

UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA DE LA SELVA
FACULTAD DE RECURSOS NATURALES RENOVABLES
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERIA AMBIENTAL



**INFLUENCIA DE LA CALIDAD Y CANTIDAD DE CONTAMINANTES DEL AGUA EN SU
DESINFECCIÓN A ESCALA LABORATORIO**

Tesis

Para optar el título de:

INGENIERO AMBIENTAL

PRESENTADO POR:

GASPAR AYROS MERLY ROSA

Tingo María – Perú.

2023



UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA DE LA SELVA
Tingo María- Perú
FACULTAD DE RECURSOS NATURALES RENOVABLES



ACTA DE SUSTENTACION DE TESIS N° 090-2023-FRNR-UNAS

Los que suscriben, Miembros del Jurado de Tesis, reunidos con fecha 03 de octubre del 2023, a horas 10:00 a.m. de la Escuela Profesional de Ingeniería Ambiental de la Facultad de Recursos Naturales Renovables para calificar la tesis titulada:

**“INFLUENCIA DE LA CALIDAD Y CANTIDAD DE CONTAMINANTES
DEL AGUA EN SU DESINFECCIÓN A ESCALA LABORATORIO”.**

Presentado por la Bachiller: **GASPAR AYROS, Merly Rosa**, después de haber escuchado la sustentación y las respuestas a las interrogantes formuladas por el Jurado, se declara **APROBADO** con el calificativo de **“BUENA”**

En consecuencia, el sustentante queda apto para optar el Título Profesional de **INGENIERO AMBIENTAL** que será aprobado por el Consejo de Facultad, Tramitándolo al Consejo Universitario para el otorgamiento del Título Correspondiente.

Tingo María, 13 de octubre de 2023


Ing. M. Sc. JOSÉ ANTONIO BLAS MATIENZO
PRESIDENTE


Ing. M. Sc. FRANKLIN DIONISIO MONTALVO
MIEMBRO


Dr. CÉSAR SAMUEL LÓPEZ LÓPEZ
MIEMBRO




Ing. Mg. Sc. JOSÉ LUIS PAREDES SALAZAR
ASESOR



UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA DE LA SELVA
DIRECCIÓN DE GESTIÓN DE INVESTIGACIÓN - DGI
REPOSITORIO INSTITUCIONAL - UNAS

Correo: repositorio@unas.edu.pe



“Año de la unidad, la paz y el desarrollo”

CERTIFICADO DE SIMILITUD T.I. N° 296 - 2023 - CS-RIDUNAS

El Director de la Dirección de Gestión de Investigación de la Universidad Nacional Agraria de la Selva, quien suscribe,

CERTIFICA QUE:

El Trabajo de Investigación; aprobó el proceso de revisión a través del software TURNITIN, evidenciándose en el informe de originalidad un índice de similitud no mayor del 25% (Art. 3° - Resolución N° 466-2019-CU-R-UNAS).

Programa de Estudio:

Ingeniería Ambiental

Tipo de documento:

Tesis	X	Trabajo de investigación
-------	---	--------------------------

TÍTULO	AUTOR	PORCENTAJE DE SIMILITUD
INFLUENCIA DE LA CALIDAD Y CANTIDAD DE CONTAMINANTES DEL AGUA EN SU DESINFECCIÓN A ESCALA LABORATORIO	GASPAR AYROS MERLY ROSA	14 % Catorce

Tingo María, 30 de octubre de 2023


UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA DE LA SELVA
DIRECCIÓN DE GESTIÓN DE LA INVESTIGACIÓN
Dr. Tomas Menacho Mallqui
DIRECTOR

C.C. Archivo

UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA DE LA SELVA
FACULTAD DE RECURSOS NATURALES RENOVABLES
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERIA AMBIENTAL



**INFLUENCIA DE LA CALIDAD Y CANTIDAD DE CONTAMINANTES DEL AGUA
EN SU DESINFECCIÓN A ESCALA LABORATORIO**

Autor	: Gaspar Ayros, Merly Rosa
Asesor	: Ing. Msc. Paredes Salazar José Luis.
Programa de investigación	: Tecnologías para reducir la contaminación
Línea de investigación	: Ciencias y Tecnologías Ambientales
Eje temático	: Reducción de la contaminación de agua
Lugar de ejecución	: Universidad Nacional Agraria de la Selva
Duración	: 6 meses
Financiamiento	: S/. 3 445,00

Tingo María – Perú, 2023

VICERRECTORADO DE INVESTIGACION
OFICINA DE INVESTIGACION



UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA DE LA SELVA

REGISTRO DE TESIS PARA LA OBTENCION DEL
TITULO UNIVERSITARIO, INVESTIGACIÓN DOCENTE
Y TESISTA

(Resol. N° 113-2019-CU-R-UNAS)

I. Datos Generales de Pregrado

Universidad	:	Universidad Nacional Agraria de la Selva.
Facultad	:	Facultad de Recursos Naturales Renovables
Título de tesis	:	Influencia de la calidad y cantidad de contaminantes del agua en su desinfección a escala laboratorio
Autor	:	Gaspar Ayros, Merly Rosa.
Asesor de tesis	:	Ing. Mg. Sc. Paredes Salazar, José Luis
Escuela Profesional	:	Ingeniería Ambiental.
Programa de investigación	:	Tecnologías para reducir la contaminación.
Línea(s) de investigación	:	Ciencia y Tecnología Ambientales.
Eje Temático	:	Reducción de la contaminación del agua.
Lugar de ejecución	:	Universidad Nacional Agraria de la Selva
Duración	:	Inicio : Julio 2022 Término : Enero 2023
Financiamiento	:	FEDU : S/0.00 Propio : S/3,445.00 Otros : S/.0.00

Tingo María, Perú, agosto 2023.

A handwritten signature in blue ink, appearing to read 'Merly Rosa'.

Gaspar Ayros, Merly Rosa
Tesista

A handwritten signature in blue ink, appearing to read 'Paredes Salazar'.

Ing.Mg.Sc. Paredes Salazar, José Luis
Asesor

DEDICATORIA

Les dedico este presente trabajo de investigación a mi querida madre Zenayda y a mis queridos tíos Rosinda y Abraham por su gran comprensión que tuvieron y que me encaminaron a culminar mis estudios superiores, son mi motor y motivo para lograr mis objetivos en esta vida.

AGRADECIMIENTO

A Dios por guiarme en nuestra etapa de formación de profesionales, por permitir que nuestras decisiones sean las adecuadas y por acompañarnos todos los días de nuestras vidas.

A mi madre, mis queridos tíos por su apoyo incondicional, por sus sabios consejos; quienes a su vez son nuestro principal motivo para superarnos.

A los Docentes de la facultad de Recursos Naturales por sus enseñanzas y por compartir con nosotros sus experiencias y conocimientos como profesionales

ÍNDICE

	Página
I. INTRODUCCIÓN	1
1.1. Objetivos	2
II. REVISIÓN DE LITERATURA.....	3
2.1. Antecedentes	3
2.2. Contaminación del agua	4
2.3. Contaminantes del agua.....	5
2.4. Proceso de desinfección de agua contaminada por cloración	5
2.5. El Potencial Redox	8
2.6. Reacciones óxido- reducción en el agua contaminada.....	8
2.7. Aplicación del potencial redox como indicador de tratamiento de aguas.....	9
III. MATERIALES Y MÉTODOS	11
3.1. Lugar de ejecución	11
3.1.1. Características climáticas	11
3.2. Materiales y Equipos.....	12
3.3. Criterios de estudio.....	12
3.3.1. Nivel de investigación	12
3.3.2. Tipo de investigación	12
3.3.3. Método de investigación.....	12
3.3.4. Diseño de investigación.....	13
3.3.5. Variables de investigación.....	13
3.3.6. Análisis estadístico	14
3.4. Metodología.....	14

3.4.1. Determinación de la eficiencia de un proceso de desinfección por cloración en un agua contaminada con materia orgánica y metales pesados a dos concentraciones diferentes.....	14
3.4.2. Determinación de la eficiencia de un proceso de desinfección por cloración en un agua contaminada con materia orgánica y compuestos nitrogenados a dos concentraciones diferentes.....	16
3.4.3. Determinación de la eficiencia de un proceso de desinfección por cloración en un agua contaminada con materia orgánica con presencia de metales pesados y compuestos nitrogenados a dos concentraciones diferentes.....	16
IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	18
4.1. Determinación de la eficiencia de un proceso de desinfección por cloración en un agua contaminada con materia orgánica y metales pesados a dos concentraciones diferentes.	18
4.2. Determinación de la eficiencia de un proceso de desinfección por cloración en un agua contaminada con materia orgánica y compuestos nitrogenados a dos concentraciones diferentes.	23
4.3. Determinación de la eficiencia de un proceso de desinfección por cloración en un agua contaminada con materia orgánica con presencia de metales pesados y compuestos nitrogenados a dos concentraciones diferentes.	26
4.4. Análisis estadístico	30
V. CONCLUSIONES	32
VI. PROPUESTAS A FUTURO	33
VII. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	34
ANEXOS.....	38

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla	Página
1. Niveles de las variables	13
2. Matriz de diseño tipo factorial completo 3^2	13
3. Potencial redox y coliformes totales antes y después de la adición de cloro al agua con materia orgánica presencia de plomo y cadmio.	18
4. Variación del potencial redox y coliformes totales por efecto de la cloración del agua con materia orgánica presencia de plomo y cadmio.	21
5. Potencial redox y coliformes totales antes y después de la adición de cloro al agua con materia orgánica y presencia de nitrato y fosfato.	23
6. Variación del potencial redox y coliformes totales por efecto de la cloración del agua con materia orgánica y presencia de nitrato y fosfato.	24
7. Potencial redox y coliformes totales antes y después de la adición de cloro al agua con materia orgánica presencia de plomo, cadmio, nitrato y fosfato.	26
8. Variación del potencial redox y coliformes totales por efecto de la cloración del agua con materia orgánica y presencia de nitrato, fosfato, plomo y cadmio.	28
9. Datos experimentales en los tratamientos de cloración en aguas contaminadas con plomo y cadmio	50
10. Datos experimentales en los tratamientos de cloración en aguas contaminadas con nitrato y fosfato	51
11. Datos experimentales en los tratamientos de cloración en aguas contaminadas con plomo, cadmio, nitrato y fosfato	52

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura	Página
1. Formación de ácido hipocloroso y ion clorito respecto a variaciones de pH.....	7
2. Ubicación geográfica de la Universidad Nacional Agraria de la Selva.	11
3. Variación del cloro libre residual a diferentes concentraciones de plomo y cadmio.	22
4. Incremento de potencial redox y eliminación de coliformes totales a diferentes concentraciones de plomo y cadmio.....	22
5. Variación del cloro libre residual a diferentes concentraciones de nitrato y fosfato.....	25
6. Incremento de potencial redox y eliminación de coliformes totales a diferentes concentraciones de nitrato y fosfato.	26
7. Variación del cloro libre residual a diferentes concentraciones de nitrato y fosfato, plomo y cadmio.	29
8. Incremento de potencial redox y eliminación de coliformes totales a diferentes concentraciones de nitrato y fosfato , plomo y cadmio.	30
9. Punto de obtención de la muestra del agua residual para la investigación.....	38
10. Mapa referencial del punto de obtención de muestra: Desembocadura de la Quebrada del Águila al Río Huallaga.	38
11. Filtración del agua residual doméstica utilizada en la investigación.	39
12. Adición de la dosis de la solución de hipoclorito de sodio.	39
13. Adición de los contaminantes de plomo y cadmio al agua residual.....	40
14. Solución de la solución de hipoclorito de sodio.....	40
15. Cloración del agua contaminada con plomo y cadmio a diferentes concentraciones.	41
16. Cloración del agua contaminada con nitrato y fosfato a diferentes concentraciones.....	41
17. Aspecto del agua después los 30 minutos de la adición de cloro.....	42
18. Medición del peso para la preparación de la solución desinfectante	42
19. Adición del volumen exacto de hipoclorito de sodio	43
20. Medición del agua residual doméstica de la investigación.	43
21. Preparación del agua residual diluida para la investigación.....	44

22. Preparación del agua residual con adición de plomo y cadmio de la investigación.....	44
23. Kit de medición de cloro libre residual.	45
24. Soluciones patrón de plomo y cadmio utilizados en la investigación.	45
25. Toma de muestras después de la cloración para análisis de coliformes totales.	46
26. edición del potencial redox de las unidades experimentales.	46
27. Medición del cloro libre residual en las unidades experimentales.	47
28. Adición de reactivos para la medición del cloro libre residual por colorimetría.	47
29. Muestras tomadas para el análisis microbiológico.....	48
30. Preparación y desarrollo del análisis microbiológico.....	48
31. Visualización de los efectos en los análisis de coliformes totales.....	49
32. Resultados en los análisis para determinación de coliformes totales.	49

RESUMEN

Esta investigación se desarrolló para determinar, si la presencia de plomo, cadmio, nitrato y fosfato influyen en la eficiencia de la desinfección de un agua mediante cloración. El trabajo fue realizado a nivel de laboratorio, para lo cual se prepararon las unidades experimentales a partir de un agua residual doméstica diluida al 10% v/v, de la cual se tomaron volúmenes de 1L, y se adicionaron los contaminantes plomo, cadmio y nitrato, fosfato a concentraciones de 1ppm y 5ppm, procediéndose a medir el potencial redox y la concentración de coliformes totales. Posteriormente se realizó la cloración de cada unidad de estudio utilizando una solución hipoclorito de sodio a 5ppm de concentración, con un tiempo de contacto de 30 minutos. Al término del tiempo establecido, se midió el potencial redox, el cloro libre residual y la concentración de coliformes totales. Los resultados indicaron que el plomo y el ion fosfato son contaminantes que tienden a reducir la eficiencia de la desinfección y este efecto está relacionado con menores valores de potencial redox y mayor concentración de coliformes totales. Finalmente, en la cloración en presencia de plomo, cadmio, nitrato y fosfato simultáneamente, el potencial redox es mayor cuando menor es la concentración de los contaminantes, para este caso la eficiencia de la desinfección se vio afectada negativamente en las dos concentraciones de contaminantes. El análisis de la varianza de potencial redox y coliformes totales en presencia de plomo y cadmio, nitrato y fosfato, con un test de Duncan con un 95% de confiabilidad determinaron que, estadísticamente no existe diferencia significativa en el potencial redox cuando la concentración de plomo y cadmio son iguales, y en presencia de nitrato y fosfato, la concentración de coliformes totales después de la cloración son estadísticamente diferentes, así también, en una cloración en presencia de plomo, cadmio, nitrato y fosfato, tanto el potencial redox como los coliformes totales antes y después de la cloración son estadísticamente diferentes en todas las concentraciones de contaminantes evaluadas.

Palabras claves: plomo y cadmio, nitrato y fosfato, desinfección, potencial redox, cloración

The Influence of the Quality and Quantity of Contaminants in Water for Its Disinfection on a Laboratory Scale

ABSTRACT

This research was carried out to determine if the presence of lead, cadmium, nitrate, and phosphate influenced the efficiency of the disinfection of water through chlorination. The work was done at a laboratory level, for which the experimental units were prepared from domestic waste water, diluted at 10% v/v. From this, 1L volumes were taken, to which lead, cadmium, nitrate, and phosphate contaminants were added at concentrations of 1ppm and 5ppm. Next, the redox potential and total coliform concentration were measured. Later, the chlorination was done for each unit in study, using a sodium hypochlorite solution at a concentration of 5 ppm, for a contact time of thirty minutes. At the end of the established time, the redox potential, residual free chlorine, and total coliform concentration were measured. The results indicated that the lead and the phosphate ion were contaminants which tended to reduce the efficiency of the disinfection, and this effect was related, in lesser values, to the redox potential and a greater concentration of total coliforms. Finally, with the chlorination in the presence of lead, cadmium, nitrate, and phosphate simultaneously, the redox potential was greater when there was a lesser concentration of the contaminants. In this case, the efficiency of the disinfection was negatively affected with the two concentrations of contaminants. From the variance analysis of the redox potential and total coliforms in the presence of lead and cadmium, [and] nitrate and phosphate, done with the Duncan test at a trustworthiness of 95%, [it was found] that, statistically, no significant difference existed for the redox potential when the concentration of lead and cadmium were the same, and in the presence of nitrate and phosphate, the concentration of total coliforms after the chlorination were statistically different. Likewise, for the chlorination in the presence of lead, cadmium, nitrate, and phosphate, the redox potential, as much as the total coliforms, before and after chlorination were statistically different for all of the concentrations of contaminants that were evaluated.

Keywords: lead , cadmium, nitrate, phosphate, disinfection, redox potential, chlorination.

I. INTRODUCCIÓN

El agua es un recurso vital para la vida del hombre, sin embargo, su consumo se ve limitado por los niveles de contaminación que se presentan de manera natural o por el uso de este recurso en actividades antrópicas, que generan la inserción de contaminantes orgánicos e inorgánicos, muchos de los cuales, finalmente son disueltos y otros suspendidos en el seno acuoso.

Para hacer posible el uso del agua para consumo humano, es necesario someter el agua a una depuración de contaminantes y convencionalmente los tratamientos se enfocan en la eliminación de humano.

La eliminación de contaminantes físicos, químicos y biológicos, mediante tratamientos denominados primarios, secundarios y terciarios, que terminan mejorando la calidad del agua con diversos fines entre ellos los de consumo biológicos, entre ellos los microbiológicos, que se presentan mediante concentraciones elevadas de agentes patógenos, deben ser eliminados a niveles inocuos de manera que no representen un riesgo para la salud. La desinfección del agua es el proceso mediante el cual se eliminan estos agentes patógenos, y se lleva a cabo, mediante la adición de compuestos clorados, aplicación de agentes oxidantes como el ozono o la irradiación de energía ultravioleta, estos métodos son los más usados para asegurar la calidad del agua, y son utilizados en diversos contextos de las actividades del ser humano.

Actualmente la aplicación de cloro, en forma de hipoclorito de sodio, hipoclorito de calcio o cloro gaseoso, es la técnica de desinfección más utilizada, sin embargo, su uso en concentraciones no adecuadas representa un riesgo que implica insuficiente desinfección o exceso de desinfectante. Aunque existen métodos colorimétricos para control del cloro residual necesario asegurar su potabilización, es necesario utilizar métodos alternos y de bajo costo que puedan utilizarse para asegurar que el proceso de desinfección es seguro.

Ante la necesidad de brindar algunas alternativas de control de desinfección de agua, se formula la siguiente pregunta: ¿Cómo influye la calidad y cantidad de contaminantes en la eficiencia de su desinfección?, planteándose la siguiente hipótesis: La calidad y cantidad de contaminantes influye negativamente en la eficiencia de su desinfección.

1.1. Objetivos

Objetivo General

Evaluar la influencia de la calidad y cantidad de contaminantes del agua en su desinfección a escala de laboratorio.

Objetivos específicos

Determinar la eficiencia de un proceso de desinfección por cloración en un agua contaminada con materia orgánica y metales pesados a dos concentraciones diferentes.

Determinar la eficiencia de un proceso de desinfección por cloración en un agua contaminada con materia orgánica, compuestos iónicos de nitrato y fosfato a dos concentraciones diferentes.

Determinar la eficiencia de un proceso de desinfección por cloración en un agua contaminada con materia orgánica con presencia de metales pesados y compuestos iónicos de nitrato y fosfato a dos concentraciones diferentes.

II. REVISIÓN DE LITERATURA

2.1. Antecedentes

En Ecuador fue realizada una investigación, para establecer un control de calidad del agua del río Quero, mediante una red inalámbrica de sensores, para medición de pH, de oxígeno disuelto y potencial redox ubicados en puntos estratégicos de la microcuenca. La información captada por los sensores se transmitía a una computadora, para realizar el análisis y estimar variaciones en la calidad del agua (Tirado ,2015).

Agirrezabalaga y Cruz (2004), realizó un estudio para establecer la calidad con la medición de la variación potencial redox en una fuente de agua donde no se ha adicionado un agente oxidante, detalles de estudio mostraron valores del potencial redox en dos puntos: un primer punto con un rango de valores entre 300-400 mV y un segundo punto entre 200-400 mV.

Aguirre et al. (2006), menciona que, en un proyecto de restauración ambiental realizado por el Gobierno Vasco, para determinar la situación actual de la denominada regata de Jaitzubia, se realiza un análisis de sedimentos para conocer la influencia de la concentración de metales pesados, hidrocarburos totales, contenido en carbono orgánico total y nitrógeno total en su calidad. Con el fin de entender mejor el estudio, se debe mencionar que en este proyecto se consideraron doce estaciones, de la cuales seis se ubicaban a lo largo de la regata, para lo cual se utilizó también el potencial redox, para determinar la zonas oxidadas, las mediciones se realizaron in situ a diferentes profundidades del sedimento, según los resultados la capa más superficial de la zona estudiada fue la más oxidada, con un rango de valores de potencial redox entre los 220 y los 440 mV de la estación 5, mientras que las estaciones 2 y 4, mostró valores positivos de potencial redox en todas las profundidades, por otro lado el autor menciona que la zona sulfhídrica de todas las estaciones se desarrolla por debajo del tercer o cuarto centímetro.

En un estudio que realizaron Aguirre et al. (2006) en la bahía de Cartagena para conocer el efecto de vertimientos procedentes del uso pinturas con características antiincrustantes en la calidad del agua, se tomaron muestras para la medición de diversos

parámetros entre ellos, la influencia de radiación solar, la concentración de oxígeno disuelto, la variación de temperatura, pH, potencial redox, alcalinidad y salinidad, y la presencia o ausencia de organismos vivos. De los resultados se observó que el potencial redox se relaciona con la conductividad y la salinidad y también que influyen en la corrosividad del medio lo cual permite la formación de un biofilm en la superficie del metal.

La variación del potencial redox se evidencia a diferentes profundidades y a diferentes horas del día, como lo describe Tirado (2015), cuando mide el potencial redox en horas del día y contrasta los resultados con horas de la tarde determinando que disminuye notoriamente según el nivel de profundidad. En este estudio, según los resultados se puede afirmar que el medio es oxidante; presentando una corrosividad potencial moderada en zonas próximas a la superficie, según los valores de potencial redox registrados.

2.2. Contaminación del agua

Cuando se habla de contaminación del recurso hídrico debemos entender que es, el acto de introducir cualquier tipo de material en el agua, y que su presencia continua o permanente a una concentración determinada altera su calidad y su composición química, afectando su disponibilidad. De acuerdo con la Organización Mundial de la Salud el agua se califica como contaminada “cuando su composición se haya modificado de modo que no reúna las condiciones necesarias para el uso, al que se le hubiera destinado en su estado natural” (Guadarrama et al.,2016).

A nivel de América Latina, Perú es considerado uno de los países con mayor reserva de agua, por ser uno de los 20 países que posee la mayor disponibilidad de agua del mundo. Analizando la situación de Perú, en cuanto a la concentración de la población en algunas regiones más que en otras como es el caso de la costa peruana donde habita 65% del total de la población se calcula que tiene una disponibilidad del 1,7% de agua de todo el país. Caso contrario sucede en la región de la selva donde se encuentra la cuenca del Amazonas que aporta el 97,7% del agua, y está disponible para el 30% de la población (Autoridad Nacional del Agua, 2009). El agua es un recurso básico para la vida, sin embargo, fácilmente se convierte en un agente alto riesgo para la salud de muchas poblaciones, por el impacto de contaminantes de naturaleza física, química o biológica, como el caso de los agentes infecciosos; por tanto, la eliminación de contaminantes, por diferentes tecnologías, deben ser controladas para asegurar que cumpla con los estándares de calidad de acuerdo con el fin al cual será destinado (Gonzales et al.,2014).

2.3. Contaminantes del agua.

Guadamarra et al. (2016), en su publicación menciona que los contaminantes del agua pueden proceder de fuentes puntuales o de fuentes difusas y de manera general tomando en cuenta su naturaleza y su efecto se pueden clasificar en:

Aquellos de naturaleza microbiológica como son los agentes patógenos: donde debemos mencionar algunas bacterias, virus y parásitos, cuyo hábitat y fuente de reproducción son los desechos orgánicos que en muchos casos la falta de tratamiento o mala gestión tienen como destino final las fuentes de agua superficiales. Por naturaleza los desechos deben descomponerse, en este proceso las bacterias utilizan el oxígeno disponible en el agua para dar lugar a la biodegradación y agotando el oxígeno disuelto, condición que pone en riesgo la supervivencia de algunas especies acuáticas.

También se encuentran los contaminantes de naturaleza química entre los cuales están las sustancias químicas inorgánicas tales como los compuestos ácidos y los compuestos de metales tóxicos, que usualmente están disueltos en el agua alterando el medio acuoso directa o indirectamente mediante reacciones secundarias que incrementan la toxicidad del agua. La innovación y desarrollo tecnológico utilizan las sustancias químicas orgánicas entre estos el petróleo, el plástico, los plaguicidas y los detergentes, productos que en la actualidad son de gran demanda, porque facilitan muchas de las actividades del hombre, sin embargo, amenazan la vida en el agua y disminuyen su disponibilidad.

Otro contaminante importante lo constituyen los nutrientes vegetales ya que generan el crecimiento excesivo de plantas acuáticas, que cuando culminan su ciclo de vida se descomponen consumiendo exponencialmente el oxígeno del agua y provocando no solo la muerte de varias especies acuáticas, sino también la distribución de material particulado, el que sumado al material inorgánico suspendido, interrumpen el paso de luz solar a través del agua limitando la producción de oxígeno por fotosíntesis.

2.4. Proceso de desinfección de agua contaminada por cloración

Solsona y Méndez (2002) en su publicación sobre desinfección del agua realizado para OPS/CEPIS, mencionan que, en países desarrollados, se aplica el tratamiento adecuado al agua, para darle la condición de agua segura, con esto se consigue reducir los riesgos que la OMS ha detectado y publicado. La desinfección del agua para consumo humano es la técnica que da la solución al problema, ya que es sencilla y eficiente que este contexto, representa la última etapa del tratamiento y en los países desarrollados, se ha convertido en

el eje de la calidad microbiológica del agua que se abastece y los resultados han sido muy favorables, muestra de ello son las tasas más bajas de casos de enfermedades diarreicas que los presentados en países en vías de desarrollo.

Según lo descrito en el párrafo que antecede, en los países desarrollados la aplicación de la desinfección se ha convertido en un proceso ineludible, fijo y establecido, que más que una rutina, se ejerce con todo el conocimiento y convicción de la importancia y beneficios que representa su buen manejo por parte de muchas ciencias e ingenierías, que abarcan una evaluación desde el punto de vista técnico, profundizando el conocimiento necesario para un despliegue de las mejores capacidades, altas eficiencias y bajos costos. Adicionalmente se refuerza el factor sanitario y toxicológico que aportan los desinfectantes y los productos de la desinfección con la salud.

La situación en los países en desarrollo es muy distinta, ya que cuando se aplican los tratamientos de potabilización, donde la imprecisión y deficiente operación de la mano del escaso mantenimiento, no garantizan un eficiente proceso de desinfección y ponen en riesgo la salud pública.

Es necesario mencionar que no existe el desinfectante o la técnica que sea igualmente ideal o perfecto, por lo cual debemos agregar que las técnicas no aniquilan todos los microorganismos, quistes o parásitos, tampoco dejan un residual en la red, que dependen de productos químicos y producen subproductos de la desinfección, que son más o menos complicadas, más o menos caras o más o menos difíciles de operar.

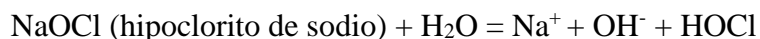
La cloración es el proceso de desinfección que se convierte entonces en la técnica que ofrece una barrera más contra la contaminación que seguramente ocurrirá posteriormente, que se convierte en un desinfectante secundario para proveer el residual.

Mecanismos de la desinfección con cloro

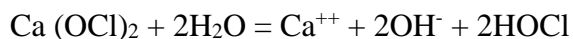
Para llevar a cabo la cloración del agua con fines de potabilización es necesario aplicar un burbujeo con cloro gaseoso o disolver compuestos de cloro y su posterior dosificación. El cloro inicia con una hidrólisis cuando tiene contacto con el agua, formando el ácido hipocloroso (HOCl) de la siguiente forma: Cuando se trata de cloro gaseoso, la reacción que tiene lugar es:



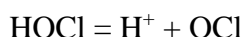
Si el compuesto clorado es el hipoclorito de sodio, la reacción que tiene lugar es:



Por último, si se trata del hipoclorito de calcio y la parte activa de la cal clorada, la reacción es:



En la desinfección durante la reacción de la dosis de cloro aplicado, se producen compuestos secundarios como cloraminas, dicloraminas y tricloraminas ante la presencia de amoníaco en el agua. De manera general estos productos se denominan cloraminas y poseen poder desinfectante, aunque reaccionen de una manera sumamente lenta. Algunos subproductos formados como el ácido clorhídrico (HCl) y los hidróxidos de calcio y sodio, no participan en el proceso de desinfección. El ácido hipocloroso (HOCl), es la especie desinfectante, que se disocia formando iones hidrogenios (H^+) y iones hipoclorito (OCl^-) y adquiere sus propiedades oxidantes:



Estas especies tienen características microbicidas e inhiben la actividad enzimática de las bacterias y virus terminando inactivándolas. Tanto el ácido hipocloroso como el ión hipoclorito son afectados por el pH que varía entre 6 y 9. Cuando el valor de pH del agua clorada es aproximadamente 7,5, la formación del ácido hipocloroso y el ion clorito se produce en proporciones iguales. Los diferentes porcentajes de HOCl y OCl^- a diferentes valores de pH pueden verse en la figura.

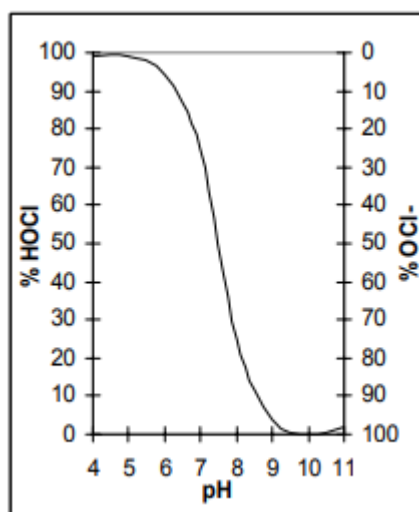


Figura 1. Formación de ácido hipocloroso y ion clorito respecto a variaciones de pH.

2.1. Métodos de Control de Desinfección de Agua

En la actualidad uno de los métodos de control de desinfección más utilizado es el método del DPD, el cual se basa en el uso del dietil-pfenilen-diamina (DPD), en condiciones específicas de pH y otros compuestos enmascarantes que permiten que se produzca una oxidación selectiva de los compuestos utilizados en el tratamiento, que finalmente están presentes en el agua en cantidades residuales. Entre ellos “podemos diferenciar el cloro libre, el dióxido de cloro, el clorito y las cloraminas. El rango de concentración de 0 a 5 mg/l le hace muy apropiado para su empleo en el agua potable”.

Los compuestos mencionados, ante su reacción con el DPD, dan una coloración rosa en su forma oxidada, por efecto de la presencia de iones yoduro, la cual se puede cuantificar utilizando una medición colorimétrica o valoración con sulfato ferroso amónico o con sal de Oesper, en condiciones controladas de pH, comprendido entre 6,2 y 6,5, a valores superiores a este rango la coloración rosa se debería a la presencia de oxígeno disuelto, mientras que a un pH inferior las sustancias oxidadas cuantificadas, serían las cloraminas en lugar de cloro(Ramírez , 2005).

2.5. El Potencial Redox

El potencial redox es una medida de la diferencia de potencial generado entre dos electrodos: un electrodo indicador y otro denominado electrodo de referencia, los cuales deben estar inmersos en la solución a la cual se quiere evaluar.

La medida del potencial de oxidación-reducción para el control de la eficiencia de la desinfección ha sido aceptado por la OMS, tal es así que en su publicación International Standards for Drinking Water, se aceptó que existe una relación entre potencial redox y nivel de desinfección, es decir con un valor mínimo del potencial redox fijado en 650 mV se puede garantizar una desinfección eficiente (Hannainst, 2017).

2.6. Reacciones óxido- reducción en el agua contaminada.

Las reacciones oxidación-reducción son un conjunto general de reacciones químicas que describen la transferencia de electrones de los átomos de una a otra especie químicas.

Se conoce que el pH se utiliza para evaluar la capacidad del agua de reaccionar con otras sustancias, adoptando el comportamiento de un ácido o de una base, de manera similar, el potencial redox nos permite evaluar su capacidad para reaccionar si bien como oxidante o reductora al contacto con una sustancia que ingrese al agua. De aquí se ha llegado a

determinar que el agua que presenta un potencial redox elevado se comportará como un agente oxidante mientras que si desarrolla un potencial negativo actuará como reductor.

Para entender mejor la importancia del uso del potencial redox, consideremos al pH que es un parámetro que nos permite conocer la distribución de especies químicas para un grupo conjugado. Podemos mencionar en el grupo de los carbonatos si se tiene un pH elevado, indicará la presencia el ion carbonato, y ante un pH bajo se entiende que se está produciendo la formación de ácido carbónico. Una comparación muy similar podemos hacer con el potencial redox, porque su evaluación permite estimar las especies químicas predominantes dentro de un grupo de reacciones redox. Por citar un caso, podemos mencionar la evaluación del cromo hexavalente que se presenta a valores de ORP relativamente elevados, mientras que su reducción a cromo trivalente se presenta con valores más bajos, de aquí que al realizar la medición del potencial redox, podemos predecir el estado de oxidación predominante en la especie química.

Las reacciones redox son por naturaleza de cinética más lenta, por esta razón, se produce la variación en la medición del potencial redox, la cual se deberá al tiempo que tardan medios en alcanzar el equilibrio químico.

Durante la desinfección, al añadir cloro al agua, éste actúa como un agente oxidante contra los organismos microbiológicos como bacterias y virus, ya que el potencial desinfectante del cloro se relaciona de manera directa con su capacidad oxidante, el valor del potencial redox del agua clorada indica su capacidad y rapidez para eliminar organismos patógenos en el agua. Es importante mencionar que el potencial redox ya incluye el efecto del pH del agua, es decir no debemos corregir o verificar que la relación de adición de cloro y el pH del agua. De manera general a nivel internacional se considera que la desinfección es eficiente si el ORP es mayor a +600 mV. Una ventaja de utilizar el ORP es que permite medir la capacidad final del agua para oxidar o reducir al margen de los componentes que posea (Microlab Industrial, 2019).

2.7. Aplicación del potencial redox como indicador de tratamiento de aguas.

El potencial Redox utiliza un electrodo de referencia de plata/cloruro de plata cuyo potencial es constante y conocido para compararlo con un electrodo indicador que convencionalmente es de platino y aquí se realizará la reacción de oxidación reducción. La diferencia de potencial entre estos dos electrodos es medida por un potenciómetro y se utiliza para determinar la concentración del biocida.

Mediante el potencial redox se mide de una forma indirecta la concentración de cloro libre de una muestra, mediante la medida de la capacidad de oxidación que la tiene la solución y se expresa en mV. La determinación del potencial redox es función de la temperatura y también del pH, eso significa que el electrodo debe de incluir una sonda de temperatura para referenciar el valor determinado de cloro libre (Hannainst, 2017).

El potencial redox esta influenciado por la concentración de oxígeno disuelto y al mismo tiempo éste influye en el tipo de reacciones biológicas que se desarrollen en el agua residual, un electrodo para medir ORP es un buen medidor que permite para monitorear en tiempo real y asegurar que se están produciendo las reacciones deseadas en un reactor biológico; a manera de ejemplos podemos citar que la generación de sulfuro de hidrógeno se produce en el intervalo de -250 a -50 mV, la metanogénesis, en el rango de -400 a -175 mV y en contraste a los valores negativos por cambio de medio, mencionaremos la degradación aerobia de desechos orgánicos a que se produce a un rango de potencial de +50 a +250 Mv (Microlab Industrial, 2019).

III. MATERIALES Y MÉTODOS

3.1. Lugar de ejecución

La presente investigación se realizó en el Laboratorio de Calidad del Agua de la Universidad Nacional Agraria de la Selva (UNAS), ubicado en las coordenadas UTM: 390256 Este y 8970849 Norte a una altitud de 662 m.s.n.m en la ciudad de Tingo María.

Geográficamente la ciudad de Tingo María se encuentra en la hoja 19-k de la Carta Nacional del Instituto Geográfico Nacional, correspondiente a la región Selva.

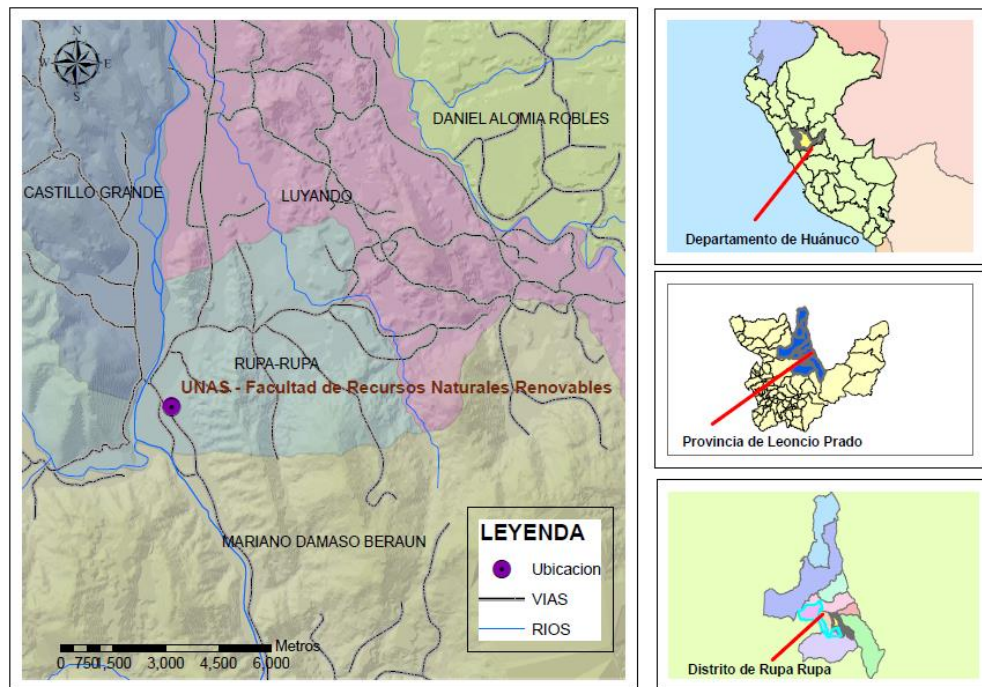


Figura 2. Ubicación geográfica de la Universidad Nacional Agraria de la Selva.

3.1.1. Características climáticas

El área de estudio presenta una temperatura máxima media anual de 31,5 °C y una temperatura mínima media anual de 21,0 °C, siendo la temperatura media anual de 25,4 °C. La humedad relativa media anual es cercana al 85%. La precipitación media anual es de 3,755 milímetros (Estación Meteorológica José Abelardo Quiñonez, 2017).

La velocidad promedio del viento por hora en Tingo María no varía considerablemente durante el año y permanece en un margen de más o menos 0,6 kilómetros por hora de 5,1 kilómetros por hora. La dirección del viento promedio por hora predominante en Tingo María es del norte durante el año.

El eje hidrográfico principal es el río Huallaga, el cual recibe numerosos afluentes, entre los cuales son el río Monzón y el río Tulumayo (SENAMHI, s.d.).

3.2. Materiales y Equipos.

Material de vidrio de laboratorio: vasos de precipitación y fioles, Medidor colorimétrico de cloro residual, Balanza Analítica con 0.001 g de precisión, pH-metro, Equipo multiparamétrico, Agitador magnético.

Reactivos

Agua destilada, Hidróxido de sodio, Ácido clorhídrico al 37%, sulfato ferroso amoniacal, ácido sulfúrico, dicromato de potasio, sulfato de plata, Sulfato de Plomo, Sulfato de Cadmio, Nitrato de Potasio, Fosfato de sodio, Hidróxido de sodio.

3.3. Criterios de estudio

3.3.1. Nivel de investigación

La presente investigación tiene un nivel explicativo, ya que se utilizó la recolección de datos de las variables en estudio, para probar una hipótesis con base en la medición numérica (Hernández et al., 2010).

3.3.2. Tipo de investigación

El tipo de investigación fue aplicativo, Hernández et al. (2010) afirma que en este tipo de estudio busca la aplicación de los conocimientos adquiridos a la vez que se adquieren otros.

3.3.3. Método de investigación

El método de investigación fue inductivo y analítico, el primer método utiliza el razonamiento para obtener conclusiones que parten de hechos aceptados como válidos, mientras que con el método analítico se estudiaron y conocieron los resultados obtenidos.

3.3.4. Diseño de investigación

Considerando la manipulación de las variables independientes, el diseño fue experimental y factorial (Hernández et al., 2014).

3.3.5. Variables de investigación

a) Variable independiente:

La calidad y cantidad de contaminantes del agua

- Dimensiones e indicadores:

Agua contaminada con materia orgánica, plomo y cadmio.

Agua contaminada con materia orgánica, nitrato y fosfato.

Agua contaminada con materia orgánica, plomo cadmio, nitrato y fosfato.

b) Variable dependiente:

La eficiencia de la desinfección

Dimensiones e indicadores:

- El potencial redox en el agua contaminada, después de la cloración.

- El cloro residual en el agua contaminada, después de la cloración.

- La concentración de coliformes totales en el agua contaminada después de la cloración.

Tabla 1. Niveles de las variables

Variable de investigación	Niveles	
	(A)	(B)
	Agua con materia orgánica Pb y Cd	Agua con materia orgánica nitrato y fosfato
La calidad y cantidad de contaminantes del agua	0 ppm Pb y Cd 1 ppm Pb y Cd 5 ppm Pb y Cd	0 ppm nitrato y fosfato 1 ppm nitrato y fosfato 5 ppm nitrato y fosfato

Tabla 2. Matriz de diseño tipo factorial completo 3^2

Nº experimental	Orden Aleatorio	Factor A	Factor B
		Agua cont. Pb y Cd	Agua cont. nitrato y fosfato
1	1	-1	-1

2	8	0	-1
3	9	+1	-1
4	3	-1	0
5	6	0	0
6	2	+1	0
7	7	-1	+1
8	5	0	+1
9	4	+1	+1

Donde:

Para 0 ppm Pb y Cd (-1), 1 ppm Pb y Cd (0), 5 ppm Pb y Cd (+1) y 0 ppm de nitrato y fosfato (-1), 1 ppm de nitrato y fosfato (0), 5 ppm de nitrato y fosfato (+1).

3.3.6. Análisis estadístico

Se utilizó el programa InfoStat para realizar un ANVA con arreglo factorial de 3^2 con tres repeticiones. Se realizó una prueba de Duncan para comparar los tratamientos evaluar efecto de los tratamientos en la desinfección de agua con distintos métodos.

3.4. Metodología

3.4.1. Determinación de la eficiencia de un proceso de desinfección por cloración en un agua contaminada con materia orgánica y metales pesados a dos concentraciones diferentes.

Se procedió a preparar 2L de agua contaminada, tomando 200 ml de filtrado de agua residual doméstica, colectada en la desembocadura de la Quebrada del Águila al Río Huallaga y aforando a dos litros, posteriormente, se separó la solución por litros y a cada litro se le adicionó 1ppm de Pb, a partir de sulfato de plomo y 1 ppm de Cd, a partir de una solución patrón de cadmio de 1000 ppm.

Posteriormente se preparó una solución de cloro al 1% (10g/L), disolviendo 200g de hipoclorito de sodio al 5%, en 1 litro de agua. Para desinfectar cada litro de agua contaminada se adicionó 0.5 ml de la solución clorada preparada, con este volumen adicionado, conseguimos una concentración de cloro de 5 ppm, luego se agitó para homogenizar la solución y después de 30 minutos se realizó las mediciones de potencial redox, cloro residual

y tomarán las muestras para análisis de coliformes totales en laboratorio (adaptado de James R. Mihelcic, Fry, Myre, Linda D. Phillips, & Brian D. Barkdoll (2009)). Con el mismo procedimiento y variando la concentración de los metales se prepararon las soluciones de 5ppm Cd y 5 ppm de Pb.

Medición de Potencial Redox.

Se determinó el, potencial redox mediante la metodología de Standard Methods for Examination of Water and Wastewater. Las medidas de potencial redox se realizaron con un electrodo indicador de platino y un electrodo de referencia de plata /cloruro de plata (Gonzales et al.,2006).

Medición del cloro residual

La medición del cloro residual se realizó a través del método del DPD con el kit colorimétrico, según el procedimiento descrito por Buelta y Martínez (2016), donde previamente se enjuagó el compartimento del comparador por lo menos 3 veces con el agua que se analizó, luego se colocó la solución de DPD1 y se agitó el dispositivo cerrado correctamente hasta homogenizar la muestra y el reactivo. En seguida se procedió a leer de inmediato el resultado del grado de concentración de cloro residual.

Medición de los Coliformes Totales

El procedimiento básico para preparar y cultivar la muestra de agua siguió el descrito por Buelta y Martínez (2016), de acuerdo a los siguientes pasos: Se tomó la muestra y se filtró a través del vaso de filtrado, donde previamente se puso el filtro. Una vez realizada la filtración, se colocó el filtro en las placas Petri, en las que se había añadido el medio de cultivo necesario. Para incubar las muestras se consideró un período de 16-18 horas, luego se procedió a realizar el conteo de las colonias. Se consideró el conteo de las colonias de color amarillo entre 1-3 mm de diámetro. El número de colonias que se contaron, son las colonias presentes en los 100mL de cantidad de muestra luego se hará la relación en función del volumen real.

3.4.2. Determinación de la eficiencia de un proceso de desinfección por cloración en un agua contaminada con materia orgánica y compuestos nitrogenados a dos concentraciones diferentes.

Se procedió a preparar 2L de agua contaminada, tomando 200 ml de filtrado de agua residual doméstica, tomada de una alcantarilla y aforando a dos litros, posteriormente, se separó la solución por litros y a cada litro se le adicionó nitrato de potasio hasta obtener 1ppm de ion NO_3^- y fosfato de sodio hasta obtener 1 ppm de PO_4^{3-} .

Posteriormente se preparó una solución de cloro al 1% (10g/L), disolviendo 200g de hipoclorito de sodio al 5%, en 1 litro de agua. Para desinfectar cada litro de agua contaminada se adicionó 0.5 ml de la solución clorada preparada, con este volumen adicionado, conseguimos una concentración de cloro de 5 ppm, luego se agitó para homogenizar la solución y después de 30 minutos se realizaron las mediciones de potencial redox, cloro residual y tomaron las muestras para análisis de coliformes totales en laboratorio (adaptado de James R. Mihelcic, Fry, Myre, Linda D. Phillips, & Brian D. Barkdoll (2009)). La metodología que se siguió para medición de potencial redox, cloro residual, coliformes totales es la mencionada en el ítem 3.4.1. Con el mismo procedimiento y variando la concentración de nitrato y fosfato se prepararon las soluciones de 5ppm NO_3^- y 5 ppm de PO_4^{3-} .

3.4.3. Determinación de la eficiencia de un proceso de desinfección por cloración en un agua contaminada con materia orgánica con presencia de metales pesados y compuestos nitrogenados a dos concentraciones diferentes.

Se procedió a preparar 2L de agua contaminada, tomando 200 ml de filtrado de agua residual doméstica, tomada de una alcantarilla y aforando a dos litros, posteriormente, se separó la solución por litros y a cada litro se le adicionó 1ppm de Pb, a partir de sulfato de plomo y 1 ppm de Cd, a partir de una solución patrón de cadmio de 1000 ppm, nitrato de potasio hasta obtener 1ppm de ion NO_3^- y fosfato de sodio hasta obtener 1 ppm de PO_4^{3-} .

Posteriormente se preparó una solución de cloro al 1% (10g/L), disolviendo 200g de hipoclorito de sodio al 5%, en 1 litro de agua. Para desinfectar cada litro de agua contaminada se adicionó 0.5 ml de la solución clorada preparada, con este volumen adicionado, conseguimos una concentración de cloro de 5 ppm, luego se agitó para homogenizar la solución y después de 30 minutos se realizaron las mediciones de potencial redox, cloro residual y tomaron las muestras para análisis de coliformes totales en laboratorio (adaptado de James R. Mihelcic, Fry, Myre, Linda D. Phillips, & Brian D. Barkdoll (2009)). La metodología que se siguió para medición de potencial redox, cloro residual, coliformes totales es la mencionada en el ítem 3.4.1. Con el mismo procedimiento y variando la concentración de metales, nitrato y fosfato se prepararon las soluciones de 5 ppm de Cd, 5 ppm de Pb, 5ppm NO₃ y 5 ppm de PO₄-3.

IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1. Determinación de la eficiencia de un proceso de desinfección por cloración en un agua contaminada con materia orgánica y metales pesados a dos concentraciones diferentes.

Tabla 3. Potencial redox y coliformes totales antes y después de la adición de cloro al agua con materia orgánica presencia de plomo y cadmio.

Tratamiento	Agua contaminada antes de cloración		Agua contaminada después de cloración		
	Potencial Redox (mV)	Coliformes Totales (NMP/100ml)	Potencial Redox (mV)	Cloro Libre residual (ppm)	Coliformes Totales (NMP/100ml)
0 ppm Pb	128.3	181000.0	839.7	0.6	0.0
1 ppm Pb	183.0	204000.0	721.0	0.5	40.0
5 ppm Pb	86.7	242666.7	763.7	0.4	30.0
0 ppm Cd	128.3	202333.3	814.7	0.6	10.0
1 ppm Cd	149.3	188500.0	764.5	0.4	22.5
5 ppm Cd	191.7	222000.0	755.7	0.5	20.0

En la tabla 3, se puede observar de manera general que la adición de los metales pesados en un medio acuoso con materia orgánica influye en el potencial redox, generando una reducción de su valor, aquí se observa que cuando incrementa la concentración del plomo en el agua, el potencial redox también incrementa es decir el medio se vuelve más oxidante, sin embargo, con el cadmio se puede observar que sucede lo contrario siendo a mayor concentración cuando el medio reduce su potencial redox. Es importante mencionar que la adición de hipoclorito de sodio eleva enormemente el potencial redox del medio.

Antes de la cloración, en el agua predomina un medio oxidante, debido a la presencia de materia orgánica, la cual por acción microbiana se va degradando y a la vez se va consumiendo el oxígeno disuelto del agua. Muniz et al., (2004), realizaron un estudio de evaluación de la distribución de metales pesados en el río Sevilla, entre los parámetros

fisicoquímicos evaluados se consideró el potencial redox, el cual cuando fue medido en el sedimento superficial presentó condiciones reductoras, el valor más bajo (-375 mV) y el más alto (-130 mV) la variación de potencial redox en este estudio depende de las condiciones del sitio donde se toman las muestras, ya que según la acumulación de materia orgánica en los sedimentos, se produce una reducción de oxígeno por la actividad microbiológica, dando como resultado las condiciones reductoras observadas.

En los resultados de la tabla 3, se observa que después de la cloración, se produce una disminución del potencial redox del agua con cadmio a mayor concentración, esto puede relacionar a la capacidad del cadmio para aceptar electrones o reaccionar con los grupos funcionales de la materia orgánica. El cadmio forma complejos con la materia orgánica en condiciones naturales de agua (Hertkorn et al., 2004). El cadmio es un ión que muestra una unión relativamente débil, y presenta una preferencia con los sitios que contienen amina a los sitios puros con carboxilatos y se unen a moléculas más pequeñas y menos aromáticas (Cabaniss, 2011). Li et al. (1998), sin embargo, han declarado que el cadmio está principalmente coordinado con átomos donantes de O (grupos carboxilo) y se coordinarían con átomos donantes de N solo a pH alto sin observarse coordinación con S. En desacuerdo, Hertkorn et al. (2004), han afirmado que la coordinación con S es posible.

En el medio acuático natural, el plomo (Pb) puede existir en dos formas de oxidación (+2 y +4) siendo el +2 dominar. Los iones de Pb^{2+} forman una unión fuerte con la materia orgánica natural dominada por aminas. Se une igualmente con otros grupos tales como fenoles, alcoholes, grupos éter y moléculas más grandes, pero forma enlaces ligeramente más débiles con carboxilato (Cabaniss, 2011).

Bergendahl y Stevens (2005), investigaron la relación del potencial redox como indicador de la efectividad de la desinfección con cloro, y manifiestan que debido a que la mayoría de las especies de cloro son oxidantes, el ORP de las aguas residuales aumentó con el aumento de cloro añadido. El ORP aumentó con el aumento de cloro agregado, cloro total y cloro libre; sin embargo, en las gráficas las pendientes de las líneas de regresión son relativamente bajas. Estas bajas pendientes se manifiestan en una baja sensibilidad en la medición del ORP en función de cada especie de cloro. A dosis más altas de cloro que pueden producir mayores concentraciones de especies de cloro libre, que son oxidantes más fuertes, el aumento en el ORP medido con aumentos incrementales de cloro puede ser mucho mayor.

Los efectos observados sobre la variación de potencial redox, podrían indicar que se producen reacciones químicas o bioquímicas de los metales pesados, en este caso el plomo y el cadmio, los cuales tienen estado de oxidación positivo y pueden reaccionar o formar complejos con subproductos de la degradación de la materia orgánica en el agua. Teóricamente se podría argumentar que la presencia de plomo y cadmio, convertirían el medio más oxidante e incrementarían el potencial redox del medio. Sin embargo, la disminución de potencial redox sería un indicador de reacción del oxígeno disuelto en el agua.

La variabilidad también puede atribuirse a el hecho de que el ORP es una medida no específica, es decir, es el resultado neto de todos los pares redox en solución que puede interactuar con la sonda ORP, incluidos los componentes que no son desinfectantes (Bergendahl y Stevens, 2005).

Holman y Wareham (2003) encontraron grandes cambios en la medida ORP en aguas residuales cerca del punto de agotamiento de demanda química de oxígeno (DQO).

Puede haber otras especies en las aguas residuales que no fueron cuantificadas que también podrían interactúan en reacciones redox. Otras parejas redox que pueden afectar las mediciones de ORP en aguas residuales incluyen algunos compuestos de azufre y algunos compuestos orgánicos (Charpentier et al., 1998).

Analizando los valores de cloro libre residual, se puede decir que la dosis hipoclorito utilizada para la desinfección fue suficiente para eliminar la carga microbiana. La muestra con 5 ppm de plomo presentó el valor más bajo de cloro libre residual, valor asociado a la concentración más elevada de coliformes totales. Finalmente comparando los valores de coliformes totales en todas las muestras, observamos que las muestras con plomo presentaron los valores más altos de coliformes totales, lo que podría interpretarse como que el plomo causa más interferencia que el cadmio en el proceso de desinfección con hipoclorito de sodio.

El ORP de cada una de las muestras de aguas residuales se levantó con adición de cloro (dosis de cloro de 5, 10 y 15 mg/L) y se midió la inactivación del patógeno resultante. Elevar el ORP a través de la cloración de las aguas residuales muestras resultaron en la inactivación efectiva de *E. coli*, coliformes totales y enterococos. Con el aumento de la dosis de cloro y el tiempo de contacto, los organismos restantes disminuyeron en concentración.

Después de 20 minutos, se produjo una inactivación muy eficaz, con una concentración menor al 10% de la inicial de organismos restantes para todas las dosis de cloro. El porcentaje de inactivación en función del ORP aumenta con la cloración (Bergendahl y Stevens 2005).

La desinfección con hipoclorito de sodio, tiene como principio activo la formación de ácido hipocloroso y el ion clorito, siendo el primero el que ejerce el principal efecto de desinfección, esto asociado a los resultados presentados, podrían indicar que el plomo interfiere de alguna manera en la formación de ácido hipocloroso, ya que su estado de oxidación bivalente le da posibilidad de reemplazar el sodio en la molécula de hipoclorito y entorpece su reacción con los protones del medio acuoso.

Las especies de cloro formadas cuando se agrega cloro al agua tienen diferentes poderes de desinfección, el cloro libre (ácido hipocloroso, HOCl e iones hipoclorito, OCl⁻) tienen la mayor capacidad desinfectante, mientras que las cloraminas (monocloramina, dicloramina y tricloramina) son menos eficaces. La capacidad desinfectante de las especies que componen el cloro libre el cloro residual y el residual combinado no pueden ser inferido de sólo los valores residuales, pero los compuestos reales formados también afectan la desinfección. Sin embargo, todavía es común usar cloro residual libre y/o cloro disponible combinado como la métrica relacionada con la efectividad de la desinfección (Bergendahl y Stevens 2005).

Tabla 4. Variación del potencial redox y coliformes totales por efecto de la cloración del agua con materia orgánica presencia de plomo y cadmio.

Tratamiento	Variación de potencial redox (mV)	Variación de Coliformes Totales (NMP/100 ml)	Porcentaje de incremento de potencial redox (%)	Porcentaje de eliminación de coliformes totales (%)
0 ppm Pb	711.3	181000.0	554.3	100.0
1 ppm Pb	538.0	203960.0	294.0	100.0
5 ppm Pb	677.0	242636.7	781.2	100.0
0 ppm Pb	686.3	202323.3	534.8	100.0
1 ppm Cd	615.2	188477.5	411.9	100.0
5 ppm Cd	564.0	221980.0	294.3	100.0

En la tabla 4 podemos observar que la desinfección en términos generales fue favorable y permitió la formación del ácido hipocloroso, el cual justifica la eliminación del total de coliformes totales y se realiza mostrando un gran incremento del potencial redox del medio.

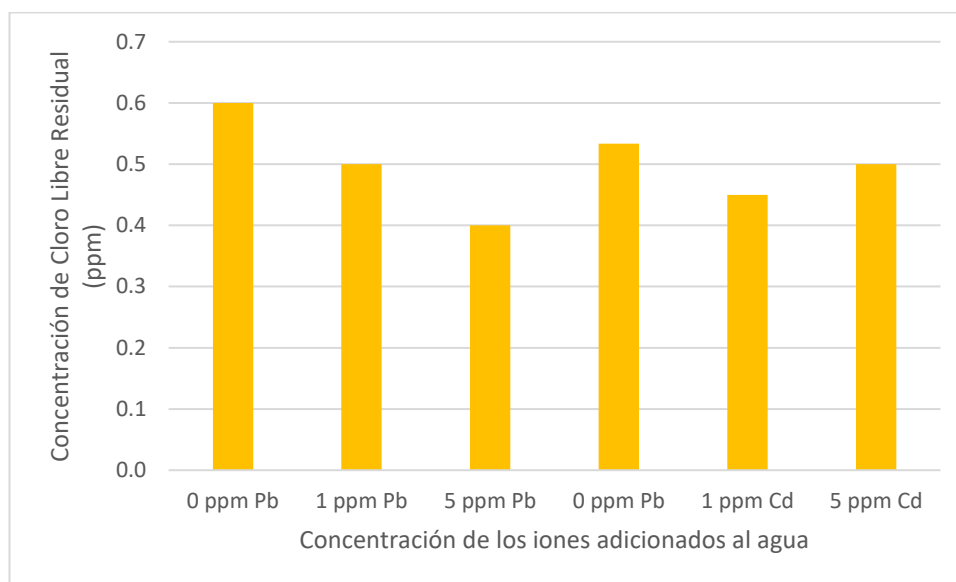


Figura 3. Variación del cloro libre residual a diferentes concentraciones de plomo y cadmio.

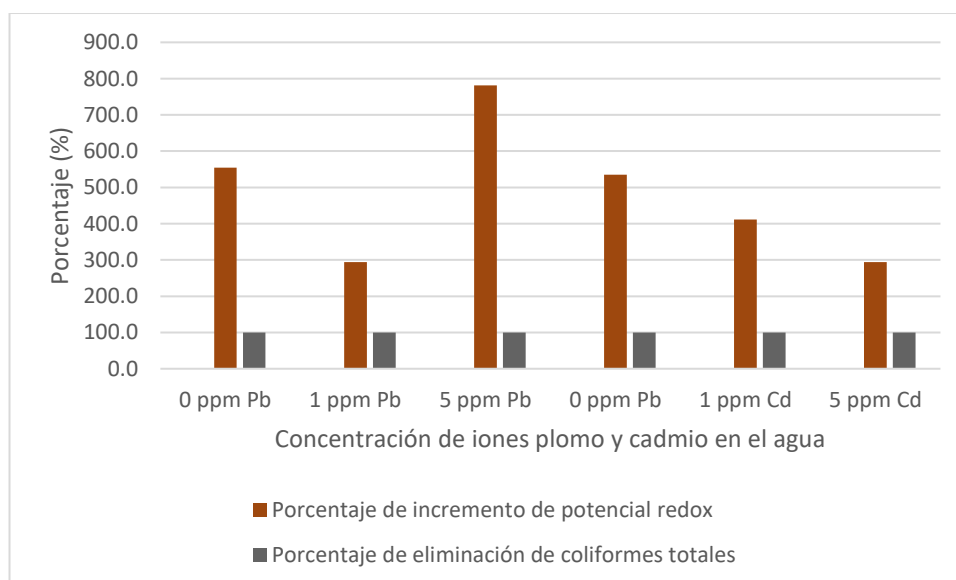


Figura 4. Incremento de potencial redox y eliminación de coliformes totales a diferentes concentraciones de plomo y cadmio.

4.2. Determinación de la eficiencia de un proceso de desinfección por cloración en un agua contaminada con materia orgánica y compuestos nitrogenados a dos concentraciones diferentes.

Tabla 5. Potencial redox y coliformes totales antes y después de la adición de cloro al agua con materia orgánica y presencia de nitrato y fosfato.

Tratamiento	Agua contaminada antes de cloración		Agua contaminada después de cloración		
	Potencial Redox (mV)	Coliformes Totales (NMP/100ml)	Potencial Redox (mV)	Cloro Libre residual (ppm)	Coliformes Totales (NMP/100)
0 ppm nitrato	128.3	182333.3	839.7	0.6	0.0
1 ppm nitrato	93.3	152000.0	660.7	0.4	60.0
5 ppm nitrato	40.7	123000.0	604.7	0.3	40.0
0 ppm fosfato	128.3	182000.0	839.7	0.6	0.0
1 ppm fosfato	62.0	131000.0	549.7	0.3	70.0
5 ppm fosfato	24.7	112666.7	556.3	0.2	90.0

En la tabla 5 se puede observar que la adición de los iones nitrato y fosfato reducen el potencial redox del medio y lo convierten en menos oxidante, esto debido a la posible reacción producida por la carga negativa de los iones adicionados y los agentes oxidantes como el caso del oxígeno disuelto. También se evidencia que la cloración eleva el potencial redox del medio acuoso siendo mayor en presencia de nitrato, lo que podría indicar que el ion fosfato interfiere en la formación del desinfectante activo formado por la cloración.

Zipper et al. (1998) encontró una variación de 95 mV en ORP con diferentes concentraciones de nitrato en aguas residuales, que puede ser producido por variaciones en la nitrificación.

Xiao Liu et al. (2021), realizaron un estudio para determinar el papel del nitrato durante la desinfección, en el cual describen que durante la desinfección se produce la formación de subproductos nitrogenados considerados más genotóxicos y citotóxicos que muchos subproductos de desinfección carbonáceos. Los subproductos de desinfección nitrogenados se forman cuando existe elevadas concentraciones de nitrógeno orgánico durante la cloración (Shah y Mitch, 2011).

Ante el riesgo que implica las reacciones del nitrato por la desinfección con cloro, sean desarrollado algunos estudios para tratar de identificar algunos compuestos como el caso de Vughs et al.(2018) investigaron la formación de subproductos nitrogenados en la desinfección del aguas con materia orgánica natural del lago Pony y determinaron la formación de 14 subproductos nitrogenados de la desinfección, con estructuras nitroaromáticas, dejando un vacío en cuanto al mecanismo de interacción e incorporación del nitrato con la materia orgánica.

El cloro libre residual con menor concentración es que resultó en la desinfección del agua con 5 ppm de fosfato, esto podría significar que el efecto en la desinfección del medio fue favorable, si nos basamos en que a mayor contaminación microbiana mayor es el consumo de cloro desinfectante, por otro lado, desde el punto de vista de potabilización sería un valor muy bajo que significa un riesgo para la salud humana.

Batte et al. (2003) afirman que el fosfato y el cloro tienen la capacidad de alterar la composición de las comunidades microbiológicas, ante este efecto se produce la formación de biopelículas que en función a la concentración de materia orgánica disponible y reacción del desinfectante que, finalmente, determinan la existencia de subproductos de la desinfección (Chandy et al., 2001).

En la investigación se observó que los coliformes totales después de la desinfección en presencia de fosfato son mayores con respecto a la realizada en presencia de nitrato. Al respecto, según algunos estudios realizados se ha llegado a demostrar que la adición de fosfatos favorece el crecimiento microbiano (Jang et al., 2012), sin embargo, en otras investigaciones se afirma que no existe ninguna influencia en el incremento del número de bacterias (Gouider et al., 2009).

Tabla 6. Variación del potencial redox y coliformes totales por efecto de la cloración del agua con materia orgánica y presencia de nitrato y fosfato.

Tratamiento	Variación de potencial redox (mV)	Variación de Coliformes Totales (NMP/100 ml)	Porcentaje de incremento de potencial redox (%)	Porcentaje de eliminación de coliformes totales (%)
0 ppm nitrato	711.3	182333.3	554.3	100.0
1 ppm nitrato	567.3	151940.0	607.9	100.0
5 ppm nitrato	564.0	122960.0	1386.9	100.0

0 ppm fosfato	711.3	182000.0	554.3	100.0
1 ppm fosfato	487.7	130930.0	786.6	99.9
5 ppm fosfato	531.7	112576.7	2155.4	99.9

En la tabla 6, se observa que la eliminación de los coliformes totales es casi completa y que el potencial redox incrementa enormemente cuando la concentración de iones nitrato y fosfato son mayores. Un análisis del efecto podría indicar que el medio se vuelve más oxidante por la presencia de ácido hipocloroso, ya que por la carga negativa de nitrato y fosfato se puede producir una reacción con el oxígeno disuelto que haga el medio menos oxidante.

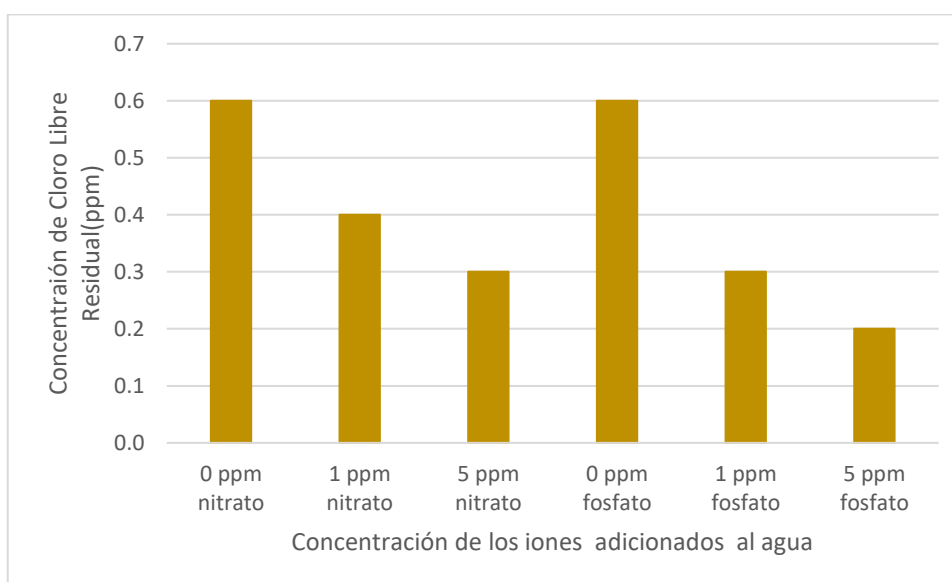


Figura 5. Variación del cloro libre residual a diferentes concentraciones de nitrato y fosfato.

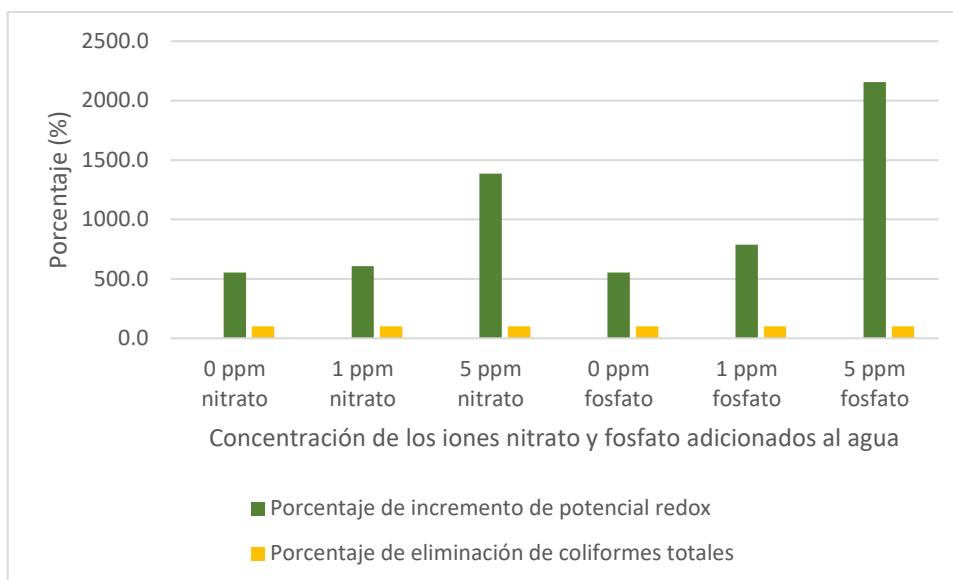


Figura 6. Incremento de potencial redox y eliminación de coliformes totales a diferentes concentraciones de nitrato y fosfato.

4.3. Determinación de la eficiencia de un proceso de desinfección por cloración en un agua contaminada con materia orgánica con presencia de metales pesados y compuestos nitrogenados a dos concentraciones diferentes.

Tabla 7. Potencial redox y coliformes totales antes y después de la adición de cloro al agua con materia orgánica presencia de plomo, cadmio, nitrato y fosfato.

Tratamiento	Agua contaminada antes de cloración		Agua contaminada después de cloración		
	Potencial Redox (mV)	Coliformes Totales (NMP/100ml)	Potencial Redox (mV)	Cloro Libre residual (ppm)	Coliformes Totales (NMP/100)
0 ppm nitrato, fosfato, Pb y Cd	128.3	182500.0	839.7	0.6	0.0
1 ppm nitrato, fosfato, Pb y Cd	81.3	128000.0	525.7	0.0	1683.3
5 ppm nitrato, fosfato, Pb y Cd	38.3	113666.7	465.0	0.0	2283.3

En la tabla 7, se puede observar que, ante la presencia de metales pesados y iones de nitrato y fosfato, se ve interrumpido el proceso de desinfección, lo cual está evidenciado por la concentración final de coliformes totales. Ante este resultado se podría argumentar que parte del ácido hipocloroso que se forma reacciona y se consume reaccionando con los contaminantes adicionados al agua, quedando un déficit de desinfección reflejado en los valores de cloro libre residual igual a cero en ambas concentraciones.

La forma más común de limitar o prevenir la presencia de organismos microbiológicos en un sistema de agua es alimentar una sustancia química que sea tóxica para los organismos, como un microbicida oxidante, dentro del agua. Estos oxidantes (desinfectantes) incluyen cloro, bromo, hipoclorito de sodio, dióxido de cloro, ozono y permanganato de potasio. Los microbicidas oxidantes inhiben el crecimiento de microorganismos al eliminar electrones de la célula, oxidando irreversiblemente los grupos proteicos. El efecto es interferir con actividad enzimática normal, lo que resulta en la muerte de la célula (Honeywell, 2012).

El hipoclorito de sodio se considera más seguro de manipular y enviar que cloro y, por lo tanto, puede preferirse por estas razones. Sin embargo, se descompone lentamente y tiene reacciones adversas con el amoníaco y orgánicos. El control del pH puede ser más difícil debido a la formación de hidróxido de sodio, una base fuerte (Honeywell, 2021).

Por otro lado, es necesario mencionar que los valores de potencial redox después de la cloración, son inferiores a 600 mV, con cloro libre residual igual a cero y con presencia de coliformes totales, siendo un indicador que la presencia de contaminantes iónicos interrumpe la desinfección de agua y el potencial redox presenta valores que podrían asociarse a una deficiente desinfección.

Honeywell (2012), es una compañía asiática que comercializa equipos tecnológicos para evaluación de procesos, tales como la desinfección del agua, en su publicación mencionan que el potencial redox, se puede utilizar para realizar un control preciso de la alimentación de oxidante ya que su valor se considera una lectura directa de la actividad del oxidante y agentes reductores en el agua, que corresponden a reacciones de oxidación-reducción. La investigación muestra que la capacidad de los microorganismos para sobrevivir en el agua está influenciada principalmente por el ORP del agua. Esto se debe a que la acción de un oxidante microbicida es remover electrones de un organismo,

efectivamente destruyendo ciertos procesos que mantienen vivo al organismo. Desde esta transferencia de electrones es una reacción de oxidación-reducción, el ORP da una correlación directa de la capacidad del agua para prevenir crecimiento microbiológico. La determinación del punto de ajuste de control ORP debe hacerse para cada sitio individual, ya que habrá muchas variaciones entre los sitios, incluyendo tipo de organismo, química del agua, temperatura y tipo de oxidante. En su mayor parte, los puntos de ajuste de control para la adición de biocidas oxidantes estarán dentro del rango de +550 a +650 mV.

Du et al. (2017), investigaron los efectos secundarios del procesos de cloración, en su publicación, mencionan que aunque es un proceso que inactiva patógenos y siendo uno de los métodos más usados, ha generado una gran preocupación por los productos secundarios que se forman en su reacción, pues la adición de cloro al agua con fines de desinfección describe una secuencia de reacciones y en presencia de precursores, derivados generalmente de materia orgánica disuelta, tienen la capacidad y posibilidad de formar varios subproductos, los cuales en forma individual o como nuevos compuestos formados por reacción entre los mismos, han demostrado ser citotóxicos, genotóxicos y cancerígenos.

Tabla 8. Variación del potencial redox y coliformes totales por efecto de la cloración del agua con materia orgánica y presencia de nitrato, fosfato, plomo y cadmio.

Tratamiento	Variación de Potencial redox (mV)	Variación de Coliformes totales (NMP/100 ml)	Porcentaje de incremento de Potencial redox (%)	Porcentaje de eliminación de Coliformes totales (%)
0 ppm nitrato, fosfato, Pb y Cd	711.3	182500.0	554.3	100.0
1 ppm nitrato, fosfato, Pb y Cd	444.3	126316.7	546.3	98.7
5 ppm nitrato, fosfato, Pb y Cd	426.7	111383.3	1113.0	98.0

En la tabla 8, se observa que a pesar de que se produce un gran incremento de potencial redox, no es suficiente para la eliminación total de coliformes totales, efecto asociado a la interferencia en la acción del ácido hipocloroso como agente activo de desinfección.

En la investigación, se pudo observar que, ante la presencia de los contaminantes de manera conjunta, se produce un consumo total del desinfectante, quedando cero de cloro

libre residual, esto obedece a la formación de productos secundarios del proceso de desinfección, dejando una concentración de coliformes presentes en el agua, que indica deficiente desinfección. Honeywell (2012), menciona que una sobrealimentación de oxidante resultará en incrementos de costos de productos químicos, así como daños potenciales al sistema componentes y metalurgia. Una subalimentación de oxidante resultará en daños potencialmente irreversibles y pérdida de eficiencia debido al crecimiento de microorganismos. Los programas típicos de control microbiológico están diseñados para eliminar el 99% o más de los organismos en el agua, así como prevenir cualquier ocurra el crecimiento futuro.

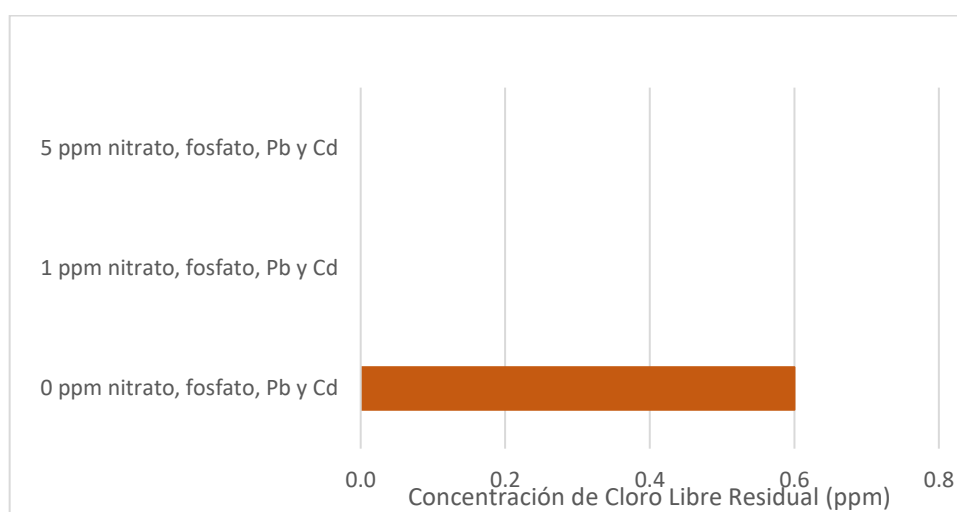


Figura 7. Variación del cloro libre residual a diferentes concentraciones de nitrato y fosfato, plomo y cadmio.

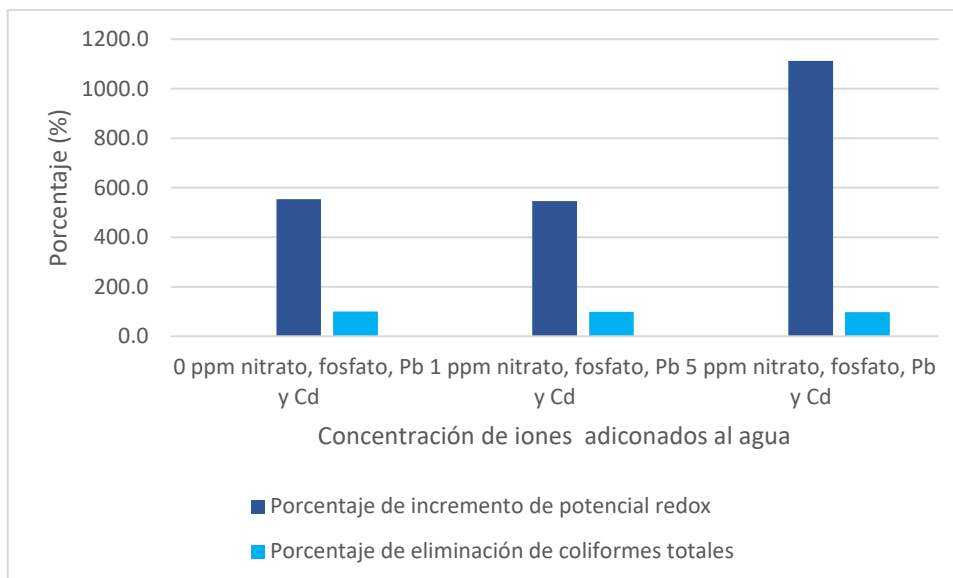


Figura 8. Incremento de potencial redox y eliminación de coliformes totales a diferentes concentraciones de nitrato y fosfato, plomo y cadmio.

4.4. Análisis estadístico

Se realizó el análisis estadístico de los datos experimentales (ver anexo C), de aquí se puede afirmar con el análisis de la varianza de potencial redox y coliformes totales en presencia de plomo y cadmio después de un test de Duncan con un 95% de confiabilidad que antes de la cloración del agua contaminada con materia orgánica, plomo y cadmio, la cantidad de Coliformes totales a las concentraciones de plomo y cadmio evaluadas son distintas y después de la cloración, no existe variabilidad en la cantidad de coliformes totales. Así mismo el potencial redox antes de la cloración es diferente en todas las unidades experimentales, sin embargo, después de la cloración, estadísticamente no existe diferencia significativa en el potencial redox cuando la concentración de plomo y cadmio son iguales.

Del análisis de la varianza de potencial redox y coliformes totales en presencia de nitrato y fosfato, se puede afirmar que antes de la cloración los valores de potencial redox en todos los casos son estadísticamente iguales; después de la cloración el potencial redox en las muestras con diferentes concentraciones de fosfato no muestra diferencia estadística significativa, sin embargo el potencial redox de las muestras con diferentes concentraciones de nitrato son estadísticamente diferentes. Para el caso de los coliformes totales, la prueba

de Duncan nos dice que antes y después de la cloración, la concentración de coliformes totales son estadísticamente diferentes.

Con el análisis de la varianza de potencial redox y coliformes totales en presencia de Pb, Cd, nitrato y fosfato, se puede observar que tanto el potencial redox como los coliformes totales antes y después de la cloración son estadísticamente diferentes en todas las concentraciones de contaminantes evaluadas.

Mediante la correlación de Pearson se puede comprobar que el potencial redox y el cloro libre residual en las muestras evaluadas son directamente proporcionales. El potencial redox y los coliformes totales tienen una relación moderadamente inversa. Para el caso del cloro libre residual y los coliformes totales, se desarrolló una relación fuertemente inversa.

V. CONCLUSIONES

La cloración del agua en presencia de plomo y cadmio permite desarrollar altos valores de potencial redox y eliminar gran cantidad de coliformes totales, siendo el plomo el metal pesado que tiende a influir en la reducción de la eficiencia de la desinfección.

En la cloración del agua en presencia de nitrato y fosfato, el ion fosfato reduce la eficiencia de la desinfección, resultando con menores valores de potencial redox y mayor concentración de coliformes totales con respecto al comportamiento del nitrato.

Cuando se realiza la cloración en presencia de plomo, cadmio, nitrato y fosfato, el potencial redox es mayor cuando menor es la concentración de los contaminantes, sin embargo, la eficiencia de la desinfección se ve afectada negativamente a las dos concentraciones de contaminantes evaluadas.

Cuando los valores de potencial redox son menores a 500 mV, se obtuvo el más bajo porcentaje de eliminación de coliformes totales.

VI. PROPUESTAS A FUTURO

Desarrollar investigaciones para determinar el efecto de otros tipos de contaminantes de naturaleza orgánica e inorgánica sobre la eficiencia de la desinfección por cloración.

Realizar estudios que permitan conocer los subproductos formados por la adición de cloro y su reacción con materia orgánica disuelta, así como su grado de toxicidad.

Investigar la influencia de otros parámetros fisicoquímicos en la eficiencia de la desinfección, tales como la conductividad, la salinidad, solidos disueltos.

Realizar investigaciones que permitan determinar cómo reducir la formación de subproductos de la cloración para fines de manejo de la reducción de problemas de salud por ingesta humana.

VII. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Agirrezabalaga, F., Cruz I. (2004). Estudio ecológico integral (agua, sedimento y macrofauna bentónica) del tramo final de la Regata de Jaitzubia y de las nuevas zonas intermareales creadas tras la ejecución del proyecto “restauración ambiental de marismas de la vega de Jaitzubia”. Dirección de biodiversidad del departamento de ordenación del territorio y medioambiente del gobierno vasco- España. https://nanopdf.com/download/estudio-ecologico-integral-agua-sedimento-y_pdf.
- Aguirre N., Echeverría F., Castaño J. (2006). *Caracterización fisicoquímica y biológica de la bahía de Cartagena en la zona de Mamonal para la evaluación de pinturas antiincrustantes en condiciones estáticas*. [Grupo de Corrosión y Protección, Ingeniería de Materiales, Universidad de Antioquia, Medellín, Colombia].
- Autoridad Nacional del Agua (2009). Política y Estrategia Nacional de Recursos Hídricos del Perú. Lima: ANA.
- Batté, M., Mathieu, L., Laurent, P., Prévost, M, (2003). Influence of phosphate and disinfection on the composition of biofilms produced from drinking water, as measured by fluorescence in situ hybridization. *Can J Microbiol* 49 (12), 741–753. doi:10.1139/w03-094, 2003.
- Bergendahl, JA y Stevens, L. (2005). Potencial de reducción de la oxidación como medida de la eficacia de la desinfección para la cloración de aguas residuales. *Progreso ambiental*, 24(2), 214–222. doi:10.1002/ep.10074.
- Buelta, A., Martínez, R. (2016). Guía Básica de Control de Calidad del Agua, Editorial ONGAWA C/ Vizconde de Matamala, 15 28028 Madrid.
- Cabaniss, S.E. (2011). Forward Modeling of Metal Complexation by NOM: II. Prediction of Binding Site Properties. *Environ. Sci. Technol.* 45, 3202–3209. <https://doi.org/10.1021/es102408w>.

- Charpentier, J., Martin, G., Wacheux, H., & Gilles, P. (1998). ORP regulation and activated sludge: 15 years of experience. *Water Science and Technology*, 38, 197–208.
- Du, Y., Lv, X.-T., Wu, Q.-Y., Zhang, D.-Y., Zhou, Y.-T., Peng, L., & Hu, H.-Y. (2017). Formation and control of disinfection byproducts and toxicity during reclaimed water chlorination: A review. *Journal of Environmental Sciences*, 58, 51–63. doi:10.1016/j.jes.2017.01.013.
- Gonzales GF, Zevallos A, Gonzales-Castañeda C, Nuñez D, Gastañaga C, Cabezas C, et al. (2014). Contaminación ambiental, variabilidad climática y cambio climático: una revisión del impacto en la salud de la población peruana. *Rev Peru Med Exp Salud Publica* ,31(3):547-56.
- Gonzales, S., Almeida, C., Quintar, S., Gonzales, P., Mallea M. (2006). El uso del potencial redox en muestras ambientales. Universidad Nacional de San Luis Chacabuco y Pedernera 5700 San Luis. Argentina.
- Gouider M, Bouzid J, Sayadi S & Montiel A (2009) Impact of orthophosphate addition on biofilm development in drinking water distribution systems. *Journal of hazardous materials* 167: 1198-1202.
- Guadarrama-Tejas, R., Kido-Miranda, J., Roldan-Antunez, G. y Salassalgado, M. (2016). Contaminación del agua. *Revista de Ciencias Ambientales y Recursos Naturales*, 2-5: 1-10.
- Hannainst (2017). La medida del potencial redox para el control de la eficiencia en la desinfección del agua. *Aguaresiduales.info*, [En Línea] (<https://www.aguasresiduales.info/revista/noticias/medida-del-potencial-de-oxidacion-reduccion-para-el-control-de-la-eficiencia-de-la-de-2XMk>, 27 de diciembre de 2021).
- Hernández R., Fernández C. Baptista M. (2010). Metodología de la Investigación, McGraw-Hill / Interamericana editores, s.a. de c.v. Quinta Edición.
- Hertkorn, N., Perdue, E.M., Kettrup, A. (2004). A Potentiometric and ¹¹³Cd NMR Study of Cadmium Complexation by Natural Organic Matter at Two Different Magnetic Field Strengths. *Anal. Chem.* 76, 6327–6341. <https://doi.org/10.1021/ac0400212>.

- Holman, J.B., & Wareham, D.G. (2003). Oxidation–reduction potential as a monitoring tool in a low dissolved oxygen wastewater treatment process. *Journal of Environmental Engineering*, 129, 52–58.
- Honeywell International Inc. (2012, mayo). Oxidation Reduction Potential Measurement for Microbiological Control in Makeup Water and Cooling Water. Automation & Control Solutions. <https://thermo-kinetics.com/wp-content/uploads/2022/12/pmt-hps-sn-orp-measurement-for-microbiological-control-solution-notes.pdf>.
- Chandy J.P, Angles M.L (2001) Determination of nutrients limiting biofilm formation and the subsequent impact on disinfectant decay, *Water Research*, Volume 35, Issue 11, Pages 2677-2682, ISSN 0043-1354, [https://doi.org/10.1016/S0043-1354\(00\)00572-8](https://doi.org/10.1016/S0043-1354(00)00572-8).
- James R. Mihelcic, P., Fry, L. M., Myre, E. A., Linda D. Phillips, P., Brian D. Barkdoll, P. P. (2009). Field guide to environmental engineering for development workers: water, sanitation, and indoor air. Virginia: American Society of Civil Engineers.
- Jang HJ, Choi YJ, Ro HM & Ka JO (2012) Effects of phosphate addition on biofilm bacterial communities and water quality in annular reactors equipped with stainless steel and ductile cast iron pipes. *Journal of microbiology (Seoul, Korea)* 50: 17-28.
- Li, J., Perdue, E.M., Gelbaum, L.T. (1998). Using cadmium-113 NMR spectrometry to study metal complexation by natural organic matter. *Environ. Sci. Technol.* 32, 483–487.
- Microlab Industrial (2019). Hablemos de REDOX, el otro potencial en el agua. [Aguasresiduales.info](https://www.aguasresiduales.info), [En Línea] (<https://www.aguasresiduales.info/revista/blog/hablemos-de-redox-el-otro-potencial-del-agua> 27 de diciembre de 2021).
- Muniz, P., E. Danulat, B. Yannicelli, A. García-Alonso, G. Medina y M.C. Bicego. (2004). Assessment of contamination by heavy metals and petroleum hydrocarbons in sediments of Montevideo Harbour (Uruguay). *Environ. Inter.*, 29: 1019– 1028.
- Ramirez, F. (2005). Desinfección del Agua Potable. Editorial Canal Educa. Primera Edición. México.

- Shah, A.D., Mitch, W.A., (2011). Halonitroalkanes, halonitriles, haloamides, and Nnitrosamines: a critical review of nitrogenous disinfection byproduct formation pathways. *Environ. Sci. Technol.* 46 (1), 119–131.
- Solsona, F., Méndez, J. (2002). Desinfección del Agua, Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente.
- Tirado M. (2015). Red inalámbrica de sensores para el monitoreo de la calidad del agua de la microcuenca del río Quero (BFISEI; t962ec). [Tesis para optar el grado de Ingeniero en Electrónica y Comunicaciones, Universidad Técnica de Ambato]. <http://repositorio.uta.edu.ec/handle/123456789/8604>.
- Vugh, D., Baken, K., Kolkman, A., Martijn, A., de Voogt, P. (2018). Application of effect directed analysis to identify mutagenic nitrogenous disinfection by-products of advanced oxidation drinking water treatment. *Environ. Sci. Pollut. Res.* 25 (5), 3951–3964.
- Xiao Liu, Minkyu Park, Shawn C. Beitel, Christiane Hoppe-Jones, Xiang-Zhou Meng, Shane A. Snyder, (2021). Formation of nitrogenous disinfection byproducts in MP UV-based water treatments of natural organic matters: The role of nitrate, *Water Research*, Volume,204,117583, <https://doi.org/10.1016/j.watres.2021.117583>.
- Zipper, T., Fleischmann, N., & Haberl, R. (1998). Development of a new system for control and optimization of small wastewater treatment plants using oxidation–reduction potential (ORP). *Water Science and Technology*, 38, 307–314.

VIII. ANEXOS

8.1. Imágenes de la investigación



Figura 9. Punto de obtención de la muestra del agua residual para la investigación.



Figura 10. Mapa referencial del punto de obtención de muestra: Desembocadura de la Quebrada del Águila al Río Huallaga.



Figura 11. Filtración del agua residual doméstica utilizada en la investigación.



Figura 12. Adición de la dosis de la solución de hipoclorito de sodio.



Figura 13. Adición de los contaminantes de plomo y cadmio al agua residual.

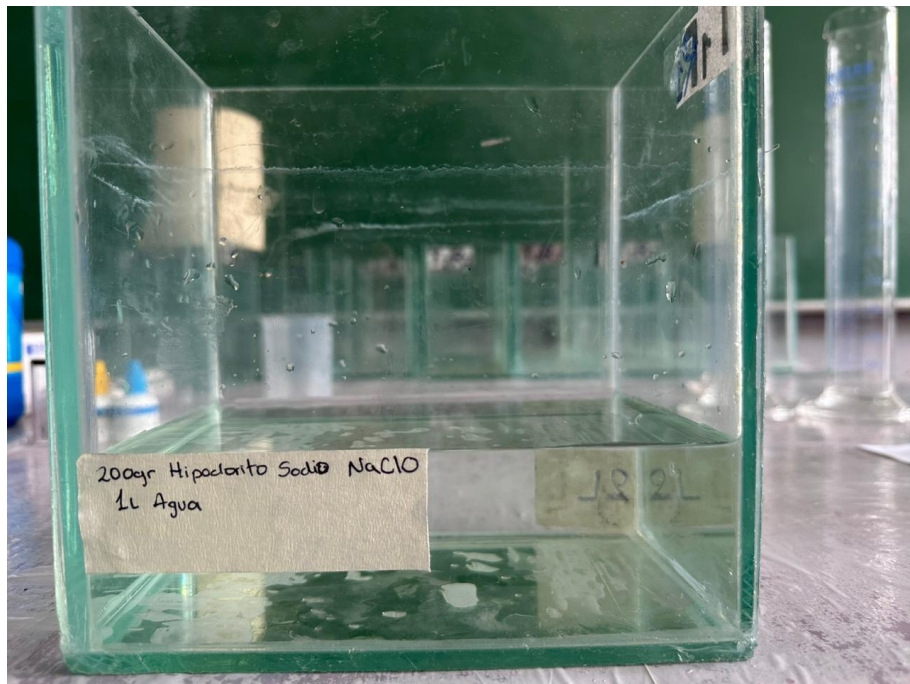


Figura 14. Solución de la solución de hipoclorito de sodio.



Figura 15. Cloración del agua contaminada con plomo y cadmio a diferentes concentraciones.



Figura 16. Cloración del agua contaminada con nitrato y fosfato a diferentes concentraciones.



Figura 17. Aspecto del agua después los 30 minutos de la adición de cloro.



Figura 18. Medición del peso para la preparación de la solución desinfectante.



Figura 19. Adición del volumen exacto de hipoclorito de sodio



Figura 20. Medición del agua residual doméstica de la investigación.

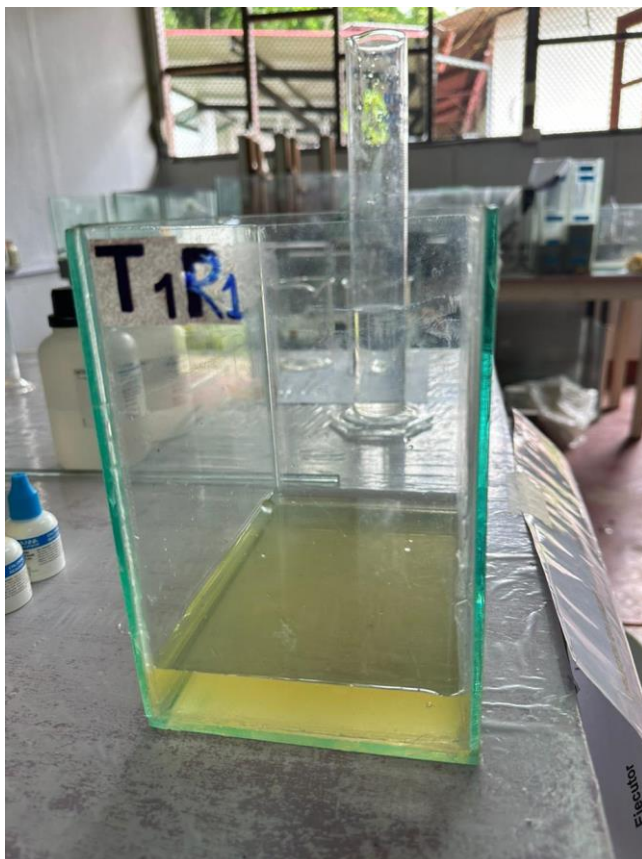


Figura 21. Preparación del agua residual diluida para la investigación.



Figura 22. Preparación del agua residual con adición de plomo y cadmio de la investigación.



Figura 23. Kit de medición de cloro libre residual.



Figura 24. Soluciones patrón de plomo y cadmio utilizados en la investigación.

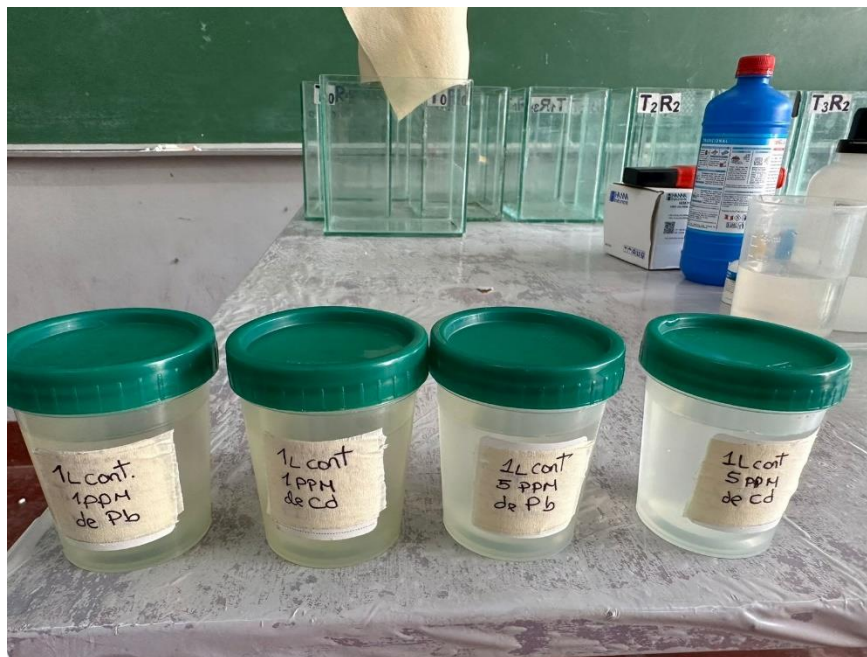


Figura 25. Toma de muestras después de la cloración para análisis de coliformes totales.



Figura 26. Medición del potencial redox de las unidades experimentales.



Figura 27. Medición del cloro libre residual en las unidades experimentales.



Figura 28. Adición de reactivos para la medición del cloro libre residual por colorimetría.



Figura 29. Muestras tomadas para el análisis microbiológico.



Figura 30. Preparación y desarrollo del análisis microbiológico.



Figura 31. Visualización de los efectos en los análisis de coliformes totales.



Figura 32. Resultados en los análisis para determinación de coliformes totales.

8.2. Datos experimentales de la investigación

Tabla 9. Datos experimentales en los tratamientos de cloración en aguas contaminadas con plomo y cadmio.

Tratamiento/ replicas	Agua contaminada antes de cloración			Agua contaminada después de cloración		
	Potencial Redox (mV)	Cloro Libre residual (ppm)	Coliformes Totales (NMP/100 ml)	Potencial Redox (mV)	Cloro Libre residual (ppm)	Coliformes Totales (NMP/100)
0 ppm Pb	125	0	183000	850	0.6	0
0 ppm Pb	129	0	180000	823	0.6	0
0 ppm Pb	131	0	180000	846	0.6	0
1 ppm Pb	187	0	200000	723	0.5	40
1 ppm Pb	179	0	200000	719	0.5	40
1 ppm Pb	183	0	212000	721	0.5	40
5 ppm Pb	86	0	240000	756	0.4	30
5 ppm Pb	92	0	248000	764	0.4	30
5 ppm Pb	82	0	240000	771	0.4	30
0 ppm Pb	125	0	180000	850	0.6	0
0 ppm Cd	129	0	187000	823	0.6	0
0 ppm Cd	131	0	180000	846	0.6	0
1 ppm Cd	165	0	190000	731	0.4	30
1 ppm Cd	157	0	194000	747	0.4	30
1 ppm Cd	163	0	190000	734	0.4	30
5 ppm Cd	189	0	220000	749	0.5	20
5 ppm Cd	192	0	226000	758	0.5	20
5 ppm Cd	194	0	220000	760	0.5	20

Tabla 10. Datos experimentales en los tratamientos de cloración en aguas contaminadas con nitrato y fosfato.

Tratamiento/ replicas	Agua contaminada antes de cloración			Agua contaminada después de cloración		
	Potencial Redox (mV)	Cloro Libre residual (ppm)	Coliformes Totales (NMP/100 ml)	Potencial Redox (mV)	Cloro Libre residual (ppm)	Coliformes Totales (NMP/100 ml)
0 ppm nitrato	125	0	182000	850	0.6	0
0 ppm nitrato	129	0	180000	823	0.6	0
0 ppm nitrato	131	0	185000	846	0.6	0
1 ppm nitrato	97	0	150000	680	0.4	60
1 ppm nitrato	92	0	156000	653	0.4	60
1 ppm nitrato	91	0	150000	649	0.4	60
5 ppm nitrato	43	0	120000	602	0.3	40
5 ppm nitrato	38	0	129000	614	0.3	40
5 ppm nitrato	41	0	120000	598	0.3	40
0 ppm fosfato	125	0	180000	850	0.6	0
0 ppm fosfato	129	0	186000	823	0.6	0
0 ppm fosfato	131	0	180000	846	0.6	0
1 ppm fosfato	62	0	130000	540	0.3	70
1 ppm fosfato	66	0	133000	560	0.3	70
1 ppm fosfato	58	0	130000	549	0.3	70
5 ppm fosfato	27	0	110000	524	0.2	90
5 ppm fosfato	25	0	118000	556	0.2	90
5 ppm fosfato	22	0	110000	589	0.2	90

Tabla 11. Datos experimentales en los tratamientos de cloración en aguas contaminadas con plomo, cadmio, nitrato y fosfato.

Tratamiento/ replicas	Agua contaminada antes de cloración			Agua contaminada después de cloración		
	Potencial Redox (mV)	Cloro Libre residual (ppm)	Coliformes Totales (NMP/100 ml)	Potencial Redox (mV)	Cloro Libre residual (ppm)	Coliformes Totales (NMP/100 ml)
0 ppm nitrato, fosfato, Pb y Cd	125	0	181000	850	0.6	0
0 ppm nitrato, fosfato, Pb y Cd	129	0	186500	823	0.6	0
0 ppm nitrato, fosfato, Pb y Cd	131	0	180000	846	0.6	0
1 ppm nitrato, fosfato, Pb y Cd	78	0	124000	539	0	1500
1 ppm nitrato, fosfato, Pb y Cd	81	0	140000	528	0	1750
1 ppm nitrato, fosfato, Pb y Cd	85	0	120000	510	0	1800
5 ppm nitrato, fosfato, Pb y Cd	35	0	110000	489	0	2100
5 ppm nitrato, fosfato, Pb y Cd	38	0	115000	457	0	2450
5 ppm nitrato, fosfato, Pb y Cd	42	0	116000	449	0	2300

8.3. Análisis estadístico de los datos experimentales

8.3.1. Análisis de la varianza de potencial redox y coliformes totales en presencia de Pb y Cd.

Colif. T(NMP/100 ml) sin cloración

Variable	N	R ²	R ² Aj	CV
Colif. T(NMP/100 ml) sin ..	18	0.98	0.97	2.06

Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo I)

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo.	8933777777.78	5	1786755555.56	101.14	<0.0001
Contaminante (ppm)	8933777777.78	5	1786755555.56	101.14	<0.0001
Error	212000000.00	12	17666666.67		
Total	9145777777.78	17			

Test:Duncan Alfa=0.05

Error: 17666666.6667 gl: 12

Contaminante (ppm)	Medias	n	E.E.	
0 Pb	181000.00	3	2426.70	A
0 Cd	182333.33	3	2426.70	A
1 Cd	191333.33	3	2426.70	B
1 Pb	204000.00	3	2426.70	C
5 Cd	222000.00	3	2426.70	D
5 Pb	242666.67	3	2426.70	E

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0.05$)

Colif. T(NMP/100 ml) con cloración

Variable	N	R ²	R ² Aj	CV
Colif. T(NMP/100 ml) con ..	18	1.00	1.00	0.00

Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo I)

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo.	4200.00	5	840.00	sd	sd
Contaminante (ppm)	4200.00	5	840.00	sd	sd
Error	0.00	12	0.00		
Total	4200.00	17			

ORP sin cloración(mV)

Variable	N	R ²	R ² Aj	CV
ORP sin cloración(mV)	18	0.99	0.99	2.55

Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo I)

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo.	23526.94	5	4705.39	337.44	<0.0001
Contaminante (ppm)	23526.94	5	4705.39	337.44	<0.0001
Error	167.33	12	13.94		
Total	23694.28	17			

Test:Duncan Alfa=0.05*Error: 13.9444 gl: 12*

Contaminante (ppm)	Medias	n	E.E.	
5 Pb	86.67	3	2.16	A
0 Pb	128.33	3	2.16	B
0 Cd	128.33	3	2.16	B
1 Cd	161.67	3	2.16	C
1 Pb	183.00	3	2.16	D
5 Cd	191.67	3	2.16	E

*Medias con una letra común no son significativamente diferentes (p > 0.05)***ORP con cloración (mV)**

Variable	N	R ²	R ² Aj	CV
ORP con cloración (mV)	18	0.97	0.96	1.28

Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo I)

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo.	39577.17	5	7915.43	80.27	<0.0001
Contaminante (ppm)	39577.17	5	7915.43	80.27	<0.0001
Error	1183.33	12	98.61		
Total	40760.50	17			

Test:Duncan Alfa=0.05*Error: 98.6111 gl: 12*

Contaminante (ppm)	Medias	n	E.E.	
1 Pb	721.00	3	5.73	A
1 Cd	737.33	3	5.73	A
5 Cd	755.67	3	5.73	B
5 Pb	763.67	3	5.73	B
0 Cd	839.67	3	5.73	C
0 Pb	839.67	3	5.73	C

Medias con una letra común no son significativamente diferentes (p > 0.05)

8.3.2. Análisis de la varianza de potencial redox y coliformes totales en presencia de nitrato y fosfato

ORP sin cloración (mV)

Variable	N	R ²	R ² Aj	CV
ORP sin cloración (mV)	18	1.00	0.99	3.90

Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo I)

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo.	29345.11	5	5869.02	610.65	<0.0001
Contaminante (ppm)	29345.11	5	5869.02	610.65	<0.0001
Error	115.33	12	9.61		
Total	29460.44	17			

Test:Duncan Alfa=0.05*Error: 9.6111 gl: 12*

Contaminante (ppm)	Medias	n	E.E.	
5 Fosfato	24.67	3	1.79	A
5 Nitrato	40.67	3	1.79	B
1 Fosfato	62.00	3	1.79	C
1 Nitrato	93.33	3	1.79	D

0 Nitrato	128.33	3	1.79	E
0 Fosfato	128.33	3	1.79	E

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0.05$)

ORP con cloración (mV)

Variable	N	R ²	R ² Aj	CV
ORP con cloración (mV)	18	0.99	0.98	2.66

Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo I)

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo.	267517.78	5	53503.56	165.90	<0.0001
Contaminante (ppm)	267517.78	5	53503.56	165.90	<0.0001
Error	3870.00	12	322.50		
Total	271387.78	17			

Test:Duncan Alfa=0.05

Error: 322.5000 gl: 12

Contaminante (ppm)	Medias	n	E.E.	
1 Fosfato	549.67	3	10.37	A
5 Fosfato	556.33	3	10.37	A
5 Nitrato	604.67	3	10.37	B
1 Nitrato	660.67	3	10.37	C
0 Fosfato	839.67	3	10.37	D
0 Nitrato	839.67	3	10.37	D

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0.05$)

Colif. T (NMP/100 ml) sin cloración

Variable	N	R ²	R ² Aj	CV
Colif. T (NMP/100 ml) sin ..	18	0.99	0.98	2.51

Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo I)

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo.	13527166666.67	5	2705433333.33	198.77	<0.0001
Contaminante (ppm)	13527166666.67	5	2705433333.33	198.77	<0.0001
Error	163333333.33	12	13611111.11		
Total	13690500000.00	17			

Test:Duncan Alfa=0.05

Error: 13611111.1111 gl: 12

Contaminante (ppm)	Medias	n	E.E.	
5 Fosfato	112666.67	3	2130.03	A
5 Nitrato	123000.00	3	2130.03	B
1 Fosfato	131000.00	3	2130.03	C
1 Nitrato	152000.00	3	2130.03	D
0 Fosfato	182000.00	3	2130.03	E
0 Nitrato	182333.33	3	2130.03	E

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0.05$)

Colif. T (NMP/100 ml) con cloración

Variable	N	R ²	R ² Aj	CV
Colif. T (NMP/100 ml) con ..	18	1.00	1.00	2.9E-07

Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo I)

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo.	20800.00	5	4160.00	257820749310017000.00	<0.0001

Contaminante (ppm)	20800.00	5	4160.00	sd	sd
Error	0.00	12	0.00		
Total	20800.00	17			

Test:Duncan Alfa=0.05

Error: 0.0000 gl: 12

Contaminante (ppm)	Medias	n	E.E.	
0 Fosfato	0.00	3	0.00	A
0 Nitrato	0.00	3	0.00	A
5 Nitrato	40.00	3	0.00	B
1 Nitrato	60.00	3	0.00	C
1 Fosfato	70.00	3	0.00	D
5 Fosfato	90.00	3	0.00	E

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0.05$)

8.3.3. Análisis de la varianza de potencial redox y coliformes totales en presencia de Pb, Cd, nitrato y fosfato.

ORP sin cloración (mV)

Variable	N	R ²	R ² Aj	CV
ORP sin cloración (mV)	9	0.99	0.99	4.07

Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo I)

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo.	12158.00	2	6079.00	536.38	<0.0001
Contaminante (ppm)	12158.00	2	6079.00	536.38	<0.0001
Error	68.00	6	11.33		
Total	12226.00	8			

Test:Duncan Alfa=0.05

Error: 11.3333 gl: 6

Contaminante (ppm)	Medias	n	E.E.	
5 Pb Cd nitrato fosfato	38.33	3	1.94	A
1 Pb Cd nitrato fosfato	81.33	3	1.94	B
0 Pb Cd nitrato fosfato	128.33	3	1.94	C

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0.05$)

ORP con cloración (mV)

Variable	N	R ²	R ² Aj	CV
ORP con cloración (mV)	9	0.99	0.99	2.80

Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo I)

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo.	242651.56	2	121325.78	416.13	<0.0001
Contaminante (ppm)	242651.56	2	121325.78	416.13	<0.0001
Error	1749.33	6	291.56		
Total	244400.89	8			

Test:Duncan Alfa=0.05

Error: 291.5556 gl: 6

Contaminante (ppm)	Medias	n	E.E.	
5 Pb Cd nitrato fosfato	465.00	3	9.86	A
1 Pb Cd nitrato fosfato	525.67	3	9.86	B
0 Pb Cd nitrato fosfato	839.67	3	9.86	C

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0.05$)

Colif. T(NMP/100 ml) sin cloración

Variable	N	R ²	R ² Aj	CV
Colif. T(NMP/100 ml) sin ..	9	0.97	0.96	4.74

Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo I)

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo.	7913722222.22	2	3956861111.11	88.20	<0.0001
Contaminante (ppm)	7913722222.22	2	3956861111.11	88.20	<0.0001
Error	269166666.67	6	44861111.11		
Total	8182888888.89	8			

Test:Duncan Alfa=0.05

Error: 44861111.1111 gl: 6

Contaminante (ppm)	Medias	n	E.E.
5 Pb Cd nitrato fosfato	113666.67	3	3867.00 A
1 Pb Cd nitrato fosfato	128000.00	3	3867.00 B
0 Pb Cd nitrato fosfato	182500.00	3	3867.00 C

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0.05$)

Colif. T(NMP/100 ml) con cloración

Variable	N	R ²	R ² Aj	CV
Colif. T(NMP/100 ml) con ..	9	0.99	0.98	10.39

Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo I)

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo.	8407222.22	2	4203611.11	222.54	<0.0001
Contaminante (ppm)	8407222.22	2	4203611.11	222.54	<0.0001
Error	113333.33	6	18888.89		
Total	8520555.56	8			

Test:Duncan Alfa=0.05

Error: 18888.8889 gl: 6

Contaminante (ppm)	Medias	n	E.E.
0 Pb Cd nitrato fosfato	0.00	3	79.35 A
1 Pb Cd nitrato fosfato	1683.33	3	79.35 B
5 Pb Cd nitrato fosfato	2283.33	3	79.35 C

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0.05$)

8.3.4. Coeficientes de correlación*Correlación de Pearson*

Variable(1)	Variable(2)	n	Pearson	p-valor
ORP con cloración(mV)	Cloro libre residual (ppm) ..	45	0.94	<0.0001
ORP con cloración(mV)	Colif. T(NMP/100 ml) con ..	45	-0.67	<0.0001
Cloro libre (ppm)	Colif. T(NMP/100 ml) con ..	45	-0.79	<0.0001