

**UNIVERSIDAD PRIVADA ANTONIO GUILLERMO URRELO**



Facultad de Ingeniería

Escuela Profesional de Ingeniería Ambiental y Prevención de Riesgos

**TESIS**

**EFFECTO DE LA APLICACIÓN DEL OZONO EN LA CONCENTRACIÓN  
DE METALES EN SOLUCIÓN EN EL AGUA DEL RÍO HUALGAYOC –  
2018**

**Tesistas:**

**Cieza Cueva Evitelio**

**Zegarra Córdova Jesús Del Lirio**

**Asesor:**

**Mg. Ing. Fernando Camilo Joaquín Rodríguez**

**Cajamarca – Perú**

**Febrero– 2019**

**UNIVERSIDAD PRIVADA ANTONIO GUILLERMO URRELO**



Facultad de Ingeniería

Escuela Profesional de Ingeniería Ambiental y Prevención de Riesgos

TESIS

**EFFECTO DE LA APLICACIÓN DEL OZONO EN LA CONCENTRACIÓN  
DE METALES EN SOLUCIÓN EN EL AGUA DEL RÍO HUALGAYOC - 2018**

Tesis presentada en cumplimiento parcial de los requerimientos para optar el Título  
Profesional de Ingeniero Ambiental y Prevención de Riesgos

**Tesistas:**

**Cieza Cueva Eitelio**

**Zegarra Córdova Jesús Del Lirio**

**Asesor:**

**Mg. Ing. Fernando Camilo Joaquín Rodríguez**

**Cajamarca-Perú**

**Febrero-2019**

COPYRIGHT © 2019 by

EVITELIO CIEZA CUEVA  
JESÚS DEL LIRIO ZEGARRA CÓRDOVA

Todos los derechos reservados

UNIVERSIDAD PRIVADA ANTONIO GUILLERMO URRELO

FACULTAD DE INGENIERÍA  
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA AMBIENTAL Y PREVENCIÓN DE  
RIESGOS

APROBACIÓN DE TESIS PARA OPTAR TÍTULO PROFESIONAL

“EFECTO DE LA APLICACIÓN DEL OZONO EN LA CONCENTRACIÓN DE  
METALES EN SOLUCIÓN EN EL AGUA DEL RÍO HUALGAYOC-2018”

---

Dr. Ing. Persi Vera Zelada  
PRESIDENTE

---

Mg. Ing. Diana Jakelin Cruzado Vásquez  
SECRETARIO

---

Mg. Ing. Fernando Camilo Joaquín Rodríguez  
ASESOR

**A:**

A Dios, por sus bendiciones, a mis padres Ángel Luis y María Romenthi, a quienes amo y agradezco infinitamente por su amor, enseñanzas y sacrificios. A mi esposa Maribel y mis hijas Angélica, Regina, Nadia y Anita y finalmente a todas las personas maravillosas que me apoyaron, me apoyan y me motivan a ser cada vez mejor profesional y persona.

Isabel Cueva y Ismael Cieza por darme la vida y haberme apoyado en todo momento, por la motivación constante que me ha permitido ser una persona de bien, pero más que nada, por su amor y ejemplos de perseverancia y constancia que lo caracterizan, por el valor mostrado para salir adelante y por su amor.

Jesús y Eitelio

## **AGRADECIMIENTO**

- A la Universidad Privada Antonio Guillermo Urrelo por darnos la mejor educación y a nuestros docentes por habernos brindado sus conocimientos y experiencias.
- En especial a nuestro asesor, Mg. Fernando Joaquín Rodríguez, quien nos apoyó desde el inicio, para poder desarrollar esta investigación.
- A nuestros amigos en especial al Mg. Ricardo Julián Díaz Ruiz por su apoyo incondicional.

# ÍNDICE

DEDICATORIA: .....	i
AGRADECIMIENTO .....	ii
ÍNDICE .....	iii
LISTA DE TABLAS .....	vii
LISTA DE FIGURAS .....	vii
LISTA DE ABREVIATURAS .....	viii
RESUMEN.....	ix
ABSTRAC .....	xi
INTRODUCCIÓN .....	1
CAPÍTULO I: PLANTEAMIENTO DE LA REALIDAD PROBLEMÁTICA .....	3
1.1. Descripción de la Realidad Problemática.....	3
1.2. Formulación del Problema .....	8
1.3. Objetivos de la Investigación .....	8
1.3.1. Objetivo general. ....	8
1.3.2. Objetivos específicos.....	8
1.4. Justificación de la Investigación .....	9
CAPÍTULO II: MARCO TEÓRICO .....	11
2.1. Fundamentos teóricos de la investigación.....	11
2.1.1. Antecedentes teóricos.....	11
2.2. Marco Histórico.....	15
2.3. Marco conceptual .....	20
2.3.1. Hierro y manganeso en aguas naturales. ....	21
2.3.2. Origen de hierro y manganeso en aguas naturales. ....	22
2.3.3. Química del hierro y manganeso.....	23
2.4. Bases conceptuales .....	30

2.4.1.	Metales disueltos. ....	30
2.4.2.	Contaminación por metales disueltos. ....	32
2.4.3.	Oxidación. ....	34
2.4.4.	Manganeso. ....	35
2.4.5.	Ozono. ....	36
2.4.6.	Efectos tóxicos de los metales. ....	40
2.4.7.	Potencial de hidrógeno (pH). ....	41
2.4.8.	Espectrometría de masas por plasma de acoplamiento inductivo. ....	42
2.4.9.	La Autoridad Nacional Del Agua (ANA). ....	43
2.4.10.	Calidad de agua. ....	43
2.4.11.	El Límite Máximo Permissible (LMP). ....	44
2.4.12.	Estándar de Calidad Ambiental (ECA). ....	44
2.4.13.	Diagrama de Predominancia de Pourbaix. ....	45
2.5.	Operacionalización de las Variables .....	47
2.6.	Hipótesis de la Investigación.....	48
CAPÍTULO III: MÉTODO DE INVESTIGACIÓN .....		49
3.1.	Tipo de investigación .....	49
3.2.	Diseño de investigación .....	50
3.3.	Área de investigación .....	53
3.4.	Universo .....	54
3.5.	Población.....	54
3.6.	Muestra.....	55
3.7.	Unidad de análisis .....	55
3.8.	Técnicas e instrumentos de recolección de datos .....	55
3.8.1.	Muestreo. ....	56
3.8.2.	Criterios para la selección del punto de monitoreo. ....	57
3.8.3.	Criterios para el muestreo de ríos y quebradas.....	58

3.8.4.	Tipos de muestras de agua.....	59
3.9.	Técnicas para el procesamiento y análisis de datos .....	61
3.9.1.	Técnicas para el procesamiento de datos.....	61
3.9.2.	Técnicas para el análisis de datos.....	62
3.10.	Interpretación de datos .....	63
CAPÍTULO IV: RESULTADOS Y DISCUSIÓN .....		64
4.1.	Resultados de análisis de muestreo de línea base. ....	64
4.2.	Presentación de datos experimentales.....	65
4.3.	Análisis y discusión de resultados antes de aplicar ozono .....	70
4.4.	Análisis de resultados con la aplicación del ozono .....	71
4.4.1.	Correlación entre la concentración del Mn en función del tiempo .....	75
4.4.2.	Influencia del pH y el tiempo en la disminución de metales disueltos ..	80
4.5.	Discusión de resultados.....	84
4.5.1.	Contrastar si la aplicación del ozono disminuye la concentración de metales disueltos. ....	84
4.5.2.	Constratar si la aplicación del ozono disminuye la concentración de metales disueltos. ....	85
4.6.	Evaluación de la relación óptima de ozono para la oxidación de los metales, así como también el pH y tiempo óptimo. ....	86
4.7.	Cálculo del porcentaje de rendimiento de la aplicación de ozono .....	88
CAPÍTULO V: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES .....		89
5.1.	Conclusiones .....	89
5.2.	Recomendaciones.....	90
LISTA DE REFERENCIAS .....		91
ANEXOS .....		95

Anexo 1. Panel fotográfico .....	95
Anexo 2. Informe inicial del punto de monitoreo – Laboratorio NKAP .....	102
Anexo 3. La ruta de la limpieza. Ozonización. Tomado de Brasil Ozono.....	105
Anexo 4. Comparación propiedades de cloro y ozono en agua. ....	106

## LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Estados de oxidación del manganeso.....	25
Tabla 2. Operacionalización de las variables.....	47
Tabla 3. Esquema de pruebas experimentales.....	52
Tabla 4. Resultados de análisis de muestra de línea base. ....	64
Tabla 5. Resultados de análisis de muestra antes del tratamiento.....	65
Tabla 6. Resultado de análisis por ICP de pruebas a pH 6. ....	66
Tabla 7. Resultado de análisis por ICP de pruebas a pH 7. ....	67
Tabla 8. Resultado de análisis por ICP de pruebas a pH 8. ....	68
Tabla 9. Formatos de registro de datos. ....	69
Tabla 10. Resultados de laboratorio NKAP y ECA categoría 3 bebida de animales..	70
Tabla 11. Tabla 11. Resultados de aplicación de ozono. ....	72
Tabla 12. Análisis estadístico de correlación no lineal. ....	77
Tabla 13. Tiempos determinados para llegar a la concentración indicada por el estándar de calidad ambiental.....	80
Tabla 14. Análisis de Varianza. ....	81
Tabla 15. Comparaciones de Tukey y Fisher para verificar la diferencia entre aplicaciones.....	83

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Diagrama de estabilidad Eh-pH.....	25
Figura 2. Ciclo biogeoquímico del manganeso.....	26
Figura 3. Diagrama de Pourbaix del Manganeso. ....	29
Figura 4. Diagrama de Pourbaix simplificado para el sistema hierro-agua a 25°C. ...	46
Figura 5. Mapa de ubicación de los puntos de monitoreo.....	53
Figura 6. Mapa de identificación de puntos de monitoreo en la red hídrica del Distrito de Hualgayoc. ....	54
Figura 7. Análisis de laboratorio de química vs ECA categoría 3 riego de vegetales y bebida de animales.....	71
Figura 8. Gráfica de tendencia del Mn en función del tiempo en una escala normal. 73	
Figura 9. Gráfica de tendencia del Mn en función al tiempo en escala semilogarítmica.....	74
Figura 10. Ajuste de correlación no lineal de la concentración de Mn vs tiempo. ....	75
Figura 11. Correlación no lineal ajustada para pH 6.....	78
Figura 12. Correlación no lineal ajustada para pH 7.....	78
Figura 13. Correlación no lineal ajustada para pH 8.....	79
Figura 14. Gráfica de efectos significativos.....	82

## LISTA DE ABREVIATURAS

CO <sub>2</sub> :	Dióxido de Carbono
DBP:	Dibutilftalato
DGCRH:	Dirección de Gestión de la Calidad de los Recursos Hídricos
ECA:	Estándar de calidad ambiental
EEC:	Comunidad Económica Europea
EFSA:	Autoridad Europea de Seguridad Alimentaria
FeCO <sub>3</sub> :	Trióxocarbonato de hierro
Fe (OH) <sub>2</sub> :	Dihidróxido de hierro
FeS <sub>2</sub> :	Disulfuro de Hierro
HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> :	Hidróxidodioxido carbonato (1-)
NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> :	Trióxido nitrato (1-)
PbS:	Monosulfuro de Plomo
pH:	Potencial de hidrogeno
ppm:	Partes por millón
SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> :	Tetraóxidosulfato (2-)
SO <sub>3</sub> <sup>2-</sup> :	Trióxidosulfato (2-)
THMs:	Trihalometanos
KMnO <sub>4</sub> :	Tetraoxomanganato (IV) de potasio
OMS:	Organización Mundial de la Salud
LMP:	Límite Máximo Permisible

## RESUMEN

La presente investigación, titulada “Efecto de la aplicación del ozono en la concentración de metales en solución en el agua del río Hualgayoc – 2018”, tiene por objetivo determinar el efecto de la aplicación del ozono en la concentración de metales en solución en el agua del río Hualgayoc. Estos metales en solución han sido generados por la minería informal y formal, conocidos también como pasivos ambientales, afectando no sólo a la población, sino también a la flora y fauna de la zona. Se obtuvo datos de un primer monitoreo de las aguas, en el puente Culquirumi del río Hualgayoc, dando como resultados de análisis: Mn = 32.06 mg/L, Fe = 17.77 mg/L y Zn = 19.95 mg/L; entre otros metales, los cuales sobrepasan los ECA’s nacionales para la categoría 3 de aguas (riego de vegetales y bebida de animales). Además, se logró determinar la relación óptima de ozono para la oxidación de metales en solución y se determinó que el pH óptimo es 8, en un tiempo de 11.6 minutos. Nuestro objetivo fue determinar el efecto de la aplicación del ozono en la concentración de metales en solución, sin embargo, se logró superar nuestras expectativas al lograr disminuir las concentraciones de estos metales disueltos, tomando como base los estándares de calidad ambiental (ECA’s), para este tipo de agua que es de categoría 3, llámese; riego de vegetales y bebidas de animales. El Mn, se logró reducir su concentración a 0.107 mg/L, Fe 0.011 mg/L y el Zn, a 0.064 mg/L. La hipótesis planteada es: La aplicación del ozono disminuye la concentración de metales disueltos en el agua del río Hualgayoc. Aseguramos, en base a los resultados obtenidos que sí existe una diferencia entre las concentraciones iniciales y finales de metales en solución en las aguas del río

Hualgayoc. Demostramos que, aplicando ozono, en las aguas del río Hualgayoc, se puede disminuir la concentración de metales en solución y por consiguiente evitar la contaminación de estas.

**Palabras clave:** Metales disueltos, estándares de calidad ambiental, ozono, pH, tiempo.

## ABSTRAC

The present investigation, entitled "Effect of the application of ozone in the concentration of metals in solution in the water of the Hualgayoc River - 2018", has the objective of determining the effect of the application of ozone on the concentration of metals in solution in water of the Hualgayoc river. These metals in solution have been generated by informal and formal mining, also known as environmental liabilities, affecting not only the population, but also the flora and fauna of the area. Data was obtained from a first monitoring of the waters, in the Culquirumi Bridge of the Hualgayoc River, giving as results of analysis: Mn = 32.06 mg/L, Fe = 17.77 mg/L and Zn = 19.95 mg/L, among other metals, which surpass the national ECAs for category 3 water (irrigation of vegetables and animal drink). In addition, it was possible to determine the optimum ozone ratio for the oxidation of metals in solution and it was determined that the optimum pH is 8, in a time of 11.6 minutes. Our objective was to determine the effect of ozone amplification in the concentration of metals in solution, however, we were able to exceed our expectations by achieving a decrease in the concentrations of these dissolved metals, based on the environmental quality standards (ECA's), for this type of water that is category 3, call it; irrigation of vegetables and animal drinks. The Mn, it was possible to reduce its concentration to 0.107 mg/L; Fe 0.011 mg/L and Zn, to 0.064 mg/L The hypothesis is: The application of ozone decreases the concentration of metals dissolved in the water of the Hualgayoc River, this application is a function of time and pH. We assure, based on the results obtained, that there is a difference between the initial and final concentrations of metals in

solution in the waters of the Hualgayoc River. We demonstrate that, by applying ozone, in the waters of the Hualgayoc River, the concentration of metals in solution can be reduced and therefore the contamination of these can be avoided.

Key words: Dissolved metals, environmental quality standards, ozone, pH, time.

## INTRODUCCIÓN

Desde hace dos siglos existe actividad minera de socavón en la provincia de Hualgayoc y desde hace tres décadas a tajo abierto. Solamente ahí se han reportado cerca de 1253 pasivos ambientales causando graves consecuencias en el medio ambiente y en la salud. Los ríos Llaucano, Maygasbamba y Tingo están hoy contaminados. El cuidado del medio ambiente es un asunto que preocupa a todos, por eso cada vez se hace más necesario encontrar tecnologías limpias, que a su vez sean rentables.

El agua es un bien escaso y su gestión un problema para la mayoría de las industrias. La necesidad de higienización, desinfección y eliminación de metales disueltos supone para muchas empresas un problema. ¿Por qué no apostar por tecnologías limpias que reduzcan el impacto medioambiental en las operaciones de tratamiento de aguas?. El uso del ozono es una de ellas.

La aplicación de ozono es una tecnología limpia que no produce residuos, que puede suponer un ahorro en el consumo de agua hasta de un 60-70% y que además resulta ser un desinfectante eficaz. De este modo, completado el proceso tenemos la garantía de que no quedará un residuo químico indeseable.

Se considera que el ozono es el desinfectante de mayor eficiencia microbicida y requiere tiempos de contacto bastante cortos. Se ha demostrado que cuando el ozono es transferido al agua mediante un mezclador estático, se logran tasas de transferencia a la fase acuosa bastante elevados y con ello los microorganismos patógenos pueden ser destruidos en pocos segundos.

Debido a su gran poder oxidante, el uso del ozono puede ser recomendable en el

tratamiento de aguas para la reducción de metales disueltos y la remoción de materia orgánica, lo que permite un ahorro en coagulantes y tiempos de retención, aunque este factor depende en gran medida de la calidad del agua, ya que el ozono reacciona con algunos compuestos y genera sustancias tóxicas.

En química industrial, el ozono tradicionalmente ha encontrado un número bastante ilimitado de aplicaciones, todas relacionadas con su poder oxidante, que lo convierte en un poderoso desinfectante. Se usa sobre todo para purificar el agua, sustituyendo al cloro, en estos efectos elimina el mal olor y sabor en este uso. También se utiliza para esterilizar, purificar y eliminar el mal olor del aire (destruye las moléculas y bacterias que lo provocan), y para blanquear: maderas, ceras, aceites y textiles.

# **CAPÍTULO I: PLANTEAMIENTO DE LA REALIDAD**

## **PROBLEMÁTICA**

### **1.1. Descripción de la Realidad Problemática**

El problema de los impactos de la minera en los últimos años viene generando conflictos sociales, ambientales y económicos en la región de Cajamarca e inclusive a nivel nacional e internacional. Una de sus causas ha sido la contaminación que genera la actividad minera formal como: Minera Yanacocha S.R.L., Sociedad Minera Corona, Compañía Minera San Nicolás S.A., Empresa Sudafricana Gold Field Ltda. Y Sociedad Minera Corona S.A., y la actividad minera informal como: La compañía minera San Nicolás, que se encuentran ubicadas en las comunidades de Coimolache, El Tingo y Hualgayoc del mismo distrito y la provincia de Hualgayoc que se encuentra en los ecosistemas de la zona norte de nuestro país y como una de las cuencas que es receptora de escorias mineras en el río Tingo Maygasbamba y río Arascorgue, que desembocan directamente al río Llaucano siguiendo su cauce hasta el río Marañón, son causantes de la contaminación ambiental generando problemas en el ecosistema y en la biodiversidad desde la naciente hasta la desembocadura del río Llaucano como consecuencia ésta afecta a la cadena trófica y a los pobladores de la zona. Como afluentes afecta a los canales de riego El Obrero, Los Tres Puentes, la actividad minera afecta a las áreas productivas de los caseríos pertenecientes a los distritos Bambamarca y Hualgayoc, región Cajamarca, que son contaminados por la explotación de la minería formal e informal (Huanacuni et al., 2016, p. 3).

Ante las afirmaciones anteriores los tesistas realizamos un monitoreo en el puente Culquirumi del río Hualgayoc, el cual se llevó a analizar al laboratorio NKAP el mismo que dio como resultado concentraciones medidas en mg/L de Mn = 32.06; Fe = 17.77 y Zn = 19.95 entre otros (ver anexo 2) los cuales sobrepasan los ECA's nacionales para la categoría 3 (riego de vegetales y bebida de animales). El pH de la muestra fue de 6.71.

El Fe, el efecto más característico de la deficiencia de Fe es la incapacidad de las hojas jóvenes para sintetizar la clorofila, tornándose cloróticas y algunas veces de color blanco. Además, puede depositarse como hidróxido y obturar las branquias de los organismos, disminuyendo su potencial respiratorio. El Fe en medio acuático no es nocivo al estar en bajo contenido, pero suele serlo en presencia de altas concentraciones. Para las truchas con valores de pH en agua de 6.5 a 7.5 y concentraciones de 0.9 mg/L de Fe, tiene efecto mortal (CEPIS, 2 004).

El Zn, la EPA y la Agencia internacional de investigación de cáncer, han clasificado al Zn como no carcinogénico. Sin embargo, la EPA recomienda que el agua no deba contener más de 5 mg/L de Zn. Es un elemento esencial para la dieta. Tener un nivel bajo de zinc en el organismo causa problemas de salud, pero presentar niveles altos es dañino. El Zn es acumulable en peces, pero no en plantas (Cornejo, 2003).

El uso potencial del ozono en la industria de frutas y verduras depende del hecho de que, como agente oxidativo, es 1.5 veces más fuerte que el cloro y más efectivo para un espectro más amplio de microorganismos que el cloro y otros desinfectantes. El ozono mata bacterias como *Escherichia coli*, *Listeria* y otros patógenos de alimentos mucho más rápido que los desinfectantes tradicionalmente usados, como el cloro y está libre de residuos químicos. (Sapers, 1998 citado en Morales 2008, p. 7).

Por décadas, se ha sabido que el ozono es un desinfectante efectivo y un sanitizante para el tratamiento de productos alimenticios. Se usa comúnmente en Europa para el tratamiento de agua pública y para el procesamiento de alimentos. Se ha usado en Estados Unidos para embotellar agua y tiene el potencial para usarse en muchas aplicaciones en el procesamiento de alimentos. Varios documentos y estudios confirman los beneficios del uso de ozono en la industria de alimentos (Graham, 1997; Rice et al., 1982 citado en Morales 2008, p. 8).

El ozono gaseoso es un sanitizante fuerte y agente fumigante que se puede usar para sanitizar alimentos en almacenes y durante el transporte para prevenir bacterias, hongos y levaduras en la superficie de alimentos y para controlar insectos. Puede eliminar sabores no deseados producidos por bacterias y destruir químicamente al gas etileno disminuyendo así el proceso de maduración provocado por éste, lo que permite una distribución más

amplia (Rice et al., 1982 citado en Morales 2008, p. 8).

De acuerdo con la Agencia de Protección al Medio Ambiente (EPA), el ozono es el desinfectante más efectivo disponible para agua de consumo. De hecho, es más efectivo que el cloro contra microorganismos, incluyendo a *Cryptosporidium* y *Giardia* los cuales han contaminado alimentos y suministros de agua causando muertes en años recientes (EPRI, 1997; Of., 1997 Citado en Morales 2008, p. 8).

Brasil ozono esta implementado un ambicioso proyecto en el que el gas ozono se empleará para el tratamiento de aguas, efluentes y suelos contaminados con metales pesados de una mina de extracción de Uranio situada en Caldas, Minas Gerais, desactivada en 1995. El primer ensayo para la evaluación del sistema se realizó en el laboratorio de la empresa paulistana. Luego de la aplicación de ozono, en 20 minutos, los metales pesados presentes en la muestra se transformaron en sólidos en suspensión. (Ereno, 2013, p. 2-3)

Brasil Ozono ha instalado 2 mil dispositivos para la desodorización de ambientes en grandes cadenas de hoteles, eliminación de gases en fábricas de fertilizantes y de cigarrillos, tratamiento del agua en universidades, higienización de alimentos, además de otras aplicaciones. El tratamiento del agua del Acuario de São Paulo con ozono, en el barrio de Ipiranga, en la

capital paulista, con ejemplares tan diversos como manatíes, tiburones, pingüinos y mantarrayas, fue desarrollado por la empresa y adaptado a las necesidades de cada especie. (Ereno, 2013, p.2-3).

El agua presenta diversos tipos de contaminantes ya sean de origen natural, debidos principalmente a la climatología y geología del terreno como pueden ser metales pesados, hierro, manganeso etc., o contaminantes provocados por la acción del hombre como compuestos orgánicos volátiles, pesticidas, nitritos etc. Según normativas establece la obligación de tratar y controlar el nivel de contaminantes en el agua destinada al consumo humano. Para ello, el cloro es el agente desinfectante más empleado, pero no el único ni el mejor. El poder desinfectante del ozono es 3 000 veces superior y más rápido. El tratamiento de agua potable con ozono presenta, por tanto, una serie de ventajas respecto al tratamiento con cloro. En primer lugar, debido al fuerte poder oxidante la calidad de la desinfección con ozono es muy superior a la que se consigue con un tratamiento con cloro. De esta forma, se consiguen eliminar virus, bacterias y microorganismos (en general a los cloro-resistentes). Gracias también a este elevado potencial de oxidación conseguimos precipitar metales pesados presentes en la disolución y eliminar compuestos orgánicos, pesticidas, y todo tipo de olores y sabores extraños que el agua pudiera contener. Otra de las importantes ventajas del uso del ozono frente al cloro es la rapidez con la que actúa; lo cual nos permite realizar tratamientos muy efectivos en pocos segundos o minutos, a

comparación de un tratamiento de desinfección con cloro que es necesario un tiempo de contacto muy superior. (Permelec Electrode Ltd Co, Electrode-Anode citado en Jingquan, 2014, p. 47).

Ante lo expuesto se presenta un problema serio en cuanto a la presencia de los mencionados metales, lo cual nos motiva a buscar una solución al mismo utilizando el ozono el cual oxidará y precipitará a los metales, disminuyendo su concentración en el agua.

## **1.2. Formulación del Problema**

¿Cuál es el efecto de la aplicación del ozono en la concentración de metales en solución en el agua del río Hualgayoc-2018?

## **1.3. Objetivos de la Investigación**

### **1.3.1. Objetivo general.**

- Determinar el efecto de la aplicación del ozono en la concentración de metales en solución en el agua del río Hualgayoc-2018.

### **1.3.2. Objetivos específicos.**

- Analizar el nivel de concentración de los metales en solución en el agua del río Hualgayoc, antes y después del proceso de oxidación mediante ozono.

- Determinar la relación óptima de ozono para la oxidación de metales en solución.
- Determinar el rango óptimo de pH y tiempo óptimo para la oxidación de metales en solución mediante el ozono.

#### **1.4. Justificación de la Investigación**

Ante lo expuesto se presenta un problema serio en las aguas del río Hualgayoc por la presencia de metales en solución debido a que no solo afecta a la población sino también a la flora y fauna, lo cual ocurre con el manganeso el mismo que en altas concentraciones vuelve marrones las raíces de las plantas, después que sus partes superiores fueron dañadas (CEPIS, 2004).

Los trabajos citados en el marco teórico Huanacuni et al. (2016) y Yacoub et al. (2015), solo cuantifican presencia de metales disueltos, pero no proponen soluciones al problema, en los cuales se encuentra un vacío, por lo tanto, se pretende llenarlo con este trabajo de investigación proponiendo una solución, tratar el agua con ozono para disminuir el elevado contenido de metales disueltos existentes.

La presente investigación permite dejar antecedentes y base de estudio en lo que concierne a la disminución de la concentración de metales disueltos usando la tecnología limpia de ozonización.

Con la presente investigación aportaremos conocimientos para el tratamiento de las aguas usando esta tecnología limpia (ozonización), la cual no genera residuos durante el tratamiento. Además, permite tener un mejor control de los metales disueltos oxidándolos y posteriormente precipitando, por ende, se tendrá un mejor control de los metales del recurso hídrico por lo tanto se evitará impactos al medio biótico y abiótico además se evitará conflictos sociales.

## **CAPÍTULO II: MARCO TEÓRICO**

### **2.1. Fundamentos teóricos de la investigación**

#### **2.1.1. Antecedentes teóricos.**

Dentro de los antecedentes se citan las siguientes investigaciones las cuales servirán como base y posterior discusión de resultados:

Huallanca (2017) en su trabajo de investigación titulado: “Reducción de concentración de cadmio en aguas de lavado con RAEE mediante micronanoburbujas (aire y ozono) del Taller ASCOPE – Cercado de Lima” concluye que el uso de las micronanoburbujas con aire y ozono reduce positivamente la concentración de cadmio en el agua del Taller de Ascope – Cercado de Lima, cuya concentración en la fase inicial fue de 3.251 mg/L, en la fase post del tratamiento de 4 minutos fue de 2.973 mg/L; tratamiento de 8 minutos 3.076 mg/L y el tratamiento de 12 minutos fue 3.082 mg/L.

Valenzuela (2017) en su tesis titulada “Reducción de plomo y silicio en aguas de lavado de gases de una empresa de servicios usando micronanoburbujas de aire-ozono, Lima 2017” realizó un análisis preliminar del agua de lavado de gases para confirmar la contaminación por plomo y silicio, con una concentración de 32.26 mg/L y para el silicio 70.49 mg/L, luego realizó el tratamiento con el generador de micronanoburbujas por tres tiempos de 8, 16 y 24 minutos, con pH de

6, 8 y 10 hasta lograr una reducción de plomo de 0.088 mg/L y de silicio de 12.97 mg/L del agua residual.

Mediante el informe N°-005-2015-ANA-AAA.M-SDGCRH, la Autoridad Nacional del Agua (ANA), presentó los resultados de los análisis hechos a las muestras tomadas durante el tercer monitoreo participativo de la calidad del agua superficial de la Cuenca del Río Llaucano, en la Provincia de Hualgayoc. Dicha cuenca comprende los ríos Tingo- Maygasbamba, Hualgayoc, Arascorgue y Llaucano, y las quebradas la EME, Mesa de Plata, Tres Amigos y Sinchao y la citada actividad fue realizada entre el primero y el 5 de setiembre del 2014, por la Dirección de Gestión de la Calidad de los Recursos Hídricos (DGCRH) y el ANA.

Según el documento, en el agua de la zona existen metales disueltos como Al, Ca, As, Cd, Cu, Fe, Pb, Mn y Zn, así como coliformes y oxígeno disuelto, por encima de los límites máximos permisibles, como consecuencia de aproximadamente 964 pasivos ambientales dejados por la actividad minera, y debido a los trabajos que llevan a cabo algunas plantas caleras de la zona. El estudio señala que la contaminación es producto, en un 97%, de los pasivos ambientales o vertimientos mineros de aguas industriales, en un 2% de las aguas residuales domésticas y en un 1%, de los residuos sólidos urbanos.

Además, da a conocer que la laguna Vira Vira, que proporciona agua al Distrito de Hualgayoc, presenta acidez porque su naturaleza es mineralizada y, por lo tanto, no es apta para el abastecimiento de agua de consumo humano. (ANA, 2015).

Este informe sirve de punto de partida para sustentar la propuesta de solución al problema planteado, ya que contiene metales disueltos que se propone oxidar por ozono.

Yacoub et al. (2015) en su trabajo presentado en el II Congreso UPC Sostenible 2015 titulado: “Análisis de impactos ambientales en la cuenca del Jequetepeque, Perú, producidos por actividades mineras” presenta un análisis cuantitativo de los metales Al, Fe, Mn, Cu, Pb, Zn, As en el cual determina que los mencionados metales se encuentran en mayores concentraciones cerca a la zonas mineras y que disminuyen conforme se alejan de las mismas y esto lo atribuye al efecto de la dinámicas de los metales en las aguas.

Un estudio publicado en la revista Food and chemical toxicology, trata sobre la dieta de una población rural cerca de una mina de oro en el distrito de Cajamarca, Perú. Los principales artículos consumidos por esta población fueron tubérculos y cereales, y la ingesta energética media (1990 kcal) no cubrió los valores de ingesta recomendados para la población masculina. Las concentraciones de As, Cd, Hg, Pb, Zn, Al,

Cr y Cu en el agua potable y muestras de alimentos que contribuyen al 91% de esta dieta (145 muestras, 24 ítems diferentes) fueron determinadas y utilizadas para calcular su ingesta diaria para la evaluación de riesgos. Las ingestas diarias de As, Cd y Pb excedieron los valores límite establecidos por la Autoridad Europea de Seguridad Alimentaria (EFSA), lo que supone una gran preocupación para la salud de la población. Además, los valores de ingesta de As y Pb mostraron ser más altos cuanto más cerca estaba la mina de oro de la población estudiada. (Barenys, 2014, p.1).

Reckhow et al, (2012) presentaron un trabajo de investigación denominada “Oxidation Of Iron And Manganese By Ozone concluyen luego de haber realizado pruebas experimentales de laboratorio, determinaron que el Mn y el ozono presentan velocidades de reacción de primer orden y que en el rango de pH es entre 5.5 y 7 el Mn se oxida rápidamente, algo similar sucede con el Fe que con pH alrededor de 6.3 el mismo es oxidado rápidamente en ausencia de materia orgánica. La presencia de materia orgánica incrementa el consumo de ozono por parte del Mn hasta en cinco veces.

## 2.2. Marco Histórico

La capacidad del ozono para desinfectar el agua contaminada fue reconocida en 1886 por De Mericens (Vosmaer, 1916). Unos años más tarde, la empresa alemana Siemens & Halske, fabricantes de equipos eléctricos, se puso en contacto con funcionarios prusianos locales que estaban dispuestos a probar las zonas para la desinfección del agua potable. En consecuencia, se construyó una planta piloto en Martiraikenfekit - Alemania. Froelich informó en 1891 que las pruebas demostraron que este equipo sí era eficaz contra las bacterias (Vosmaer, 1916). En 1889, el químico francés Marius Paul Otto comenzó a estudiar el ozono en la Universidad La Sorbona en Paris. En 1897, obtuvo un doctorado por su tesis sobre la capa de ozono, el primero de su clase. Froelich también creó la primera empresa especializada para la fabricación e instalación de equipos de ozonización en 1897.

El número de instalaciones de plantas de ozono creció rápidamente antes de 1914. Vosmaer (1916) contaron al menos 49 plantas europeas que utilizan Siemens, de Frisia, Marmier, Abraham y los generadores de ozono Otto de 1915. Sin embargo, los primeros cuatro tipos de generadores pronto desaparecerían. Este crecimiento en el uso de ozono se ha desacelerado en la primera parte del siglo cuando se realizaron investigaciones sobre gases venenosos durante la Primera Guerra Mundial. En gran parte del mundo, esto estimuló el uso de cloro como desinfectante y limitó severamente la propagación del ozono. Sin embargo, la construcción de nuevas plantas de

ozono continuó a un ritmo lento, especialmente en Francia.

También hubo algunas construcciones de plantas de ozono, como en el Congo Belga, donde se construyeron 11 plantas antes de 1939 (Pascal, 1986). En 1936, había cerca de 100 plantas de ozono en Francia y 30-40 en otras partes del mundo (Evans, 1972). Sin embargo, no fue hasta después de la Segunda Guerra mundial que se dieron las aplicaciones del ozono. Todas estas plantas de primera generación, la mayoría de las cuales se encontraban en Francia, usaban ozono como desinfectante. Además, se completó bastante temprano en el desarrollo del sabor y olor acompañado por la desinfección del agua por ozono (Vosmaer, 1916). Por lo tanto, la mayoría de las aplicaciones de ozono (desde el primer uso del ozono en la década de 1950) fueron tanto para la desinfección como para el control del sabor y el olor. Sin embargo, la aplicación de ozono para fines distintos de la desinfección y el control del sabor y el olor estaban surgiendo incluso durante la era anterior a la Primera Guerra Mundial. Vosmaer (1916) informó las observaciones de los ingenieros de tratamiento sobre la eliminación del color y la oxidación de hierro y manganeso después de la ozonización. En Gran Bretaña, un par de plantas de ozono habían sido instalados antes de 1960 para el tratamiento de las aguas subterráneas de alta calidad en las zonas donde se considera inadecuado "contaminar" tales suministros mediante el uso de cloración marginal (Lowndes, 1985).

La década de 1960 vio la introducción generalizada de varias aplicaciones nuevas para el ozono. Muchas de estas nuevas aplicaciones requieren que se agregue ozono durante las primeras etapas del tratamiento, de ahí el término preozonación. Hasta este momento, la ozonización era, en la mayoría de los casos, la última etapa del tratamiento.

En Francia y Alemania durante la década de 1960, el ozono se utilizó específicamente para oxidar el hierro y el manganeso. Si bien la capacidad del ozono para oxidar estos metales se reconoció durante mucho tiempo (Vosmaer, 1916), la aplicación generalizada a gran escala vino más tarde. Algunas de las primeras aplicaciones para este propósito estaban en Dusseldorf, Alemania (1957 y 1980), Sitterdorf, Suiza (1963), Montjean, Francia (1967), y Rouen-la-Chapelle, Francia (1974). Greaves y Lowndes, (1987), que fue diseñado y construido por O'Donovan (1965). El agua de las tierras altas escocesas e irlandesas es característicamente alta en color y de baja turbidez. Las plantas en Bacrum, Noruega (1961), Loch Torreta, Escocia (1967), Sligo, Irlanda (1970), Loch Lomond, Escocia (1971), y Manchester, Inglaterra (1970) representan los primeros ejemplos de esta aplicación. A mediados de la década de 1960, los efectos coagulantes del ozono se explotaron por primera vez (Guillerd 1968).

Las observaciones en Escocia y Francia de la floculación espontánea ocurrido en algunas cámaras de contacto de ozono condujeron al desarrollo

del proceso de "micelización-demicellisation", una aplicación temprana de ozono para mejorar la eliminación de partículas. Las plantas que incorporaron este proceso fueron construidas en Roanne, Francia (1964), Lausana, Suiza (1967) y Constanza, Alemania (1966). Los procesos que emplean el efecto coagulante del ozono han evolucionado hasta convertirse en modernas aplicaciones de pre ozonización para el control de la turbidez. También en este momento, el ozono se usó en Alemania Occidental y Suiza para oxidar ciertos micros contaminantes específicos. En, los compuestos fenólicos y varios pesticidas fueron los primeros objetivos de este tratamiento. La capacidad del ozono para controlar el crecimiento de algas y el tratamiento mejorado en la presencia de una floración de algas se explotó por primera vez en Francia a fines de los años setenta. Esto se ejemplifica en la planta de Fromne. Las aplicaciones más recientes de ozono son para la desinfección del subproducto (DBP), control y estabilización biológica, o minimización del crecimiento microbiológico potencial del agua. En el caso del control de DBP, la mayoría de las aplicaciones han estado en los Estados Unidos. El descubrimiento de trihalometanos (THMs) como la cloración de los subproductos en 1973 (Rook, 1974), la promulgación de una norma de cumplimiento obligatorio en los Estados Unidos en 1979 (Registro Federal 1979, 1980), y la promulgación de la Comunidad Económica Europea, Directiva de la Comunidad Europea (EEC) en 1980 proporcionó el ímpetu para esta aplicación. La estabilización biológica fue reconocida en Europa como un beneficio en el tratamiento de trenes (BAC) filtración, una extensión

económica asequible de la vida del lecho de carbón y el uso de ozono antes del GAC. Las primeras aplicaciones a gran escala de esta tecnología fueron en Alemania. Aunque originalmente se pensó que la estabilización biológica era un paso de tratamiento adicional para la eliminación de compuestos orgánicos, ahora se reconoce como un tratamiento necesario para asegurar la ausencia de un crecimiento biológico excesivo en el sistema de distribución. Se usan como fuentes de agua potable.

Dos de las aplicaciones más recientes de ozono se basan en consideraciones químicas fundamentales. Vosmaer, (1916) Con base en el conocimiento actual de las reacciones del ozono con productos químicos orgánicos sintéticos (SOC), se propuso que el ozono pudiera utilizarse para controlar de forma efectiva ciertos tipos de compuestos orgánicos. Además, sobre la base de las similitudes entre el ozono ataque electrofílico (no es la única vía para la reacción de ozono) y el cloro ataque electrofílico, el uso del ozono para el control de subproductos de la cloración fue propuesto. Estos usos contrastan con otras aplicaciones que se originaron a partir de observaciones.

### **2.3. Marco conceptual**

La disponibilidad de agua dulce en todo el mundo es crítica y cada día es más compleja, debido a factores como la contaminación del recurso hídrico, la manipulación económica y la fuente de poder que representa para quien la posee. La creciente demanda de agua para la agricultura, la industria y el consumo doméstico han creado competencias que se reflejarán en unos 15 años debido al crecimiento demográfico y a la falta de planificación, educación y conciencia para el manejo y uso adecuado del agua, lo que genera consecuencias como acidez de los suelos, enormes cantidades de sedimentos en ríos y lagos, enfermedades gastrointestinales derivadas de su consumo y aumento de abortos y malformaciones genéticas por la presencia de metales pesados en aguas. La desmedida ambición que ciertos grupos económicos que tienen por aumentar la explotación, control y administración de recursos como el petróleo, el gas natural y el agua dulce hacen que el agua sea un recurso estratégico para el siglo XXI, ya que este es un elemento esencial, único e insustituible para la supervivencia de la humanidad. (Agudelo, 2005, p. 91).

Por lo antes mencionado centraremos nuestro marco conceptual en la disminución de los metales pesados por medio de la oxidación de estos con ozono; para lo cual detallaremos algunos aspectos de los mecanismos de oxidación de los metales en solución.

### **2.3.1. Hierro y manganeso en aguas naturales.**

#### **2.3.1.1. Fuentes de hierro y manganeso.**

El Fe y el Mn son elementos metálicos comunes que se encuentran juntos en forma natural, especialmente en pozos más profundos con poco o ningún oxígeno presente. Las fuentes naturales de Fe y Mn pueden incluir la meteorización de minerales que contienen Fe y Mn como anfíboles, sulfuro de hierro y minerales de arcilla ricos en Fe. En áreas donde el agua subterránea fluye a través de un suelo orgánico rico, el Fe y el Mn también se disolverán en el agua subterránea. El Fe y el Mn también pueden tener fuentes antropogénicas, incluidos efluentes industriales, fugas de vertederos y drenaje ácido de minas. La carcasa del pozo, las piezas de la bomba, las tuberías y el tanque de almacenamiento también pueden contribuir con Fe y Mn al agua subterránea. Nova Ecotia (2008) citado por Mansoor A. (2012, p. 3).

En condiciones naturales, el agua se filtra a través del suelo orgánico donde el oxígeno disuelto se consume por la descomposición de la materia orgánica y los microbios en el suelo. El proceso de descomposición reduce el pH debido a la acción microbiana. En combinación con la falta de oxígeno, los átomos de hierro y manganeso también se reducen de  $\text{Fe}^{3+}$  y  $\text{Mn}^{4+}$  a  $\text{Fe}^{2+}$  y  $\text{Mn}^{2+}$ . La forma más dominante de hierro disuelto es el  $\text{Fe}^{2+}$  soluble

en el rango de pH de 5 a 8. Cuando el agua subterránea se bombea a la superficie entra en contacto con el aire que ingresa a las soluciones y comienza el proceso de oxidación que libera dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) del agua subterránea a la atmósfera. Cuando esto sucede, los valores de pH aumentan y, por lo tanto, el Fe<sup>2+</sup> y el Mn<sup>2+</sup> se transforman en los minerales insolubles Fe<sup>3+</sup> y Mn<sup>4+</sup>. Nova Ecotia (2008) citado por Mansoor A. (2012, p. 3).

### **2.3.2. Origen de hierro y manganeso en aguas naturales.**

#### **2.3.2.1. Origen del hierro en aguas subterráneas.**

El hierro puede originarse por la erosión de minerales de hierro como la pirita.

Durante la intemperie de la pirita en montones de carbón, el agua subterránea reducida con un contenido de Fe<sup>+2</sup> origina:

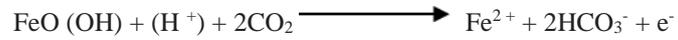


Estas reacciones pueden inducir SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> en agua bruta bombeada. El carbonato de hierro reacciona con CO<sub>2</sub> e introduce Fe en la solución.



(Ahmad, 2012, p. 3)

Si hay suficiente CO<sub>2</sub> presente y H<sup>+</sup> donantes, entonces será posible volver a movilizar los óxidos de Fe<sup>+3</sup> de gran diseminación.



(Ahmad, 2012, p. 4)

### **2.3.2.2. Origen del manganeso en aguas naturales.**

Los estados geológicos del suelo y el subsuelo son un factor importante en la determinación del contenido de Mn en las aguas subterráneas. El Mn en el suelo puede fundarse en diferentes fases que se dan a continuación. Rott y Lamberth, (1993) citado por Mansoor A. (2012, p. 4).

- Como manganeso-óxidos, -silicatos y carbonatos.
- Adsorbido en óxido de hierro
- En compuestos orgánicos
- En intercambio (Mn<sup>+2</sup>) y condición soltada.

### **2.3.3. Química del hierro y manganeso.**

#### **2.3.3.1. Química del hierro.**

El Fe en el suministro de agua puede existir en cualquiera de los siguientes estados:

- a) Hierro ferroso divalente Fe<sup>+2</sup> (forma soluble). (Ahmad, 2012, p. 5).
- b) Hierro férrico trivalente Fe<sup>+3</sup> (forma insoluble). (Ahmad, 2012, p. 5).

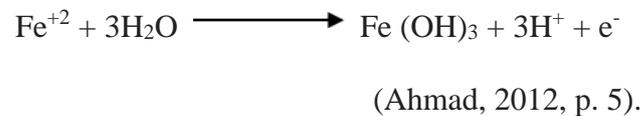
El proceso de oxidación del ion ferroso divalente ( $\text{Fe}^{+2}$ ) a iones férricos trivalentes ( $\text{Fe}^{+3}$ ) puede ser descrito por:



En circunstancias en las que se produce una alta concentración de oxígeno disuelto, el ion férrico trivalente puede reaccionar adicionalmente con grupos hidroxilo para precipitar en forma sólida según:



La secuencia completa de reacción de oxidación-reducción puede escribirse como:



La estabilidad del ion de hierro depende no solo del pH, sino también de la actividad de los electrones, que es representado por un potencial redox- pE. El alto valor positivo de pE indica condiciones oxidantes donde el hierro es insoluble y los valores bajos de pE indican condiciones reductoras en las que el hierro es soluble Silveira (1988) citado por Mansoor A (2012 p. 6).

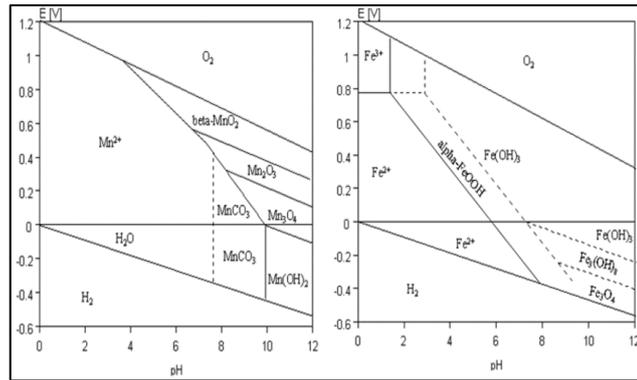


Figura 1. Diagrama de estabilidad Eh-pH.

Fuente. Tomado de: (Scheffer et al., 1989).

### 2.3.3.2. Química del manganeso.

Como el Mn es un metal de transición, puede existir en varios estados de oxidación, como se muestra en la tabla siguiente.

Tabla 1. Estados de oxidación del manganeso.

Estado de oxidación	Compuesto	Nombre	Apariencia
0	Mn	Elemental	Sólido plateado
II	Mn <sup>2+</sup>	Ion Manganeso	Claro en agua
III	Mn <sup>3+</sup>	Ion Mangánico	Rojo/violeta en agua
	Mn <sub>2</sub> O <sub>3(s)</sub>	Óxido de Manganeso III	Sólido marrón/negro oscuro
IV	MnO <sub>2(s)</sub>	Dióxido de Manganeso	Sólido negro
V	MnO <sub>4</sub> <sup>3-</sup>	Ion hipo mangánico	Turquesa en agua
VI	MnO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	Ion Mangánico	Verde en agua
VII	MnO <sub>4</sub> <sup>-</sup>	Ion permanganato	Purpura en agua

Nota: Estados de oxidación y apariencia del manganeso, tomado de "Evaluation of Iron and Manganese Control for a Volcanic Surface Water Supply Treated with Conventional Coagulation, Sedimentation and Filtration Processes

Fuente: por Hall, C, 2014, p.5

Dentro del agua potable común, las especies de manganeso más relevantes incluyen el ion manganeso ( $Mn^{2+}$ ), el dióxido de manganeso en forma de partículas ( $MnO_2$ ) y el ion permanganato ( $MnO_4^-$ ). Estas tres especies pueden existir en una de tres formas fisicoquímicas, que incluyen partículas, coloidal o soluble. De los tres estados de oxidación y las formas fisicoquímicas, el manganeso soluble,  $Mn^{2+}$ , es el más común en los suministros de aguas subterráneas, así como los suministros de aguas superficiales confiscadas.

Si las bacterias oxidantes y reductoras están presentes, pueden ser responsables del ciclo del manganeso entre las formas de manganeso soluble y en forma de partículas como se muestra en la figura siguiente (Carlson y Knocke 1999, citado por Christine, H p. 5).

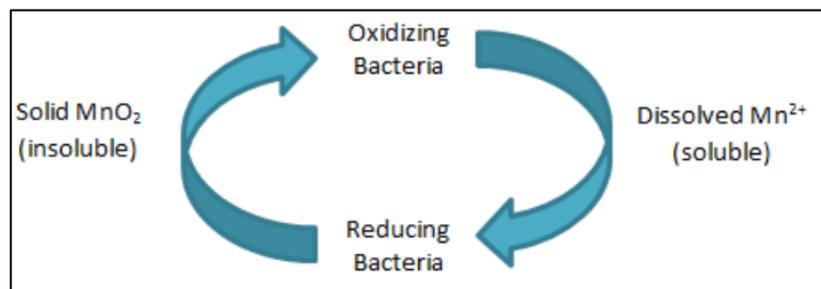


Figura 2. Ciclo biogeoquímico del manganeso.

Fuente: Tomado de: (Roccaro, P., et al. 2007).

Las bacterias anaeróbicas en los sedimentos del yacimiento minimizan la formación de dióxido de manganeso precipitado durante la respiración, y el  $Mn^{2+}$  soluble se libera a la columna de agua donde se utiliza como fuente

de energía por bacterias oxidantes de manganeso. El dióxido de manganeso sólido luego se precipita al fondo, permitiendo que el ciclo se repita. Durante la estratificación, las condiciones anóxicas pueden alterar el ciclo biogeoquímico y se libera más  $Mn^{2+}$  soluble que la que pueden usar los oxidantes de manganeso, lo que da como resultado más manganeso disuelto. (Roccaro, Barone et al., 2007, p. 207-208).

El dióxido de manganeso insoluble se presenta principalmente como dióxido de manganeso, mientras que el manganeso disuelto se produce como un catión divalente soluble de metal libre. Si el manganeso no se oxida, el manganeso disuelto puede pasar fácilmente a través de los procesos de tratamiento del agua. Una vez que este manganeso soluble está en el sistema de distribución, puede oxidarse a manganeso insoluble (óxido de manganeso), causando varios problemas, tales como decoloración del agua, sabor metálico, olor, turbidez, incrustación biológica, corrosión y manchas en la ropa y accesorios de plomería (Roccaro, Barone et al., 2007 citado por Christine, H. p. 6).

Los sólidos de óxido de manganeso que implican Mn (III) o ambos estados de oxidación Mn (III) y Mn (IV) pueden estar presentes cuando la química del agua de fondo ha cambiado debido a la adición de otros oxidantes. Por lo tanto, los sólidos de óxido de manganeso se describen con mayor precisión como  $MnO_x$  (s), donde x está entre 1.5 y 2 y los sólidos de

óxido de manganeso se denominan Mn(s). (Pontius, LeChevallier y otros 2002).

La especie de permanganato,  $\text{KMnO}_4$ , no se encuentra en forma natural en el agua, pero es un producto químico importante que los servicios de agua utilizan con frecuencia. El ion permanganato es un oxidante fuerte capaz de oxidar muchos contaminantes que pueden estar presentes en el agua debido a su alto estado de oxidación, +7. El permanganato se usa comúnmente para controlar el sabor y el olor, así como para el tratamiento con hierro y manganeso. Debido a su alto estado de oxidación, el ion permanganato actúa como un oxidante en las reacciones de oxidación / reducción; esto da como resultado que el  $\text{MnO}_4$  soluble se reduzca a partículas  $\text{MnO}_2$  (s).

Las especies de Mn que pueden estar presentes en el agua están controladas por el potencial de oxidación / reducción de fondo y el pH del agua, junto con la presencia de otros contaminantes que pueden combinarse con el manganeso para formar otros compuestos de manganeso. El diagrama de Pourbaix, que se muestra en la Figura 3, representa mejor a las especies de manganeso que pueden estar presentes en el sistema en un rango de oxidación / reducción de fondo y condiciones de pH. El área sombreada de la Figura 3, representa las condiciones típicas del agua para la investigación realizada por UCF. El eje y de este diagrama representa el potencial de

oxidación / reducción del sistema. Las condiciones de oxidación están presentes en la parte superior del diagrama, y los iones reductores en condiciones ácidas están a la izquierda y los básicos están hacia la derecha. Este diagrama de Pourbaix proporciona información básica sobre cómo se puede usar la manipulación del potencial de oxidación / reducción y el pH para convertir el manganeso no tratado en especies adecuadas de manganeso que pueden tratarse.

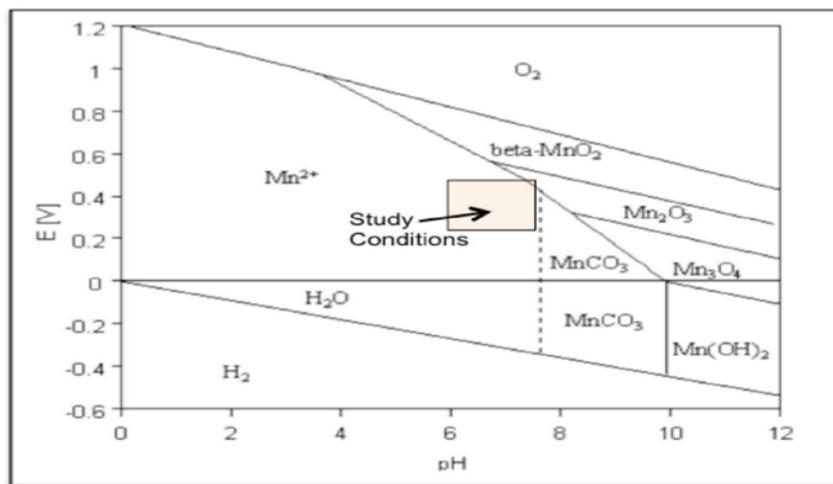


Figura 3. Diagrama de Pourbaix del Manganese.

Fuente. Tomado de: Scheffer et al., (1989).

El diagrama de Pourbaix presenta las formas estables de manganeso en agua que contiene manganeso y carbonato. El ion soluble  $Mn^{2+}$  es soluble y está presente en un amplio rango de condiciones de pH y oxidación / reducción. Según el diagrama, a un pH de menos de cinco, el manganeso es altamente soluble. A un pH moderado, entre cinco y ocho, el manganeso es altamente soluble en condiciones reductoras, pero insoluble en condiciones

oxidantes. A niveles de pH típicos de una planta de tratamiento de agua (pH 6.0 a 8.0),  $Mn^{2+}$  soluble puede o no ser estable. Esto depende del estado de oxidación / reducción del agua y de la cantidad de carbonato presente. Bajo condiciones elevadas de pH (más de ocho) o fuertemente oxidantes,  $Mn^{2+}$  es inestable y precipitará para formar un óxido, hidróxido o carbonato sólido insoluble visible. Si el pH aumenta aún más, el manganeso forma diversos óxidos insolubles. Una de las razones por las cuales el manganeso causa problemas para los servicios de agua es que las condiciones típicas de calidad del agua están en el rango desde el cual el manganeso puede ciclarse fácilmente entre las formas solubles e insolubles. Esto explica por qué el agua que puede estar coloreada por el manganeso puede aparecer y desaparecer de un sistema. (Ahmad, 2012, p. 3)

## **2.4. Bases conceptuales**

### **2.4.1. Metales disueltos.**

Los Metales disueltos constituyen el 75% de los elementos conocidos, están caracterizados por ser buenos conductores del calor y la electricidad, poseen alta densidad, y son sólidos en temperaturas normales (excepto el mercurio). Pueden formar aleaciones entre sí y son ampliamente utilizados, por ejemplo, en la fabricación de coches, computadoras, la construcción de autopistas, puentes, etc., así como en la producción de electrodomésticos, y material de laboratorio. Se encuentran en forma de elementos nativos (mineral, geológico) o son

producto de actividades antropogénicas (fungicidas, minería y fundición, industrias plásticas, y desechos) (Griet Eeckhout, 2006, citado en Mejá, O. 2016, p. 13).

Existen varias definiciones del término “metales disueltos”. En esta categoría entran prácticamente todos los elementos metálicos de interés económico, por lo tanto, de interés minero (Oyarzun & Higuera 2009). Por lo general se acepta que son aquellos elementos químicos que presentan ciertas propiedades comunes: conductividad eléctrica y térmica altas, maleabilidad, ductibilidad y brillo (Vega y Reynaga 1990), cuya densidad es mayor a 5 g/mL (Cervantes y Moreno 1999), por lo menos cinco veces mayor que la del agua. Algunos metales disueltos en el agua son: arsénico (As), cadmio (Cd), cobalto (Co), cromo (Cr), cobre (Cu), mercurio (Hg), níquel (Ni), plomo (Pb), estaño (Sn) y zinc (Zn) (Arce, 2000 citado en Mejá, O. 2016, p. 14).

Los metales se encuentran en forma aislada o combinados formando minerales (Vega y Reynaga 1990). Pueden encontrarse en mayores cantidades en los extractos profundos de los ríos y en menor proporción en la superficie, los mantos acuíferos no contaminados pueden contener cantidades muy pequeñas (Arce, 2000 citado en Mejá, O. 2016, p. 14).

Dentro de los metales hay dos grupos:

Oligoelementos o micronutrientes que son los requeridos en

pequeñas cantidades, o cantidades traza por plantas y animales, y son necesarios para que los organismos completen su ciclo vital.

Dentro de este grupo están: As, B, Co, Cr, Cu, Mo, Mn, Ni, Se y Zn. Estos elementos minoritarios se encuentran en muy bajas concentraciones en el suelo y agua. Pasado cierto umbral biológico se vuelven tóxicos. La ausencia de estos micronutrientes causa enfermedades y su exceso intoxicaciones. (Arce, 2000 citado en Mejía, O. 2016, p. 15).

Metales sin función biológica conocida, su presencia en determinadas cantidades en los seres vivos, generan disfunciones en el funcionamiento de sus organismos, produciendo inhibición de las actividades enzimáticas.

Son altamente tóxicos y presentan la propiedad de acumularse en los organismos vivos. A este grupo pertenecen principalmente: cadmio (Cd), mercurio (Hg), plomo (Pb), cobre (Cu), níquel (Ni), antimonio (Sb), bismuto (Bi), hierro (Fe) y manganeso (Mn). (Arce, 2000 citado en Mejía, O. 2016, p. 15).

#### **2.4.2. Contaminación por metales disueltos.**

La contaminación por metales disueltos se considera según su origen, así pues, en los sistemas acuáticos continentales (ríos, lagos,

embalses, etc.) la contaminación se produce, bien por la presencia de compuestos o elementos que normalmente no estarían sin la acción del hombre, o por un aumento o descenso de la concentración normal de las sustancias ya existentes debido a la acción humana (Rosas, 2001, p. 4-5).

La acción de los factores medioambientales sobre las rocas y los suelos derivados de ellas son los determinantes de las diferentes concentraciones basales de metales disueltos en los sistemas fluviales (aguas, sedimentos y biota) (Rosas, 2001, p. 6).

Las aguas residuales de las ciudades son las portadoras de los metales pesados de origen doméstico. Los vertidos domésticos transportan una amplia gama de metales contenidos en las excreciones humanas, en los restos de los alimentos, en las aguas de lavado, etc. (Rosas, 2001, p. 6).

La actividad urbana es también una fuente de contaminación fundamentalmente por la generación de residuos sólidos urbanos, las emisiones de los vehículos a la atmósfera o a la producción de lodos en las depuradoras de aguas residuales (Rosas, 2001, p. 23).

Las emanaciones gaseosas de los automóviles no sólo afectan a las

ciudades, sino que también lo hacen a las zonas limítrofes de autopistas y carreteras. Los metales así originados incluyen al Cd, Cu, Ni, Pb y Zn siendo el Pb el más abundante proveniente de la combustión de la gasolina y el Zn debido al desgaste de los neumáticos. Estos metales contenidos en las partículas de los humos de combustión y las originadas por el desgaste de neumáticos, pueden llegar a alcanzar los sistemas acuáticos de dos maneras: directamente (precipitación de partículas, por la lluvia) e indirectamente por la lixiviación de los terrenos (calles, carreteras y zonas adyacentes donde previamente se produjo la deposición) debido a la escorrentía superficial de las aguas de tormenta y de los riego de las ciudades (Rosas, 2001, p. 23-24).

#### **2.4.3. Oxidación.**

Es el fenómeno mediante el cual una especie química, (para nuestro caso un metal disuelto), pierde electrones por lo tanto el número de oxidación de este aumenta algebraicamente, por que pierde cargas negativas (Whitten, 2015, p. 222).

Un metal disuelto en el agua presenta una gran estabilidad, por lo cual para ser oxidado requiere de un agente oxidante que sea capaz de arrancar electrones al metal y así lograr que se oxide, para lo cual el ozono es el mencionado. Ver Anexo 3: La ruta de la limpieza: “ozonización”.

#### **2.4.4. Manganese.**

El Mn es un metal que se encuentra en forma natural en diversos tipos de rocas, debido a su gran afinidad por el oxígeno, generalmente se presenta como  $(\text{MnSi}_2\text{O}_3)$ , la Rodonita, la Rodocrosita  $(\text{MnCO}_3)$  (Dana, 1996, p. 454).

El manganeso se usa principalmente en la producción de acero para mejorar su dureza, rigidez y solidez. También se puede usar como aditivo en la gasolina para mejorar el octanaje de la gasolina. El manganeso También es considerado un elemento organoléptico ya que su presencia ocasiona manchas en la ropa lavada y en las instalaciones de gasfitería (OMS, 1998).

En las plantas es un microelemento esencial para la síntesis de clorofila, su función principal está relacionada con la activación de algunas enzimas en la planta. El Mn es absorbido por las raíces en forma de  $\text{Mn}^{2+}$  que es la forma biológicamente activa. El Mn es relativamente inmóvil, pero tóxico en altas concentraciones, afecta la parte aérea de la planta, produciendo clorosis marginal y necrosis en la parte de las hojas, arrugamiento foliar (soya y algodón) y manchas necróticas en las hojas (cebada, lechuga y soya). En casos severos de toxicidad, las raíces de las plantas se vuelven marrones, usualmente después que las partes superiores han sido severamente dañadas. (CEPIS, 2004).

#### 2.4.5. Ozono.

El ozono obtenido del oxígeno puro es un gas incoloro, de olor penetrante, químicamente puro y exento de productos nitrosos. Dicho gas es muy inestable y tóxico, sólo si es inhalado. En estado líquido es de color azul índigo (violeta azulado) y ebulle a  $-112\text{ }^{\circ}\text{C}$ . En estado sólido constituye una masa cristalina de color violeta oscuro que funde a una temperatura de  $-250\text{ }^{\circ}\text{C}$  (Rice y Netzer, 2010, p. 2-3).

En estos dos estados es muy inestable y basta con un simple choque para hacerlo explotar. En estado gaseoso demuestra una notable inestabilidad y, a temperatura ambiente, se descompone muy rápidamente. (Rice y Netzer, 2010, p. 2-3).

##### 2.4.5.1. *Propiedades químicas del ozono.*

El ozono es un agente fuertemente oxidante, con un potencial de oxidación inferior solamente al del Flúor, tal como indica la siguiente reacción:



Se observa cómo el ozono es netamente más reactivo que el oxígeno. En la mayor parte de las reacciones, el oxígeno es un oxidante lento,

mientras el ozono actúa con rapidez. En las confrontaciones de sustancias inorgánicas, la diferente reactividad de los dos gases es evidente: la plata, inalterable con el oxígeno, se convierte con el ozono, en un peróxido negro. El azufre se oxida no en SO<sub>2</sub> como el oxígeno, sino en SO<sub>3</sub>; el sulfuro de plomo (PbS), de color negro, se transforma con el ozono en PbSO<sub>4</sub>, asumiendo un color blanco.

También con las sustancias orgánicas el ozono reacciona enérgicamente provocando numerosas transformaciones. Algunas sustancias como el indigo, se decoloran, otras se queman, en otras ahora tiene lugar una reacción de combinación (Harries, 1912).

#### ***2.4.5.2. Efectos principales de ozonización del agua potable.***

##### **Desinfección e inactivación viral**

La acción bactericida y la inactivación viral está relacionado con la concentración del ozono en el agua y el tiempo de contacto con los microorganismos. Las bacterias son las que más rápidamente son destruidas. Las bacterias E-Coli son destruidas por concentraciones de ozono de unos 0.1 mg/L y una duración de contacto de 15 segundos a temperaturas de 25°C y 30°C. Streptococcus tectalis son destruidos mucho más fácilmente. A concentraciones de ozono de aproximadamente 0.025 mg/L, se obtiene un 99.9% de inactivación en 20 segundos o menos a temperaturas ambiente. Los virus son más

resistentes que las bacterias. Estudios pioneros por científicos de Salubridad Pública Francesa en los años 60 han demostrado que el poliovirus tipos I, II y III quedan inactivados por medio de exposición a concentraciones de ozono disuelto de 0.4 mg/L por un período de contacto de cuatro minutos. (O3 Technologies Ltd Co, Polymer-Electrolyte Membrane citado en Jingquan, 2014, p. 48-49).

### **Oxidación de compuestos inorgánicos**

En el caso del Fe, el Mn, y de varios compuestos de As, la oxidación ocurre muy rápidamente, dejando compuestos insolubles que se puede quitar fácilmente por medio de un filtro de carbón activado. Iones de sulfuro son oxidados a iones sulfatos, que es una sustancia inocua. (Jingquan, 2014, p. 49).

### **Oxidación de sustancias o compuestos orgánicos**

El ozono es un agente muy poderoso en el tratamiento de materiales orgánicos. Los compuestos orgánicos pueden ser naturales (ácidos húmicos y fúlvicos) o sintéticos (detergentes, pesticidas). Algunos orgánicos reaccionan con ozono muy rápidamente hasta la destrucción, en minutos o aún segundos (fenol, ácido fórmico), mientras otros reaccionan más lentamente con ozono (ácidos húmicos y fúlvicos, varios pesticidas, tricloreto, etc. En algunos casos, los materiales orgánicos son oxidados parcialmente

con ozono. Una ventaja principal de oxidación parcial de materiales orgánicos es que, al oxidarse, los materiales orgánicos se polarizan mucho más que el inicial, produciendo materiales insolubles complejos que se pueden quitar con filtros de carbón activado. (Jingquan, 2014, p. 49).

### **Eliminación de turbidez**

La turbidez del agua se elimina por ozonización a través de una combinación de oxidación química y neutralización de carga. Las partículas coloidales que causan turbidez son mantenidas en suspensión por partículas de carga negativas que son neutralizadas por el ozono. El ozono además destruye los materiales coloidales por medio de la oxidación de materias orgánicas. (Jingquan, 2014, p. 49).

### **Eliminación de olores, colores y sabores**

La oxidación de la materia orgánica, metales pesados, sulfuros y sustancias extrañas, produce la supresión de sabores y olores extraños que el agua pudiera contener, proporcionando una mejora en la calidad y el aspecto del agua, haciéndola más adecuada para su consumo y disfrute. (Beutelspacher, E 2005 citado en Jingquan, 2014, p. 50).

#### **2.4.6. Efectos tóxicos de los metales.**

Entre los metales que tienen más probabilidades de causar problemas figuran el cobre (Cu), el cadmio (Cd), el mercurio (Hg), el manganeso (Mg), el cobalto (Co) y el níquel (Ni). Se consideran tóxicos si resulta perjudicial para el crecimiento o el metabolismo de las células al exceder cierta concentración, algunos de ellos constituyen venenos graves incluso a concentraciones muy bajas (Vega y Reynaga, 1990). La toxicidad de estos metales pesados es proporcional a la facilidad de ser absorbidos por los seres vivos, un metal disuelto en forma iónica puede absorberse más fácilmente que estando en forma elemental, y si esta se halla reducida finamente aumenta las posibilidades de su oxidación y retención por los diversos órganos (Rosas, 2001 en Mejía, O. 2008, p. 21).

La toxicidad de un metal depende de su vía de administración y del compuesto químico al que está ligado. La combinación de un metal con un compuesto orgánico puede aumentar o disminuir sus efectos tóxicos sobre las células. La toxicidad es el resultado de: a) cuando el organismo se ve sometido a una concentración excesiva del metal durante un periodo prolongado, b) cuando el metal se presenta en forma bioquímica inusitada o c) cuando el organismo lo absorbe por una vía inusitada. (Vega y Reynaga, 1990).

Los efectos tóxicos de los metales pesados no se detectan fácilmente a corto plazo, aunque sí puede haber una incidencia muy importante a mediano y largo plazo. Los metales son difíciles de eliminar del medio, puesto que los propios organismos los incorporan a sus tejidos y de éstos a sus depredadores, en los que se acaban manifestando (Vega y Reynaga, 1990; Garban, 1996; Rosas, 2001).

#### **2.4.7. Potencial de hidrógeno (pH).**

El pH es una medida de la acidez o alcalinidad de una solución. En 1909, el químico danés Sorensen definió el potencial hidrógeno (pH) como el logaritmo negativo de la concentración molar (más exactamente de la actividad molar) de los iones hidrógeno. Esto es:

$$\text{pH} = -\log [\text{H}^+] \text{ (Carrasco, 2013, p. 263-264).}$$

Su medida refleja las variaciones la calidad de la fuente de agua. En los cultivos, el pH del agua en contacto con las raíces puede afectar el crecimiento vegetal de dos formas principalmente:

El pH puede afectar la disponibilidad de los nutrientes: para que el aparato radical pueda absorber los distintos nutrientes, éstos obviamente deben estar disueltos. Valores extremos de pH pueden provocar la precipitación de ciertos nutrientes, los que permanecen en forma no disponible para las plantas, el pH puede afectar al proceso

fisiológico de absorción de los nutrientes por parte de las raíces; todas las especies vegetales presentan unos rangos característicos de pH en los que su absorción es idónea. Fuera de este rango la absorción radicular se ve dificultada y si la desviación en los valores de pH es extrema, puede deteriorar a la planta o presentar toxicidad debido a la excesiva absorción de elementos fitotóxicos. Con pH de suelos y aguas de riego cercano o superior a 7.5 se ve afectada la correcta asimilabilidad de nutrientes como P, Fe, Mn, Zn y Cu. Con pH cercanos o inferiores a 7.5 se puede ver afectada la asimilación de Ca, Mg y Mo (Arce, 2000).

Con un pH menor a 5.5 puede producir acidosis. Un agua con pH bajo es poco probable que tenga un efecto directo en los cerdos por las condiciones ácidas del estómago (Zirena, 1991).

#### **2.4.8. Espectrometría de masas por plasma de acoplamiento inductivo.**

Mediante la espectrometría de masas con plasma de acoplamiento inductivo es posible determinar de forma cuantitativa la mayoría de los elementos de la tabla periódica a niveles de traza y ultra traza, partiendo de muestras en disolución acuosa.

La muestra, en forma líquida, es transportada por medio de una bomba peristáltica hasta el sistema nebulizador donde es transformada

en aerosol gracias a la acción de gas argón. Dicho aerosol es conducido a la zona de ionización que consiste en un plasma generado al someter un flujo de gas argón a la acción de un campo magnético oscilante inducido por una corriente de alta frecuencia. En el interior del plasma se pueden llegar a alcanzar temperaturas de hasta 8000 K. En estas condiciones, los átomos presentes en la muestra son ionizados.

Los iones pasan al interior del filtro cuadripolar a través de una interfaz de vacío creciente, allí son separados según su relación carga/masa. Cada una de las masas sintonizadas llega al detector donde se evalúa su abundancia en la muestra (Sánchez, 1986, p. 32-33).

#### **2.4.9. La Autoridad Nacional Del Agua (ANA).**

La Autoridad Nacional es el ente rector y la máxima autoridad técnico-normativa del Sistema Nacional de Gestión de los Recursos Hídricos. Es responsable del funcionamiento de dicho sistema en el marco de lo establecido en la Ley. (Ley 29338 ley de recursos hídricos).

#### **2.4.10. Calidad de agua.**

La calidad del agua se refiere a las características físicas, químicas y biológicas de los cuerpos de agua superficiales y subterráneos. Estas características afectan la capacidad del agua para sustentar tanto a las comunidades humanas como la vida vegetal y animal

(ANA, 2010).

#### **2.4.11. El Límite Máximo Permissible (LMP).**

Es la medida de la concentración o del grado de elementos, sustancias o parámetros físicos, químicos y biológicos, que caracterizan a un efluente o una emisión, que al ser excedida causa o puede causar daños a la salud, al bienestar humano y al ambiente. Su cumplimiento es exigible legalmente por la respectiva autoridad competente. Según el parámetro a que se refiera, la concentración o grado podrá ser expresada en máximos, mínimos o rangos (ley general del ambiente, art. N° 32).

#### **2.4.12. Estándar de Calidad Ambiental (ECA).**

Es la medida que establece el nivel de concentración o del grado de elementos, sustancias o parámetros físicos, químicos y biológicos, presentes en el aire, agua o suelo, en su condición de cuerpo receptor, que no representa riesgo significativo para la salud de las personas ni al ambiente. Según el parámetro a que se refiera, la concentración o grado podrá ser expresada en máximos, mínimos o rangos. (Ley general del ambiente, art. N° 31).

### 2.4.13. Diagrama de Predominancia de Pourbaix.

Los diagramas Eh – pH, muestran las áreas de estabilidad termodinámica de diferentes especies en una solución acuosa en función del pH y del potencial electroquímico.

Un diagrama de Pourbaix es una representación gráfica del potencial (ordenada) en función del pH (abscisa) para un metal dado bajo condiciones termodinámicas standard (usualmente agua a 25°C). El diagrama tiene en cuenta los equilibrios químicos y electroquímicos y define el dominio de estabilidad para el electrolito (normalmente agua). Los diagramas de Pourbaix son particularmente útiles en el estudio del comportamiento frente a la corrosión de materiales metálicos, ya que permiten predecir las zonas de inmunidad, corrosión y pasivación de un metal en un medio agresivo determinado. Como se muestra en la figura 6. Si el metal en su forma elemental es la fase termodinámicamente estable, esto indicará condiciones de inmunidad. La corrosión ocurrirá si un catión soluble del metal es la fase termodinámicamente estable. Si un anión complejo soluble del catión en medio alcalino es la fase termodinámicamente estable, lo que ocurre en el caso de metales anfóteros, como, por ejemplo, hierro, aluminio, cinc, etc., esto indicará condiciones de corrosión alcalina. La pasivación ocurrirá si un compuesto sólido del metal es la fase termodinámicamente estable, como, por ejemplo, óxido, hidróxido o hidruros. Esta es la razón por la cual habitualmente

en los estudios de corrosión los diagramas de Pourbaix aparecen de forma simplificada mostrando las regiones descritas y sin precisar cuáles son las especies estables en cada condición (Scheffer, 1989 citado por Ahmad, 2012, p. 15).

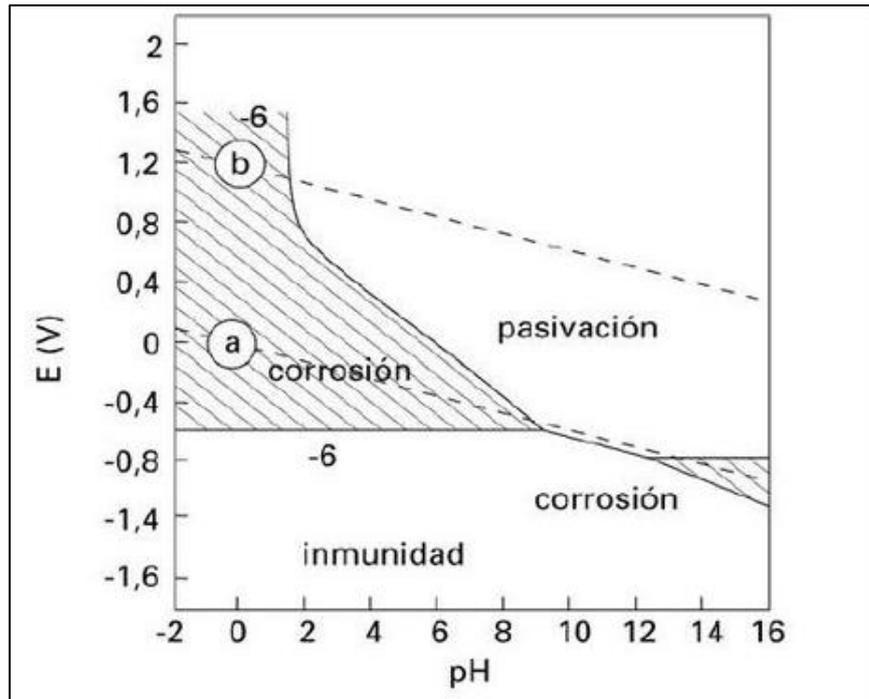


Figura 4. Diagrama de Pourbaix simplificado para el sistema hierro-agua a 25°C.

Fuente: Tomado de: Scheffer et al., 1989.

## 2.5. Operacionalización de las Variables

Tabla 2. Operacionalización de las variables.

VARIABLE	DEFINICIÓN CONCEPTUAL	DEFINICIÓN OPERACIONAL	INDICADORES	INSTRUMENTO	UNIDADES
Variable independiente. Oxidación de metales disueltos mediante el ozono	La oxidación es una reacción química donde un metal o un no metal cede electrones, y por tanto aumenta su estado de oxidación	$\text{Mn}^{2+} + \text{O}_3 + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{MnO}_{2(s)} + 2\text{H}^+ + \text{O}_2$	Rango de pH	Medidor de pH	Unidades de pH
			Tiempo	Cronómetro	Minutos
			Relación de O <sub>3</sub>	Estequiometria	mg/ L
Variable dependiente. Concentración de metales disueltos en las aguas del río Hualgayoc	Concentración de metales disueltos presentes en el agua del río Hualgayoc	Medida en ppm de metales disueltos en el agua del río Hualgayoc.	Niveles de concentración = Nivel máximo permisibles.	ECAS	mg/L

Fuente: elaboración propia.

## **2.6. Hipótesis de la Investigación**

La aplicación del ozono disminuye la concentración de metales disueltos en el agua del río Hualgayoc.

## **CAPÍTULO III: MÉTODO DE INVESTIGACIÓN**

### **3.1. Tipo de investigación**

Es de tipo aplicada que según Murillo (2008), la investigación aplicada recibe el nombre de “investigación práctica o empírica”, que se caracteriza porque busca la aplicación o utilización de los conocimientos adquiridos, a la vez que se adquieren otros, después de implementar y sistematizar la práctica basada en investigación. El uso del conocimiento y los resultados de investigación que da como resultado una forma rigurosa, organizada y sistemática de conocer la realidad.

Con el fin de ofrecer un referente comprensible de la expresión “investigación aplicada”, se exponen algunas de las ideas de Padrón (2006) al respecto, para quien la expresión se propagó durante el siglo XX para hacer referencia, en general, a aquel tipo de estudios científicos orientados a resolver problemas de la vida cotidiana o a controlar situaciones prácticas, haciendo dos distinciones:

- a. La que incluye cualquier esfuerzo sistemático y socializado por resolver problemas o intervenir situaciones. En ese sentido, se concibe como investigación aplicada tanto la innovación técnica, artesanal e industrial como la propiamente científica.

- b. La que sólo considera los estudios que explotan teorías científicas previamente validadas, para la solución de problemas prácticos y el control de situaciones de la vida cotidiana.

La investigación es de tipo aplicada por que usa el método científico para obtener resultados. Es decir que mediante la tecnología de ozonización se está innovando y demostrando que las concentraciones de metales disueltos en las aguas del río Hualgayoc ha disminuido, resultando de gran beneficio para el medio ambiente y la población.

### **3.2. Diseño de investigación**

Para Kerlinger (1999), " El diseño de investigaciones es el plan de estructura de las investigaciones concebidas de manera que se pueden obtener respuestas a las preguntas de investigación."

Según Castro (1976) se les denomina diseños experimentales aquellos que poseen las siguientes características:

- a) Existencia de al menos una comparación formal entre dos o más observaciones, medidas o grupos.
- b) Control de variables extrañas.
- c) Manipulación de la variable dependiente por parte del experimentador.

- d) Relación biunívoca entre variable independiente y dependiente.
- e) Selección de sujetos por parte del experimentador.
- f) Asignación al azar de los sujetos a los diferentes grupos.

En la investigación experimental el investigador manipula una o más variables de estudio, para controlar el aumento o disminución de esas variables y su efecto en las conductas observadas. Dicho de otra forma, un experimento consiste en hacer un cambio en el valor de una variable (variable independiente) y observar su efecto en otra variable (variable dependiente). Esto se lleva a cabo en condiciones rigurosamente controladas, con el fin de describir de qué modo o por qué causa se produce una situación o acontecimiento particular (Baptista y Hernández, 2014).

Basándonos en esta información se puede decir que es de tipo experimental, porque permitió obtener respuestas a las preguntas de investigación y manipular las variable independiente que son la aplicación del ozono, y el, al mismo tiempo controlarlas y así obtener respuestas que ayuden a responder las preguntas de investigación.

Tabla 3. *Esquema de pruebas experimentales.*

N°	pH	Tempo	[ Metales mg/L]
1	6	0	
	6	5	
	6	10	
	6	15	
	6	20	
2	7	0	
	7	5	
	7	10	
	7	15	
	7	20	
3	8	0	
	8	5	
	8	10	
	8	15	
	8	20	

Fuente. Elaboración propia.

### 3.3. Área de investigación

Río Hualgayoc “puente Culquirumi” ubicado en la Provincia y Distrito de Hualgayoc, Región Cajamarca.

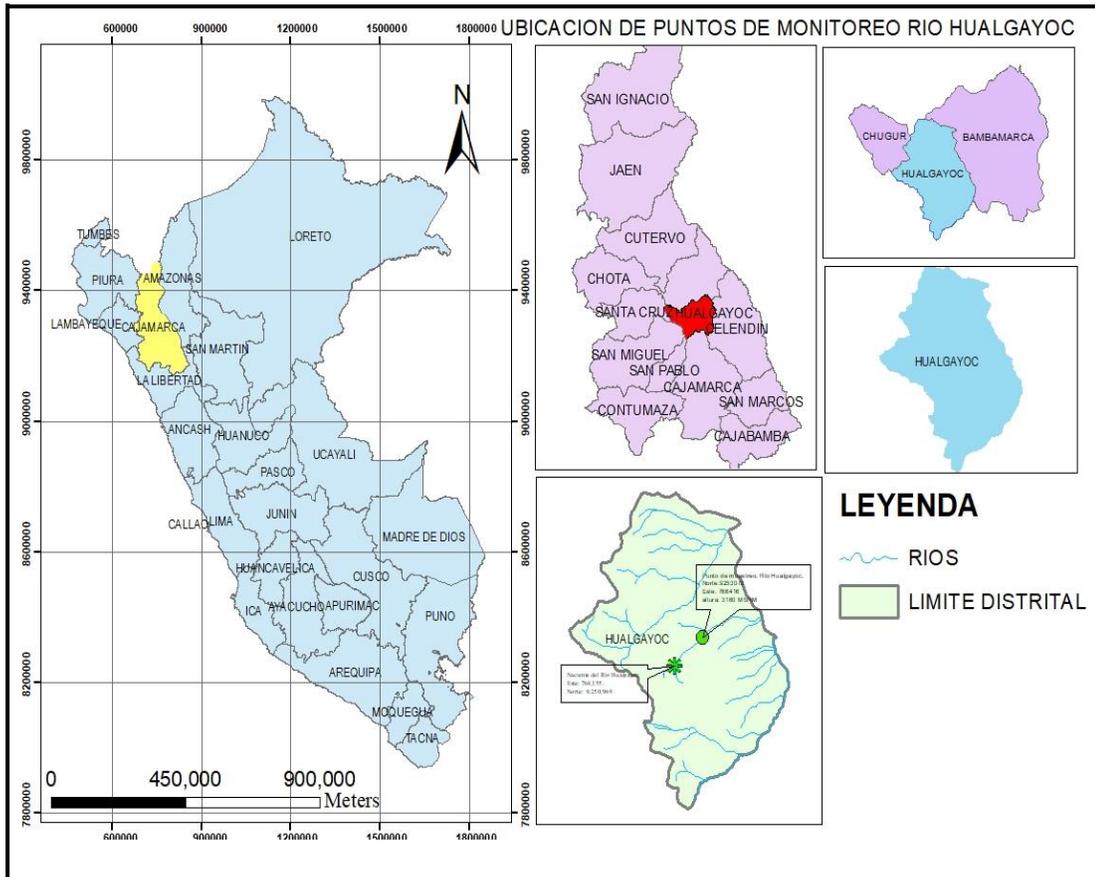
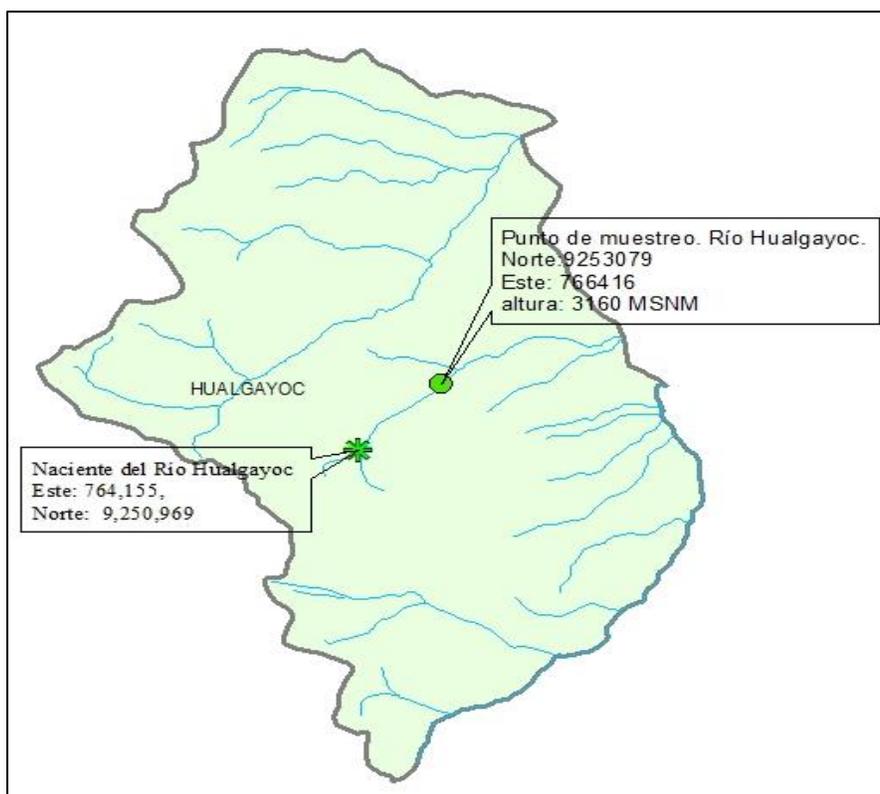


Figura 5. Mapa de ubicación de los puntos de monitoreo.

Fuente. Elaboración propia.



*Figura 6.* Mapa de identificación de puntos de monitoreo en la red hídrica del Distrito de Hualgayoc.

Fuente. Elaboración propia.

### 3.4. Universo

Aguas de la Cuenca del río Llaucano

### 3.5. Población

Aguas del río Hualgayoc.

### **3.6. Muestra**

La muestra tratada en la prueba experimental estuvo conformada por la porción de agua recolectada en el río Hualgayoc a la altura del puente Culquirumi.

Para realizar los experimentos es suficiente la toma de muestra puntual, la cual no invalidará el proceso experimental, debido a que la cantidad obtenida es homogénea y a partir de esta muestra se subdivide y se realizan las pruebas experimentales necesarias, eliminando el factor de variabilidad de la concentración inicial del agua de río, y dando mayor enfoque en la aplicabilidad del ozono, en el cual se centró la investigación.

### **3.7. Unidad de análisis**

La unidad de análisis son las pruebas experimentales donde se aplicó el ozono que estuvo conformado por 2500 ml de agua a tratar; evaluados a un pH (6, 7 y 8) y a una variación de tiempo.

### **3.8. Técnicas e instrumentos de recolección de datos**

La técnica empleada para la recolección de datos será la observación que, según Sabino (1996) “es el uso sistemático de nuestros sentidos en la búsqueda de los datos que se necesitan para resolver un problema de investigación, por lo cual observar científicamente es percibir activamente la realidad exterior con el

propósito de obtener los datos que, previamente, han sido definidos como de interés para la investigación (p. 117).

Sabino (1996) un instrumento de recolección de datos “es, en principio, cualquier recurso del que se vale el investigador para acercarse al fenómeno y extraer de ellos información, (...) mediante una adecuada construcción de los instrumentos de recolección de datos es que la investigación alcanza la necesaria correspondencia entre la teoría y los hechos, es más podríamos decir que gracias a ellos que ambos términos se vinculan. (P. 114)

De lo expuesto anteriormente podemos indicar que la técnica de recolección de datos será la observación de las respuestas que nos indiquen los instrumentos usados, para cuantificar los parámetros de las variables independientes; los cuales serán estipulados en el instrumento de recolección de datos.

### **3.8.1. Muestreo.**

Es el método utilizado para seleccionar a los componentes de la muestra del total de la población. "Consiste en un conjunto de reglas, procedimientos y criterios mediante los cuales se selecciona un conjunto de elementos de una población que representan lo que sucede en toda esa población". (Mata et al, 1997 citado en López, 2004, p. 2-3).

### **3.8.2. Criterios para la selección del punto de monitoreo.**

La definición de los puntos de monitoreo depende de los objetivos que se requiera alcanzar.

Para el establecimiento de la Línea Base se deben considerar los principales cuerpos de agua del área de influencia de la zona de estudio, que determinará la probabilidad del impactado causado por las actividades económicas y poblacionales.

Según el tipo de fuente de agua, se debe considerar los siguientes criterios generales:

Accesibilidad a los puntos de muestreo (rápido y seguro) y la representatividad, es decir que el punto de muestreo debe ser ubicado en un lugar que presente un flujo regular (sin turbulencia y de profundidad homogénea) y que permita el aforo y de ser posible permita tener una referencia para su futura ubicación. El uso de imágenes satelitales es de gran ayuda al momento de tomar la mejor decisión de donde ubicar los puntos de monitoreo, sin embargo, la ubicación definitiva debe realizarse en campo. (ANA, 2016, p. 9).

### **3.8.3. Criterios para el muestreo de ríos y quebradas.**

Los puntos de monitoreo deben ser ubicados aguas arriba y aguas abajo de una descarga de agua residual.

Punto de monitoreo aguas arriba debe estar ubicado a una distancia suficientemente lejos de la descarga de agua residual, para asegurar que no influya en las características naturales de cuerpo de agua, se sugiere una distancia de 50 a 100 m de acuerdo con la accesibilidad y otros componentes que alteren el recurso hídrico en estudio. (ANA, 2016, p. 9).

Punto de monitoreo aguas abajo para ubicar este punto de monitoreo se recomienda realizar las mediciones consecutivas de los parámetros de campo (temperatura, conductividad y pH) hasta llegar a definir la zona de mezcla completa del efluente en el cuerpo receptor, se sugiere una distancia de 100 a 500 m de acuerdo con la accesibilidad, caudal, capacidad de depuración de recurso y otros componentes que alteren sus características naturales del recurso hídrico en estudio. (ANA, 2016, p. 9).

### 3.8.4. Tipos de muestras de agua.

**Muestras simple o puntal.** A este tipo de muestras también se le denomina discreta. Consiste en la toma de una porción de agua en un punto o lugar determinado para su análisis individual. Representa las condiciones y características de la composición original del cuerpo de agua para ese lugar, tiempo y circunstancias particulares en el instante en el que se realiza su recolección. (ANA, 2016, p. 30).

#### 3.8.4.1. *Muestreo de caracterización de línea base.*

Punto número 1: nacimiento del río Hualgayoc

Paso 1: identificación de punto de muestreo: Se identificó dos puntos de muestreo en el río Hualgayoc, registrando las coordenadas UTM, en el sistema WGS84:

Este: 764 155

Norte: 9 250 969

Punto número 2: Puente Culquirumi río Hualgayoc

Norte: 9 253 079

Este: 766 416

Paso 2: ejecución del muestreo. Para obtener confiabilidad de los resultados, se procedió de la siguiente manera:

Se verificó y ajustó del equipo multiparámetro, antes de realizar la medición, luego se enjuagó los electrodos con la muestra de agua, estando el equipo apagado, se agitó ligeramente el sensor antes de medir,

posteriormente se registró la lectura cuando esta estabilizó, posteriormente se procedió con la toma de la muestra para el análisis de metales totales y disueltos en un frasco de polietileno de 500 ml y se preservó con ácido nítrico de concentración 1:1. (ANA, 2016, p. 49).

#### **3.8.4.2. Muestreo para pruebas de tratamiento.**

El muestreo para la prueba de tratamiento se realizó en el punto número 2. (Puente Culquirumi río Hualgayoc).

Norte: 9 253 079

Este: 766 416

Se realizó un muestreo simple o puntal, recolectando una porción de agua de 50 litros en un tanque debidamente rotulado y etiquetado, primero se enjuagó el tanque por tres veces, posteriormente se tomó la muestra.

#### **3.8.4.3. Procedimiento para prueba experimental**

Paso 1: se reguló el pH de la solución usando cal, 1.2 g de cal en 1 L de agua obteniendo un pH de 12.5 a 12.6.

Paso 2: se toma 2.5 L de muestra y gota a gota se regula el pH hasta obtener los pH de 6, 7 y 8 aproximadamente.

Paso 3: se acondiciona la muestra en el tanque reactor

Paso 4: se pone en marcha el sistema de ozonificación y se inyecta ozono, durante 5 minutos a razón de 20 gramos por hora.

Paso 5: luego de llegar a los 5 minutos se apaga la inyección de ozono y

se toma una muestra para los análisis correspondientes

Paso 6: se repite los pasos anteriores para las pruebas de 10, 15 y 20 minutos (nota: para cada tiempo se vuelve a tomar 2.5 L de muestra).

### **3.9. Técnicas para el procesamiento y análisis de datos**

#### **3.9.1. Técnicas para el procesamiento de datos.**

Consiste en procesar los datos (dispersos, desordenados, individuales) obtenidos de la población objeto de estudio durante el trabajo de campo, y tiene como fin generar resultado (datos agrupados y ordenados), a partir de los cuales se realizará el análisis según los objetivos de hipótesis de la investigación realizada. En el procesamiento de datos debe mencionarse las herramientas estadísticas a utilizarse.

Como lo menciona Hernández (2003) debe decidir qué tipo de análisis de los datos se llevará a cabo: cuantitativo, cualitativo o mixto. En caso de que el análisis sea cuantitativo, seleccionar las pruebas estadísticas apropiadas para analizar los datos, dependiendo de las hipótesis formuladas y de los niveles de medición de las variables.

En la presente investigación utilizaremos el enfoque cuantitativo para el análisis de datos.

Se uso el método de tabulación, según Rojas, R (1996) “La tabulación es el proceso mediante el cual los datos recopilados se organizan y concentran, con base a determinadas ideas o hipótesis, en tablas o cuadros para su tratamiento estadístico. Los datos por no ser de gran volumen se tabularán en forma manual, teniendo en cuenta:

**Datos de entrada.** Estan constituidos por los datos de la caracterización de la muestra.

**Datos de proceso.** Estan conformadas por los datos de tiempo de exposición al ozono de la muestra.

**Datos de salida.** Lo constituyen los datos que se obtengan como respuesta a la manipulación de las variables independientes.

### **3.9.2. Técnicas para el análisis de datos.**

En la actualidad, el análisis cuantitativo de los datos se lleva a cabo por computadora u ordenador, ya casi nadie lo hace de forma manual o aplicando formulas, en especial si hay un número considerable de datos. (Hernández et. al., 2014, p. 272).

### **3.10. Interpretación de datos**

La interpretación de los resultados estadísticos es un elemento crucial para la comprensión de los avances en las ciencias (...). Las herramientas que nos ofrece la estadística nos permiten transformar la incertidumbre y aparente caos de la naturaleza en parámetros medibles y aplicables a nuestra práctica (...). La importancia de entender el significado y alcance real de estos instrumentos es fundamental para el investigador, para los financiadores de las investigaciones y para los profesionales que precisan de una actualización permanente basada en buena evidencia y ayudas a la toma de decisiones (García y Maroto, 2017).

Para interpretar nuestros datos que son de tipo relacionado usaremos: La representación gráfica de los resultados.

## CAPÍTULO IV: RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### 4.1. Resultados de análisis de muestreo de línea base.

Tabla 4. Resultados de análisis de muestra de línea base.

Elemento	Símbolo	Metales por ICP				
		Unidad	PCRHMT	PCRHMD	NRHMD	NRHMT
Aluminio	Al	mg/L	9.5060	2.7180	0.0980	0.1080
Antimonio	Sb	mg/L	0.0050	0.0050	0.0050	0.0050
Arsénico	As	mg/L	0.0065	0.0065	0.0065	0.0065
Bario	Ba	mg/L	0.0066	0.0066	0.0066	0.0066
Berilio	Be	mg/L	0.0057	0.0057	0.0057	0.0057
Boro	B	mg/L	0.2330	0.0102	0.0102	0.1540
Cadmio	Cd	mg/L	0.1260	0.1060	0.0027	0.0027
Calcio	Ca	mg/L	187.1	156.0	130.237	132.485
Cerio	Ce	mg/L	0.0054	0.0054	0.0054	0.0054
Cobalto	Co	mg/L	0.0071	0.0071	0.0071	0.0071
Cobre	Cu	mg/L	0.6000	0.156	0.0084	0.0084
Cromo	Cr	mg/L	0.0056	0.0056	0.0056	0.0056
Estaño	Sn	mg/L	0.0700	0.0079	0.0079	0.0079
Estroncio	Sr	mg/L	0.4030	0.3340	0.5660	0.5740
Fósforo	P	mg/L	0.6840	0.2250	0.0137	0.0137
Hierro	Fe	mg/L	17.770	5.675	0.045	0.048
Litio	Li	mg/L	0.0098	0.0098	0.0098	0.0098
Magnesio	Mg	mg/L	18.370	15.580	5.4410	5.5860
Manganeso	Mn	mg/L	32.060	26.730	0.0070	0.0070
Mercurio	Hg	mg/L	0.0008	0.0008	0.0008	0.0008
Molibdeno	Mo	mg/L	0.0048	0.0048	0.0048	0.0048
Níquel	Ni	mg/L	0.0050	0.0050	0.0050	0.0050
Plata	Ag	mg/L	0.0093	0.0093	0.0093	0.0093
Plomo	Pb	mg/L	0.0047	0.0047	0.0047	0.0047
Potasio	K	mg/L	4.8910	4.1390	0.9980	1.0410
Selenio	Se	mg/L	0.0069	0.0069	0.0069	0.0069
Sodio	Na	mg/L	5.9070	5.2890	3.5670	3.7050
Talio	Tl	mg/L	0.0078	0.0078	0.0078	0.0078
Titanio	Ti	mg/L	0.0090	0.0090	0.0090	0.0090
Vanadio	V	mg/L	0.0075	0.0075	0.0075	0.0075
Zinc	Zn	mg/L	19.950	19.090	0.1030	0.1050

**Nota:** PCRHMT= Puente Culquirumi del Río Hualgayoc Metales Totales. PCRHMD= Puente Culquirumi Río Hualgayoc Metales Disueltos; NRHMD=Naciente Río Hualgayoc Metales Disueltos. NRHMT= Naciente del Río Hualgayoc Metales Totales; ICP= Plasma de Acoplamiento Inductivo.

**Fuente:** laboratorio NKAP SRL.

## 4.2. Presentación de datos experimentales

Tabla 5. Resultados de análisis de muestra antes del tratamiento.

Elemento	Metales por ICP		PCRHMD
	Símbolo	Unidad	
Aluminio	Al	mg/L	0.100
Antimonio	Sb	mg/L	0.019
Arsénico	As	mg/L	0.024
Bario	Ba	mg/L	29.000
Berilio	Be	mg/L	0.000
Boro	B	mg/L	0.352
Cadmio	Cd	mg/L	0.043
Calcio	Ca	mg/L	142.300
Cerio	Ce	mg/L	0.000
Cobalto	Co	mg/L	0.012
Cobre	Cu	mg/L	0.026
Cromo	Cr	mg/L	0.005
Estaño	Sn	mg/L	0.018
Estroncio	Sr	mg/L	0.408
Fósforo	P	mg/L	0.000
Hierro	Fe	mg/L	0.135
Litio	Li	mg/L	0.005
Magnesio	Mg	mg/L	10.140
Manganeso	Mn	mg/L	14.600
Mercurio	Hg	mg/L	0.000
Molibdeno	Mo	mg/L	0.007
Niquel	Ni	mg/L	0.004
Plata	Ag	mg/L	0.003
Plomo	Pb	mg/L	0.008
Potasio	K	mg/L	3.401
Selenio	Se	mg/L	0.000
Sodio	Na	mg/L	6.970
Talio	Tl	mg/L	0.018
Titanio	Ti	mg/L	0.001
Vanadio	V	mg/L	0.009
Zinc	Zn	mg/L	4.730

Nota: resultado de análisis de metals antes de ajustar pH y tratar la muestra con ozono. PCRHMD= Puente Culquirumi Río Hualgayoc Metales Disueltos. Fuente: Laboratorio NKAP SRL.

Tabla 6. Resultado de análisis por ICP de pruebas a pH 6.

		Metales por ICP				
Potencial de hidrógeno		pH 6	pH 6	pH 6	pH 6	
Tiempo		5"	10"	15"	20"	
Elemento	Símbolo	unidad	M1_6	M2_6	M3_6	M4_6
Aluminio	Al	mg/L	0.033	0.030	0.058	0.038
Antimonio	Sb	mg/L	0.000	0.000	0.010	0.010
Arsénico	As	mg/L	0.018	0.007	0.000	0.000
Bario	Ba	mg/L	0.056	0.032	0.012	0.066
Berilio	Be	mg/L	0.000	0.000	0.000	0.000
Boro	Bo	mg/L	0.253	0.235	0.254	0.214
Cadmio	Cd	mg/L	0.019	0.016	0.013	0.011
Calcio	Ca	mg/L	111.73	104.85	105.97	106.62
Cerio	Ce	mg/L	0.000	0.000	0.000	0.000
Cobalto	Co	mg/L	0.000	0.000	0.000	0.000
Cobre	Cu	mg/L	0.077	0.169	0.166	0.205
Cromo	Cr	mg/L	0.000	0.002	0.004	0.003
Estaño	Sn	mg/L	0.000	0.000	0.000	0.000
Estroncio	Sr	mg/L	0.343	0.312	0.311	0.311
Fósforo	P	mg/L	0.000	0.000	0.000	0.000
Hierro	Fe	mg/L	0.007	0.008	0.012	0.023
Litio	Li	mg/L	0.004	0.003	0.003	0.003
Magnesio	Mg	mg/L	6.968	6.482	6.440	6.412
Manganeso	Mn	mg/L	5.433	2.445	0.522	0.362
Mercurio	Hg	mg/L	0.000	0.000	0.000	0.000
Molibdeno	Mo	mg/L	0.000	0.000	0.001	0.005
Níquel	Ni	mg/L	0.022	0.020	0.022	0.017
Plata	Ag	mg/L	0.002	0.001	0.001	0.000
Plomo	Pb	mg/L	0.000	0.000	0.000	0.000
Potasio	K	mg/L	2.928	2.522	2.523	2.585
Selenio	Se	mg/L	0.032	0.026	0.041	0.000
Sodio	Na	mg/L	7.206	6.252	6.319	6.359
Talio	Tl	mg/L	0.001	0.023	0.013	0.015
Titanio	Ti	mg/L	0.000	0.000	0.000	0.000
Vanadio	V	mg/L	0.000	0.000	0.000	0.000
Zinc	Zn	mg/L	2.188	2.169	2.486	2.101

**Nota:** M1\_6= Muestra número 1 del primer tratamiento a pH 6 en 5 minutos. M2\_6= Muestra número 2 del primer tratamiento a pH 6 en 10 minutos. M3\_6= Muestra número 3 del primer tratamiento a pH 6 en 15 minutos. M4\_6= Muestra número 4 del primer tratamiento a pH 6 en 20 minutos.

**Fuente:** Laboratorio NKAP SRL

Tabla 7. Resultado de análisis por ICP de pruebas a pH 7.

Metales por ICP						
Potencial de hidrógeno			pH 7	pH 7	pH 7	pH 7
Tiempo			5"	10"	15"	20"
Elemento	Símbolo	unidad	BK2	BK3	BK4	BK5
Aluminio	Al	mg/L	268.900	514.300	0.224	0.077
Antimonio	Sb	mg/L	0.030	0.001	0.022	0.009
Arsénico	As	mg/L	0.123	0.067	0.014	0.025
Bario	Ba	mg/L	0.055	0.068	0.033	0.069
Berilio	Be	mg/L	0.000	0.000	0.000	0.000
Boro	Bo	mg/L	1.401	1.149	0.821	0.789
Cadmio	Cd	mg/L	0.039	0.035	0.016	0.008
Calcio	Ca	mg/L	135.700	130.100	146.700	133.900
Cerio	Ce	mg/L	0.000	0.000	0.000	0.000
Cobalto	Co	mg/L	0.005	0.004	0.000	0.002
Cobre	Cu	mg/L	0.118	0.140	0.047	0.071
Cromo	Cr	mg/L	0.006	0.007	0.002	0.000
Estaño	Sn	mg/L	0.026	0.003	0.011	0.003
Estroncio	Sr	mg/L	0.426	0.416	0.437	0.407
Fósforo	P	mg/L	0.000	0.000	0.000	0.000
Hierro	Fe	mg/L	0.420	0.685	0.003	0.002
Litio	Li	mg/L	0.009	0.010	0.005	0.005
Magnesio	Mg	mg/L	9.763	9.279	9.930	9.162
Manganeso	Mn	mg/L	6.757	2.896	1.328	0.480
Mercurio	Hg	mg/L	0.000	0.000	0.000	0.000
Molibdeno	Mo	mg/L	0.007	0.011	0.006	0.007
Níquel	Ni	mg/L	0.113	0.016	0.009	0.004
Plata	Ag	mg/L	0.001	0.001	0.001	0.000
Plomo	Pb	mg/L	0.021	0.000	0.006	0.015
Potasio	K	mg/L	6.224	5.780	4.240	3.842
Selenio	Se	mg/L	0.023	0.063	0.105	0.014
Sodio	Na	mg/L	18.120	23.280	8.593	8.854
Talio	Tl	mg/L	0.026	0.031	0.028	0.052
Titanio	Ti	mg/L	0.000	0.001	0.002	0.000
Vanadio	V	mg/L	0.004	0.000	0.000	0.000
Zinc	Zn	mg/L	4.484	3.768	1.293	0.673

**Nota:** BK2= Muestra número 1 del segundo tratamiento a pH 7 en 5 minutos. Bk3= Muestra número 2 del segundo tratamiento a pH 7 en 10 minutos. BK4= Muestra número 3 del segundo tratamiento a pH 7 en 15 minutos. Bk5= Muestra número 4 del segundo tratamiento pH 7 en 20 minutos.

**Fuente:** Laboratorio NKAP SRL

Tabla 8. Resultado de análisis por ICP de pruebas a pH 8.

		Metales por ICP				
Potencial de hidrógeno			pH 8	pH 8	pH 8	pH 8
Tiempo			5"	10"	15"	20"
Elemento	Símbolo	unidad	M1_8	M2_8	M3_8	M4_8
Aluminio	Al	mg/L	0.027	0.026	0.025	0.027
Antimonio	Sb	mg/L	0.000	0.000	0.000	0.000
Arsénico	As	mg/L	0.000	0.014	0.000	0.004
Bario	Ba	mg/L	0.018	0.008	0.007	0.024
Berilio	Be	mg/L	0.001	0.000	0.000	0.000
Boro	Bo	mg/L	0.132	0.128	0.172	0.219
Cadmio	Cd	mg/L	0.006	0.003	0.001	0.001
Calcio	Ca	mg/L	54.928	79.873	70.379	95.956
Cerio	Ce	mg/L	0.000	0.000	0.000	0.000
Cobalto	Co	mg/L	0.000	0.001	0.000	0.000
Cobre	Cu	mg/L	0.066	0.054	0.023	0.045
Cromo	Cr	mg/L	0.006	0.003	0.003	0.005
Estaño	Sn	mg/L	0.000	0.009	0.000	0.001
Estroncio	Sr	mg/L	0.177	0.239	0.211	0.283
Fósforo	P	mg/L	0.000	0.000	0.000	0.000
Hierro	Fe	mg/L	0.001	0.001	0.024	0.011
Litio	Li	mg/L	0.002	0.002	0.002	0.003
Magnesio	Mg	mg/L	3.672	5.198	4.564	6.358
Manganeso	Mn	mg/L	2.197	0.419	0.113	0.107
Mercurio	Hg	mg/L	0.000	0.000	0.000	0.000
Molibdeno	Mo	mg/L	0.001	0.000	0.002	0.001
Níquel	Ni	mg/L	0.003	0.005	0.003	0.003
Plata	Ag	mg/L	0.001	0.000	0.000	0.001
Plomo	Pb	mg/L	0.000	0.000	0.000	0.000
Potasio	K	mg/L	1.286	1.894	1.653	2.259
Selenio	Se	mg/L	0.060	0.090	0.130	0.051
Sodio	Na	mg/L	3.902	5.181	4.962	5.706
Talio	Tl	mg/L	0.021	0.016	0.025	0.015
Titanio	Ti	mg/L	0.000	0.000	0.000	0.000
Vanadio	V	mg/L	0.000	0.000	0.000	0.000
Zinc	Zn	mg/L	0.356	0.284	0.062	0.064

**Nota:** M1\_8= Muestra número 1 del tercer tratamiento a pH 8 en 5 minutos. M2\_8= Muestra número 2 del tercer tratamiento a pH 8 en 10 minutos. M3\_8= Muestra número 3 del tercer tratamiento a pH 8 en 15 minutos. M4\_8= Muestra número 4 del tercer tratamiento a pH 6 en 20 minutos.

**Fuente:** Laboratorio NKAP SRL.

Tabla 9. Formatos de registro de datos.

Lab. Químico		pH 6	pH 6	pH 6	pH 6	pH 7	pH 7	pH 7	pH 7	pH 8	pH 8	pH 8	pH 8	
Disueltos		5"	10"	15"	20"	5"	10"	15"	20"	5"	10"	15"	20"	
Símbolo	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	
Aluminio	Al	0.100	0.033	0.030	0.058	0.038	268.900	514.300	0.224	0.077	0.027	0.026	0.025	0.027
Antimonio	Sb	0.019	0.000	0.000	0.010	0.010	0.030	0.001	0.022	0.009	0.000	0.000	0.000	0.000
Arsénico	As	0.024	0.018	0.007	0.000	0.000	0.123	0.067	0.014	0.025	0.000	0.014	0.000	0.004
Bario	Ba	0.029	0.056	0.032	0.012	0.066	0.055	0.068	0.033	0.069	0.018	0.008	0.007	0.024
Berilio	Be	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.001	0.000	0.000	0.000
Boro	Bo	0.352	0.253	0.235	0.254	0.214	1.401	1.149	0.821	0.789	0.132	0.128	0.172	0.219
Cadmio	Cd	0.043	0.019	0.016	0.013	0.011	0.039	0.035	0.016	0.008	0.006	0.003	0.001	0.001
Calcio	Ca	142.3	111.726	104.852	105.973	106.623	135.700	130.100	146.700	133.900	54.928	79.873	70.379	95.956
Cerio	Ce	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
Cobalto	Co	0.012	0.000	0.000	0.000	0.000	0.005	0.004	0.000	0.002	0.000	0.001	0.000	0.000
Cobre	Cu	0.026	0.077	0.169	0.166	0.205	0.118	0.140	0.047	0.071	0.066	0.054	0.023	0.045
Cromo	Cr	0.005	0.000	0.002	0.004	0.003	0.006	0.007	0.002	0.000	0.006	0.003	0.003	0.005
Estaño	Sn	0.018	0.000	0.000	0.000	0.000	0.026	0.003	0.011	0.003	0.000	0.009	0.000	0.001
Estroncio	Sr	0.408	0.343	0.312	0.311	0.311	0.426	0.416	0.437	0.407	0.177	0.239	0.211	0.283
Hierro	Fe	0.135	0.007	0.008	0.012	0.023	0.420	0.685	0.003	0.002	0.001	0.001	0.024	0.011
Litio	Li	0.005	0.004	0.003	0.003	0.003	0.009	0.010	0.005	0.005	0.002	0.002	0.002	0.003
Magnesio	Mg	10.14	6.968	6.482	6.440	6.412	9.763	9.279	9.930	9.162	3.672	5.198	4.564	6.358
Manganeso	Mn	14.600	5.433	2.445	0.522	0.362	6.757	2.896	1.328	0.480	2.197	0.419	0.113	0.107
Molibdeno	Mo	0.007	0.000	0.000	0.001	0.005	0.007	0.011	0.006	0.007	0.001	0.000	0.002	0.001
Níquel	Ni	0.004	0.022	0.020	0.022	0.017	0.113	0.016	0.009	0.004	0.003	0.005	0.003	0.003
Plata	Ag	0.003	0.002	0.001	0.001	0.000	0.001	0.001	0.001	0.000	0.001	0.000	0.000	0.001
Plomo	Pb	0.008	0.000	0.000	0.000	0.000	0.021	0.000	0.006	0.015	0.000	0.000	0.000	0.000
Potasio	K	3.401	2.928	2.522	2.523	2.585	6.224	5.780	4.240	3.842	1.286	1.894	1.653	2.259
Selenio	Se	0.000	0.032	0.026	0.041	0.000	0.023	0.063	0.105	0.014	0.060	0.090	0.130	0.051
Sodio	Na	6.970	7.206	6.252	6.319	6.359	18.120	23.280	8.593	8.854	3.902	5.181	4.962	5.706
Talio	Tl	0.018	0.001	0.023	0.013	0.015	0.026	0.031	0.028	0.052	0.021	0.016	0.025	0.015
Titanio	Ti	0.001	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.001	0.002	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
Vanadio	V	0.009	0.000	0.000	0.000	0.000	0.004	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
Zinc	Zn	4.728	2.188	2.169	2.486	2.101	4.484	3.768	1.293	0.673	0.356	0.284	0.062	0.064

Fuente. Elaboración propia tomado de Laboratorio NKAP SRL

### 4.3. Análisis y discusión de resultados antes de aplicar ozono

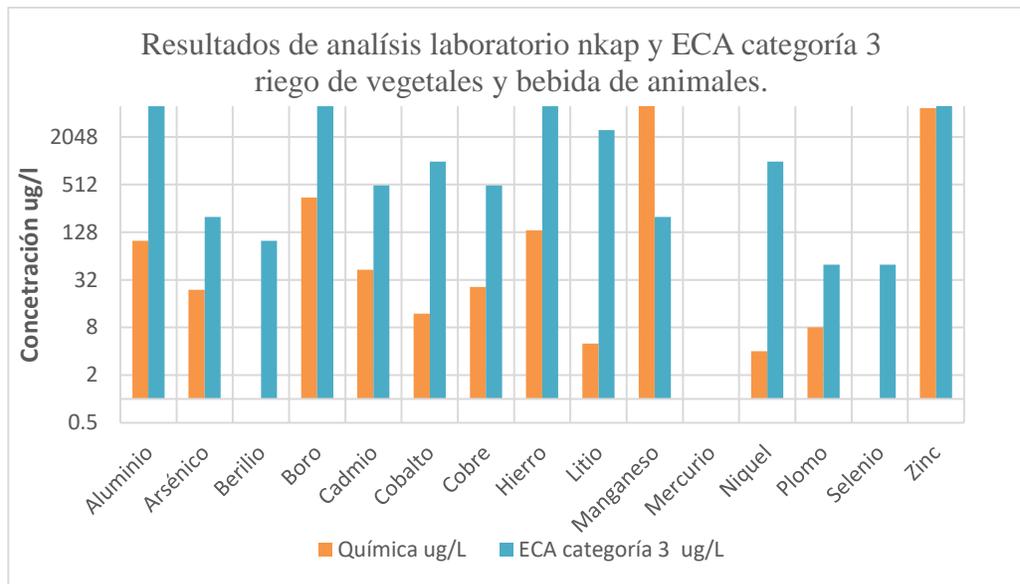
En la tabla 10 y figura 7 se aprecia los resultados obtenidos de la muestra previa al tratamiento, con respecto a la concentración de metales disueltos, así como la comparación con los valores establecidos por el estándar de calidad ambiental (Categoría 3).

Tabla 10. *Resultados de laboratorio NKAP y ECA categoría 3 bebida de animales.*

	Concentración Laboratorio Química	ECA categoría 3 bebida de animales	Laboratorio Química	ECA categoría 3 bebida de animales
	mg/L	mg/L	ug/L	ug/L
Aluminio	0.1	5	100	5000
Arsénico	0.024	0.2	24	200
Berilio	0	0.1	0	100
Boro	0.352	5	352	5000
Cadmio	0.043	0.5	43	500
Cobalto	0.012	1	12	1000
Cobre	0.026	0.5	26	500
Hierro	0.135	5	135	5000
Litio	0.005	2.5	5	2500
Manganeso	14.6	0.2	14600	200
Mercurio	0	0.001	0	1
Níquel	0.004	1	4	1000
Plomo	0.008	0.05	8	50
Selenio	0	0.05	0	50
Zinc	4.728	24	4728	24000

Nota: ECA= Estándar de Calidad Ambiental. El dato de hierro 5 mg/L se tomó de la subcategoría D1 (riego de vegetales) ya que en la subcategoría D2, bebida de animales no aplica.

Fuente: laboratorio de química y ECA (DS. N° 004-2017-MINAM) categoría 3 riego de vegetales y bebida de animales.



*Figura 7.* Análisis de laboratorio de química vs ECA categoría 3 riego de vegetales y bebida de animales.

Nota: de los datos experimentales y ECA categoría 3 bebida de animales. En el gráfico mostrado se puede apreciar que la concentración de manganeso supera el estándar de calidad ambiental (categoría 3 riego de vegetales y bebida de animales).

Según los resultados mostrados en la Tabla 10 y Figura 7 podemos observar que el único parámetro que no cumple con los valores establecidos por el estándar de calidad ambiental (categoría 3), es el manganeso. Todos los otros elementos evaluados cumplen la calidad establecida, por lo tanto, la evaluación de la aplicación del ozono se realizó en base a la concentración del manganeso.

#### 4.4. Análisis de resultados con la aplicación del ozono

La aplicación del ozono se realizó en tres experimentos, diferenciándose cada uno de ellos en el acondicionamiento del pH y tomando como medidas de resultados a la concentración del manganeso, luego cada intervalo de tiempo de

5 minutos, tomando hasta un tiempo máximo de 20 minutos. Los resultados de los experimentos se muestran en la tabla 11.

Tabla 11. *Tabla 11. Resultados de aplicación de ozono.*

N°	pH	Tiempo	[Mn] (mg/L)	Ozono (g)	Mn (g)	Ozono/ (Mn inicial)
1	6	0	14.6	0.00	0.0365	0
	6	5	5.433	1.67	0.0136	46
	6	10	2.445	3.33	0.0061	91
	6	15	0.522	5.00	0.0013	137
	6	20	0.362	6.67	0.0009	183
2	7	0	14.6	0.00	0.0365	0
	7	5	10.3	1.67	0.0258	46
	7	10	4.8	3.33	0.0120	91
	7	15	2.89	5.00	0.0072	137
	7	20	0.48	6.67	0.0012	183
3	8	0	14.6	0.00	0.0365	0
	8	5	2.197	1.67	0.0055	46
	8	10	0.419	3.33	0.0010	91
	8	15	0.113	5.00	0.0003	137
	8	20	0.107	6.67	0.0003	183
Volumen:	2.5	Litros	Flujo de Ozono:	20		g/h

En base a los resultados mostrados en la Tabla 11, se construye la gráfica de tendencias (figura 8), para los tres experimentos y poder visualizar mejor los resultados.

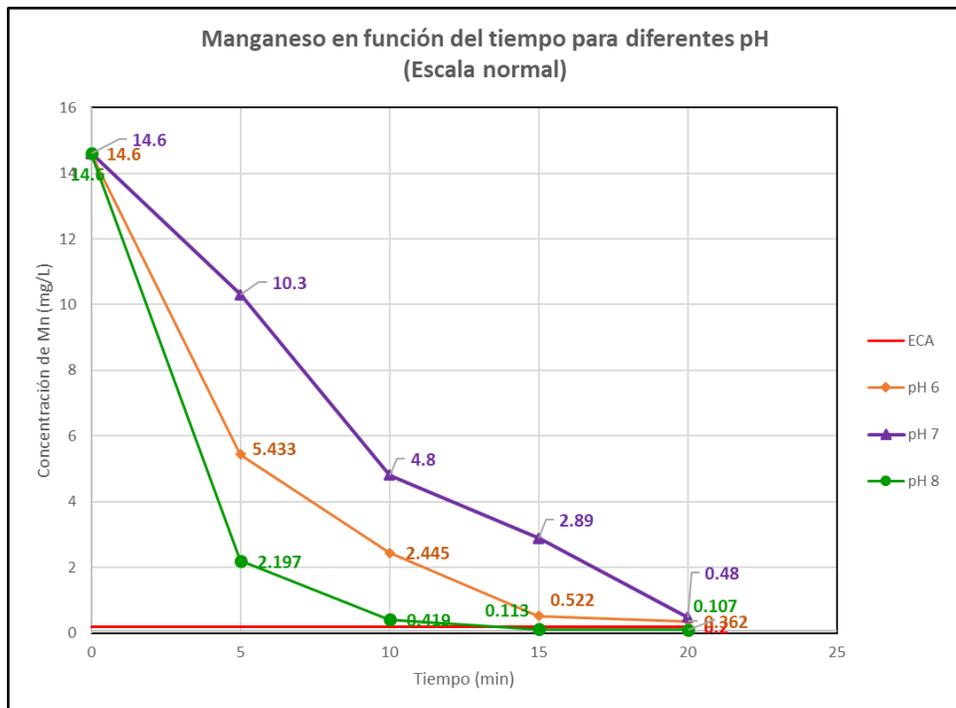
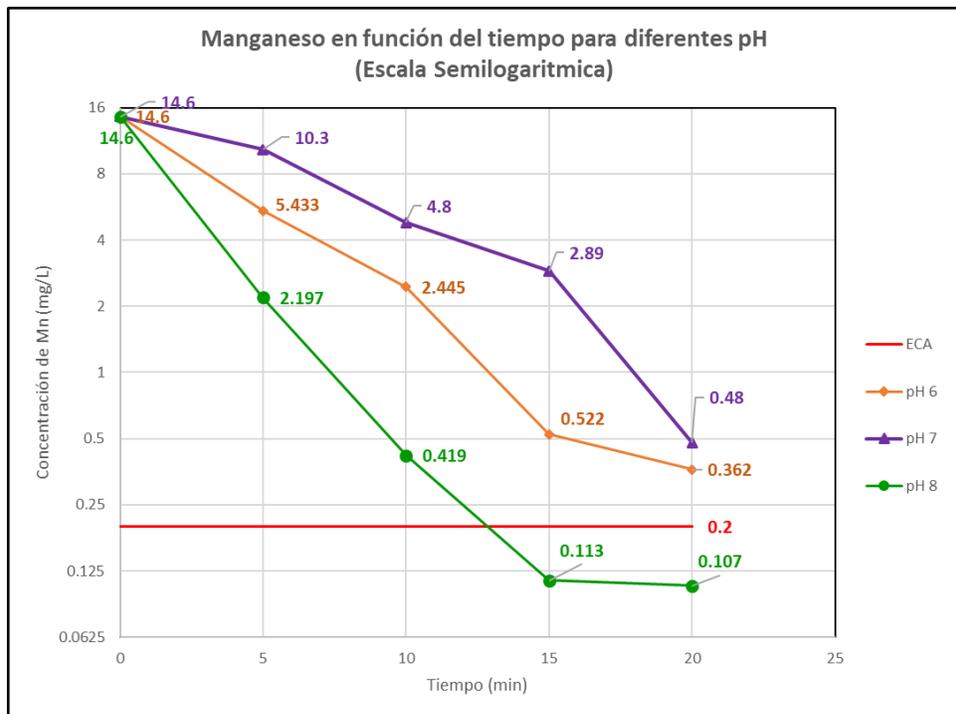


Figura 8. Gráfica de tendencia del Mn en función del tiempo en una escala normal.

Según la figura 8, podemos observar que no refleja de forma clara los últimos resultados para los tiempos de 15 y 20 minutos principalmente, por lo tanto, se elaboró una gráfica con una escala logarítmica en el eje de las concentraciones del manganeso, esto se representa en la figura 9.



*Figura 9.* Gráfica de tendencia del Mn en función al tiempo en escala semilogarítmica.

Según la gráfica de la figura 9, podemos observar que, de los tres experimentos realizados, el mejor es el ejecutado a pH 8, el cual alcanza una concentración de Mn por debajo del valor del estándar de calidad ambiental a los 15 minutos. Sin embargo, podemos observar que en los tres experimentos existe una tendencia a disminuir la concentración del Mn. Para determinar si el pH tiene influencia significativa se realizó una evaluación mediante el análisis de varianza (ANOVA), haciendo uso del Minitab 18.

#### 4.4.1. Correlación entre la concentración del Mn en función del tiempo

De acuerdo con los resultados mostrados en las figuras 8 y 9 se puede decir que tiene una correlación no lineal, para lo cual se hizo uso del software Minitab 18 y el mejor ajuste que se obtuvo es un tipo de gráfica exponencial, tal como se muestra en la figura 10.

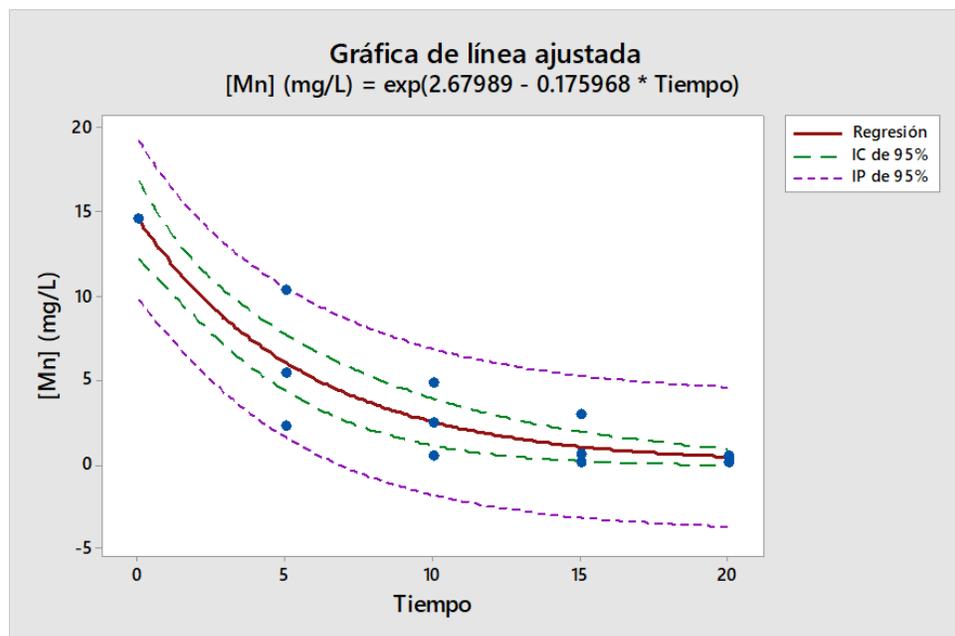


Figura 10. Ajuste de correlación no lineal de la concentración de Mn vs tiempo.

Fuente: Elaboración propia con Software Minitab 18.

Según la gráfica mostrada en la figura 10, se observa que presenta una ecuación de correlación no lineal exponencial de la siguiente forma:

$$[Mn] = e^{(2.67989 - 0.17598 * tiempo)}$$

La concentración del Mn esta expresada en mg/L y el tiempo en minutos. También se puede representar de la siguiente manera.

$$\text{Ln}[Mn] = 2.67989 - 0.17598 * \text{tiempo}$$

Por lo tanto, para predecir el tiempo en función a la concentración tendremos la siguiente fórmula:

$$\text{tiempo} = \frac{2.67989 - \text{Ln}[Mn]}{0.17589}$$

En seguida realizaremos el análisis de los resultados de la correlación no lineal de tipo exponencial obtenidos con el Minitab 18, los cuales se muestra en la tabla 12.

Tabla 12. *Análisis estadístico de correlación no lineal.*

Regresión no lineal: $[Mn] \text{ (mg/L)} = \exp(\text{Theta1} + \text{Theta2} * \text{Tiempo})$					
Método					
Algoritmo	Gauss-Newton				
Iteraciones máx.	200				
Tolerancia	0.00001				
Valores iniciales de los parámetros					
Parámetro	Valor				
Theta1	3				
Theta2	3				
Ecuación					
$[Mn] \text{ (mg/L)} = \exp(2.67989 - 0.175968 * \text{Tiempo})$					
Cálculos del parámetro					
Parámetro	Estimar	EE de estimación			
Theta1	2.67989	0.0746518			
Theta2	-0.17597	0.0277148			
$[Mn] \text{ (mg/L)} = \exp(\text{Theta1} + \text{Theta2} * \text{Tiempo})$					
Falta de ajuste					
Fuente	GL	SC	MC	F	P
Error	13	47.5722	3.6594		
Falta de ajuste	3	0.1168	0.03892	0.01	0.999
Error puro	10	47.4555	4.74555		

Fuente: Elaboración propia con el Software Minitab 18.

El resultado clave para el análisis estadístico es lo indicado en el valor P de la “Falta de Ajuste”. “El valor P para la prueba de falta de ajuste es 0.999, que no proporciona ninguna evidencia de que el ajuste del modelo a los datos sea deficiente”, según lo indicado por Minitab 18. Es decir que el ajuste tiene una probabilidad de 99.9 %.

En base a la evaluación global de correlación no lineal, se procedió a determinar los ajustes de forma individual para cada pH, los cuales se muestran en las figuras 11, 12 y 13.

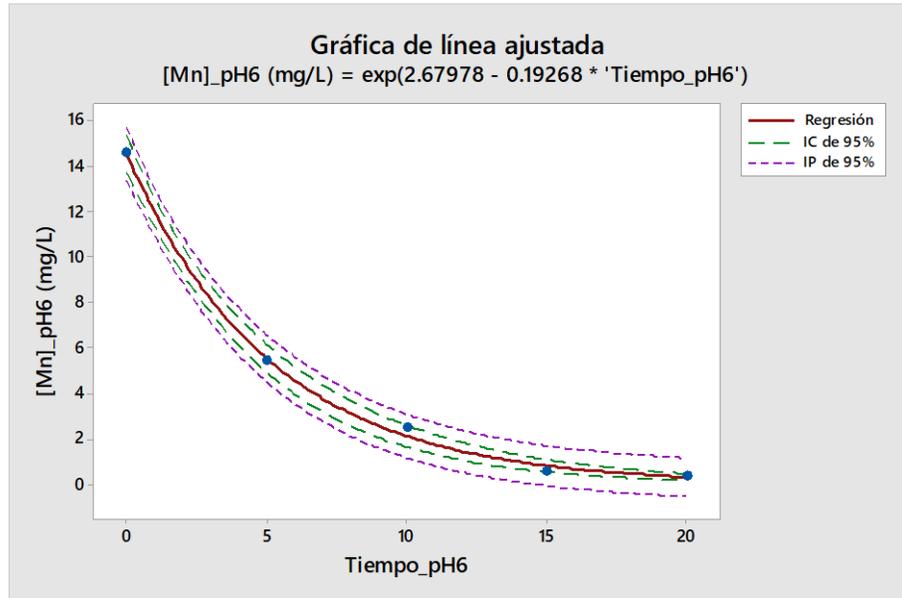


Figura 11. Correlación no lineal ajustada para pH 6.

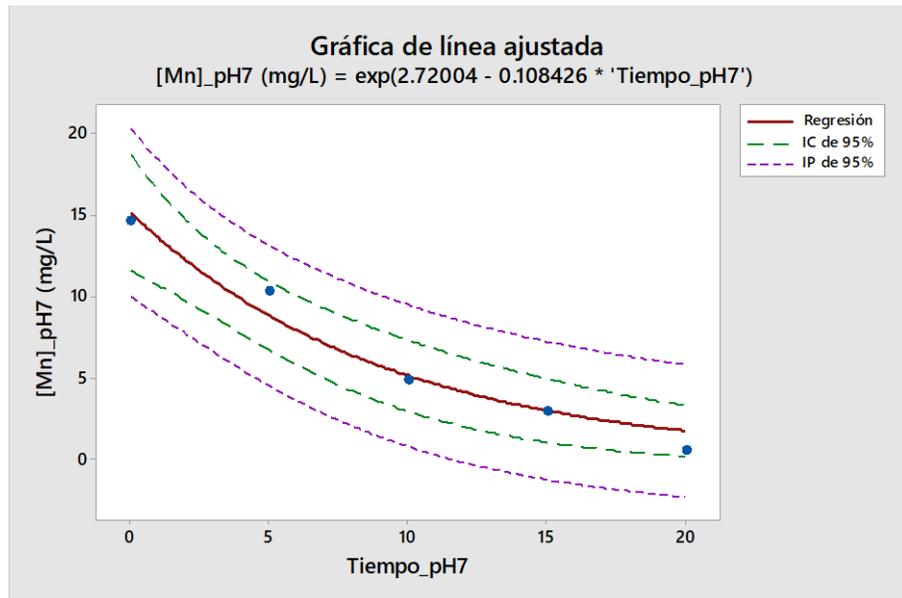


Figura 12. Correlación no lineal ajustada para pH 7.

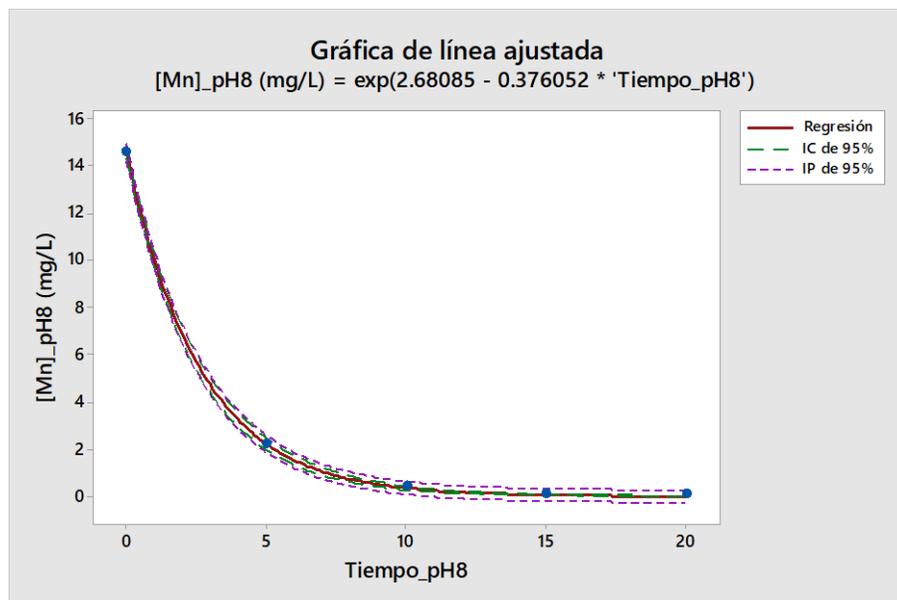


Figura 13. Correlación no lineal ajustada para pH 8.

De acuerdo con las gráficas mostradas en las figuras 11, 12 y 13 se obtienen las ecuaciones de ajuste, y son las siguientes:

Para pH 6:  $[Mn] = e^{(2.67978 - 0.198268 * tiempo)}$

Para pH 7:  $[Mn] = e^{(2.72004 - 0.108426 * tiempo)}$

Para pH 8:  $[Mn] = e^{(2.68085 - 0.376052 * tiempo)}$

En base a dichas ecuaciones, podemos predecir los tiempos en la cual la concentración de Mn estaría por debajo de 0.20 mg/L (Valor del ECA).

Tabla 13. *Tiempos determinados para llegar a la concentración indicada por el estándar de calidad ambiental.*

	Ec.General	pH 6	pH 7	pH 8
Theta 1	2.67989	2.67978	2.72004	2.68085
Theta 2	-0.17598	-0.198268	-0.108429	-0.37052
Mn (mg/L)	0.2	0.2	0.2	0.2
Tiempo (min)	24.4	21.6	39.9	11.6

Fuente: elaboración propia.

De acuerdo con los resultados mostrados en la tabla 13, se puede observar que con los tres pH se logra disminuir el manganeso a las concentraciones de 0.2 mg/L indicados para el estándar de calidad ambiental.

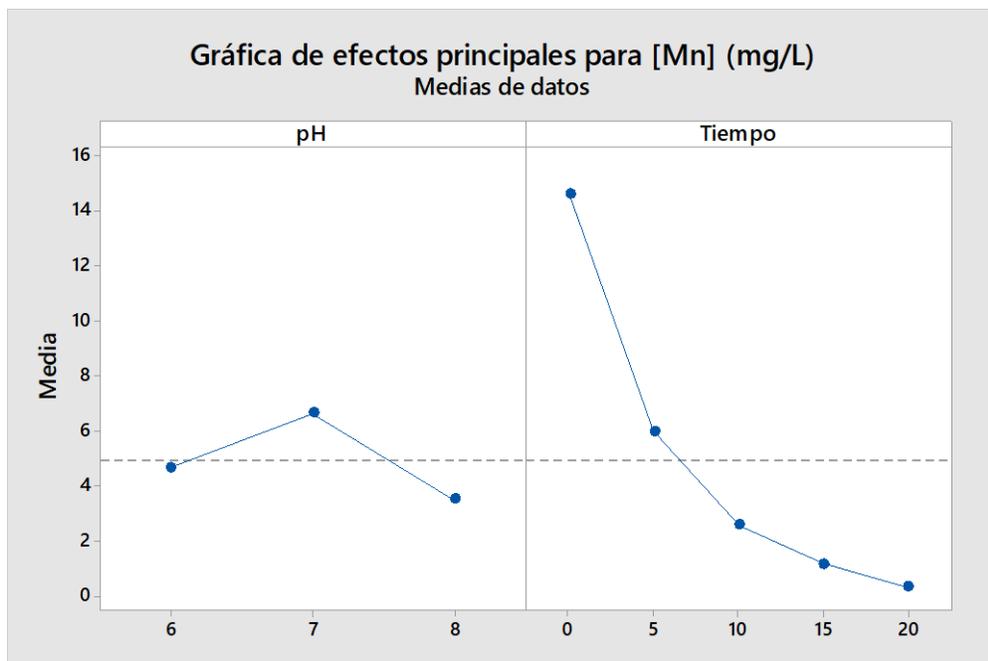
#### **4.4.2. Influencia del pH y el tiempo en la disminución de metales disueltos**

Referente a la disminución de los metales por la aplicación del ozono estaría inferido en base a la disminución de la concentración del manganeso, debido a que es el único de los metales que se encuentra en concentración altas, tal como se determinó en lo descrito del numeral 4.3 del presente informe. Para evaluar la influencia del pH y el tiempo hacemos uso del ANOVA y las gráficas de efectos significativos mediante el minitab 18, la cual se muestra en la siguiente tabla 14.

Tabla 14. *Análisis de Varianza.*

ANOVA anidada: [Mn] (mg/L) vs. pH; Tiempo					
Análisis de varianza de [Mn] (mg/L)					
Fuente	GL	SC	MC	F	P
pH	2	24.919	12.4595	0.348	0.713
Tiempo	12	429.4337	35.7861		
Total	14	454.3527			
Componentes de la varianza					
Fuente	Comp.Var.	% del total	Desv.Est.		
pH	-4.665*	0	0		
Tiempo	35.786	100	5.982		
Total	35.786		5.982		
ANOVA anidada: [Mn] (mg/L) vs. Tiempo; pH					
Análisis de varianza de [Mn] (mg/L)					
Fuente	GL	SC	MC	F	P
Tiempo	4	406.8972	101.7243	21.436	0
pH	10	47.4555	4.7455		
Total	14	454.3527			
Componentes de la varianza					
Fuente	Comp.Var.	% del total	Desv.Est.		
Tiempo	32.326	87.2	5.686		
pH	4.746	12.8	2.178		
Total	37.072		6.089		

Fuente: elaboración propia.



*Figura 14.* Gráfica de efectos significativos.

El valor P para pH es de 0.713, el cual considera que las medias son similares, mientras que para el tiempo el valor P es menor 0.05 indicando que existe un efecto significativo respecto al tiempo, mas no al pH. Al realizar la evaluación de la influencia del pH y el tiempo, podemos ver que la mayor influencia en los cambios es del tiempo, el pH tiene menor influencia en el cambio de concentración del manganeso, esto se comprueba con el ANOVA y la “gráfica de efectos significativos”. Adicionalmente a la prueba de ANOVA, se realizó las pruebas de comparaciones de Tukey y Fisher para ver la diferencia entre los diferentes pH en la cual se aplica el ozono.

Tabla 15. Comparaciones de Tukey y Fisher para verificar la diferencia entre aplicaciones.

Comparaciones por parejas				
Comparaciones por parejas de Tukey: pH				
Agrupar información utilizando el método de Tukey y una confianza de 95%				
pH	N	Media	Agrupación	
7	5	6.614	A	
6	5	4.6724	A	B
8	5	3.4872	B	
<i>Las medias que no comparten una letra son significativamente diferentes.</i>				
Comparaciones por parejas de Fisher: pH				
Agrupar información utilizando el método LSD de Fisher y una confianza de 95%				
pH	N	Media	Agrupación	
7	5	6.614	A	
6	5	4.6724	A	B
8	5	3.4872	B	
<i>Las medias que no comparten una letra son significativamente diferentes.</i>				

Fuente: elaboración propia.

De acuerdo con los resultados mostrados en la tabla 15, se puede ver que al eliminar el factor tiempo (para que no interfiera en la evaluación y analizar de forma específica el factor de pH) hay una diferencia en la aplicación del ozono a diferentes pH, se puede considerar que a pH 8 se puede obtener una mayor remoción que a pH 6 y 7, tanto en la prueba de Tukey como en la de Fisher, tienen una menor media de valores. La aplicación del ozono es más eficiente a un pH 8.

## **4.5. Discusión de resultados**

### **4.5.1. Contrastar si la aplicación del ozono disminuye la concentración de metales disueltos.**

De acuerdo con lo descrito en el numeral 4.4 del presente informe se demuestra que al aplicar ozono en agua con contenido de manganeso (el cual representa a los demás metales) se logra disminuir a concentraciones por debajo de 0.2 mg/L de Mn, el cual es un valor de referencia según el estándar de calidad ambiental. Estas pruebas se complementan al trabajo realizado por Valenzuela, L (2017) en su tesis titulada “Reducción de plomo y silicio en aguas de lavado de gases de una empresa de servicios usando micronanoburbujas de aire-ozono, Lima 2017” que logró disminuir el plomo y silicio desde 32.26 mg/L y 70.49 mg/L hasta 0.088 mg/L y 12.97 mg/L respectivamente, con la aplicación de aire y ozono. En la investigación realizada por Huallanca, Y (2017) titulado: “Reducción de concentración de cadmio en aguas de lavado con RAEE mediante Micronanoburbujas (aire y ozono) del Taller ASCOPE – Cercado de Lima” concluye que el uso de las micronanoburbujas con aire y ozono reduce positivamente la concentración de cadmio en el agua del Taller de Ascope – Cercado de Lima, cuya concentración en la fase inicial fue de 3.251 mg/L, en la fase post del tratamiento de 4 minutos fue de 2.973 mg/L; tratamiento de 8 minutos 3.076 mg/L y el tratamiento de 12 minutos fue 3.082 mg/L. Los resultados de la presenta investigación

ayudaron a determinar la correlación de la disminución del manganeso en función al tiempo para una generación de ozono de 20 g/h en forma constante, dichas correlaciones nos permiten predecir el tiempo necesario para lograr disminuir el manganeso desde 14.6 mg/L hasta una concentración que nos tracemos como objetivo, dicho tiempo varia para cada pH, el mejor aporte de la presente investigación es haber encontrado las ecuaciones de correlación, que representan la cinética de disminución del manganeso la cual se puede utilizar para futuros diseños en los sistemas de tratamiento de aguas ácidas; las correlaciones nos permite determinar el tiempo de residencia de los sistemas de tratamiento.

#### **4.5.2. Contrastar si la aplicación del ozono disminuye la concentración de metales disueltos.**

Referente a la disminución de los metales por la aplicación del ozono estaría inferido en base a la disminución de la concentración del manganeso, debido a que es el único de los metales que se encuentra en concentración altas, tal como se determinó en lo descrito del numeral 4.3 del presente informe.

#### 4.6. Evaluación de la relación óptima de ozono para la oxidación de los metales, así como también el pH y tiempo óptimo.

La cantidad necesaria según estequiometria de la reacción del ozono con el manganeso se determina según la siguiente ecuación:



Para oxidar Mn (54.938mg), necesitamos 48 mg de ozono.

Entonces:  $\text{O}_3 / \text{Mn}^{2+} = 48 / 54.938 = 0.87$  (Relación:  $\text{O}_3 - \text{Mn}$ )

Podemos deducir entonces que para bajar la concentración inicial del Mn a 14.6 mg a 0.20 mg/L, hacemos el siguiente cálculo:

$$\text{O}_3 / 14.4 = 0.87 \rightarrow \text{O}_3 = 12.53 \text{ mg/L.}$$

Para un volumen de 2.5 L necesitamos 31.3 mg.

Entonces los 31.3 mg de ozono que se requiere según la relación estequiométrica, siempre que en el agua el consumo de ozono sea únicamente por el manganeso, sin embargo en las reacciones reales influyen otros factores como son otros metales presentes en el agua, otras sustancias susceptibles a la oxidación, y también la transferencia del ozono del medio acuoso hacia la atmosfera la cual fue establecida por la Ley de Henry<sup>1</sup>, por lo tanto la cantidad de ozono que se requiere es mucho mayor y será el reactivo en exceso<sup>2</sup> en la

---

<sup>1</sup> La Ley de Henry establece que la solubilidad de un gas es proporcional a la presión parcial de dicho gas, dicho coeficiente de proporcionalidad está en función a la actividad de la sustancia y su respectivo potencial químico. (Criado-Sancho, Casas-Vásquez, & Jou, 2013)

<sup>2</sup> Los reactivos en exceso son los reactivos presentes en mayor cantidad que la necesaria para reaccionar con la cantidad de reactivo limitante. (Chang, 2011)

reacción. Para cada pH se puede determinar la cantidad de ozono, debido a que el flujo de generación es 20 g/h, los tiempos determinados para pH 6, 7 y 8 son de 21.6, 39.9 y 11.6 minutos respectivamente, que corresponde a consumo de ozono de 7.211, 13.310 y 3.860 g para cada pH; por lo tanto, la relación de ozono experimental respecto al teórico será de 230, 425 y 123 veces más. Por lo tanto, podemos concluir lo siguiente:

- La cantidad de ozono óptima sería de 123 veces más de lo requerido estequiométricamente.
- En los pH de 6, 7 y 8 se desarrolla la reacción, sin embargo, el mejor pH en donde se desempeña la reacción es a 8.
- El menor tiempo para lograr llegar a un valor de 0.2 mg/L respecto al Mn es de 11.6 minutos.

En general se logra disminuir la concentración del manganeso de 14.6 mg/L a 0.2 mg/L a un pH de 8 y en un tiempo de 11.6 minutos con una generación de ozono de 20 g/h.

#### 4.7. Cálculo del porcentaje de rendimiento de la aplicación de ozono

Sabemos que % de Rendimiento=

$$\frac{\text{concentración inicial} - \text{concentración final}}{\text{Concentración inicial}} \times 100$$

Tenemos concentración inicial de Mn= 14.6 mg/L

- Entonces para pH 6, tenemos una concentración final de 0.362 mg/L

El % de rendimiento será:  $(14.6 - 0.362 / 14.6) \times 100 = 97.52 \%$

- Para pH 7, tenemos una concentración final de 0.48 mg/L

El % de rendimiento será:  $(14.6 - 0.48 / 14.6) \times 100 = 96.71\%$

- Para pH 8, tenemos una concentración final de 0.107 mg/L

El % de rendimiento será:  $(14.6 - 0.107 / 14.6) \times 100 = 99.27\%$ .

## CAPÍTULO V: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

### 5.1. Conclusiones

- Al analizar las concentraciones de los metales en solución del agua del río de Hualgayoc, se pudo determinar que el único metal que no cumple con los estándares de calidad ambiental de categoría 3 es el Mn, por lo tanto ha este metal se evaluó el efecto de la aplicación del ozono.
- La relación óptima para la oxidación de los metales es de 123 veces respecto a su relación estequiométrica.
- Entre los factores de tiempo y pH, el mayor efecto es el tiempo y en segundo lugar es el pH. El tiempo óptimo encontrado para disminuir desde 14.6 mg/L hasta 0.2 mg/L de Mn es de 11.6 minutos a un pH de 8.
- En general se concluye que la aplicación del ozono al agua del río Hualgayoc con contenido de metales en solución disminuye sus concentraciones hasta cumplir con los estándares de calidad ambiental, esto ha sido evaluado al Mn que fue el único metal que sobrepasaba los valores, el cual disminuye desde 14.6 mg/L hasta 0.108 mg/L. El efecto es influenciado por el tiempo y el pH, las condiciones más óptimas son a pH 8 con un tiempo mínimo de 11.6 minutos.

## 5.2. Recomendaciones

- Se recomienda a las autoridades locales de la Provincia de Hualgayoc, implementar una planta de ozonificación para tratar las aguas del río Hualgayoc, para así disminuir la concentración de los metales disueltos y evitar la contaminación de estas.
- Se recomienda a las autoridades de la Facultad de Ingeniería Ambiental y Prevención de Riesgos, apoyar a los alumnos a seguir con las investigaciones en el tratamiento de las aguas del río Hualgayoc.
- Se recomienda hacer investigación para futuras tesis de pregrado: de elementos químicos como: arsénico, mercurio y plomo ya que son metales pesados y causan daños a la salud irreversibles.
- Mencionemos también que el pH para este tipo de agua, categoría 3: riego de vegetales y bebida de animales se encuentra entre 6.5 – 8.5, por lo tanto, las pruebas que hicimos fueron desde: 6 a 8. Recomendamos que no es necesario hacer pruebas por debajo de 6, ni por encima de 8, ya que sería irracional vertir agua al medio ambiente con estos valores, ya que perjudicarían al medio ambiente.

## LISTA DE REFERENCIAS

- ANA (Autoridad Nacional del Agua, Perú). 2016. *Protocolo Nacional para el monitoreo de la calidad de los Recursos Hídricos Superficiales*. Lima - Perú.
- Agudelo, R. (2005). *El agua, recurso estratégico del siglo XXI*. Revista Facultad Nacional de Salud Pública Vol. 23 No. 1.
- Ahmad, M. (2012). *Iron and Manganese removal*. (Master Thesis). University of Oslo, Oslo, Noruega.
- Arce, O. (2000). *Metales pesados presentes en el agua*. Manual de prácticas. Universidad Mayor de San Simón. Bolivia
- Barenys, M; Boix, N; Farran-Codina A, Palma-Linares, I; Montserrat, R; Curto, A; Gomez-Catalan, J; Ortiz, P; Deza, N; Llobet, J. (2014). *Heavy metal and metalloids intake risk assessment in the diet of a rural population living near a gold mine in the Peruvian Andes (Cajamarca)* Food and Chemical Toxicology.
- Blanco, A, Gutiérrez, D, Jiménez de Blas O, Guervós, S y Manzano, B. *Estudio de los niveles de plomo, cadmio, zinc y arsénico en aguas de la provincia de Salamanca*. Revista Española de Salud Pública 1998: 72: 53-65
- Carrasco, L. (2013). *Química Experimental*. Lima: macro .
- Castro, I. (1976). *Diseño experimental sin estadística*. México, Edit. Trillas.
- CEPIS. (2004). *Programa de monitoreo del agua*. Lima-Perú.
- Cervantes C., Moreno R. (1999). *Contaminación ambiental por metales pesados impacto en los seres vivos*. AGT, Editor, S.A. Mexico.

- Chang, R (2010) *Química*. México: Mac Graw Hill.
- Cornejo, A. (2003). *Impacto del Cianuro, el Niquel y el Zinc en la salud humana*. Lima – Perú.
- Dana, J (1996) *Manual de mineralogía*. México, Reverte.
- DIGESA (2011). *Evaluación de la calidad sanitaria de las aguas del río Llaucano y tributarios*. Cajamarca –Perú.
- Ereno, D. (2013). *Ozono para tratar residuos de minería* . *Pesquisa FAPESP*, 2-3.
- García, J., Maroto, F. (2017). *Interpretación de resultados estadísticos*. Medicina intensiva. P.10
- Graza, F y Quispe, R. (2015). *Determinación de Pb, Cd y As en aguas del río santa en el pasivo minero ambiental de Recuay, Ticapampa-Ancash*.
- Griet Eeckhout, S. (2006). *Mercure: une solution qui nous empoisonne*. *Laboratorio Europeo de Radiación del Sincrotrón en Grenoble, Francia*.  
<http://www.scienceinschool.org/2007/issue7/mercury/Spanish>
- Harries, C. (1912). *Über die Einwirkung des Ozons auf organische Verbindungen*.
- Herrera, H. P. (2013). *Los pasivos mineros ambientales y los conflictos sociales en Hualgayoc-Cajamarca*. Perú.
- Huanacuni, V., Chanduvi, W., Rioja y Zamora, M. (2016). *Análisis de metales pesados en el ecosistema de la Cuenca llaucano por la actividad minera en la provincia de Hualgayoc –Cajamarca 2016*.
- Huallanca, Y. (2017). *Reducción de concentración de Cadmio en aguas de lavado con RAEE mediante Micronanoburbujas (aire y ozono) del Taller ASCOPE –*

*Cercado de Lima. Lima. Obtenido de*

<http://repositorio.ucv.edu.pe/handle/UCV/3542>.

Huallanca, Y. (2017). *Reducción de concentración de Cadmio en aguas de lavado con RAEE mediante Micronanoburbujas (aire y ozono) del Taller ASCOPE – Cercado de Lima. Lima. Obtenido de*  
<http://repositorio.ucv.edu.pe/handle/UCV/3542>.

Lackoviv, M y Katner, A (2009). *Metal fume: a review of the literature and cases reported to the Louisiana poison control center. The Journal of the Louisiana State Medical Society: official organ of the Louisiana State Medical Society.*

López, L. (2004). *Población Muestra y Muestreo. Scielo, 2-3.*

Jingquan, L. (2014). *Generalidad Y Generación Electroquímica De Ozono.*(Tesis de grado).Universidad Nacional de Ingeniería, Lima, Perú.

Murillo, W. (2008). *La investigación científica.* Consultado el 18 de abril de 2008  
De <http://www.monografias.com/trabajos15/invest-científica/investcientífica.shtm>

Popper (1998). *La lógica de la investigación científica.* Madrid. Tecnos

Maja, O. (2016). *Contaminación de agua por metales producto de la actividad minera metálica en el río Zaña, Chiclayo- Lambayeque – Junio 2014- Abril 2015.*  
(Tesis). Universidad de Lambayeque, Chiclayo, Perú.

Reckhow, D., Knocke, W. Kearne, MJ y Parks CA. (2012). *Oxidation of Iron and Manganese by Ozone.* The Journal of the International Ozone Association.V-13,  
675-695.

Rice,R y Netzer A. (2010). *Handbook of ozone technology and applications.* Ann Arbor  
Science.

P. Roccaro, C. Barone, G. Mancini, F.G.A. Vagliasindi "*Removal of manganese*

- from water supplies intended for human consumption: a case study."*  
Desalination. (2007). Desalination. 205-215.
- Rojas, R. (1996) *El proceso de la investigación científica*
- Rosas, H. (2001) *Estudio de la contaminación por metales pesados en la cuenca del Llobregat*. Tesis Doctoral, Universitat Politècnica de Catalunya. Barcelona.
- Sabino, C (1996). *Proceso de investigación*. Ed. panapo. caracas
- Vargas, Z. (2009) *investigación aplicada: una forma de conocer las realidades con evidencia científica*.
- Valenzuela, L. (2017). "Reducción de plomo y silicio en aguas de lavado de gases de una empresa de servicios usando Micronanoburbujas de aire-ozono, Lima 2017". *Lim*. Obtenido de <http://repositorio.ucv.edu.pe/handle/UCV/3610>.
- Vértiz, V. M. (2008). *Uso de Ozono para. Tecnología*, 7-8.
- Vega, S y Reynaga, J. (1990) *Evaluación epidemiológica de riesgos causados por agentes químicos ambientales*. México. Editorial Noriega Limusa.
- Whitten, K., Davis, R., Peck, M y Stanley, G. (2015). *Química general*. México. Cengage Learning.
- Yacoub, C., Pérez, A y Millares, Núria. *Análisis de impactos ambientales en la cuenca del Jequetepeque*, Perú, producidos por actividades mineras. II congreso UPC sostenible 2015.
- Zirena, J. (1991). *Elementos Plásticos y Oligo Elementos UNC*. Cajamarca – Perú.

## ANEXOS

### Anexo 1. Panel fotográfico



**Imagen 1.** Caracterización del punto de muestreo.



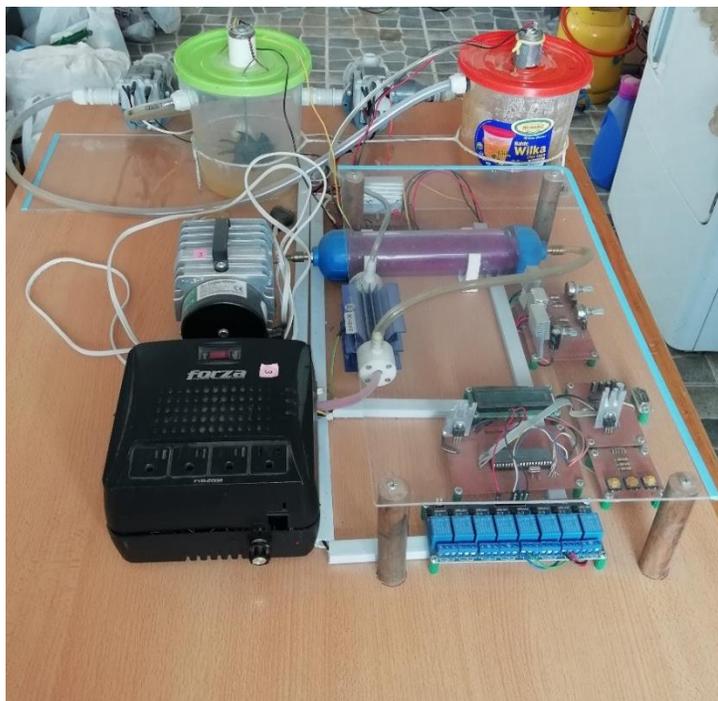
**Imagen 2.** Equipo multiparámetro para la medición in situ de pH.



**Imagen 3.** Verificación y ajuste de equipo para medición de pH.



**Imagen 4.** Toma y preservación de la muestras.



**Imagen 5.** Equipo de ozonización.



**Imagen 6.** Acondicionando el equipo de ozonización.



**Imagen 7.** Muestra para lecturas a pH 6 y tiempos de 5, 10, 15 y 20 minutos, monitoreadas a la salida del circuito de ozonización.



**Imagen 8.** Muestra para lecturas a pH 7 y tiempos de 5, 10, 15 y 20 minutos, monitoreadas a la salida del circuito de ozonización.



**Imagen 9.** Muestra para lecturas a pH 8 y tiempos de 5, 10, 15 y 20 minutos, monitoreadas a la salida del circuito de ozonización.

## Anexo 2. Informe inicial del punto de monitoreo – Laboratorio NKAP SRL



LABORATORIO DE ENSAYO  
ACREDITADO POR EL ORGANISMO  
PERUANO DE ACREDITACIÓN  
INACAL-DA CON REGISTRO No LE  
026

### INFORME DE ENSAYO

C-761-G217-UPAGU

Pág. 01 de 03

CLIENTE : UNIVERSIDAD PRIVADA ANTONIO GUILLERMO URRELO  
 ATENCIÓN : JESUS ZEGARRA CORDOVA  
 MÉTODOS DE ENSAYO : Químico  
 ITEM DE ENSAYO : Agua Superficial  
 PRESENTACIÓN DE LOS ITEM DE ENSAYO : Envases de plástico  
 Preservadas  
 MUESTREO : Muestras tomadas por el cliente  
 LUGAR Y FECHAS DE RECEPCIÓN : Cajamarca, 31 de julio de 2017  
 Hora: 14:00  
 LUGAR Y FECHAS DE EJECUCIÓN : Cajamarca, 31 de julio de 2017

#### MÉTODO DE ENSAYO

Parámetro	Norma-Método	Límite de detección	Tiempo máximo de conservación recomendado (días)
Metales Totales por ICP**	EPA 200.7, Rev 4.4, 1994	Ag <0.0005, Al <0.0005, As <0.0005, Ba <0.0005, Be <0.0005, Bi <0.0100, Ca <0.0118, Cd <0.0027, Co <0.0054, Cr <0.0071, Cu <0.0050, Fe <0.0044, Fe <0.0005, Hg <0.0005, K <0.0100, Li <0.0006, Mg <0.0140, Mn <0.0070, Mo <0.0045, Ni <0.0005, Na <0.0171, Ni <0.0005, P <0.0171, Pb <0.0047, Sb <0.0050, Si <0.0125, Sn <0.0070, Sr <0.0100, Ti <0.0005, V <0.0070, Zn <0.0005 (ppb, L)	30d

Sello	Fecha Emisión	Jefe Administrativo	Jefe del Laboratorio de Química
	21/08/2017	 Alexandra Aurazo Rodríguez	 Edder Neyra Jaico CIP 147028

LOS RESULTADOS DE LOS ENSAYOS CORRESPONDEN A LOS ENSAYOS SOLICITADOS PARA LOS ITEM DE ENSAYO RECIBIDOS.

PROHIBIDA LA REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL SIN EL PERMISO DE NKAP SRL.

\*Todos los resultados de los ensayos son considerados confidenciales.

\*Las muestras serán eliminadas al término del tiempo de almacenamiento, salvo requerimiento expreso del cliente.

\* Informes de ensayo no deben ser utilizados como una certificación de conformidad con normas de producto o como certificado del sistema de calidad de la entidad que lo produce.

Sede Principal: Av. 02 Mz. C, Lot. 5 Parque Industrial - La Esperanza - Trujillo - Perú  
 Sede Cajamarca: Libre Para Calle G217-UPAGU Real - Cajamarca - Perú  
 Central 51 - 44 - 280426  
 www.nkap.com.pe

### INFORME DE ENSAYO

C-761-G217-UPAGU

Pág. 02 de 03

Código de Laboratorio			C-761-01
Código de Cliente			TRH
Ítem de Ensayo			Agua Superficial
Fecha de Muestreo			31/07/2017
Hora de Muestreo			07:48
Parámetro	Símbolo	Unidad	
<b>Metales Totales por ICP**</b>			
Aluminio	Al	mg/L	9.506
Antimonio	Sb	mg/L	<0.0052
Arsénico	As	mg/L	<0.0065
Bario	Ba	mg/L	<0.0066
Berilio	Be	mg/L	<0.0057
Boro	B	mg/L	0.233
Cadmio	Cd	mg/L	0.126
Calcio	Ca	mg/L	187.1
Cerio	Ce	mg/L	<0.0054
Cobalto	Co	mg/L	<0.0071
Cobre	Cu	mg/L	0.600
Cromo	Cr	mg/L	<0.0056
Estaño	Sn	mg/L	0.070
Estroncio	Sr	mg/L	0.403
Fósforo	P	mg/L	0.684
Hierro	Fe	mg/L	17.77
Litio	Li	mg/L	<0.0098
Magnesio	Mg	mg/L	18.37
Manganeso	Mn	mg/L	32.06
Mercurio	Hg	mg/L	<0.0008
Molibdeno	Mo	mg/L	<0.0048
Níquel	Ni	mg/L	<0.0050
Plata	Ag	mg/L	<0.0093
Plomo	Pb	mg/L	<0.0047
Potasio	K	mg/L	4.891
Selenio	Se	mg/L	<0.0069
Sodio	Na	mg/L	5.907
Talio	Tl	mg/L	<0.0078
Titanio	Ti	mg/L	<0.0090
Vanadio	V	mg/L	<0.0075
Zinc	Zn	mg/L	19.95

(\*\*) Los Métodos indicados han sido ejecutados en la sede Trujillo



**INFORME DE ENSAYO**

C-761-G217-UPAGU

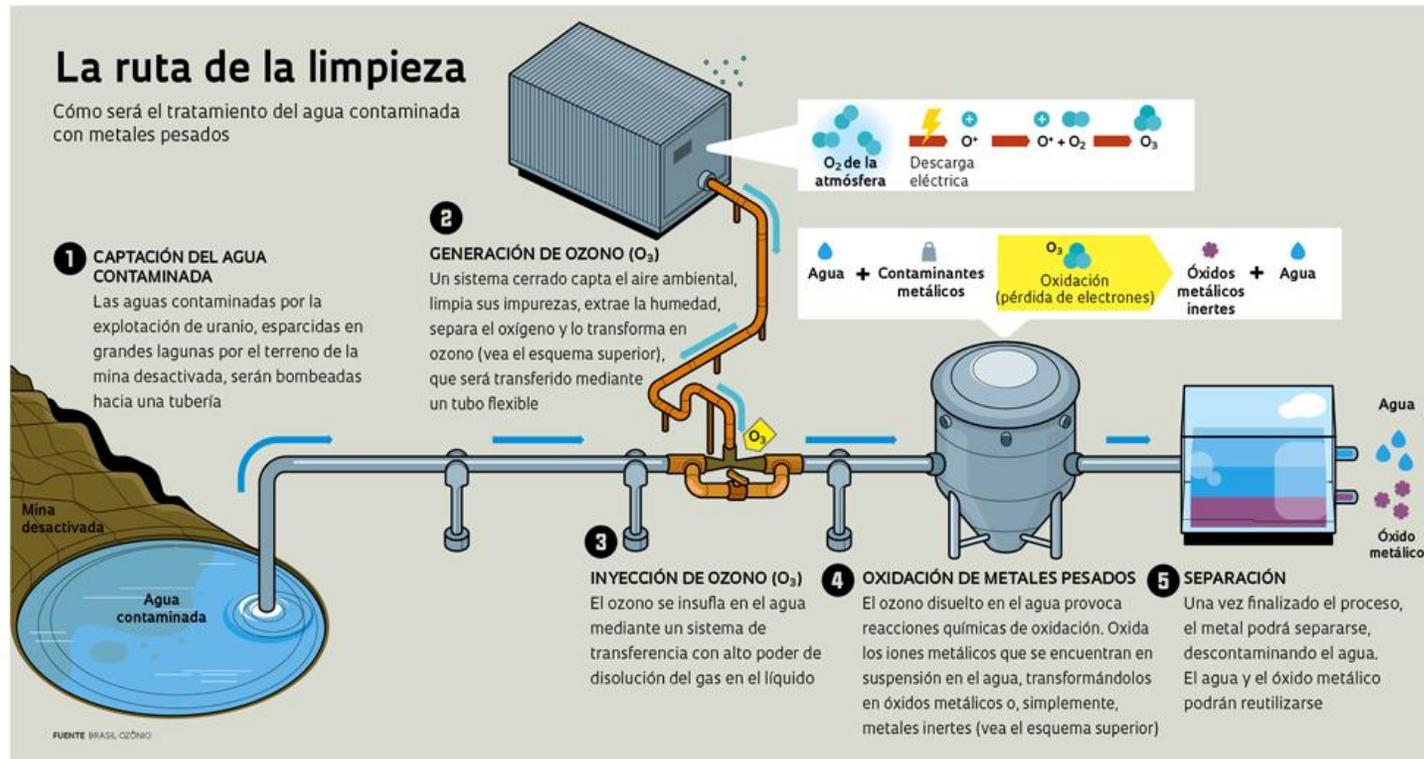
Pág. 03 de 03

Código de Laboratorio			C-761-01
Código de Cliente			TRH
Item de Ensayo			Agua Superficial
Fecha de Muestreo			31/07/2017
Hora de Muestreo			07:48
Parámetro	Símbolo	Unidad	
<b>Metales Disueltos por ICP**</b>			
Aluminio	Al	mg/L	2.718
Antimonio	Sb	mg/L	<0.0052
Arsénico	As	mg/L	<0.0065
Bario	Ba	mg/L	<0.0066
Berilio	Be	mg/L	<0.0057
Boro	B	mg/L	<0.0102
Cadmio	Cd	mg/L	0.106
Calcio	Ca	mg/L	156.0
Cerio	Ce	mg/L	<0.0054
Cobalto	Co	mg/L	<0.0071
Cobre	Cu	mg/L	0.156
Cromo	Cr	mg/L	<0.0056
Estaño	Sn	mg/L	<0.0079
Estroncio	Sr	mg/L	0.334
Fósforo	P	mg/L	0.225
Hierro	Fe	mg/L	5.675
Litio	Li	mg/L	<0.0098
Magnesio	Mg	mg/L	15.58
Manganeso	Mn	mg/L	26.73
Mercurio	Hg	mg/L	<0.0008
Molibdeno	Mo	mg/L	<0.0048
Niquel	Ni	mg/L	<0.0050
Plata	Ag	mg/L	<0.0093
Plomo	Pb	mg/L	<0.0047
Potasio	K	mg/L	4.139
Selenio	Se	mg/L	<0.0069
Sodio	Na	mg/L	5.289
Talio	Tl	mg/L	<0.0078
Titanio	Ti	mg/L	<0.0090
Vanadio	V	mg/L	<0.0075
Zinc	Zn	mg/L	19.09

(\*\*) Los Métodos indicados han sido ejecutados en la sede Trujillo



### Anexo 3. La ruta de la limpieza. Ozonización. Tomado de Brasil Ozono



Fuente: (Ereno, 2013).

#### **Anexo 4. Comparación propiedades de cloro y ozono en agua.**

Acción en agua	Cloro	Ozono
Potencial de oxidación(V)	1.36	2.07
Desinfección en bacterias y virus	Moderado	Excelente
Amigable con el ambiente	No	Si
Remoción de color	Bueno	Excelente
Cancerígeno	Si	No
Oxidación en orgánicos	Moderado	Excelente
Micro floculación	No	Moderado
Efecto de pH	Variable	Mínimo
Vida media en agua	2-3 horas	20 minutos
Toxicidad en la operación		
Toxicidad en la piel	Alta	Moderada

Fuente: (jingquan, 2014)