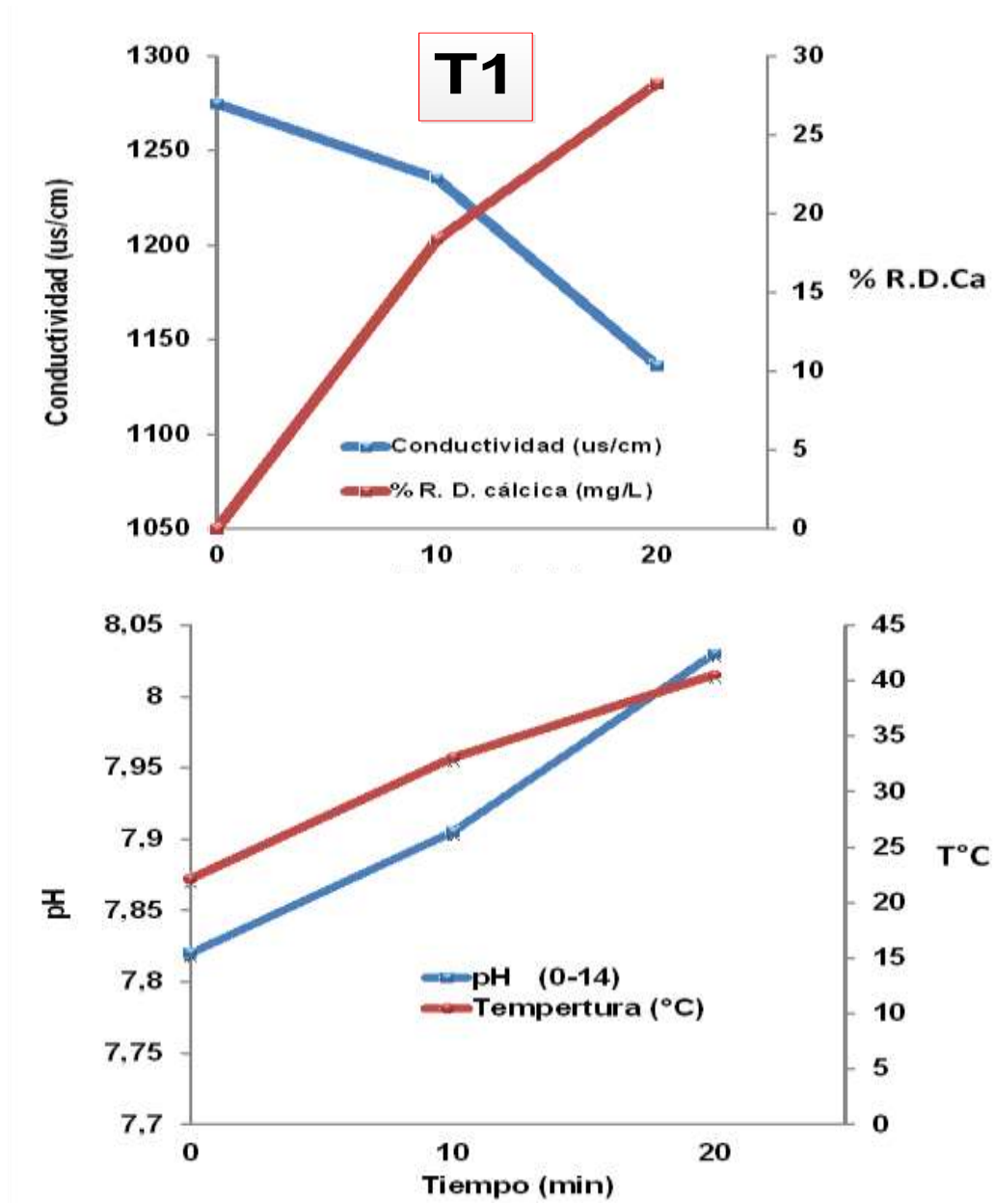
\* B: Parámetro correspondiente al tiempo de tratamiento.

\* C: Parámetro correspondiente al flujo de dióxido de carbono en sus dos niveles.

\* D: Parámetro correspondiente a la concentración de bicarbonato de sodio en sus dos niveles evaluados.

**Figura 8**

Efecto generado sobre pH, T°C, conductividad y % de reducción de dureza cálcica operado a condiciones de 7 PSI para T1



*Nota.* Las gráficas de las líneas muestran el comportamiento de las aguas subterráneas durante su tratamiento con respecto a sus propiedades fisicoquímicas (pH, temperatura, conductividad y % dureza cálcica).

### Análisis e interpretación

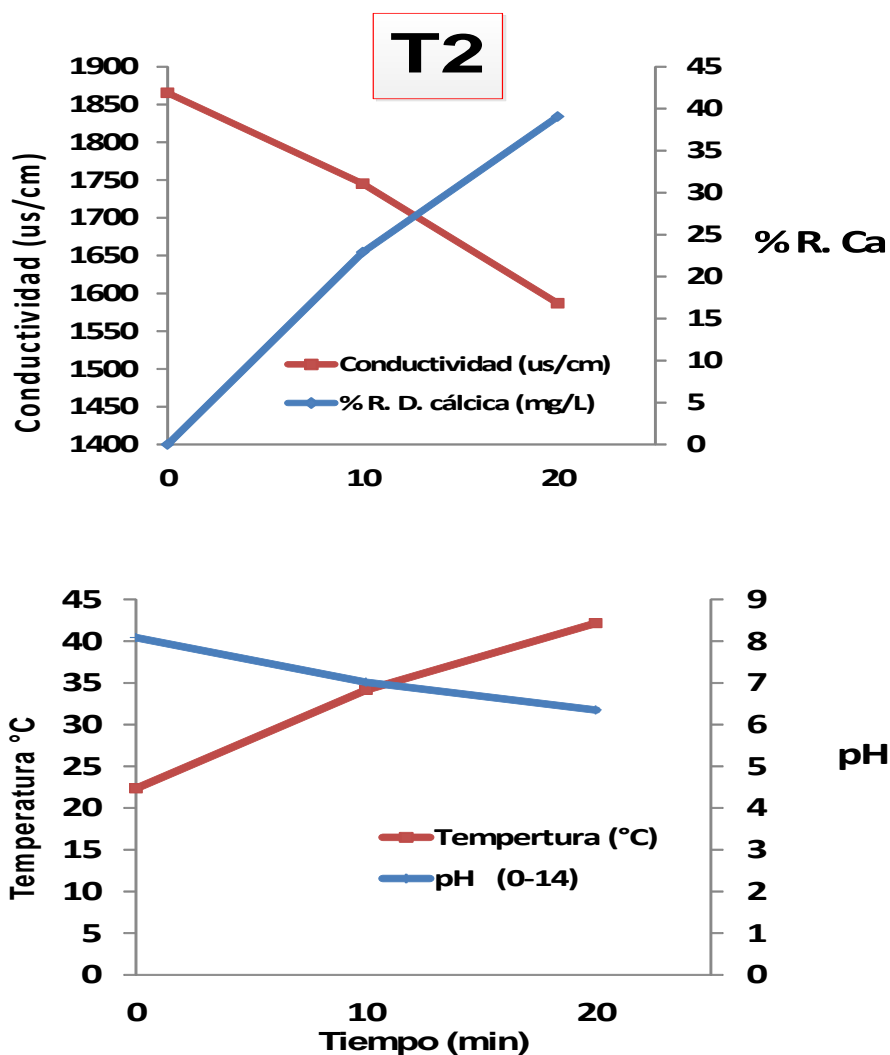
En la Figura 8, que presenta el tratamiento 1, trabajadas a las condiciones de 7 PSI, tiempo de 20 minutos y valor de 0 tanto para flujo de CO<sub>2</sub> y bicarbonato de sodio, observamos que con el tiempo la conductividad disminuye de 1274,9  $\mu\text{s/cm}$  a 1136,35  $\mu\text{s/cm}$ , para la reducción de la dureza



cálcica a medida que pasa el tiempo aumenta, llegando reducir hasta un 28.26% para un tiempo de 20 minutos, por otro lado, con respecto a la temperatura, la muestra subió de 22.15°C hasta 40.55°C, para el pH, se observó un ligero aumento desde 7.82 hasta 8.03.

**Figura 9**

*Efecto generado sobre pH, T°C, conductividad y % de reducción de dureza cálcica operado a condiciones de 7 PSI para T2*



*Nota.* Las gráficas de las líneas muestran el comportamiento de las aguas subterráneas durante su tratamiento T2 con respecto a sus propiedades fisicoquímicas (pH, temperatura, conductividad y % dureza cálcica).

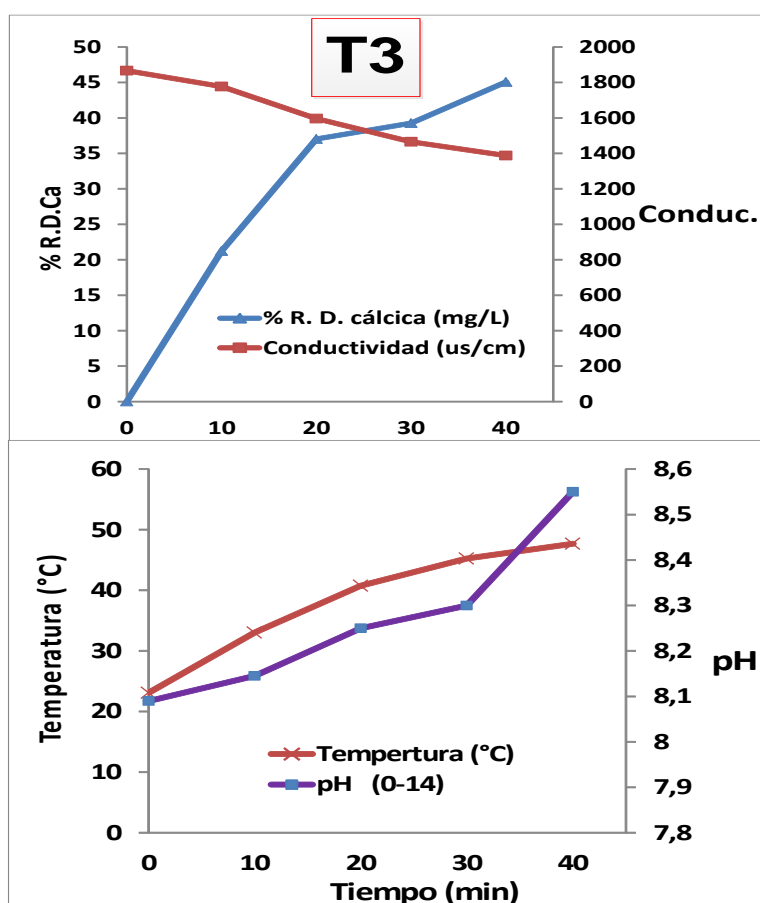
### **Análisis e interpretación**

En la Figura 9, que presenta el T2, trabajadas a condiciones de 7 PSI, tiempo de 20 minutos, 2 L/min de CO<sub>2</sub> y 530 mg/L de bicarbonato de sodio,

observamos que con el tiempo la conductividad disminuye de 1865,4  $\mu\text{s}/\text{cm}$  a 1586,75  $\mu\text{s}/\text{cm}$ , para la reducción de la dureza cálcica a medida que pasa el tiempo aumenta, llegando reducir hasta un 39.06% para un tiempo de 20 minutos, por otro lado, con respecto a la temperatura, la muestra subió de 22,35°C hasta 42,15°C, para el pH, en cambio se observó un ligero descenso desde 8,09 hasta 6,35.

**Figura 10**

*Efecto generado sobre pH, T°C, conductividad y % de reducción de dureza cálcica operado a condiciones de 7 PSI para T3*



*Nota.* Las gráficas de las líneas muestran el comportamiento de las aguas subterráneas durante su tratamiento T3 con respecto a sus propiedades fisicoquímicas (pH, temperatura, conductividad y % dureza cálcica).

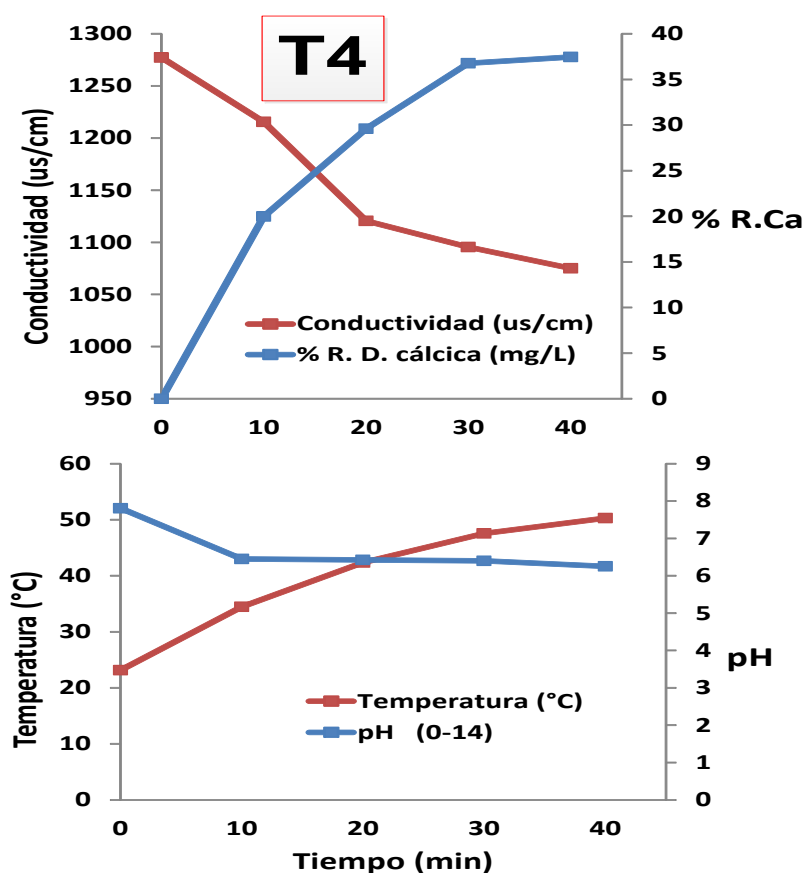
### **Análisis e interpretación**

En la Figura 10, que presenta el T3, trabajadas a condiciones de 7 PSI, tiempo de 40 minutos, 0 L/min de CO<sub>2</sub> y 530 mg/L de bicarbonato de sodio, observamos que con el tiempo la conductividad disminuye de 1866,6  $\mu\text{s}/\text{cm}$  a

1388,15  $\mu\text{s/cm}$ , para la reducción de la dureza cálcica a medida que pasa el tiempo aumenta, llegando reducir hasta un 45.06% para un tiempo de 40 minutos, por otro lado, con respecto a la temperatura, la muestra subió de 23,1°C hasta 47,7°C, para el pH, en cambio se observó un ligero aumento desde 8,09 hasta 8,55.

**Figura 11**

*Efecto generado sobre pH, T°C, conductividad y % de reducción de dureza cálcica operado a condiciones de 7 PSI para T4*



*Nota.* Las gráficas de las líneas muestran el comportamiento de las aguas subterráneas durante su tratamiento T4 con respecto a sus propiedades fisicoquímicas (pH, temperatura, conductividad y % dureza cálcica).

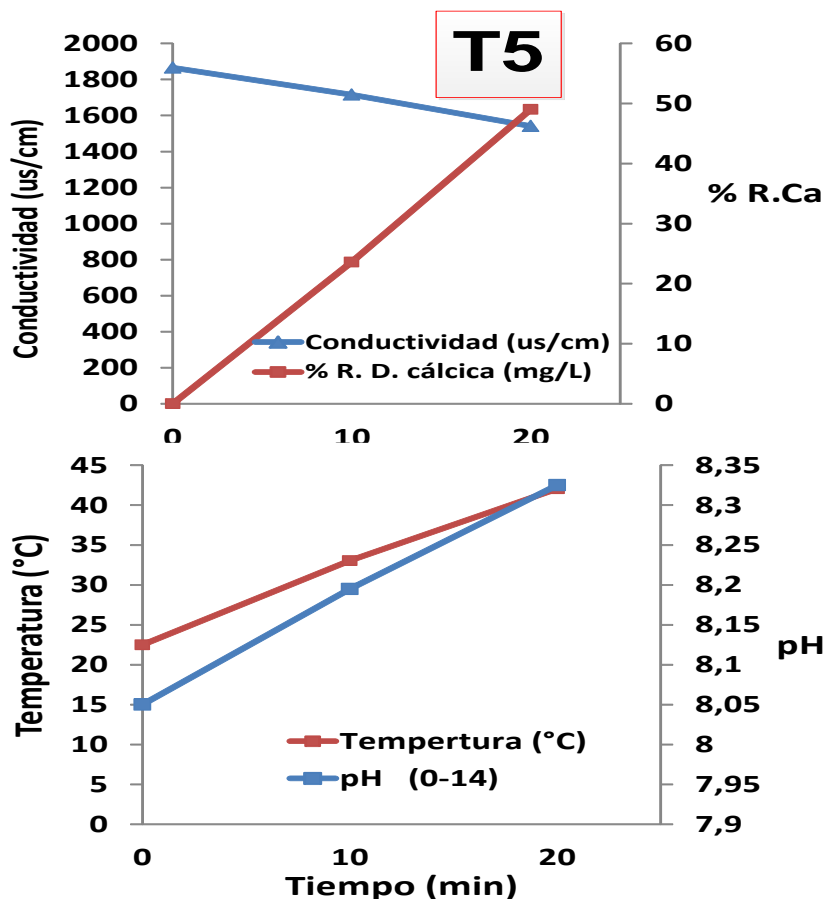
### **Análisis e interpretación**

En la Figura 11, que presenta el T4, trabajadas a condiciones de 7 PSI, tiempo de 40 minutos, 2 L/min de  $\text{CO}_2$  y 0 mg/L de bicarbonato de sodio, observamos que con el tiempo la conductividad disminuye de 1277,25  $\mu\text{s/cm}$  a 1075,15  $\mu\text{s/cm}$ , para la reducción de la dureza cálcica a medida que pasa el

tiempo aumenta, llegando reducir hasta un 37,45 % para un tiempo de 40 minutos, por otro lado, con respecto a la temperatura, la muestra subió de 23,15°C hasta 50,3°C, para el pH, en cambio se observó una ligera disminución desde 7,805 hasta 6,25.

**Figura 12**

*Efecto generado sobre pH, T°C, conductividad y % de reducción de dureza cálcica operado a condiciones de 22 PSI para T5*



*Nota.* Las gráficas de las líneas muestran el comportamiento de las aguas subterráneas durante su tratamiento T5 con respecto a sus propiedades fisicoquímicas (pH, temperatura, conductividad y % dureza cálcica).

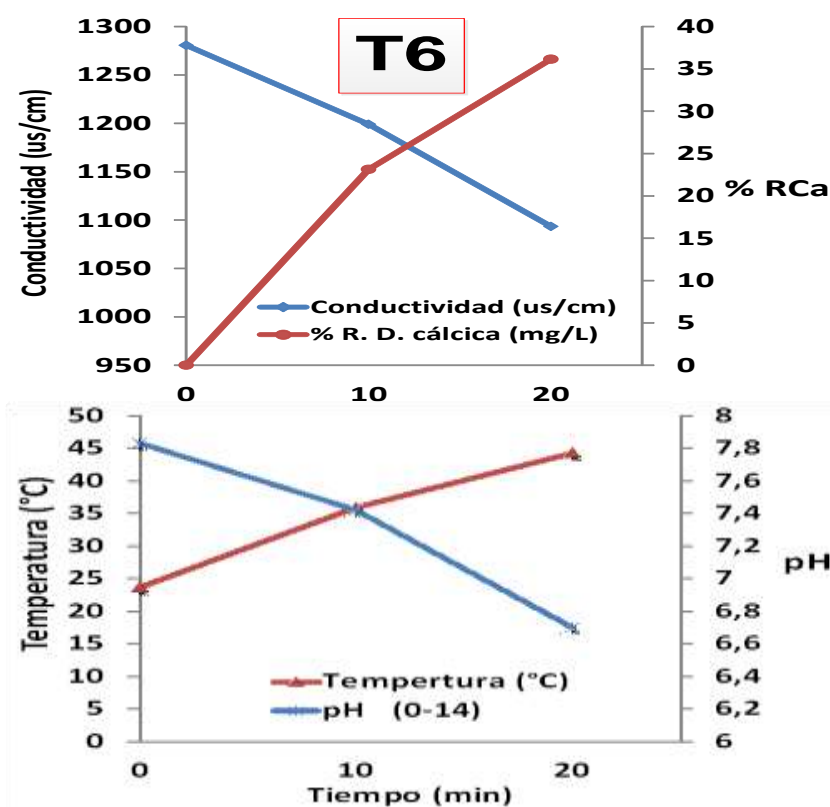
### **Análisis e interpretación**

En la Figura 12, que presenta el T5, trabajadas a condiciones de 22 PSI, tiempo de 20 minutos, 0 L/min de CO<sub>2</sub> y 530 mg/L de bicarbonato de sodio, observamos que con el tiempo la conductividad disminuye de 1864,75  $\mu\text{s/cm}$  a 1541,25  $\mu\text{s/cm}$ , por otra parte, la reducción de la dureza cálcica aumenta a medida que pasa el tiempo, llegando hasta 49,03 % para un tiempo

de 20 minutos, así mismo, con respecto a la temperatura, la muestra subió de 22,5 °C hasta 42,05 °C, para el pH, se observó un ligero aumento desde 8,05 hasta 8,33.

**Figura 13**

*Efecto generado sobre pH, T°C, conductividad y % de reducción de dureza cálcica operado a condiciones de 22 PSI para T6*



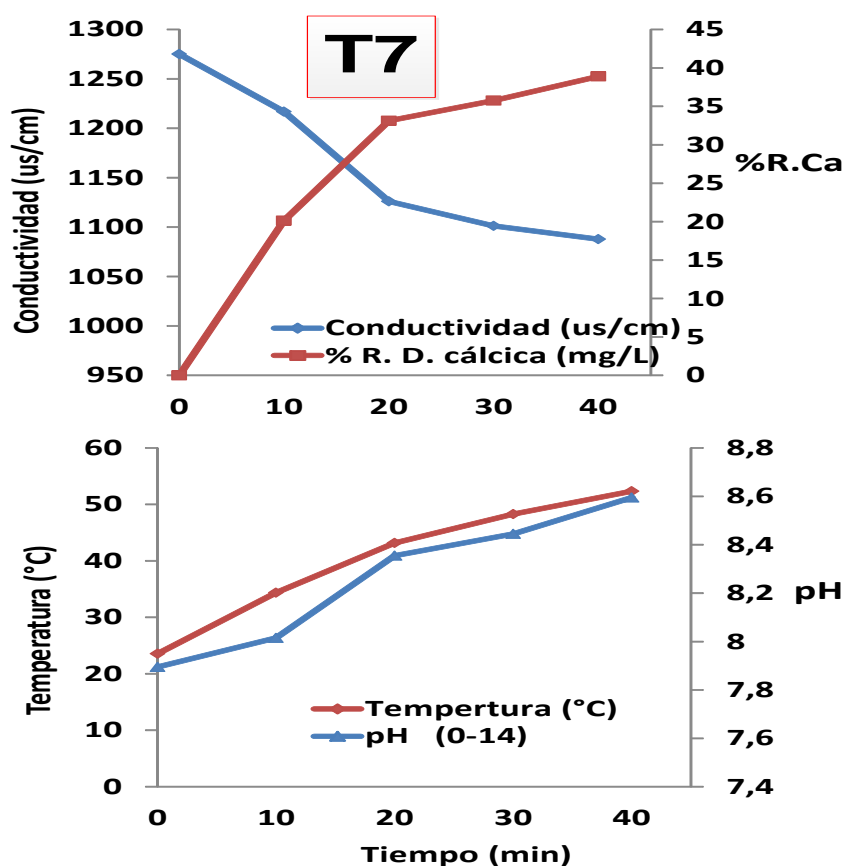
*Nota.* Las gráficas de las líneas muestran el comportamiento de las aguas subterráneas durante su tratamiento T6 con respecto a sus propiedades fisicoquímicas (pH, temperatura, conductividad y % dureza cálcica).

### **Análisis e interpretación**

En la Figura 13, que presenta el T6, trabajadas a condiciones de 22 PSI, tiempo de 20 minutos, 2 L/min de CO<sub>2</sub> y 0 mg/L de bicarbonato de sodio, observamos que con el tiempo la conductividad disminuye de 1280,6  $\mu\text{s/cm}$  a 1093,35  $\mu\text{s/cm}$ , por otra parte, la reducción de la dureza cálcica aumenta a medida que pasa el tiempo, llegando hasta 36,15 % para un tiempo de 20 minutos, así mismo, con respecto a la temperatura, la muestra subió de 23,65°C hasta 44,25°C, para el pH, se observó una ligera disminución desde 7,83 hasta 6,7.

**Figura 14**

*Efecto generado sobre pH, T°C, conductividad y % de reducción de dureza cálcica operado a condiciones de 22 PSI para T7*



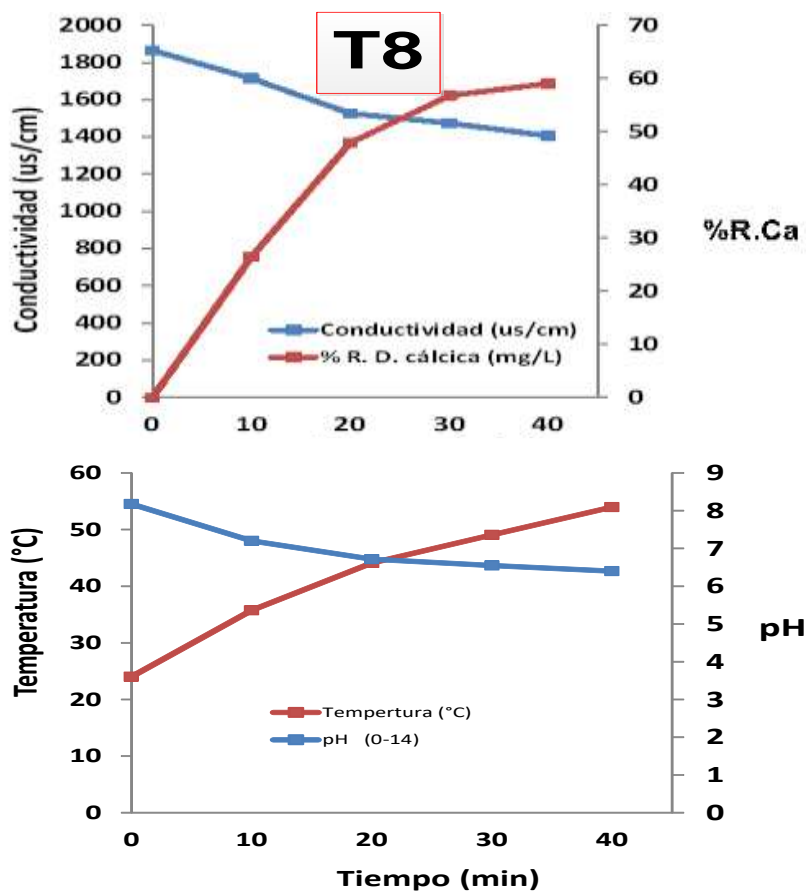
*Nota.* Las gráficas de las líneas muestran el comportamiento de las aguas subterráneas durante su tratamiento T7 con respecto a sus propiedades fisicoquímicas (pH, temperatura, conductividad y % dureza cálcica).

### **Análisis e interpretación**

En la Figura 14, que presenta el T7, trabajadas a condiciones de 22 PSI, tiempo de 40 minutos, 0 L/min de CO<sub>2</sub> y 0 mg/L de bicarbonato de sodio, observamos que con el tiempo la conductividad disminuye de 1275,1  $\mu\text{s/cm}$  a 1087,75  $\mu\text{s/cm}$ , por otra parte, la reducción de la dureza cálcica aumenta a medida que pasa el tiempo, llegando hasta 38,9 % para un tiempo de 40 minutos, así mismo, con respecto a la temperatura, la muestra subió de 23,58°C hasta 52,34°C, para el pH, se observó un ligero incremento desde 7,89 hasta 8,59.

**Figura 15**

*Efecto generado sobre pH, T°C, conductividad y % de reducción de dureza cálcica operado a condiciones de 22 PSI para T8*



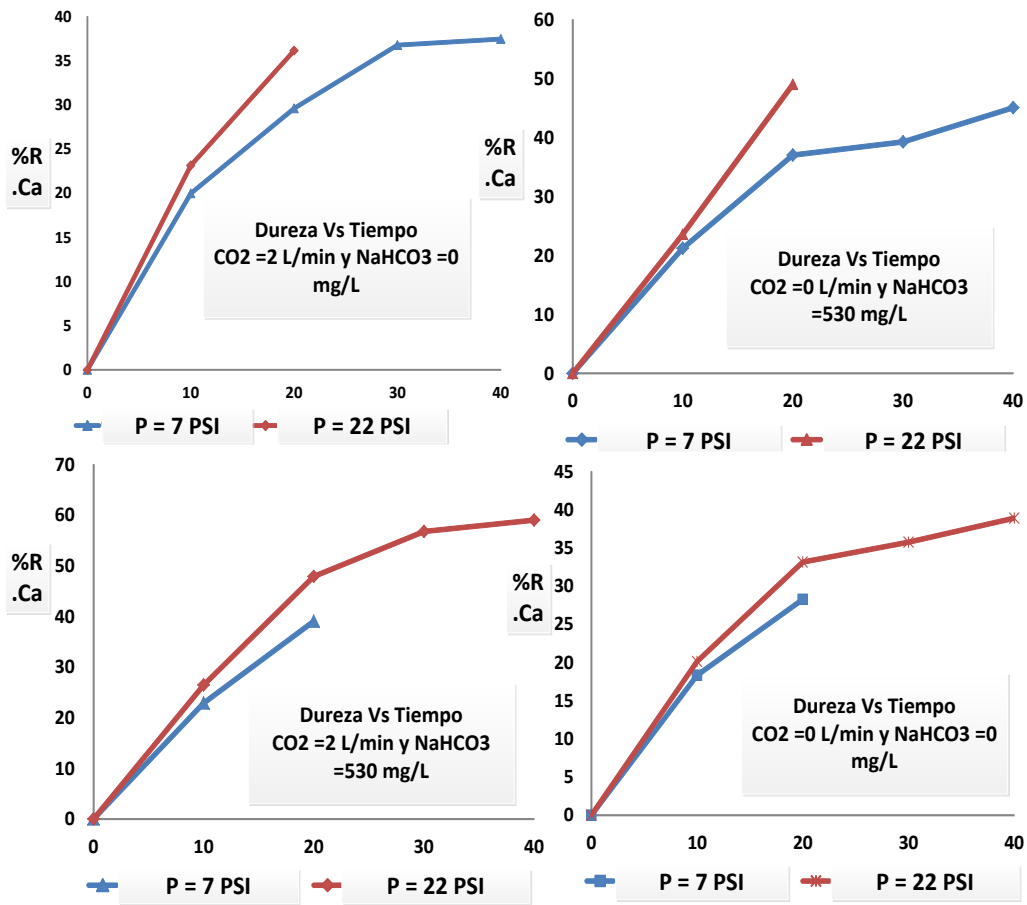
*Nota.* Las gráficas de las líneas muestran el comportamiento de las aguas subterráneas durante su tratamiento T8 con respecto a sus propiedades fisicoquímicas (pH, temperatura, conductividad y % dureza cálcica).

### **Análisis e interpretación**

En la Figura 15, que presenta el T8, trabajadas a condiciones de 22 PSI, tiempo de 40 minutos, 2 L/min de CO<sub>2</sub> y 530 mg/L de bicarbonato de sodio, observamos que con el tiempo la conductividad disminuye de 1865,8  $\mu\text{s/cm}$  a 1406,15  $\mu\text{s/cm}$ , por otra parte, la reducción de la dureza cálcica aumenta a medida que pasa el tiempo, llegando hasta 59,04 % para un tiempo de 40 minutos, así mismo, con respecto a la temperatura, la muestra subió de 24,03°C hasta 53,96°C, para el pH, se observó una ligera disminución desde 8,18 hasta 6,4.

**Figura 16**

Efecto de las presiones de entrada al sistema de cavitación a diferentes condiciones sobre el % R.D.Ca



Nota. Las gráficas de las líneas muestran el avance en la reducción de la dureza cálcica en función al tiempo a las diferentes condiciones experimentales.

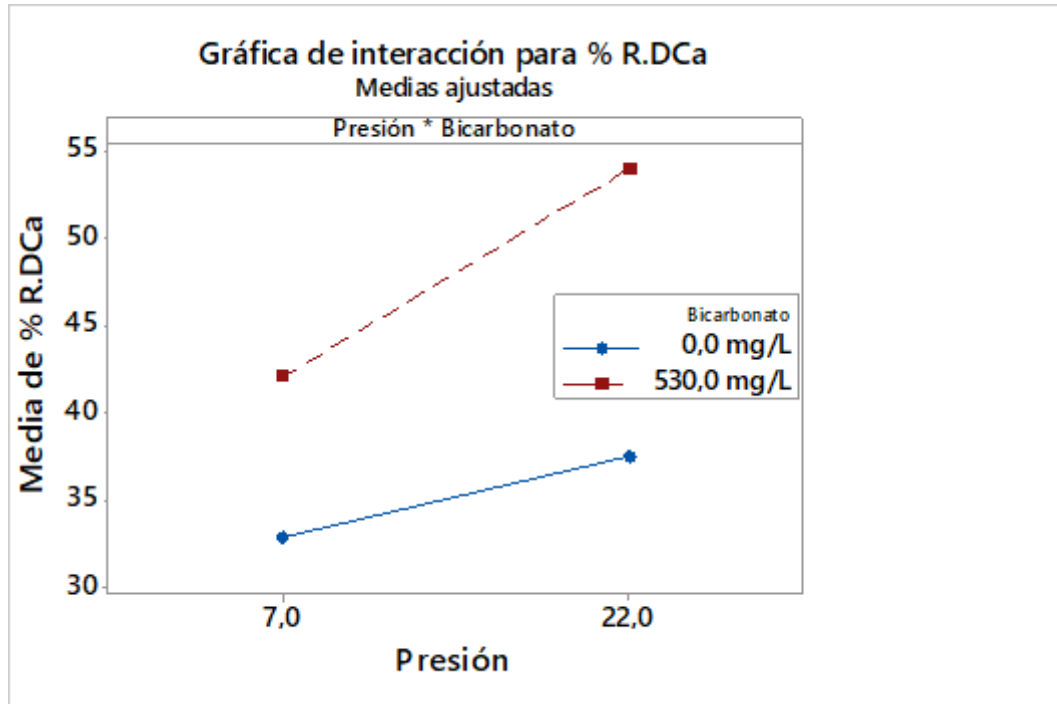
### Análisis e interpretación

La Figura 16 nos muestra que trabajando a la presión de 22 PSI se obtiene una mayor fuerza en la reducción de la dureza cálcica que a la presión de entrada de 7 PSI, Por otra parte, se puede decir que la reducción significativa de la dureza cálcica empieza a disminuir después de los 30 minutos de tratamiento, los primeros minutos si hay una reducción considerada.



**Figura 17**

Gráfica de influencia generada por bicarbonato de sodio sobre %R.D.Ca



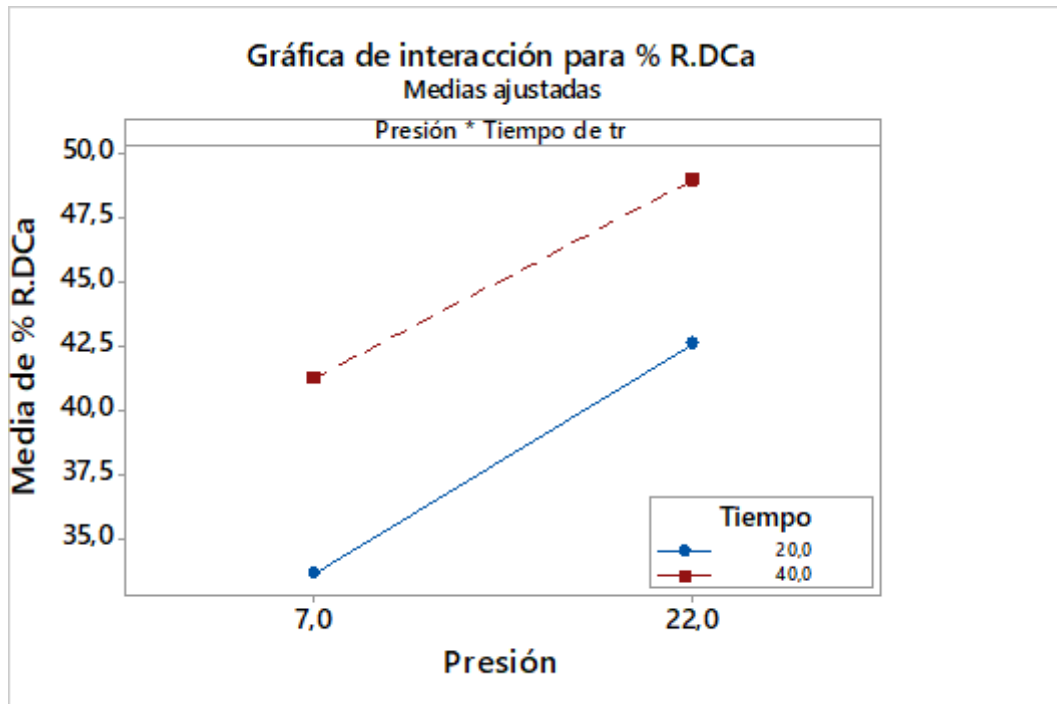
Nota. La gráfica de influencia generada por bicarbonato de sodio mediante el software estadístico Minitab

### Análisis e interpretación

La Figura 17 nos muestra que cuando se le somete al ablandamiento una muestra sin el bicarbonato de sodio, la reducción cálcica es mínima en comparación a la muestra tratada con bicarbonato de sodio, el aumento sube de 32.6% hasta 42.1% a una presión de 7 PSI, en cambio sí se le sube la presión a 22 PSI, la reducción aumenta de 37.4% hasta 53.4%, eso nos quiere decir que la adición del bicarbonato a la muestra influye para una mayor reducción de la dureza cálcica.

**Figura 18**

Gráfica de influencia generada por el tiempo de tratamiento sobre %R.D.Ca



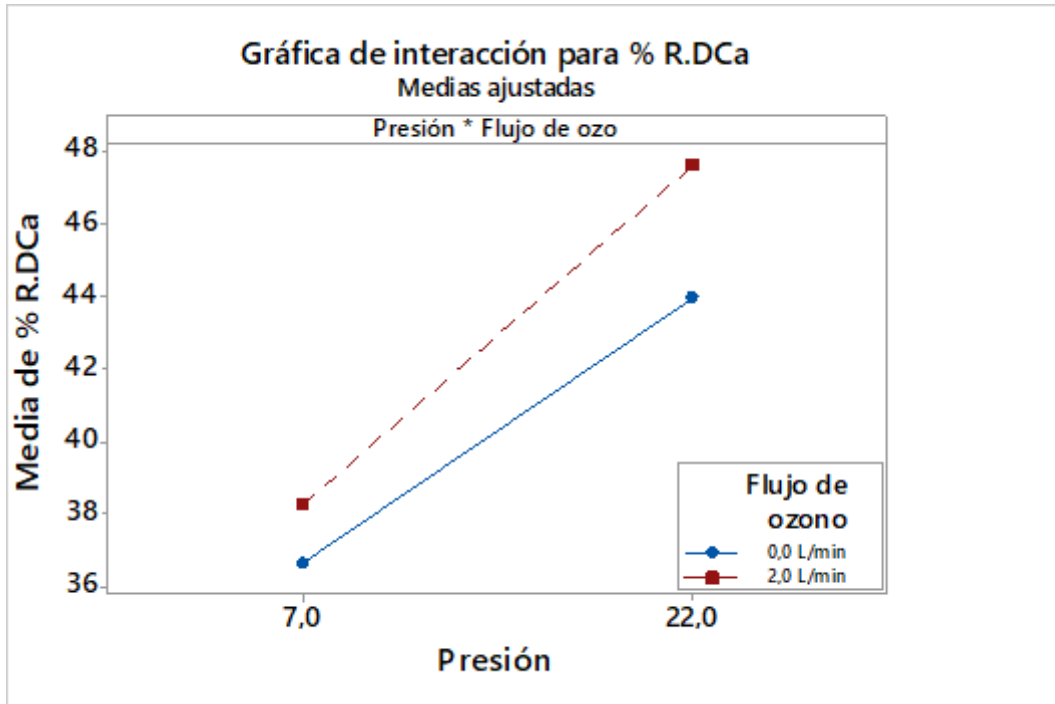
Nota. La gráfica de influencia generada por el tiempo de tratamiento mediante el software estadístico Minitab

### Análisis e interpretación

La Figura 18 nos muestra que cuando se le somete al ablandamiento una muestra, el tiempo de tratamiento genera un aumento considerable sobre la reducción cálcica, por ejemplo cuando el tratamiento sólo dura 20 minutos la reducción llega hasta 33.8%, en cambio sí dura 40 minutos la reducción cálcica aumenta hasta 41.3%, trabajadas a presión de 7 PSI, en cambio trabajadas a presión de 22 PSI, la reducción sube de 42.5% hasta 48.8%, eso nos quiere decir que el tiempo de tratamiento influye para una mayor reducción de la dureza cálcica hasta un cierto punto.

**Figura 19**

Gráfica de influencia generada por el flujo de CO<sub>2</sub> sobre %R.D.Ca



*Nota.* La gráfica de influencia generada por el flujo de CO<sub>2</sub> mediante el software estadístico Minitab

### **Análisis e interpretación**

La Figura 19 nos muestra que cuando se le somete al ablandamiento mediante un sistema acoplado de cavitación hidrodinámica y flujo de ozono a una muestra con una cierta dureza cálcica, el flujo de ozono genera una influencia no tan significativa en la reducción de la dureza cálcica, por ejemplo cuando no se acopla nada de dióxido de carbono, la reducción llega hasta 36.5%, en cambio cuando se acopla el CO<sub>2</sub>, la reducción cálcica aumenta ligeramente hasta 38.2%, trabajadas a presión de 7 PSI, en cambio, trabajadas a presión de 22 PSI, la reducción sube de 44.1% hasta 47.6%, eso nos quiere decir que el flujo de dióxido de carbono para 2 L/min no influye significativamente para una mayor reducción de la dureza cálcica.

## Análisis descriptivo del % de reducción de la dureza cálcica en los 8 experimentos en base al diseño Taguchi L<sub>8</sub>

**Tabla 14**

*Análisis descriptivo para el % de reducción de la dureza cálcica*

			95% del intervalo de confianza para la media		
Medición	Tratamiento	Media	Error estándar	Límite inferior	Límite superior
%R.D.Ca	T1	28,2600	0,05000	28,21	28,31
	T2	39,0600	0,03000	39,03	39,09
	T3	45,0600	0,07000	44,99	45,13
	T4	37,4500	0,09000	37,36	37,54
	T5	49,0300	0,90000	48,13	49,93
	T6	36,1450	0,35500	35,79	36,50
	T7	38,9050	0,49500	38,41	39,40
	T8	59,0350	0,52500	58,51	59,56

*Nota.* La tabla presenta el análisis descriptivo a nivel de la dureza cálcica después de su tratamiento.

\*T1: Tratamiento 1 correspondiente a las condiciones de 7PSI, 20 min, 0 L/min CO<sub>2</sub> y 0 mg/L NaHCO<sub>3</sub>.

\*T2: Tratamiento 2 correspondiente a las condiciones de 7PSI, 20 min, 2 L/min CO<sub>2</sub> y 530 mg/L NaHCO<sub>3</sub>.

\*T3: Tratamiento 3 correspondiente a las condiciones de 7PSI, 40 min, 0 L/min CO<sub>2</sub> y 530 mg/L NaHCO<sub>3</sub>.

\*T4: Tratamiento 4 correspondiente a las condiciones de 7PSI, 40 min, 2 L/min CO<sub>2</sub> y 0 mg/L NaHCO<sub>3</sub>.

\*T5: Tratamiento 5 correspondiente a las condiciones de 22PSI, 20 min, 0 L/min CO<sub>2</sub> y 530 mg/L NaHCO<sub>3</sub>.

\*T6: Tratamiento 6 correspondiente a las condiciones de 22PSI, 20 min, 2 L/min CO<sub>2</sub> y 0 mg/L NaHCO<sub>3</sub>.

\*T7: Tratamiento 7 correspondiente a las condiciones de 22PSI, 40 min, 0 L/min CO<sub>2</sub> y 0 mg/L NaHCO<sub>3</sub>.

\*T8: Tratamiento 8 correspondiente a las condiciones de 22PSI, 40 min, 2 L/min CO<sub>2</sub> y 530 mg/L NaHCO<sub>3</sub>.

## **Análisis e interpretación**

En base a la tabla 14, podemos decir que el tratamiento de mayor efectividad en la reducción de la dureza cálcica fue el T8, llegando a un valor de 59,035%, seguido del tratamiento T5, con un valor de 49,03%, después T3 con 45,06%, T2 con 39,06% y así hasta el tratamiento de menor efectividad correspondiente a T1 con 28.26%.

## **4.2. RESULTADOS INFERENCIALES**

### **Prueba de la Normalidad**

Para comprobar el comportamiento de la normalidad de los 16 datos generados mediante el diseño Taguchi, se realizó la prueba estadística de normalidad de los residuos mediante la verificación de Anderson-Darling, para ello se planteó las siguientes hipótesis:

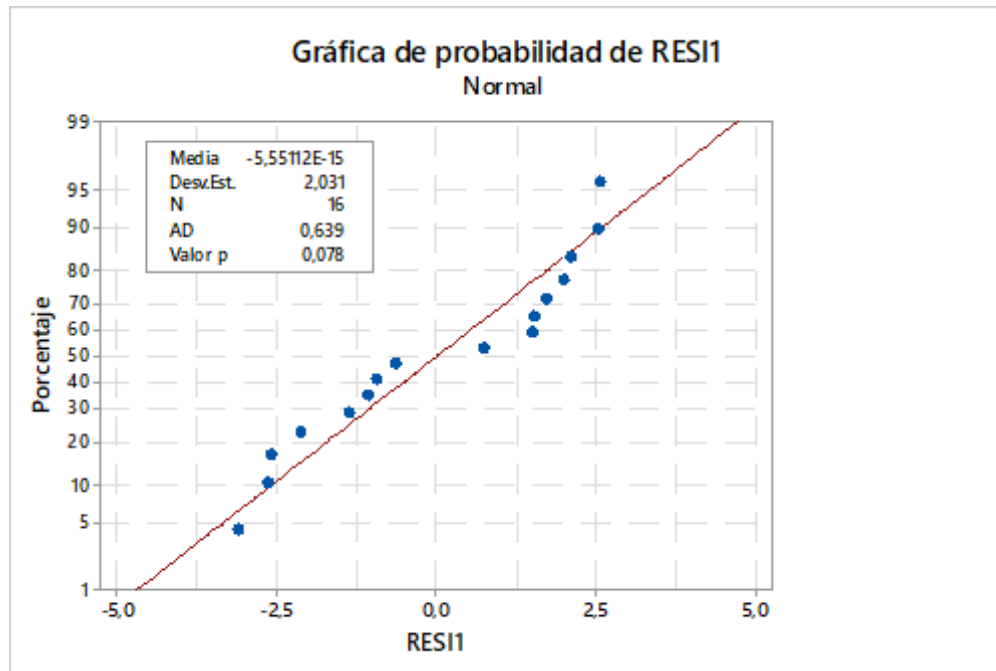
H0: Los datos tienen una distribución normal

H1: Los datos NO tienen una distribución normal

Con un nivel de significancia: 5%

**Figura 20**

Resultado de verificación de la normalidad



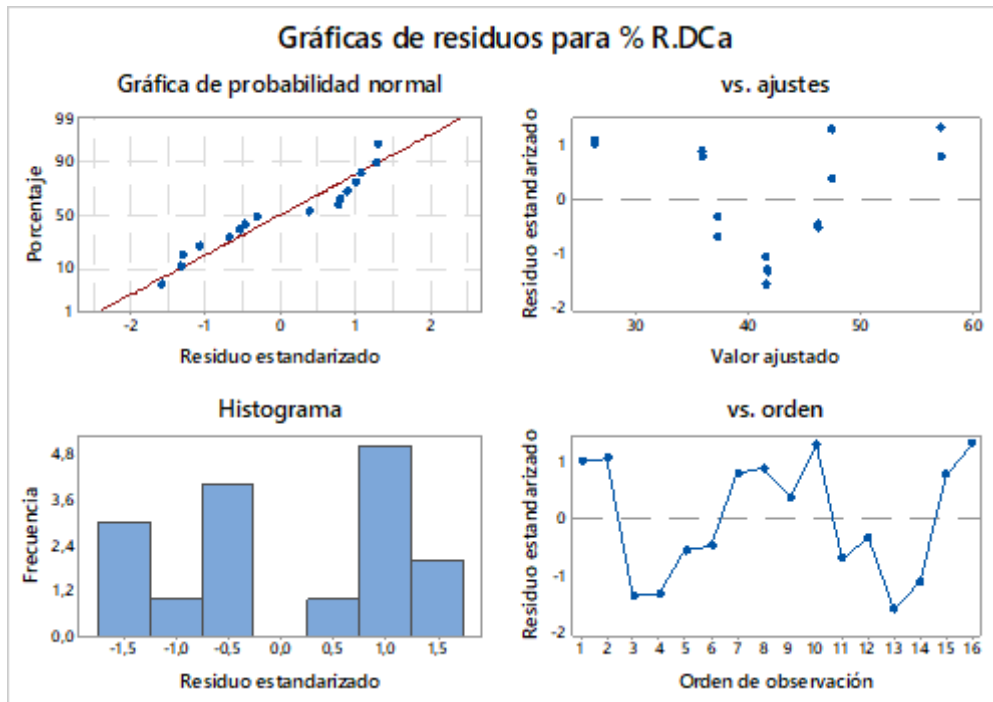
*Nota.* La gráfica representa el comportamiento normal de los datos experimentales

### **Análisis e interpretación**

En base a esta Figura 20, realizado mediante la prueba de Anderson-Darling, con los valores obtenidos de AD: 0.639 y valor p: 0.078, al comparar  $P\text{-valor} = 0.078 > 0.05$ , se toma la decisión de no rechazar la  $H_0$ , llegando a la conclusión de que con una significancia del 5%, los datos tienen una distribución normal.

**Figura 21**

*Diagramas para los residuos con respecto al %R.D.Ca*



*Nota.* La gráfica de residuos para la normalidad, varianza constante e independencia evaluados mediante el software estadístico Minitab

### **Análisis e interpretación**

En la Figura 21, podemos apreciar cómo los 16 datos se encuentran cerca de la distribución de la línea normal con un valor de  $P = 0.078 > 0.05$ , con lo cual decimos que los datos tienen una distribución de comportamiento normal. Por otra parte, los residuos se encuentran distribuidos de forma aleatoria y con respecto a la varianza, en cada uno de los tratamientos los valores son iguales. Y con respecto a la independencia, los residuos no muestran patrones ni tendencias en función al tiempo.

### **4.3. CONTRASTACIÓN DE HIPÓTESIS Y PRUEBA DE HIPÓTESIS**

#### **4.3.1. HIPÓTESIS GENERAL**

Existe una relación de influencia significativa entre los parámetros de operación y el proceso de absorción del CO<sub>2</sub> asistida por cavitación hidrodinámica sobre la reducción de la dureza cálcica, busca formalizar diferencias significativas entre los grupos experimentales con la hipótesis.

Hi: Existe una relación de influencia significativa entre los parámetros de operación y el proceso de absorción del CO<sub>2</sub> asistida por cavitación hidrodinámica sobre la reducción de la dureza cálcica en aguas subterráneas del Distrito de Luyando – 2023.

Ho: No existe una relación de influencia significativa entre los parámetros de operación y el proceso de absorción del CO<sub>2</sub> asistida por cavitación hidrodinámica sobre la reducción de la dureza cálcica en aguas subterráneas del Distrito de Luyando – 2023.

Con un nivel de significancia del 5% = 0.05.



**Tabla 15***Análisis de la Varianza intersujetos para el % reducción de dureza cálcica*

Respuesta		Suma de cuadrados	gl	Media cuadrática	F	Sig.
% de	Entre grupos	1219,606	7	174,229	473,104	<b>0,000</b>
Reducción de la dureza cálcica	Dentro de grupos	2,94615	8	0,368		
	Total	1222,552	15			

*Nota.* Datos evaluados mediante el software estadístico SPSS – ANOVA**Análisis e interpretación**

Con un valor de significancia del 5%, como se observa en la tabla 15. El valor asintótico de (p-valor = 0.000) obtenido nos aclara que estadísticamente si existen diferencias significativas entre los 8 grupos experimentales relacionados entre los parámetros operacionales sobre la reducción de la dureza cálcica en las aguas subterráneas. Esto nos indica que si existe un grado de reducción de la dureza cálcica aplicado sobre los diferentes niveles operacionales. El orden de las variaciones entre los grupos experimentales podemos apreciar en la siguiente tabla 15.

**Tabla 16***Resultados de los subconjuntos homogéneos en la reducción cálcica*

HSD Tukey		Subconjunto para alfa = 0.05					
Grupo de tratamiento	N	1	2	3	4	5	6
T1	2	28,2600					
T2	2		36,1450				
T3	2		37,4500	37,4500			
T4	2			38,9050			
T5	2			39,0600			
T6	2				45,0600		
T7	2					49,0300	
T8	2						59,0350
Sig.		1,000	0,458	0,260	1,000	1,000	1,000

*Nota.* Se visualizan las medias para los grupos en los subconjuntos homogéneos. Datos procesados en el software estadístico SPSS.

\*T1: Tratamiento 1 correspondiente a las condiciones de 7PSI, 20 min, 0 L/min CO<sub>2</sub> y 0 mg/L NaHCO<sub>3</sub>.

\*T2: Tratamiento 2 correspondiente a las condiciones de 7PSI, 20 min, 2 L/min CO<sub>2</sub> y 530 mg/L NaHCO<sub>3</sub>.

\*T3: Tratamiento 3 correspondiente a las condiciones de 7PSI, 40 min, 0 L/min CO<sub>2</sub> y 530 mg/L NaHCO<sub>3</sub>.

\*T4: Tratamiento 4 correspondiente a las condiciones de 7PSI, 40 min, 2 L/min CO<sub>2</sub> y 0 mg/L NaHCO<sub>3</sub>.

\*T5: Tratamiento 5 correspondiente a las condiciones de 22PSI, 20 min, 0 L/min CO<sub>2</sub> y 530 mg/L NaHCO<sub>3</sub>.

\*T6: Tratamiento 6 correspondiente a las condiciones de 22PSI, 20 min, 2 L/min CO<sub>2</sub> y 0 mg/L NaHCO<sub>3</sub>.

\*T7: Tratamiento 7 correspondiente a las condiciones de 22PSI, 40 min, 0 L/min CO<sub>2</sub> y 0 mg/L NaHCO<sub>3</sub>.

\*T8: Tratamiento 8 correspondiente a las condiciones de 22PSI, 40 min, 2 L/min CO<sub>2</sub> y 530 mg/L NaHCO<sub>3</sub>.

## Análisis e interpretación

Mediante esta tabla 16, podemos decir que existen diferencias significativas entre los tratamientos, por otra parte, el T1 ha reducido eficientemente, logrando una mayor reducción de la dureza cálcica llegando a 59.035%, lo que no se ve mucha diferencia es entre los tratamientos de (T4, T3, T5) y (T2 y T3).

De acuerdo a la tabla xxx, tomamos la decisión de rechazar la H0 y se acepta H1. Llegando a la conclusión de que con un nivel de significancia del 5% podemos decir que las relaciones entre los parámetros operacionales (Presión, tiempo, flujo de CO2 y bicarbonato de sodio) tienen influencia significativa sobre el % de reducción de la dureza cálcica, aceptando la hipótesis alternativa.

En la siguiente tabla, se facilitan los resultados obtenidos del análisis de varianza en base al diseño experimental de Taguchi.

**Tabla 17**

*Resultados de la ANOVA*

Fuente	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p
Modelo	4	1160,7	290,175	51,6	0
Lineal	4	1160,7	290,175	51,6	0
Presión	1	276,97	276,973	49,26	0
Tiempo de tratamiento	1	195,37	195,371	34,74	0
Flujo de ozono	1	27,22	27,222	4,84	0,0505
Bicarbonato de sodio	1	661,13	661,133	117,58	0
Error	11	61,85	5,623		
Falta de ajuste	3	58,91	19,636	53,32	0
Error puro	8	2,95	0,368		
Total	15	1222,55			

*Nota.* La tabla muestran los valores del análisis de la varianza para %R.D.Ca

## Resumen del modelo obtenido

		R-cuad.	R-cuad.
S	R-cuad.	(ajustado)	(pred)
2,3713	94,94%	93,10%	89,30%

El valor de R-cuad. (Ajustado) de 93.10% nos hace ver que la medida corregida de la bondad de ajuste para el modelo tiene una buena precisión para la variable dependiente (%R. D Ca) con relación a variables independientes y sus interacciones.

### 4.3.2. HIPÓTESIS ESPECÍFICA

#### Prueba de Hipótesis específica1

Se anunció la siguiente hipótesis

**Hi.1:** Hay influencia significativa del flujo de dióxido de carbono sobre el porcentaje promedio de reducción de la dureza cálcica en aguas subterráneas del Distrito de Luyando – 2023.

**Ho.1:** No hay influencia significativa del flujo de dióxido de carbono sobre el porcentaje promedio de reducción de la dureza cálcica en aguas subterráneas del Distrito de Luyando – 2023.

**Con un nivel de significancia de 5% = 0.05.**

P-valor = 0.0505 >0.05

Decisión: En base al valor de P obtenido de la tabla de ANOVA, se toma la decisión de aceptar el Ho y se rechaza la H1.

Concluyendo: Con un valor de significancia del 5%, se concluye que el flujo de ozono no influye significativamente en la disminución del porcentaje de la reducción cálcica en las aguas subterráneas del Distrito de Luyando.

### **Prueba de Hipótesis Específica 2:**

Se anunció la siguiente hipótesis

**Hi.2:** Hay influencia significativa de la presión de entrada sobre el porcentaje promedio de reducción de la dureza cálcica en aguas subterráneas del Distrito de Luyando – 2023.

**Ho.2:** No hay influencia significativa de la presión de entrada sobre el porcentaje promedio de reducción de la dureza cálcica en aguas subterráneas del Distrito de Luyando – 2023.

**Con un nivel de significancia de 5% = 0.05.**

P-valor = 0.000 < 0.05

Decisión: En base al valor de P obtenido de la tabla de ANOVA, se toma la decisión de rechazar el Ho y aceptar la H1.

Concluyendo: Con un valor de significancia del 5%, se concluye que la presión de entrada al sistema cavitación influye significativamente en la disminución del porcentaje de la reducción cálcica en las aguas subterráneas del Distrito de Luyando.

### **Prueba de Hipótesis Específica 3:**

Se anunció la siguiente hipótesis

**Hi.3:** Hay influencia significativa del tiempo de tratamiento sobre el porcentaje promedio de reducción de la dureza cálcica en aguas subterráneas del Distrito de Luyando – 2023.

**Ho.3:** No hay influencia significativa del tiempo de tratamiento sobre el porcentaje promedio de reducción de la dureza cálcica en aguas subterráneas del Distrito de Luyando – 2023.

**Con un nivel de significancia de 5% = 0.05.**

P-valor = 0.000 < 0.05

Decisión: En base al valor de P obtenido de la tabla de ANOVA, se

toma la decisión de rechazar el  $H_0$  y aceptar la  $H_1$ .

Concluyendo: Con un valor de significancia del 5%, se concluye que el tiempo de tratamiento para el sistema cavitación influye significativamente en la disminución del porcentaje de la reducción cálcica en las aguas subterráneas del Distrito de Luyando.

**Prueba de Hipótesis Específica 4:**

Se anunció la siguiente hipótesis

**Hi.4:** Hay influencia significativa del bicarbonato de sodio sobre el porcentaje promedio de reducción de la dureza cálcica en aguas subterráneas del Distrito de Luyando – 2023.

**Ho.4:** No hay influencia significativa del bicarbonato de sodio sobre el porcentaje promedio de reducción de la dureza cálcica en aguas subterráneas del Distrito de Luyando – 2023.

**Con un nivel de significancia de 5% = 0.05.**

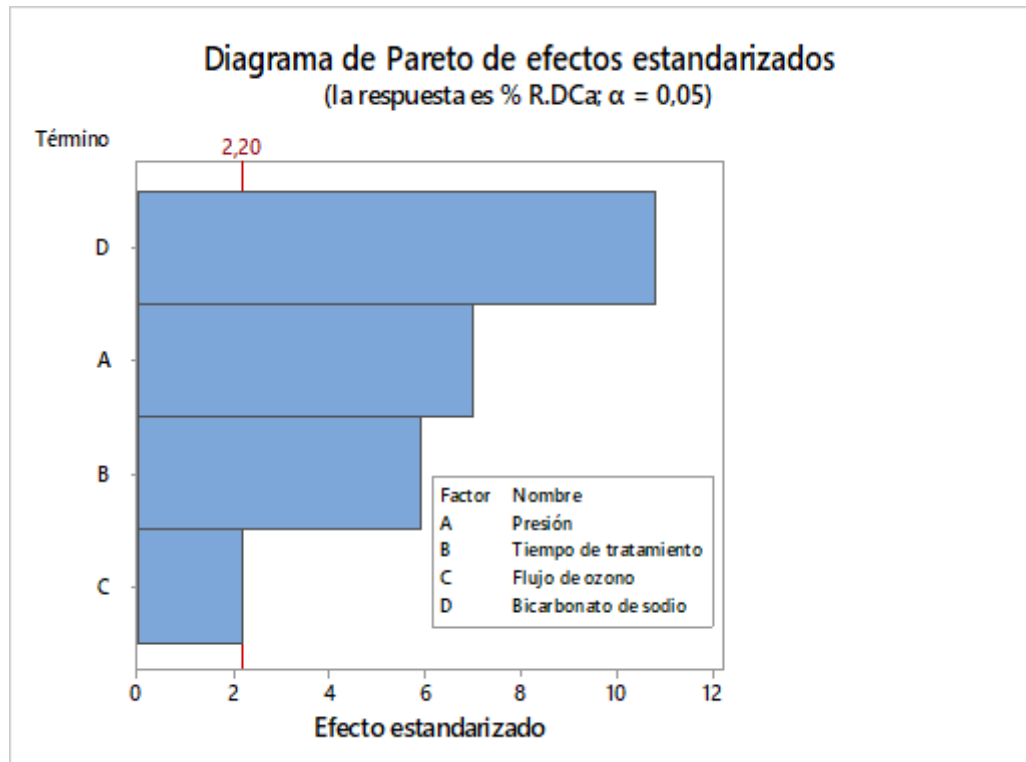
P-valor = 0.000 < 0.05

Decisión: En base al valor de P obtenido de la tabla de ANOVA, se toma la decisión de rechazar el  $H_0$  y aceptar la  $H_1$ .

**Concluyendo:** Con un valor de significancia del 5%, se concluye que la adición del bicarbonato de sodio a la muestra antes de su tratamiento influye significativamente sobre el incremento en la reducción de la dureza cálcica de las aguas subterráneas. Esta influencia lo podemos ver en la Figura 17.

**Figura 22**

*Diagramas de Pareto con respecto al %R.D.Ca*



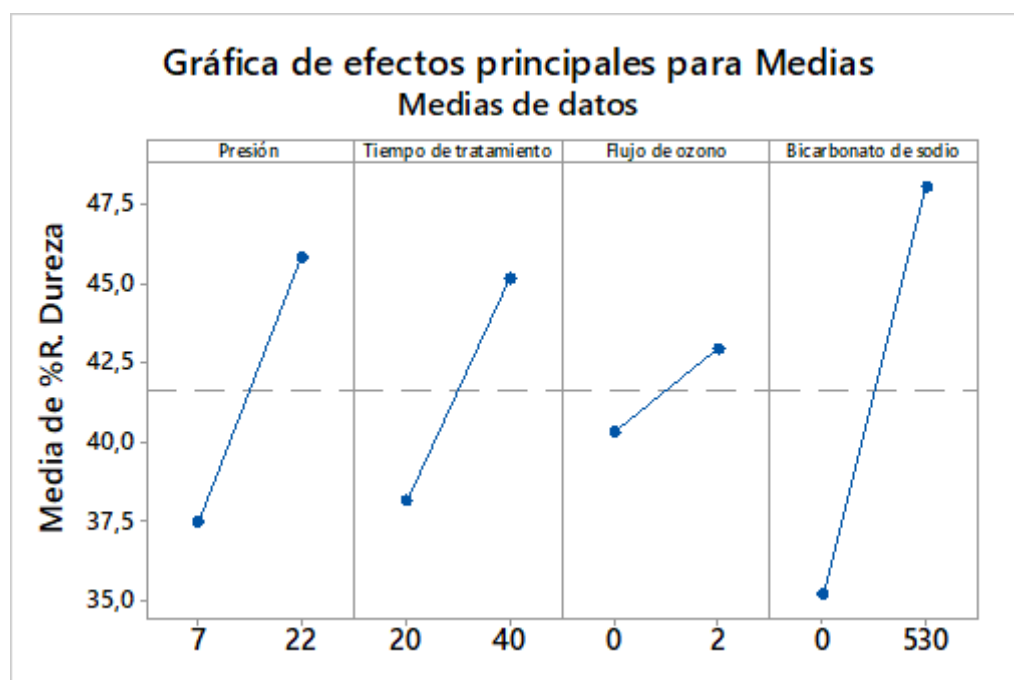
*Nota.* La gráfica de Pareto evaluado mediante el software estadístico Minitab

### **Análisis e interpretación**

En la Figura 22, podemos apreciar que los 4 factores evaluados tienen influencias de diferentes magnitudes, con lo cual, la reducción de la dureza cálcica está influenciado fuertemente con la adición del bicarbonato de sodio, seguido de la presión de entrada, luego del tiempo de tratamiento, en cambio el flujo de dióxido de carbono tiene una mínima influencia, esta interpretación se observa en el efecto estandarizado del valor mayor a  $t_{\alpha/2}$ , g.l. error = 2.20.

**Figura 23**

*Efectos principales para la media sobre %R.D.Ca*



Nota: La gráfica de los efectos principales de los factores sobre la media, evaluado mediante el software estadístico Minitab.

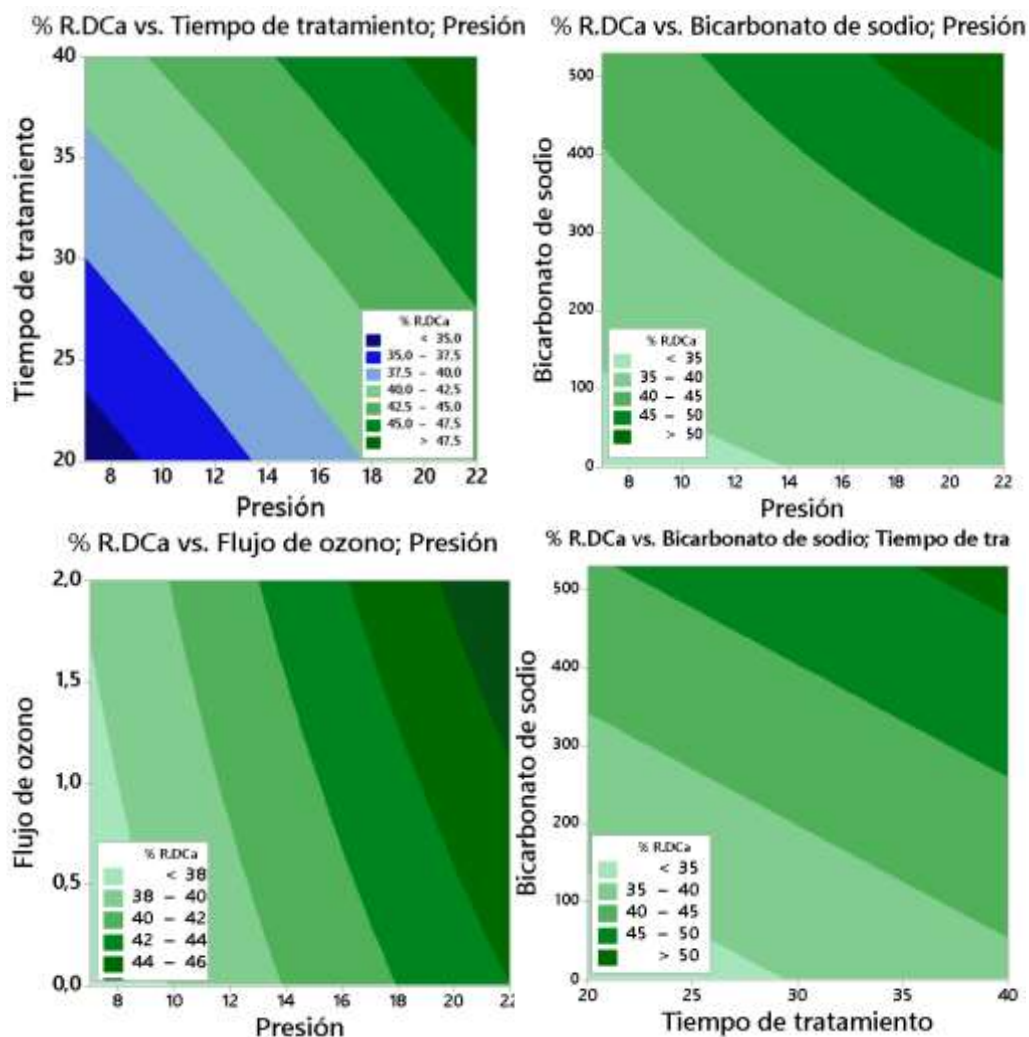
### **Análisis e interpretación**

La Figura 23, de efectos principales para medias, nos muestra que el factor de la adición del bicarbonato de sodio influye significativamente sobre la media de la reducción de la dureza cálcica, específicamente para el nivel de 530 mg/L, por otra parte el segundo factor de mayor influencia en la presión de entrada al sistema de cavitación para el nivel de 22 PSI, seguido del tiempo de tratamiento con el nivel de 40 minutos, sin embargo el factor del flujo de dióxido de carbono no tuvo mucha influencia pero si existió una diferencia sobre la reducción de la dureza cálcica.



**Figura 24**

*Diagrama de contornos sobre %R.D.Ca*



*Nota.* El diagrama de contorno muestra el avance de la reducción de la dureza cálcica en función de dos factores.

### **Análisis e interpretación**

La Figura 24, de diagrama de contorno nos muestra que a medida que uno sube de nivel de la presión (7 – 22 PSI) el incremento en la reducción % R.D.Ca se hace evidente, esto sucede acompañado a la vez cuando subes el tiempo de tratamiento, masa de bicarbonato de sodio y flujo de ozono. Las zonas oscuras verdes representan una mayor eliminación de la dureza cálcica, en cambio la zona azul o claro verde indican una baja reducción cálcica.

## CAPÍTULO V

### DISCUSIÓN DE RESULTADOS

#### 5.1. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

Mediante esta investigación, que tuvo como finalidad de conocer la influencia de los parámetros operacionales como la presión de entrada, tiempo de tratamiento, flujo de dióxido de carbono y bicarbonato de sodio sobre la reducción de la dureza cálcica en las aguas subterráneas utilizadas para el consumo humano en el Distrito de Luyando. Parte del resultado generado, nos muestra que de los 4 factores estudiados, el flujo de dióxido de carbono no tiene una influencia significativa, pero si generó la diferencia en la reducción de la dureza cálcica, por otra parte, se presenciaron diferencias significativas entre los grupos experimentales, generando una reducción significativa de la dureza cálcica para los 16 grupos experimentales incluido la réplica, lo cual nos dice que los niveles de dureza se encuentran dentro de las normativas permisibles para consumo humano.

De acuerdo a los investigadores Redekar et al. (2020), dan a conocer que mediante su trabajo realizado de “Estudio de viabilidad de ablandamiento y desinfección del Agua por Cavitación Hidrodinámica”, el rendimiento del ablandamiento por cavitación hidrodinámica fue satisfactorio, llegando a una reducción entre 75 a 85% con respecto a la dureza del agua potable, así mismo, para esta investigación evaluaron las variables de presión de entrada, diámetro de los agujeros y el número de los agujeros en sus respectivos niveles, logrando una reducción significativa entre los grupos experimentales formados en sus diferentes niveles, comparándola con la investigación que realizamos, el nivel de reducción de la dureza cálcica fue entre 28.26 % a 59.035%, sin embargo, recordar que este valor obtenido es sólo de la dureza cálcica, en cambio el valor obtenido del otro investigador es tanto de la dureza cálcica y dureza magnésica, además nuestro tiempo de tratamiento está entre 20 a 40 min., eso nos hace ver que también para ellos, tanto la presión y el tiempo influyeron significativamente.

Anaokar y Khambete (2021), ratificaron en su trabajo de investigación de “Enfoque basado en reglas difusas para evaluar el desempeño de la cavitación hidrodinámica para ablandamiento de agua de pozo”, que la aplicación de la tecnología del ablandamiento del agua mediante la cavitación hidrodinámica es eficiente, llegando a valores de 83% usando un reactor tipo venturi, en cambio para placas con agujeros se logró llegar hasta 93%, para las condiciones de 3 bar y 1.5 mm de diámetro del agujero, en cambio en el presente estudio se llegó máximo a 59.035% a las condiciones de 22 PSI y 40 min., si a este valor lo agregamos la dureza magnésica, el valor final estaría cerca al obtenido por estos investigadores. Por otra parte, las influencias tanto de la presión, como del diámetro se dieron hasta un cierto punto, pasado los 3 bar la reducción de la dureza disminuye, estos resultados de influencia se observaron en el trabajo que realicé, ya que al aumentar la presión de 7 hasta 22 PSI se observó un incremento en la reducción de dureza.

Haciendo la comparación con el trabajo realizado por Medina et al. (2023), donde evaluaron la eficiencia del sistema de cavitación hidrodinámica de tipo placas con agujeros sobre la reducción de la dureza total en una muestra proveniente del rechazo de ósmosis inversa, lograron reducir como máximo en 66,76 % a las condiciones de flujo de alimentación de la muestra en 5 L/min y una placa con 9 orificios, además observaron que dichos parámetros evaluados tuvieron influencias significativas en la reducción de la dureza total, estos valores no están alejados a los que obtuvimos en la investigación realizada, ya que para este estudio se llegó a 59.035 % de reducción de dureza a las condiciones de 22 PSI, 40 min. y 530 mg/L de bicarbonato de sodio, por otra parte, la adición del bicarbonato de sodio a la muestra tuvo una influencia muy significativa.

En base a los resultados obtenidos por Tithe y Gode (2020), donde demostraron reducir la dureza total de las aguas del río Indrayani a un valor de 82.5% a las condiciones de 50 L/min y con 9 agujeros en la placa, cada una de 1 mm de diámetro, por otro lado la influencia de la variable de número de cavitación es muy influyente, que a medida que el valor de número de cavitación baja de 4,25 a 0,55, hay un incremento muy significativo en la

dureza total, si comparamos estos resultados con el presente estudio, se encuentran por encima, ya que sólo se llegó a 59.035 % de reducción de dureza a las condiciones de 22 PSI, 40 min. y 530 mg/L de bicarbonato de sodio.

## CONCLUSIONES

Con respecto al objetivo general planteado:

Se concluye que los parámetros operacionales del proceso de absorción del CO<sub>2</sub> asistida por cavitación hidrodinámica tuvieron una influencia significativa sobre la reducción de la dureza cálcica en las aguas subterráneas del Distrito de Luyando, esto se ha demostrado en los 16 experimentos realizados, donde el porcentaje mínimo de reducción de la dureza cálcica de dio en el experimento 1 llegando a 28.26 % trabajadas a las condiciones de 7 PSI, tiempo de tratamiento de 20 minutos, 0 L/min de ingreso de dióxido de carbono y 0 mg/L de bicarbonato de sodio, en cambio a las condiciones de 22 PSI, 40 minutos de tratamiento, 2 L/min de flujo de ingreso de CO<sub>2</sub> y 530 mg/L de bicarbonato de sodio se llegó a la máxima reducción cálcica en 59.035 %.

En relación al objetivo específico 1: Se llegó a la conclusión de que el flujo de dióxido de carbono con el nivel de flujo 2 L/min, no tiene una influencia significativa sobre el porcentaje de reducción cálcica, ya que sin flujo de ozono se llegó a reducir hasta 36.5% en cambio con flujo de ozono (2L/min) hasta 44.1% operadas a 7 PSI para ambos casos, para 22 PSI se redujo de 38.2% sin CO<sub>2</sub> hasta 47.6% con CO<sub>2</sub>, esto se demostró mediante el análisis de ANOVA, donde la significancia asintótica (p-valor) obtenida es mayor al valor (p-valor=0.05), con lo cual es demasiado el error como para poder indicar una influencia significativa, pero si podemos decir que generó una reducción en la dureza cálcica que no es significativa.

En relación al objetivo específico 2: Se llegó a la conclusión de que la presión de entrada al sistema cavitación con los dos niveles estudiado tiene una influencia muy significativa sobre el porcentaje promedio de reducción de la dureza cálcica en aguas subterráneas del Distrito de Luyando, esto se demostró mediante el análisis de ANOVA, donde la significancia asintótica (p-valor) obtenida es menor al valor (p-valor=0.05), con lo cual nos indica que efectivamente existe una influencia sobre la variación de la dureza cálcica.

En relación al objetivo específico 3: Se llegó a la conclusión de que el tiempo de tratamiento con los dos niveles estudiados tiene una influencia muy significativa sobre el porcentaje promedio de reducción de la dureza cálcica, ya que a un tiempo de 20 minutos de tratamiento sólo se redujo a 33.8%, en cambio para 40 minutos se llegó a 42.5% trabajadas a 7 PSI para ambos casos, en cambio trabajando a 22 PSI se redujo de 41.3% para 20 minutos hasta 48.8% para 40 minutos, esto se demostró mediante el análisis de ANOVA, donde la significancia asintótica (p-valor) obtenida es menor al valor ( $p\text{-valor}=0.05$ ), con lo cual nos indica que efectivamente existe una influencia sobre la variación de la dureza cálcica.

En relación al objetivo específico 4: Se llegó a la conclusión de que la adición del bicarbonato de sodio con el nivel de 530mg/L estudiado tiene una influencia muy significativa sobre la reducción de la dureza cálcica en aguas subterráneas del Distrito de Luyando, esta influencia se genera debido a que cuando no se adiciona nada de bicarbonato a la muestra, la reducción de la dureza sólo llegó a 32.6%, en cambio la muestra mezclada con el bicarbonato de sodio después de su tratamiento, la reducción de la dureza aumentó hasta 37.4%, ambos trabajados a 7 PSI, en cambio cuando el sistema se sometió a 22 PSI, la muestra sin bicarbonato llegó a reducirse hasta 42.1%, mientras la muestra con bicarbonato alcanzó hasta 53.4%, esta variación se demostró mediante el análisis de ANOVA, donde la significancia asintótica (p-valor) obtenida es menor al valor ( $p\text{-valor}=0.05$ ), con lo cual nos indica que efectivamente existe una influencia sobre la variación de la dureza cálcica, además es uno de los factores de mayor influencia a comparación de los otros.

## RECOMENDACIONES

Se recomienda para futuros trabajos, antes de cada experimento lavar todo el sistema con agua destilada, con la finalidad de no alterar los resultados para los siguientes experimentos.

Para futuros trabajos evaluar el flujo de CO<sub>2</sub> a diferentes concentraciones, además buscar fuentes de dióxido de carbono que no sean problema para su uso.

Con respecto a la cuantificación de la dureza cálcica por volumetría empleando la EDTA, se recomienda buscar otra técnica más confiable y más precisa, ya que esta técnica volumétrica requiere que tengas una buena precisión en la visión con respecto al cambio o viraje del color.

Se recomienda hacer más estudios con respecto al manejo y entendimiento del proceso de reducción de la dureza de las aguas, ya que son escasos las investigaciones donde explican el fundamento en sí del mecanismo utilizando para el CO<sub>2</sub>, NaHCO<sub>3</sub> y cavitación hidrodinámica.

Para trabajos posteriores, se recomienda que, si uno va a trabajar con bombas hidráulicas que generan una presión de salida mayores a 50 PSI, las tuberías deberían ser de acero inoxidable, con la finalidad de evitar problemas de rotura o quiebre del material, además al momento del montaje y desmontaje no generen problemas.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Abd Aziz, N., Othman, N., Ibrahim, N., Murni, Z., & Ikhsan, M. (2019). Optimization of pH and Contact Time of Media in Removing Calcium and Magnesium from Groundwater. *The International Journal of Integrated Engineering Vol. 11 No. 9* , 63-72.
- Abukhadra, M., & Mohamed, A. (2019). Adsorption Removal of Safranin Dye Contaminants from Water Using Various Types of Natural Zeolite. *Silicon 11*, 1635–1647.
- Ahn, M. K., Chilakala, R., Han, C., & Thenepalli, T. (2018). Removal of Hardness from Water Samples by a Carbonation Process with a Closed Pressure Reactor. *Water 10*, 54 .
- Ajami, A. (2020). Encyclopedia of Geology. *Reference Module in Earth Systems and Environmental Sciences*.
- Al, G., Özdemir, U., & Aksoy, Ö. (2013). Cytotoxic effects of Reactive Blue 33 on *Allium cepa* determined using Taguchi's L8 orthogonal array. *Ecotoxicology and Environmental Safety 98* , 36–40.
- Alghamdi, M., El-Zahhar, A., Idris, A., Said, T., Sahlabji, T., & Nemr, A. (2019). Synthesis, characterization, and application of a novel polymeric-bentonite-magnetite composite resin for water softening. *Separation and Purification Technology Volume 224*, 356-365.
- Altiner, M. (2018). Effect of Alkaline Types on the Production of Calcium Carbonate Particles from Gypsum Waste for Fixation of CO<sub>2</sub> by Mineral Carbonation. *International Journal of Coal Preparation and Utilization* , 01330.
- Anaokar, G., & Khambete, A. (2021). Fuzzy rule base approach to evaluate performance of hydrodynamic cavitation for borewell water softening. *Materials Today: Proceedings Volume 47, Part 7*, 1377-1383.
- Aquae Fundación. (2021). ¿Cuánta agua potable hay en la Tierra? <https://www.fundacionaquae.org/cantidad-de-agua-potable-fuente-de-vida/>.
- Bang, J., Chae, S., Lee, S., Kim, J., Song, K., Kim, J., & Kim, W. (2019). Sequential carbonate mineralization of desalination brine for CO<sub>2</sub> emission reduction. *Journal of CO<sub>2</sub> Utilization 33* , 427-433.



- Bang, J., Kim, W., Song, K., Jeon, C., Chae, S., Cho, H., . . . Park, S. (2014). Effect of experimental parameters on the carbonate mineralization with CaSO<sub>4</sub>. *Chem. Eng. J.* 244, 282–287.
- Beckie, R. (2013). Groundwater. *Reference Module in Earth Systems and Environmental Sciences*.
- Bendezu, L. R. (2017). *REDUCCION DE LA DUREZA DE AGUAS SUBTERRÁNEAS MEDIANTE MICRO-NANO BURBUJAS DE AIRE-OZONO EN LA URBANIZACIÓN VILLA EL PINAR – COMAS*. Lima: Universidad César Vallejo.
- Bendezú-Valenzuela, L. (2017). *Reducción de la dureza de las aguas subterráneas mediante micro nanoburbujas de aire - ozono en la urbanización Villa el Pinar - Comas*. Lima: Universidad César Vallejo.
- Blogsadm. (19 de Febrero de 2019). *Proceso de ablandamiento de aguas: uso de CO<sub>2</sub> para reducir la dureza*. Obtenido de blogs.nippongases.es.: <https://blogs.nippongases.es/blog/proceso-de-ablandamiento-de-aguas-uso-de-co2-para-reducir-la-dureza/>
- Blue, C. R., Giuffre, A., Mergelsberg, S., Han, N., De Yoreo, J., & Dove, P. M. (2017). Chemical and physical controls on the transformation of amorphous calcium carbonate into crystalline CaCO<sub>3</sub> polymorphs. *Geochimica et Cosmochimica Acta. Volume 196*, 179-196.
- Bottani, E., & Odetti, H. (2006). *Química inorgánica*. Santa Fe: Universidad Nacional del Litoral.
- Bubulis, A., Bogorosh, A., Jurenas, V., & Voronov, S. (2010). Development of cavitation applications for the remediation of contaminated water. *Mechanika, vol. 81, no. 1*, 43–46.
- Chakraborty, M., Mukherjee, A., & Ahmed, K. (2015). Review of Groundwater Arsenic in the Bengal Basin, Bangladesh and India: from Source to Sink. . *Curr Pollution Rep* 1, 220–247.
- Crum, L. A., Skinner, M., & Zeilinger, S. (2013). A method for desalination and water remediation by hydrodynamic cavitation. *Proc. Meet. Acoust., vol. 19, no. 2013*, 8–11.
- Dangar, S., & Mishra, V. (2023). Excessive pumping limits the benefits of a strengthening summer monsoon for groundwater recovery in India. *One Earth*.

- Davidson, K., Briggs, J., Nolan, E., Bush, J., Håkansson, I., & Moloney, S. (2020). The making of a climate emergency response: Examining the attributes of climate emergency plans. *Urban Climate, Volume 33*, 100666.
- Ferrar, A. (2017). Fluid dynamics of acoustic and hydrodynamic cavitation in hydraulic power systems, *Proc. R. Soc. A. 473 (2199)*, 20160345.
- Fleischer, C., Becker, S., & Eigenberger, G. (1996). Detailed modeling of the chemisorptions of CO<sub>2</sub> into NaOH in a bubble column. *Chem. Eng. Sci. 51*, 1715-1724.
- Freeze, A., & Cherry, J. (1979). *Agua Subterránea*. Colombia.
- Fryar, A., & Mukherjee, A. (2019). Groundwater Hydrology. *Reference Module in Earth Systems and Environmental Sciences*.
- Garrels, R. M., & Christ, C. L. (1965). Solutions, Minerals, and Equilibria. *Harper & Row*, 1–18, 50–71.
- Ghadamnan, E., & Nabavi, S. (2019). Nano LTA zeolite in water softening softening process: synthesis, characterization, kinetic studies and process optimization by response surface methodology (RSM). *J. Water Environ. Nanotechnol. 4*, 119–138. .
- Gogate, P., & Pandi, A. (2004). A review of imperative technologies for wastewater treatment I: oxidation technologies at ambient conditions, *Adv. Environ. Res. 8 (3-4)*, 501–551.
- Hori, M., Shozugawa, K., Sugimori, K., & Watanabe, Y. (2021). A survey of monitoring tap water hardness in Japan and its distribution patterns. *Scientific Reports*.
- Izzah, N., Othman, N., Ibrahim, N., Murni, Z., & Ikhsan, M. (2019). Optimization of pH and Contact Time of Media in Removing Calcium and Magnesium from Groundwater. *The International Journal of Integrated Engineering VOL. 11 NO. 9* , 063–072.
- Jimoh, T., Omoarukhe, F., Epelle, E., Okoye, P., Olusola, E., Mukherjee, A., & Okolie, J. (2023). Introduction to Carbon Capture by Solvent-based Technologies. *Reference Module in Earth Systems and Environmental Sciences, Elsevier*.
- Jun-Hwan, B., Yeongsuk, Y., Seung-Woo, L., Kyungsun, S., & Soochun, C. (2017). CO<sub>2</sub> Mineralization Using Brine Discharged from a Seawater

- Desalination Plant. *Minerals* 7, 207.
- Junhyeok, J., & Myoung-Jin, K. (2019). CO<sub>2</sub> storage and CaCO<sub>3</sub> production using seawater and an alkali industrial by-product. *Chemical Engineering Journal* Volume 378, 15 December 2019, 122180.
- Kadir, N. A., Shahadat, M., & Ismail, S. (2017). Formulation study for softening of hardwater using surfactant modified bentonite adsorbent coating. *Appl. Clay Sci.*, 137, 168–175.
- Kozisek, F. (2020). Regulations for calcium, magnesium or hardness in drinking water in the. *Regulatory Toxicology and Pharmacology* 112 , 104589.
- Kozisek, F. (2020). Regulations for calcium, magnesium or hardness in drinking water in the European Union member states. *Regulatory Toxicology and Pharmacology* 112 , 104589.
- Mahasti, N. N., Shih, Y. J., Vu, X. T., & Huang, Y. H. (2017). Removal of calcium hardness from solution by fluidized-bed homogeneous crystallization (FBHC) process. *J. Taiwan Inst. Chem. Eng.*, 78., 378–385.
- Máxima-Uriarte, J. (2020). "Dióxido de Carbono". *Caracteristicas.co*.
- Medina, J. T., Gabriel, D., Mitma, D., Sanchez, J., Rubiños, S., Rosales, J., . . . Vásquez, S. (2023). Hydrodynamic Cavitation as Pretreatment for Removal of Hardness from Reverse Osmosis Reject Water. *International Journal of Membrane Science and Technology*, Vol. 10, No. 2, 288-301.
- Mohammad, V. (2015). A comprehensive study on irrigation management in Asia and Oceania. *Arch Agron Soil Sci.* 61, 1247–1271.
- Morris, B., Lawrence, A., Chilton, P., Adams, B., Calow, R., & Klinck, B. (2003). Groundwater and its Susceptibility to Degradation: A Global Assessment of the Problem and Options for Management. *Early Warning and Assessment Report Series, RS. 03–3. United Nations Environment Programme, Nairobi, Kenya.*
- Morris, R. (2011). Water Hardness and Risk of Death from Coronary Heart Disease. *Encyclopedia of Environmental Health* , 732–740.
- Naciones Unidas, O. (3 de marzo de 2022). *Las aguas subterráneas pueden ser la solución a las crisis hídricas si se gestionan correctamente.*

Obtenido de Noticias ONU:  
<https://news.un.org/es/story/2022/03/1505842>

- Ndehedehe, C., Ferreira, V., Agutu, N., Onojeghuo, A., Okwuashi, O., Kassahun, H., & Dewan, A. (2021). What if the rains do not come? *Journal of Hydrology* 595, 126040.
- Ngu, L. (2022). Carbon Capture Technologies. *Reference Module in Earth Systems and Environmental Sciences*, Elsevier.
- Ordoñez, J. (2012). *guas subterráneas acuíferos*. Lima: Sociedad Geográfica del Perú. Lima: ISBN: 978-9972-602-78-8.
- Pacheco, Y. J. (2019). *Uso de zeolita para la reducción de la dureza total y cloruros en las aguas subterráneas de la asociación Villa El Milagro, Villa El Salvador, 2018*. Lima: Unievrnsidad César Vallejo.
- Palit, S., & Hussain, C. (2021). 2 - Advanced oxidation processes as nonconventional environmental engineering techniques for water treatment and groundwater remediation,. En R. Rahman, & C. Hussain, *Handbook of Advanced Approaches Towards Pollution Prevention and Control* (págs. 33-44). Elsevier.
- Panca, E. (2021). *Diagnóstico del impacto por la existencia de letrinas en la calidad del agua subterránea para el consumo humano en los barrios 15 de Agosto Y San Salvador del distrito de Juliaca, San Román-Puno*. San Román: Universidad Nacional del Altiplano de Puno.
- Patent, U. S. (2010). *Patente n° United States Patent: 5861366*. New York, vol. 2, no. 12, pp. 1–29.
- Postigo, C., Martinez, D., & Grondona, S. (2018). Groundwater Pollution: Sources, Mechanisms, and Prevention. *Postigo, C., Martinez, D. E., Grondona, S., & Miglioranza, K. S. B. (2018). Groundwater Encyclopedia of the Anthropocene*, 87–96.
- Rajoriya, S., Bargole, S., & Saharan, V. (2017). Degradation of reactive blue 13 using hydrodynamic cavitation: Effect of geometrical parameters and different oxidizing additives. *Ultrason. Sonochem.* 37, 192–202.
- Rabeh, T., Ali, K., Bedai, S., Sadik, M. A., & Ismail, A. (2018). Exploration and evaluation of potential groundwater aquifers and subsurface structures at Beni Suef area in southern Egypt. *J. Afr. Earth Sci.* 151, 9–17.
- Rajoriya, S., Bargole, S., & Saharan, V. K. (2017). Degradation of a cationic

- dye (Rhodamine 6G) using hydrodynamic cavitation coupled with other oxidative agents: Reaction mechanism and pathway. *Ultrason. Sonochem.* 34 , 183–194.
- Ramos, F. R. (2017). *Capacidad de la resina Amberlite IR-120 para mejorar la calidad de agua subterránea en la urbanización San Sebastián – Comas, 2017*. Lima: Universidad César Vallejo.
- Redekar, S. D., Shastri, S. S., Anaokar, G. S., & Sawant, M. M. (2020). Feasibility Study of Combined Softening and Disinfection of Water by Hydrodynamic Cavitation. *International Journal of Innovative Research in Science Engineering and Technology* 9(6), 4726 - 4732.
- Reinecke, R. (2022). Groundwater – Global Abundance and Distribution. En T. Mehner, & K. Tockner, *Encyclopedia of Inland Waters (Second Edition)* (págs. 306-314). Elsevier.
- Rigola, M. (1990). Tratamiento de aguas industriales: aguas de proceso y residuales. *Marcobo*, 161.
- Robillard, W., & Sharpe, P. D. (2017). How to Interpret a Water Analysis Report. ( The pennsylvania StateUniversity), 3.
- Rockström, J., Gupta, J., & Qin, D. (2023a). Safe and just earth system boundaries. *Nature*, 619., 619:102–111.
- Sanna, A., Uibu, M., Caramanna, G., Kuusik, R., & Maroto-Valer, M. (2014). A review of mineral carbonation technologies to sequester CO<sub>2</sub>. *Chem. Soc. Rev.* 43, 8049–8080.
- Sayán, J., Guzmán, A., Pérez, G., & Tovar, J. (2006). Estado del conocimiento de la hidrogeología en Perú. *Boletín geológico y minero, ISSN 0366-0176, Vol. 117, N° 1*, 147-161.
- Sharma, A., Gogate, P., Mahulkar, A., & Pandi, A. (2008). Comparison of cavitation devices based on linear and swirling flows: Hydrodynamic characteristics. *Ind. Eng. Chem. Res.* 143, 201–209.
- Sarc, A., Stepisnik-Perdih, T., Petkovsek, M., & Dular, M. (2017). The issue of cavitation number value in studies of water treatment by hydrodynamic cavitation. *Ultrason. Sonochem.* 34, 51–59.
- Scanlon, B., Fakhreddine, S., Rateb, A., de Graaf, I., Famiglietti, J., & Gleeson, T. (2023). Global water resources and the role of groundwater in a resilient water future. *Nature Reviewss Earth & Environment*, 4., 87–

101.

- Sonawane, S., Gumfekar, S., Kate, K., Meshram, S., Kunte, K., Ramjee, L., . . . Ashokkumar, M. (2010). Hydrodynamic Cavitation-Assisted Synthesis of Nanocalcite. *International Journal of Chemical Engineering*, 1-9.
- Supo, J. (2014). *Seminario de la Investigacion Cientifica* (2da Edición ed.). Arequipa, Perú: Editorial Bioestadístico.
- Suslick, K. (1990). The chemical effects of ultrasound. *Science*, 247 (1990) 1439 (1989), 80-86.
- Szymanek, K., Charnas, R., & Piasecki, W. (2020). A study on the mechanism of Ca<sup>2+</sup> adsorption on TiO<sub>2</sub> and Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> with the usage of calcium ion-selective electrode. *Chemosphere Volume 242*, 125162.
- Tacuri, R. (2018). *Determinación de la calidad de agua de pozos artesianos y sus aspectos ambientales asociados, Juliaca, Puno, 2018* . Juliaca: Universidad Nacional de San Agustín de Arequipa.
- Thanekar, P., Gogate, P. R., Znak, Z., Sukhatskiy, Y., & Mnykh, R. (2021). Degradation of benzene present in wastewater using hydrodynamiccavitation in combination with air. *Ultrasonics - Sonochemistry* 70, 105296.
- Tithe, S., & Gode, A. (2020). A Reliable Solution for Treatment of River Water Using Hydrodynamic Cavitation in Combination with Chemical Additives. *System Reliability, Quality Control, Safety, Maintenance and Management*.
- Valenzuela, R. N., & Yucra, Y. (2022). Evaluation of the quality of groundwater of the Industrial Taparachi Park in Juliaca district. *ÑAWPARISUN – Revista de Investigación Científica de Ingenierías*, 3(4), 67-72.
- Venkiteswaran, K., Xie, T., Seib, M., Tale, V., & Zitomer, D. (2022). Chapter 8 - Anaerobic digester biogas upgrading using microalgae. En G. Demirer, & S. Uludag-Demirer, *Integrated Wastewater Management and Valorization Using Algal Cultures* (págs. 183-214). Elsevier.
- Voutchkov, N., & Kaiser, G. (2020). Chapter 7 - Land application. En N. Voutchkov, & G. Kaiser, *Management of Concentrate from Desalination Plants* (págs. 151-172). Elsevier.
- Wang, B., Su, H., & Zhang, B. (2021). Hydrodynamic cavitation as a promising

route for wastewater treatment – A review . *Chemical Engineering Journal* 412, 128685.

WORLD HEALTH ORGANIZATION, W. (2004). *Guidelines for drinking-water quality*. 2nd ed. Geneva. Vol 1. Recommendations.

Wu, G., Lian, F., Fu, M., & Zhang, Y. (2021). Classification and Quantitative Modeling Analysis of Groundwater Hardness based on Ultraviolet Absorption Spectrum. *Journal of Physics: Conference Series* 1746 , 012005.

Wu, Z., Yuste-Cordoba, F., Cintas, P., Wu, Z., Boffa, L., Mantegna, S., & Cravotto, G. (2018). Effects of ultrasonic and hydrodynamic cavitation on the treatment of cork wastewater by flocculation and Fenton processes. *Ultrason. Sonochem.* 40, 3 - 8.

### **COMO CITAR ESTE TRABAJO DE INVESTIGACIÓN**

Aquino Romero, A. (2024). *Influencia de los parámetros operacionales del proceso de absorción del CO2 asistida por cavitación hidrodinámica sobre la reducción de la dureza cálcica en aguas subterráneas del distrito de Luyando - 2023* [Tesis de pregrado, Universidad de Huánuco]. Repositorio Institucional UDH. <http://...>

## **ANEXOS**



# ANEXO 1

## RESOLUCIÓN DE APROBACIÓN DEL PROYECTO DE INVESTIGACIÓN

### UNIVERSIDAD DE HUÁNUCO Facultad de Ingeniería

#### RESOLUCIÓN N° 1785-2022-D-FI-UDH

Huánuco, 12 de setiembre de 2022

Visto, el Oficio N° 688-2022-C-PAIA-FI-UDH, mediante el cual el Coordinador Académico de Ingeniería Ambiental, remite el dictamen de los jurados revisores, del Trabajo de Investigación (Tesis) intitulado: "INFLUENCIA DE LOS PARÁMETROS OPERACIONALES DEL PROCESO DE ABSORCIÓN DEL CO 2 ASISTIDA POR CAVITACIÓN HIDRODINÁMICA SOBRE LA REDUCCIÓN DE LA DUREZA CÁLCICA EN AGUAS SUBTERRÁNEAS DEL DISTRITO DE LUYANDO - 2022", presentado por el (la) Bach. **Alexandra Talia AQUINO ROMERO**.

#### CONSIDERANDO:

Que, mediante Resolución N° 006-2001-R-AU-UDH, de fecha 24 de julio de 2001, se crea la Facultad de Ingeniería, y;

Que, mediante Resolución de Consejo Directivo N° 076-2019-SUNEDU/CD, de fecha 05 de junio de 2019, otorga la Licencia a la Universidad de Huánuco para ofrecer el servicio educativo superior universitario, y;

Que, mediante Resolución N° 1524-2021-D-FI-UDH, de fecha 17 de noviembre de 2021, perteneciente a la Bach. **Alexandra Talia AQUINO ROMERO** se le designó como ASESOR(A) de Tesis a la Mg. Maria Vanessa Cuba Tello, docente adscrito al Programa Académico de Ingeniería Ambiental de la Facultad de Ingeniería, y;

Que, según Oficio N° 688-2022-C-PAIA-FI-UDH, del Coordinador Académico quien informa que los JURADOS REVISORES del Trabajo de Investigación (Tesis) intitulado: "INFLUENCIA DE LOS PARÁMETROS OPERACIONALES DEL PROCESO DE ABSORCIÓN DEL CO 2 ASISTIDA POR CAVITACIÓN HIDRODINÁMICA SOBRE LA REDUCCIÓN DE LA DUREZA CÁLCICA EN AGUAS SUBTERRÁNEAS DEL DISTRITO DE LUYANDO - 2022", presentado por el (la) Bach. **Alexandra Talia AQUINO ROMERO**, integrado por los siguientes docentes: Mg. Herman Atilio Tarazona Mirabal (Presidente), Mg. Milton Edwin Morales Aquino (Secretario) y Mg. Abrahams Moises Cabrera Montalvo (Vocal), quienes declaran APTO para ser ejecutado el Trabajo de Investigación de (Tesis), y;

Estando a las atribuciones conferidas al Decano de la Facultad de Ingeniería y con cargo a dar cuenta en el próximo Consejo de Facultad.

#### SE RESUELVE:

**Artículo Primero.** - APROBAR, el Trabajo de Investigación (Tesis) y su ejecución intitulado: **INFLUENCIA DE LOS PARÁMETROS OPERACIONALES DEL PROCESO DE ABSORCIÓN DEL CO 2 ASISTIDA POR CAVITACIÓN HIDRODINÁMICA SOBRE LA REDUCCIÓN DE LA DUREZA CÁLCICA EN AGUAS SUBTERRÁNEAS DEL DISTRITO DE LUYANDO - 2022**", presentado por el (la) Bach. **Alexandra Talia AQUINO ROMERO** para optar el Título Profesional de Ingeniero(a) Ambiental del Programa Académico de Ingeniería Ambiental de la Universidad de Huánuco.

**Artículo Segundo.** - El Trabajo de Investigación (Tesis) deberá ejecutarse hasta un plazo máximo de 1 año de su Aprobación. En caso de incumplimiento podrá solicitar por única vez la ampliación del mismo (6 meses).

#### REGÍSTRESE, COMUNÍQUESE Y ARCHÍVESE



#### Distribución:

Fac. de Ingeniería - PAIA - Asesor - Exp. Graduando - Interesado - Archivo.  
BCR/EJML/nto.

# ANEXO 2

## RESOLUCIÓN DE CAMBIO DE TITULO

### UNIVERSIDAD DE HUÁNUCO

#### Facultad de Ingeniería

#### RESOLUCIÓN N° 0165-2024-D-FI-UDH

Huánuco, 12 de febrero de 2024

Visto, el Oficio N° 052-2024-C-PAIA-FI-UDH, del Coordinador Académico de Ingeniería Ambiental, quien remite la petición de la Bach. **Alexandra Talia AQUINO ROMERO**, en la cual solicita cambio de título del Trabajo de Investigación (Tesis).

#### CONSIDERANDO:

Que, según Oficio N° 052-2024-C-PAIA-FI-UDH, del Coordinador Académico de Ingeniería Ambiental, quien remite la petición de la Bach. **Alexandra Talia AQUINO ROMERO** en la cual solicita cambio de título del Trabajo de Investigación (Tesis), y;

Que, mediante Resolución N° 1785-2022-D-FI-UDH, de fecha 12 de setiembre de 2022, se aprueba el Trabajo de Investigación (Tesis) intitulado: "INFLUENCIA DE LOS PARÁMETROS OPERACIONALES DEL PROCESO DE ABSORCIÓN DEL CO 2 ASISTIDA POR CAVITACIÓN HIDRODINÁMICA SOBRE LA REDUCCIÓN DE LA DUREZA CÁLCICA EN AGUAS SUBTERRÁNEAS DEL DISTRITO DE LUYANDO - 2022", presentado por el (la) Bach. **Alexandra Talia AQUINO ROMERO**, la misma que solicita el cambio de título del Trabajo de Investigación (Tesis), en coordinación con su asesor, y;

Estando a las atribuciones conferidas al Decano de la Facultad de Ingeniería y con cargo a dar cuenta en el próximo Consejo de Facultad.

#### SE RESUELVE:

**Artículo Primero.** - ANULAR, la Resolución N° 1785-2022-D-FI-UDH, de fecha 12 de setiembre de 2022.

**Artículo Segundo.** - APROBAR, el Trabajo de Investigación (Tesis) intitulado: "INFLUENCIA DE LOS PARÁMETROS OPERACIONALES DEL PROCESO DE ABSORCIÓN DEL CO 2 ASISTIDA POR CAVITACIÓN HIDRODINÁMICA SOBRE LA REDUCCIÓN DE LA DUREZA CÁLCICA EN AGUAS SUBTERRÁNEAS DEL DISTRITO DE LUYANDO - 2023"; presentado por la Bach. **Alexandra Talia AQUINO ROMERO**, del Programa Académico de Ingeniería Ambiental de la Universidad de Huánuco.

REGÍSTRESE, COMUNÍQUESE, ARCHÍVESE



Datos Generales:

Fac. de Ingeniería - PAIA - Asesor - Exp. Graduado - Intersusana - Archivos  
DCH/KDH/ymz

# ANEXO 3

## RESOLUCIÓN DE NOMBRAMIENTO DE ASESOR

### UNIVERSIDAD DE HUÁNUCO Facultad de Ingeniería

#### RESOLUCIÓN N° 1893-2022-D-FI-UDH

Huánuco, 23 de setiembre de 2022

Visto, el Oficio N° 734-2022-C-PAIA-FI-UDH presentado por el Coordinador del Programa Académico de Ingeniería Ambiental y el Expediente N° 370711-0000002988, de la Bach. **Alexandra Talia AQUINO ROMERO**, quien solicita cambio de Asesor de Tesis.

#### CONSIDERANDO:

Que, de acuerdo a la Nueva Ley Universitaria 30220, Capítulo V, Art 45º inc. 45.2, es procedente su atención, y;

Que, según el Expediente N° 370711-0000002988, presentado por el (la) Bach. **Alexandra Talia AQUINO ROMERO**, quien solicita cambio de Asesor de Tesis, para desarrollar su trabajo de investigación, y;

Que, con Resolución N° 1524-2021-D-FI-UDH, de fecha 17 de noviembre de 2021, en la cual se designa como Asesor de Tesis de la Bach. **Alexandra Talia AQUINO ROMERO** a la Mg. María Vanessa Cuba Tello, quien no tiene vínculo laboral con esta universidad, y;

Que, según lo dispuesto en el Capítulo II, Art. 31 del Reglamento General de Grados y Títulos de la Universidad de Huánuco vigente, es procedente atender lo solicitado, y;

Estando a las atribuciones conferidas al Decano de la Facultad de Ingeniería y con cargo a dar cuenta en el próximo Consejo de Facultad.

#### SE RESUELVE:

**Artículo Primero.** - **DEJAR SIN EFECTO**, la Resolución N° 1524-2021-D-FI-UDH, de fecha 17 de noviembre de 2021.

**Artículo Segundo.** - **DESIGNAR**, como nuevo Asesor de Tesis de la Bach. **Alexandra Talia AQUINO ROMERO** al Mg. Frank Erick Camara Llanos, Docente del Programa Académico de Ingeniería Ambiental, Facultad de Ingeniería.

#### REGÍSTRESE, COMUNÍQUESE Y ARCHÍVESE



UNIVERSIDAD DE HUÁNUCO  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
Ing. Ethel Ibarani Manzano Lozano  
SECRETARÍA DOCENTE



UNIVERSIDAD DE HUÁNUCO  
Mg. Bertha Campos Rios  
DECANO DE LA FACULTAD DE INGENIERÍA

Distribución:  
Fac. de Ingeniería - PAIA- Asesor- Mat. y Reg.Acad. - Interesado - Archivo.  
BCR/EJML/nto

## ANEXO 4

### MATRIZ DE CONSISTENCIA

Influencia de los parámetros operacionales del proceso de absorción del CO<sub>2</sub> asistida por cavitación hidrodinámica sobre la reducción de la dureza cálcica en aguas subterráneas del Distrito de Luyando – 2023.

PROBLEMAS DE INVESTIGACIÓN	OBJETIVOS DE LA INVESTIGACIÓN	HIPÓTESIS	VARIABLES	INDICADORES	MÉTODOLÓGÍA
<b>P. General</b>	<b>O. General</b>	<b>H. General</b>	<b>Dependientes</b>		
¿Cuál será el grado de influencia de los parámetros operacionales del proceso de absorción del CO <sub>2</sub> asistida por cavitación hidrodinámica sobre la reducción de la dureza cálcica en aguas subterráneas del Distrito de Luyando – 2023?	Demostrar la influencia de los parámetros operacionales del proceso de absorción del CO <sub>2</sub> asistida por cavitación hidrodinámica sobre la reducción de la dureza cálcica en aguas subterráneas del Distrito de Luyando – 2023.	Existe una relación de influencia significativa entre los parámetros de operación y el proceso de absorción del CO <sub>2</sub> asistida por cavitación hidrodinámica sobre la reducción de la dureza cálcica en aguas subterráneas del Distrito de Luyando – 2023.	Dureza cálcica en agua subterránea del Distrito de Luyando	Porcentaje de reducción de la concentración del catión calcio en unidad de tiempo	<b>Tipo de experimentación</b> Experimental <b>Nivel de investigación</b> Explicativo Enfoque de la investigación Cuantitativa
<b>P. General</b>	<b>O. General</b>	<b>H. General</b>	<b>Independientes</b>		
¿Cuál es la influencia significativa del flujo de dióxido de carbono sobre el porcentaje promedio de reducción de la dureza cálcica en aguas subterráneas del Distrito de Luyando – 2023?	Demostrar la influencia significativa del flujo de dióxido de carbono sobre el porcentaje promedio de reducción de la dureza cálcica en aguas subterráneas del Distrito de Luyando – 2023.	Hay influencia significativa del flujo de dióxido de carbono sobre el porcentaje promedio de reducción de la dureza cálcica en aguas subterráneas del Distrito de Luyando – 2023.	Parámetros operacionales del proceso de absorción del CO <sub>2</sub> asistida por cavitación hidrodinámica.	-Presión de alimentación a la CH tipo placa orificio -Tiempo de operación	<b>Población:</b> La población estuvo conformada por las aguas subterráneas del Distrito de Luyando, Provincia Leoncio Prado, Departamento Huánuco.

¿Cuál es la influencia significativa de la presión de entrada sobre el porcentaje promedio de reducción de la dureza cálcica en aguas subterráneas del Distrito de Luyando – 2023?

Demostrar la influencia significativa de la presión de entrada sobre el porcentaje promedio de reducción de la dureza cálcica en aguas subterráneas del Distrito de Luyando – 2023.

Hay influencia significativa de la presión de entrada sobre el porcentaje promedio de reducción de la dureza cálcica en aguas subterráneas del Distrito de Luyando – 2023.

¿Cuál es la influencia significativa del tiempo de tratamiento sobre el porcentaje promedio de reducción de la dureza cálcica en aguas subterráneas del Distrito de Luyando – 2023?

Demostrar la influencia significativa del tiempo de tratamiento sobre el porcentaje promedio de reducción de la dureza cálcica en aguas subterráneas del Distrito de Luyando – 2023.

Hay influencia significativa del tiempo de tratamiento sobre el porcentaje promedio de reducción de la dureza cálcica en aguas subterráneas del Distrito de Luyando – 2023.

¿Cuál es la influencia significativa del bicarbonato de sodio sobre el porcentaje promedio de reducción de la dureza cálcica en aguas subterráneas del Distrito de Luyando – 2023?

Demostrar la influencia significativa del bicarbonato de sodio sobre el porcentaje promedio de reducción de la dureza cálcica en aguas subterráneas del Distrito de Luyando – 2023.

Hay influencia significativa del bicarbonato de sodio sobre el porcentaje promedio de reducción de la dureza cálcica en aguas subterráneas del Distrito de Luyando – 2023.

-Flujo de dióxido de carbono

**Muestra:** Como muestra se consideró por cada experimento un volumen de 6 litros, como se realizaron 8 experimentos más una réplica, en total se necesitaron 96 litros de muestra.

**Recolección de datos:** Para conocer la influencia de las cuatro variables independientes sobre la variable dependiente (dureza cálcica), se utilizó el diseño estadístico experimental del arreglo ortogonal de Taguchi  $L_8$  ( $2^4$ ).

-Bicarbonato de sodio

## ANEXO 5

### FICHA DE RECOLECCIÓN DE DATOS DE CAMPO

FICHA DE RECOLECCIÓN DE PARÁMETROS FISCOQUÍMIOS:

TESIS : "INFLUENCIA DE LOS PARÁMETROS OPERACIONALES DEL PROCESO DE ABSORCIÓN DEL CO<sub>2</sub> ASISTIDA POR CAVITACIÓN HIDRODINÁMICA SOBRE LA REDUCCIÓN DE LA DUREZA CÁLCICA EN AGUAS SUBTERRÁNEAS DEL DISTRITO DE LUYANDO – 2023"

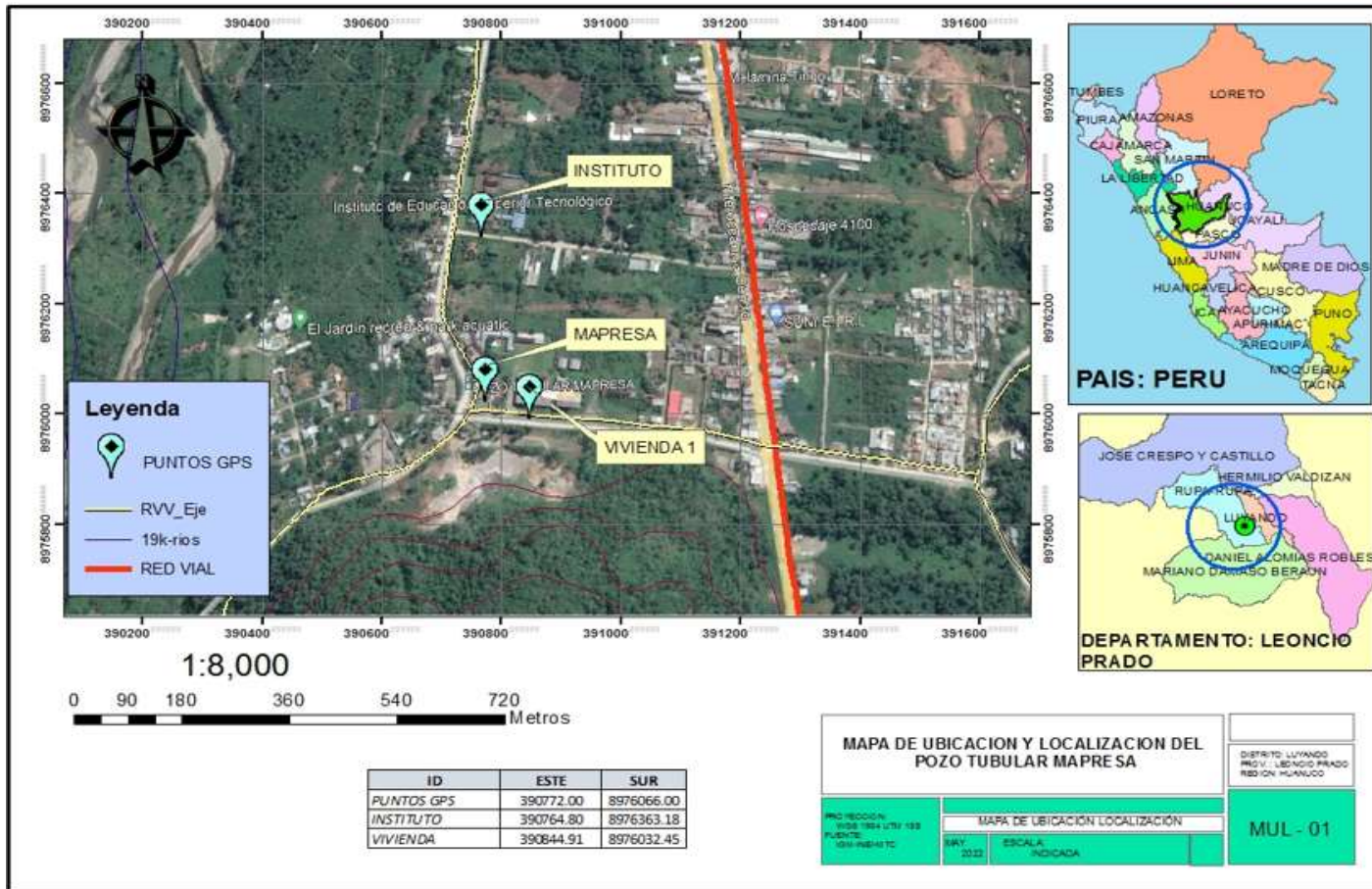
TESISTA: BACH. Alexandra Talia Aquino Romero

LUGAR: LABORATORIO DE QUÍMICA UNAS

N° EXP.	PRESIÓN DE ALIMENTACIÓN AL VENTURI (psi)	TIEMPO DE OPERACIÓN (min.)	Flujo de CO <sub>2</sub> (L/min)	Bicarbonato de sodio (mg/L)	% DE REDUCCIÓN DE LA DUREZA CÁLCICA
1	7	20	0	0	28,2600
2	7	20	2	530	39,0600
3	7	40	0	530	45,0600
4	7	40	2	0	37,4500
5	22	20	0	530	49,0300
6	22	20	2	0	36,1450
7	22	40	0	0	38,9050
8	22	40	2	530	59,0350

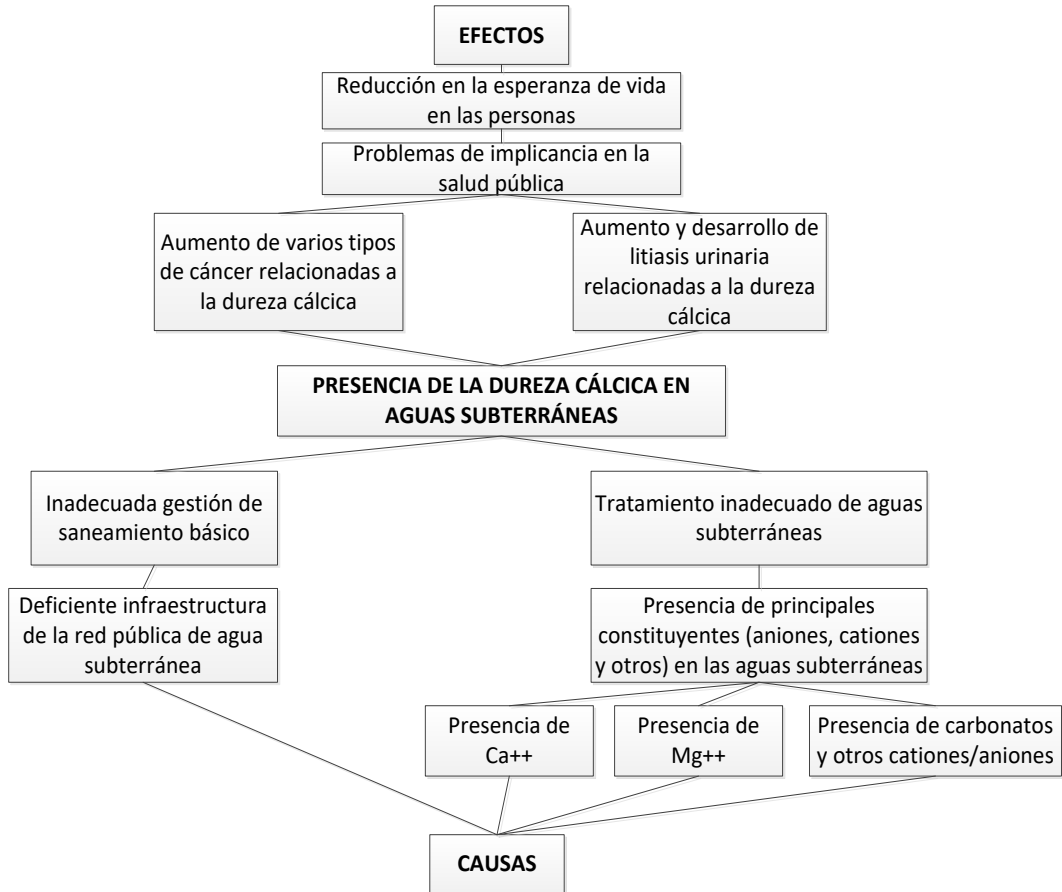
## ANEXO 6

### MAPA DE LOCALIZACIÓN Y UBICACIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO



# ANEXO 7

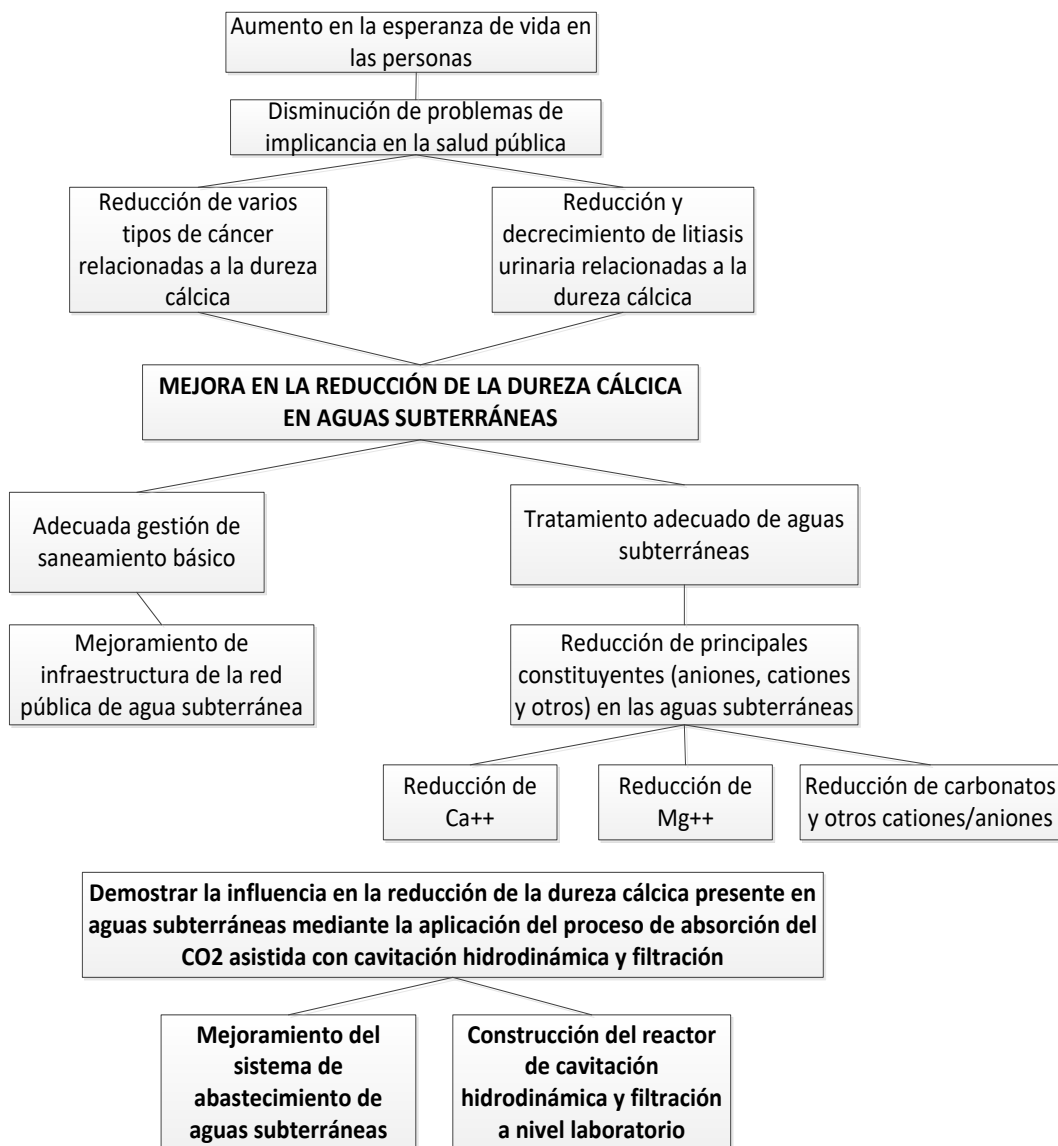
## ÁRBOL DE CAUSAS Y EFECTOS





## ANEXO 8

### ÁRBOL DE MEDIOS Y FINES



## ANEXO 9

### PANELES FOTOGRÁFICOS DEL DESARROLLO DEL PRESENTE ESTUDIO

Fotografía de recojo de la muestra en el punto 2



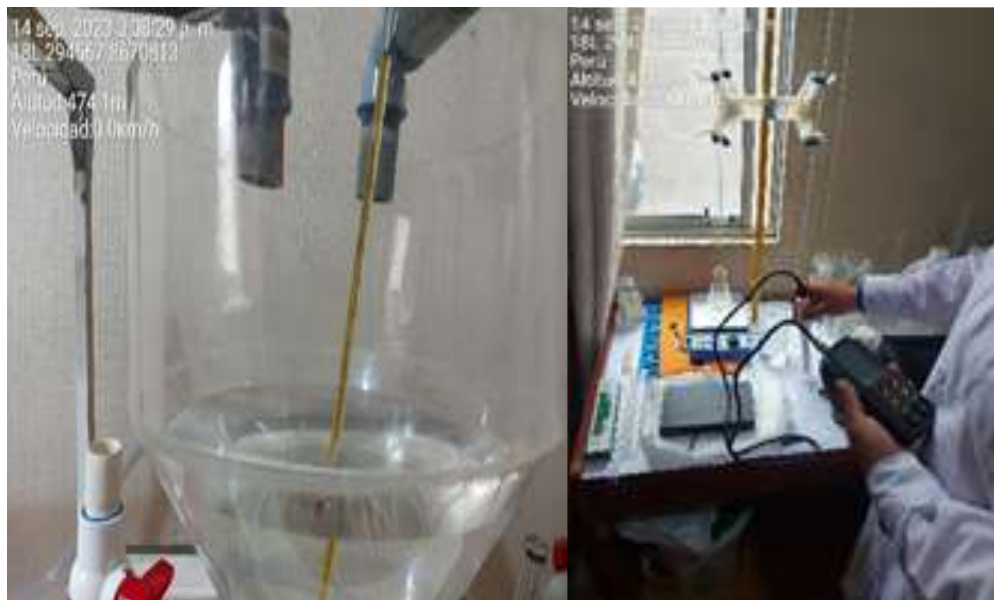
Fotografía del Análisis volumétrico de la muestra del punto 2



Fotografía del llenado y acondicionado de la muestra en el módulo para su posterior tratamiento con el sistema acoplado de cavitación hidrodinámica y  $\text{CO}_2$



Fotografía de las etapas de observación como la medida de la temperatura, pH y conductividad de la muestra



Fotografía del acondicionando de la muestra antes de su cuantificación mediante la titulación con EDTA.



Fotografía en el momento del agregado del indicador Murexida y titulación con la solución de EDTA (0.01N).



Fotografía de la muestra de color fucsia antes de su titulación, la muestra de color violeta al momento de cambiar el color y el volumen exacto para su captura y cálculo de la dureza cálcica.



Fotografía del informe de los resultados del laboratorio, muestras finales.


**UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA DE LA SELVA TINGO MARÍA**  
 FACULTAD DE INGENIERÍA EN INDUSTRIAS ALIMENTARIAS  
 LABORATORIO DE QUÍMICA  
 Av. Universidad Sin Tingo María. Tel: (052) 562542 Fax: (052) 881138

"AÑO DE LA UNIDAD, LA PAZ Y EL DESARROLLO"

Tingo María, 19 de septiembre del 2023

**RESULTADOS DE ANALISIS DUREZA DE CALCIO**

**LUGAR TOMA DE MUESTRA:** 1. CAGERO MARANILLO-LUYANDO  
**DISTRITO:** 1. LUYANDO - Leoncio Prado - Huánuco  
**PROVINCIA:** 1. Leoncio Prado  
**REGION:** 1. HUÁNUCO  
**SOLICITANTE:** 1. ADRIANO ROMERO ALEXANDRA TALLA  
**MUESTRA:** 1. OSA AGLING ROMERO ALEXANDRA TALLA  
**DESCRIPCIÓN:** 1. TRES MUESTRAS DE AGUA DE POZO TURBIAH  
**FECHA DE RECEPCIÓN DE LA MUESTRA:** 01 de setiembre de 2023

**RESULTADOS**

Análisis del D.C.T. de septiembre de 2023	
pH	5.2
CaCO <sub>3</sub>	1.7
CaCl <sub>2</sub>	345.2

Análisis del D.C. 19 de septiembre de 2023 & EXPERIMENTOS	
EX. 1	35.70
EX. 2	35.70
EX. 3	37.45
EX. 4	40.03
EX. 5	36.13
EX. 6	36.9
EX. 8	68.24


 Lic. **MAGEK VERÓNICA BAZÁN LINARES**  
 Jefe Laboratorio de Química

Fotografía de la vista panorámica del módulo construido para ablandar el agua subterránea del distrito de Luyand

