

**UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA**  
**SEDE CUENCA**

**CARRERA DE INGENIERÍA AMBIENTAL**

*Trabajo de titulación previo a la  
obtención de título de Ingeniera  
Ambiental e Ingeniero Ambiental*

**TRABAJO EXPERIMENTAL:**

**“DETERMINACIÓN DE LA CONCENTRACIÓN DE CLORO LIBRE  
RESIDUAL MEDIANTE TÉCNICAS ELECTROQUÍMICAS”**

**AUTORES:**

GABRIELA ALEJANDRA ORDÓÑEZ AGUIRRE

BORYS ISRAEL QUIROZ SILVA

**TUTORA:**

BQF. CPI | ~~NEC~~ GEOVANNA ZEA COBOS, Msc.

CUENCA / ECUADOR

2021

## CESIÓN DE DERECHOS DE AUTOR

Nosotros, Gabriela Alejandra Ordóñez Aguirre con documento de identificación N° 1150145579 y Borys Israel Quiroz Silva con documento de identificación N° 1900580471, manifestamos nuestra voluntad y cedemos a la Universidad Politécnica Salesiana la titularidad sobre los derechos patrimoniales en virtud de que somos autores del trabajo de titulación: **“DETERMINACIÓN DE LA CONCENTRACIÓN DE CLORO LIBRE RESIDUAL MEDIANTE TÉCNICAS ELECTROQUÍMICAS”**, mismo que ha sido desarrollado para optar por el título de: *Ingeniera Ambiental e Ingeniero Ambiental*, en la Universidad Politécnica Salesiana, quedando la Universidad facultada para ejercer plenamente los derechos cedidos anteriormente.

En la aplicación a lo determinado en la Ley de Propiedad Intelectual, en nuestra condición de autores nos reservamos los derechos morales de la obra antes citada. En concordancia, suscribimos este documento en el momento que hacemos entrega del trabajo final en formato digital a la Biblioteca de la Universidad Politécnica Salesiana.

Cuenca, diciembre de 2021.



Gabriela Alejandra Ordóñez Aguirre  
C.I. 1150145579



Borys Israel Quiroz Silva  
C.I. 1900580471

## CERTIFICACIÓN

Yo, declaro que bajo mi tutoría fue desarrollado el trabajo de titulación:  
**“DETERMINACIÓN DE LA CONCENTRACIÓN DE CLORO LIBRE RESIDUAL MEDIANTE TÉCNICAS ELECTROQUÍMICAS”**, realizado por Gabriela Alejandra Ordóñez Aguirre y Borys Israel Quiroz Silva, obteniendo el *Trabajo Experimental* que cumple con todos los requisitos estipulados por la Universidad Politécnica Salesiana.

Cuenca, diciembre de 2021.



Bqf. Cpi 2<sup>da</sup> de Geovanna Zea Cobos, Msc.

C.I. 0103638730

## DECLARATORIA DE RESPONSABILIDAD

Nosotros, Gabriela Alejandra Ordóñez Aguirre con documento de identificación N° 1150145579 y Borys Israel Quiroz Silva con documento de identificación N° 1900580471, autores del trabajo de titulación: **“DETERMINACIÓN DE LA CONCENTRACIÓN DE CLORO LIBRE RESIDUAL MEDIANTE TÉCNICAS ELECTROQUÍMICAS”**, certificamos que el total contenido del *Trabajo Experimental*, es de nuestra exclusiva responsabilidad y autoría.

Cuenca, diciembre de 2021.



Gabriela Alejandra Ordóñez Aguirre  
C.I. 1150145579



Borys Israel Quiroz Silva  
C.I. 1900580471

## **Dedicatoria y Agradecimientos**

Agradezco inmensamente a Dios por cada día haber guiado cada uno de mis pasos y por haberme sostenido en cada una batalla que se me ha presentado. Dedico esta tesis a mis queridos padres Roberth Ordoñez y Marlene Aguirre, a quienes les agradezco infinitamente por su gran amor, todas sus enseñanzas, su confianza, y el gran sacrificio que realizan día con día, ustedes fueron el pilar fundamental para alcanzar esta meta, de igual forma agradezco inmensurablemente a mis tíos por su gran apoyo incondicional durante todo este recorrido.

Agradezco enormemente a nuestra tutora Bqf. Geovanna Angélica Zea Cobos por todos los conocimientos impartidos, el tiempo dedicado, su ayuda y el gran apoyo académico en todo el desarrollo de esta tesis, de igual manera quiero agradecer muchísimo a la Dra. Mónica Judith Espadero Bermeo encargada de los Laboratorios “Ciencias de la Vida” por su incondicional ayuda y formación dentro de los laboratorios, quienes nos ayudaron a lograr alcanzar este logro.

**Gabriela Ordóñez**

## **Dedicatoria y Agradecimientos**

Agradezco a Dios por otorgarme todo lo necesario para cumplir mis metas y guiar mis pasos, agradezco a mi madre querida Natividad de Jesús Silva por siempre apoyar mis sueños y ser el pilar fundamental de mi vida, a todos mis tíos pero en especial y con mucho cariño a mi tía Lilia María Silva Cabrera, que con su sabiduría y amor incondicional siempre guió mis pasos durante mi etapa de estudios, a mis queridos abuelitos Delmira y florito que siempre cuidaron de mi desde el cielo.

Agradezco a todos los docentes de la carrera de Ingeniería Ambiental, pero en especial a mi tutora de tesis Bqf. Geovanna Angélica Zea Cobos por brindarnos su apoyo y tiempo en toda la etapa de desarrollo de nuestro proyecto.

Este trabajo de titulación se lo dedico primeramente a Dios, por darme la sabiduría necesaria para cumplir esta meta; a mi madre Natividad de Jesús Silva por creer en mi todo el tiempo y así lograr mi formación profesional.

Una dedicatoria especial para Gabriela por su cariño y amor incondicional en esta etapa de mi vida.

**Borys Quiroz**

**Resumen:**

En el ámbito de la salud, uno de los temas más importantes es garantizar el acceso al agua de consumo de calidad, por cual es esencial mantener un control de sus condiciones mediante análisis y muestreo, siendo uno de los principales indicadores de la calidad del agua potable la concentración de cloro libre residual ya que garantiza la inocuidad del agua y su preservación en el tiempo, muchas técnicas de determinación de cloro libre no son las más idóneas debido a los grandes costos que se requieren para su monitoreo así como la gran cantidad de sustancias químicas empleadas que terminan afectando al medio ambiente. En este proyecto se realizaron mediciones de cloro libre residual, mediante la utilización de sensores ORP o redox, los cuales miden el potencial de oxidación y reducción de las reacciones que ocurren en el agua, siendo el cloro un agente oxidante, el sensor medirá su capacidad de oxidación, y se relacionaron conjuntamente factores de pH y temperatura, empleando como referencia una curva de calibración realizada con reactivo DPD mediante espectrofotometría, determinado así; que las lecturas del sensor están relacionadas con la concentración de cloro libre presente en el agua, de igual forma el pH y la temperatura son factores indirectamente proporcionales que influyen en las mediciones, por lo cual es determinante tener control de ellos. Se encontró que no existe linealidad en las mediciones sin embargo se determinó que el sistema es preciso para medición de cloro libre ya que se encuentra dentro del criterio aceptado en la validación de técnicas analíticas, siendo una técnica idónea y económica, alternativa para el monitoreo continuo en juntas de agua potable.

**Palabras clave:** Cloro libre, potencial oxido-reducción, sensor ORP.

**Abstract:**

In the field of health, one of the most important issues is to guarantee access to quality drinking water, for which it is essential to maintain control of its conditions through analysis and sampling, being one of the main indicators of water quality. The concentration of residual free chlorine is potable since it guarantees the safety of the water and its preservation over time, many free chlorine determination techniques are not the most suitable due to the high costs required for its monitoring as well as the large amount of Chemical substances used that end up affecting the environment. In this project, measurements of residual free chlorine were carried out, using ORP or redox sensors, which measure the oxidation and reduction potential of the reactions that occur in water, since chlorine is an oxidizing agent, the sensor will measure its capacity oxidation, and pH and temperature factors were related together, using as a reference a calibration curve made with DPD reagent by spectrophotometry, determined that the sensor readings are related to the concentration of free chlorine present in the water, in the same way pH and temperature are indirectly proportional factors that influence measurements, for which it is essential to have control of them; There is no linearity in the measurements, however it was determined that the system is accurate for the measurement of free chlorine since it is within the accepted criteria in the validation of analytical techniques, being an ideal and economical alternative for continuous monitoring in drinking water joints.

**Keywords:** Free chlorine, oxidation-reduction potential, ORP sensor.



## Índice

CAPITULO I.....	1
1    Introducción.....	1
2    Antecedentes y problemática.....	3
3    Justificación.....	5
4    Objetivos.....	6
4.1    Objetivo General.....	6
4.2    Objetivo específico.....	6
CAPITULO II.....	7
5    Marco Teórico.....	7
5.1    Importancia del agua de consumo.....	7
5.1.1    Afecciones a la salud por consumo de agua en mala calidad.....	9
5.1.2    Captación del agua de consumo.....	10
5.2    Importancia de la desinfección del agua de consumo.....	10
5.2.1    Tipos de desinfectantes del agua de consumo.....	11
5.2.1.1    Cloraminas.....	11
5.2.1.2    Ozono.....	11
5.2.1.3    Cloro.....	11
5.2.1.4    Cloro gas.....	12
5.2.1.5    Cloro tabletas.....	13
5.2.2    Cloración del Agua de Consumo.....	13
5.2.2.1    Efectos positivos de la cloración.....	14
5.2.2.2    Efectos negativos de la cloración.....	14
5.2.3    Cloración al Breakpoint.....	15
5.3    Parámetros de calidad del agua de consumo.....	15
5.4    Importancia del Cloro libre residual.....	16
5.4.1    Formación de cloro libre residual mediante aplicación de hipoclorito de sodio al agua.....	17
5.4.2    Propiedades físicas del hipoclorito de sodio.....	18
5.4.3    Propiedades químicas del hipoclorito de sodio.....	19
5.4.4    Efectos del hipoclorito de sodio sobre la salud.....	20
5.4.5    Incompatibilidades con el hipoclorito de sodio.....	22
5.4.6    Producción y propiedades del hipoclorito de sodio.....	22
5.4.7    Reacción del hipoclorito de sodio con el agua.....	23
5.4.8    Oxidación del hipoclorito de sodio.....	26
5.4.9    Cloro libre residual.....	26
5.4.10    Cloro Combinado:.....	27

5.5	Técnicas de medición cloro libre residual .....	28
5.5.1	Método colorimétrico .....	29
5.5.1.1	Reactivo DPD (N,N-dietil-p-fenilenediamina) .....	30
5.5.1.1.1	Espectrofotometría .....	31
5.5.1.1.2	Ley de Lambert .....	32
5.5.1.1.3	Interferencias método colorimétrico .....	34
5.5.2	Técnicas electroquímicas .....	35
5.5.2.1	Tipos de técnicas electroquímicas .....	36
5.5.2.1.1	Sensores de electrogravimetría .....	37
5.5.2.1.2	Sensores amperométricos .....	37
5.5.2.1.3	Electrodos de diamante dopado con boro (BDD) .....	38
5.5.2.1.4	Sondas Galvánicas .....	38
5.5.2.1.5	Biosensores electroquímicos .....	38
5.5.2.1.6	Sensores ORP .....	39
5.5.2.1.6.1	Mediciones de cloro libre con ORP .....	41
5.5.2.1.6.2	Funcionamiento mediciones ORP .....	43
5.5.2.1.6.3	Lecturas ORP .....	45
5.5.2.1.6.4	Sonda de ORP .....	46
5.5.2.1.6.5	Influencias en el ORP .....	46
5.5.2.1.6.6	Sensor ORP marca Sensorex, .....	48
CAPITULO III .....		53
6	Metodología .....	53
6.1	Dosificación de Cloro Total .....	54
6.1.1	Titulación de Cloro Total .....	54
6.1.1.1	Preparación de solución de Almidón al 1% .....	55
6.1.1.2	Preparación de ácido acético glacial al 30 % .....	56
6.1.1.3	Preparación de yoduro de potasio al 10 % .....	57
6.1.1.4	Preparación de la solución de tiosulfato de sodio 0.1 N .....	57
6.1.2	Proceso de titulación del cloro total .....	59
6.1.3	Cálculo de la concentración de cloro total .....	59
6.2	Dosificación de Cloro Libre Residual .....	60
6.2.1	Titulación de Cloro Libre Residual .....	60
6.2.1.1	Preparación de la solución indicadora de almidón .....	61
6.2.1.2	Preparación de Tiosulfato de sodio $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$ al 98% .....	62
6.2.1.3	Preparación de la solución de yodo 0,0282N .....	63
6.2.2	Titulación de la muestra .....	64
6.2.3	Titulación del blanco .....	66

6.2.4	Cálculo para la determinación de cloro libre residual .....	66
6.3	Elaboración de la curva de calibración de cloro libre residual.....	67
6.3.1	Elaboración de concentraciones patrón para la curva de calibración ...	68
6.3.1.1	Preparación de la solución madre .....	68
6.3.1.2	Preparación de las muestras patrón.....	69
6.3.2	Comprobación de la concentración de cloro libre en el Fotómetro Riel 72	
6.3.3	Regulación del pH de las concentraciones patrón .....	74
6.3.4	Adición del reactivo DPD a las concentraciones patrón.....	75
6.3.5	Medición de la absorbancia en el espectrofotómetro UV-Vis.....	76
6.3.5.1	Especificaciones del Espectrofotómetro UV-Vis .....	76
6.3.6	Comprobación de los valores de absorbancia con el espectrofotómetro Génesis 77	
6.4	Métodos para la determinación de la concentración de cloro libre residual de muestras de concentración desconocida .....	77
6.4.1	Ley de Lambert Beer .....	77
6.4.2	Interpolación .....	79
6.4.3	Ecuación de la recta: .....	79
6.5	Medición de cloro libre residual con sensores ORP.....	81
6.5.1	Determinación del número de mediciones a realizar.....	81
6.5.2	Calibración del sensor ORP .....	84
6.5.3	Lecturas del voltaje .....	86
CAPITULO IV .....		88
7	Resultados: .....	88
7.1	Valores de la Curva de Calibración Cloro Libre .....	88
7.1.1	Gráfica curva de calibración .....	89
7.1.2	Comprobación de los valores de absorbancia en el espectrómetro UV- VIS y espectrofotómetro Genesis .....	91
7.2	Valores de medición de cloro libre con el sensor ORP.....	93
7.3	Análisis estadístico .....	105
7.4	Análisis de resultados .....	110
8	Conclusiones y recomendaciones.....	111
9	Bibliografía.....	113

## Índice de figuras:

Figura 1: Reacción del cloro al contacto con el agua .....	12
Figura 2: Reacción de cloro gas y agua .....	12
Figura 3: Reacción del hipoclorito con ácido hipocloroso .....	20
Figura 4: Balance dinámico del hipoclorito de sodio .....	20
Figura 5: Reacción de la producción de cloro por burbujeo con hidróxido de sodio.....	23
Figura 6: Distribución del HClO y del OCl <sup>-</sup> en el agua en función del pH .....	24
Figura 7: Disociación del hipoclorito de sodio.....	25
Figura 8: Disociación del ácido hipocloroso .....	25
Figura 9: Reacción de oxidación del cloro .....	26
Figura 10: Reactivos colorimétricos, ortotolidina y Dietil p-felinen-diamina. ....	30
Figura 11: Recta calibrado por el método de adición estándar.....	34
Figura 12: Ecuación para la determinación de masa de un elemento por método electrogravimétrico.....	37
Figura 13: Ecuación de Nerst .....	42
Figura 14: Ecuación de Nerst para la media reacción ácido hipocloroso.....	42
Figura 15: Reacción de oxidación del Fe .....	44
Figura 16: Reacción de reducción del Cl <sub>2</sub> .....	44
Figura 17: Reacción Redox con Fe y Cl <sub>2</sub> .....	45
Figura 18: Componentes del sensor ORP .....	49
Figura 19: Funcionamiento autolimpieza .....	50
Figura 20: Funcionamiento libre de abrasión .....	50
Figura 21: Funcionamiento del material viscoso.....	50
Figura 22: Sensor ORP .....	51
Figura 23: Limpieza inadecuada del sensor ORP.....	51

Figura 24: Tiempo de estabilización sensor ORP .....	52
Figura 25: Esquema principal metodología.....	54
Figura 26: Solución de almidón al 1% .....	56
Figura 27: 1,0001 gramos de Yoduro de potasio pesado en la balanza digital .....	57
Figura 28: 1,9767 gramos Tiosulfato de sodio pesado en la balanza digital.....	58
Figura 29: Solución de almidón .....	62
Figura 30: 0,2017gramos de Tiosulfato de sodio pesado en la balanza digital.....	63
Figura 31: Reacción colorimétrica de la muestra patrón con CH <sub>3</sub> -COOH y KI.....	65
Figura 32: Reacción colorimétrica de la muestra en titulación al añadir almidón .....	66
Figura 33: Guía del kit para la determinación de cloro libre.....	72
Figura 34: Kit de reactivos para determinación de cloro libre .....	73
Figura 35: Lectura del fotómetro riel de una muestra patrón de 1.5 ppm de cloro libre	74
Figura 36: Lectura del pH de la solución madre, empleando un pH-metro .....	75
Figura 37: Muestras patrón con reactivo DPD .....	76
Figura 38: Espectrofotómetro UV-630.....	76
Figura 39: Lectura de la solución calibradora de ORP.....	84
Figura 40: Lectura de la solución calibradora de ORP.....	85
Figura 41: Termómetro digital para controlar de la temperatura de la solución .....	86
Figura 42: Bolsas de gel frio para control reducir la temperatura de la solución.....	87
Figura 43: Curva de calibración espectrofotómetro UV-Vis.....	89
Figura 44: Coeficiente de correlación de la curva realizada en el espectrofotómetro UV-Vis.....	90
Figura 45: Reporte de la curva de calibración de cloro libre residual realizada en el espectrofotómetro Uv-Vis .....	91

Figura 46: Comparación de la curva de cloro libre residual en el espectrofotómetro	
Génesis y espectrofotómetro UV-Vis.....	92
Figura 47: Curva de ORP a pH 6.....	99
Figura 48: Curva de ORP a pH 6.5.....	99
Figura 49: Curva de ORP a pH 7.....	100
Figura 50: Curva de ORP a 5°C .....	100
Figura 51: Curva de ORP a 10°C .....	101
Figura 52: Curva de ORP a 15°C .....	101
Figura 53: Curva de ORP a 20°C .....	102
Figura 54: Curva de ORP a 25°C .....	102
Figura 55: Curva de ORP a 30°C .....	103
Figura 56: Curva de ORP a 20°C (Temperatura Ambiente) .....	103
Figura 57: Curva de ORP a 20°C Temperatura Ambiente .....	104
Figura 58: Curva de ORP a 20°C (Temperatura Ambiente) .....	104

### Índice de tablas:

Tabla 1 Valores mínimos y máximos de cloro libre residual establecidos en diferentes países .....	16
Tabla 2: Propiedades físicas del hipoclorito de sodio .....	18
Tabla 3: Aplicaciones del ORP .....	48
Tabla 4: Características del sensor ORP.....	49
Tabla 5: Especificaciones del sensor .....	52
Tabla 6: Tabla de valores de dilución y foro empleados en la preparación de las soluciones patrón .....	71
Tabla 7: Especificaciones Espectrofotómetro UV-Vis.....	77

Tabla 8: Valores de coeficiente de extinción molar de las soluciones patrón.....	78
Tabla 9: Lecturas de voltaje y error absoluto .....	82
Tabla 10: Resultados estadísticos de dispersión.....	83
Tabla 11: Casuística para la determinación del número de mediciones.....	83
Tabla 12: Valores de solución estándar ORP .....	84
Tabla 13: Valores de absorbancia de las concentraciones patrón de cloro libre, en el espectrofotómetro Uv-Vis .....	88
Tabla 14: Valores de absorbancia de las concentraciones patrón de cloro libre, en el espectrofotómetro Génesis .....	91
Tabla 15: Valores de medición a pH6 de concentraciones a diferentes temperaturas ...	93
Tabla 16: Valores de medición a pH6.5 de concentraciones a diferentes temperaturas	93
Tabla 17: Valores de medición a pH 7 de concentraciones a diferentes temperaturas ..	94
Tabla 18: Valores de medición a pH4 y 20°C.....	94
Tabla 19: Valores de medición a pH5 y 20°C.....	95
Tabla 20: Valores de medición a pH6 y 20°C.....	95
Tabla 21: Valores de medición a pH6.5 y 20°C.....	96
Tabla 22: Valores de medición a pH6.8 y 20°C.....	96
Tabla 23: Valores de medición a pH7 y 20°C.....	97
Tabla 24: Valores de medición a pH7.2 y 20°C.....	97
Tabla 25: Valores de medición a pH 7.5 y 20°C.....	98
Tabla 26: Valores de medición a pH8 y 20°C.....	98
Tabla 27: Coeficiente de variación de las muestras a 20°C y pH 4 .....	105
Tabla 28: Coeficiente de variación de las muestras a 20°C y pH 5 .....	106
Tabla 29: Coeficiente de variación de las muestras a 20°C y pH 6 .....	106
Tabla 30: Coeficiente de variación de las muestras a 20°C y pH 6.5 .....	107

Tabla 31: Coeficiente de variación de las muestras a 20°C y pH 6.8 .....	107
Tabla 32: Coeficiente de variación de las muestras a 20°C y pH 7 .....	108
Tabla 33: Coeficiente de variación de las muestras a 20°C y pH 7.2 .....	108
Tabla 34: Coeficiente de variación de las muestras a 20°C y pH 7.5 .....	109
Tabla 35: Coeficiente de variación de las muestras a 20°C y pH 8 .....	109



# CAPITULO I

## 1 Introducción

Se considera al agua como un bien indispensable para la vida, en el 2010 se reconoce el derecho a su saneamiento por la Organización de las Naciones Unidas, se encuentra dentro de los objetivos que establece las Naciones Unidas en cuanto a Desarrollo Sostenible. Actualmente la situación sigue siendo muy lamentable, ya que anualmente fallecen alrededor de cinco millones de personas por consumir agua que no ha pasado por un proceso adecuado de desinfección, según informa Oxfam Intermón (Guedes Alonso, 2021). Siendo de gran interés una buena calidad del agua, la cual está incluida en los objetivos de la Agenda 2030 aprobada en 2015, en donde se manifiesta la importancia de asegurar el acceso al agua y un óptimo proceso de desinfección asegurando su inocuidad. (Burgues, 2021).

Ecuador se encuentra en el tercer puesto de los países de América en cuanto a contaminación por microorganismos protozoarios en el agua, cuyos efectos en la población son afecciones intestinales como la diarrea especialmente en niños entre uno a cinco años (Cepeda Granda, 2015).

La calidad del agua de consumo disminuye en la red de distribución y lugares de acopio, debido al crecimiento bacteriano, afectando su sabor, olor, provocando incluso la presencia de sólidos suspendidos, lo cual puede llegar a crear una capa bacteriana en las tuberías lo que produce la corrosión de las mismas, disminuye su poder hidráulico, y obstaculiza la presencia de sustancias residuales antisépticas (Zuñiga Carrasco, Renato Iván Morales Samperio, 2019).

En el ámbito de la salud uno de los más importantes temas es garantizar que la población acceda a un idóneo sistema de agua potable, ya que según informes de la (OMS, 2019) , actualmente en el mundo miles de millones de personas no disponen de agua, siendo cifras realmente preocupantes, de igual forma varios estudios ratifican que actualmente aún la gente sufre de carencias de una infraestructura de tratamiento y servicio de agua potable, de esta forma nace la necesidad de asegurar el acceso a este bien esencial, en condiciones seguras para su consumo, mediante análisis y muestreo de sus parámetros, siendo uno de los indicadores de la calidad de agua potable primordiales, la concentración de cloro libre residual, ya que garantiza la inocuidad del agua y su preservación en el tiempo de almacenamiento y su transporte por la red de distribución (OMS, 2006).

La concentración de cloro libre se determina típicamente a través de uno de varios métodos que utilizan colorimétrico como es el DPD (cambio de color asociado con la reacción del cloro libre con NN-dietil-p-fenilendiamina (DPD) o yoduro, quimioluminiscencia, detección por cromatografía líquida ,o electroquímica, sin embargo la mayoría de técnicas requieren reactivos o técnicas de laboratorio que no son las más idóneas para el monitoreo continuo de bajo costo y autónomo (Hoque et al., 2017) ya sea por los elevados costos que requerirían para el monitoreo así como la gran cantidad de sustancias químicas que terminarían afectando al medio ambiente.

Para este proyecto se realizaron mediciones de cloro libre residual, mediante la utilización de sensores ORP o redox, los cuales miden el potencial de oxidación y reducción de las reacciones que ocurren en el agua, ya que el cloro es un agente oxidante el sensor medirá su capacidad de oxidación, esta medida se relacionó con la concentración

de cloro libre de muestras patrón, para de esta forma poder determinar la concentración de cloro libre presente en el agua capaz de desinfectarla, analizando conjuntamente con factores de pH y temperatura determinando así también como están relacionadas estas variables, y como método de referencia de la concentración se empleó la técnica colorimétrica con DPD de HACH Company mediante espectrofotometría.

## **2 Antecedentes y problemática**

Según informa la UNICEF y el Instituto Nacional Ecuatoriano de Censos, las zonas rurales son vulnerables ya que cuentan con poco o nada de acceso a un suministro de agua de calidad y sistemas de saneamiento (Molina et al., 2018). Generalmente al frente de estos sistemas se encuentran encargadas las Juntas de Agua Potable, las cuales generalmente no siempre disponen de la infraestructura idónea para realizar análisis de la calidad del agua, además que el abastecimiento de este servicio no suele ser rentable (SENAGUA, 2016 citado en Molina et al., 2018). Ya que como se menciona en el artículo 43 de la Ley Orgánica de Recursos Hídricos, Usos y Aprovechamiento del Agua, las juntas son organizaciones fines de lucro (Secretaría del Agua, 2016). Y cada Junta de Agua Potable se encuentra ante el desafío de varias dificultades en diferentes ámbitos, como el económico, operacional, administrativo, entre otros (Valarezo Sinche, 2015).

Por lo que el sector rural debe tener un amplio interés por parte de las autoridades ya que de ella depende la calidad de vida de una gran población. Más de 3 millones 500 mil personas acceden al agua mediante Juntas de agua, existiendo aproximadamente en el Ecuador más de 6.300 juntas, esto según el Foro de los Recursos Hídricos como lo cita (Ramos Bayas, 2017).

En el Azuay existen 191 Juntas de Agua declaradas. Y el estudio realizado por Campoverde Jahanina, en la provincia del Azuay en el cantón Cuenca, revela que, de 18 parroquias rurales de esta ciudad aproximadamente 93.719 habitantes ingieren agua que no está en condiciones óptimas para su consumo, ya que el valor promedio de Cloro Libre Residual está por debajo del límite mínimo permisible, siendo solo 5 de las 18 parroquias las que cumplen con la normativa Ecuatoriana de calidad NTE INEN 1 108:2011 (Campoverde Barros, 2014).

Siendo esencial la determinación y control de cloro libre residual; existen actualmente varios métodos y técnicas para la medición de cloro libre residual, entre las cuales destacan los métodos colorimétricos, entre los reactivos más empleados están el DPD (dietil-p-fenilen-diamina), y la ortotolidina, sin embargo, en el caso del líquido de los enjuagues de los recipientes vacíos del reactivo DPD, están considerados como un desecho peligroso (HACH, 2011). Y la ortotolidina es considerada una sustancia cancerígena e inclusive toxica para los organismos acuáticos (NJ Health, 2011). La eliminación de estos reactivos se debe realizar acorde a legislación existente de cada país y en base a regulaciones correspondientes de régimen regional, nacional y local (HACH, 2011). Estos reactivos pueden ser peligrosos para el medio ambiente (BEHQ, 2016).

Además, Pule et al., 2017, manifiesta que las técnicas de monitoreo convencionales pueden considerarse ineficientes debido a requieren mucha mano de obra para la recopilación manual de datos ambientales y generalmente no pueden dar una alerta temprana de problemas ambientales, por lo cual registradores digitales pueden mejorar el monitoreo ambiental, este enfoque ha promovido una respuesta proactiva a la contaminación ambiental. Por lo cual se ha vuelto tan importante y necesario el empleo de nuevas tecnologías para satisfacer el aumento deseado del seguimiento espacial y

temporal, se han convertido en una gran alternativa la implementación de sensores, capaces de monitorear continuamente parámetros químicos y físicos, pudiendo llegar a proporcionar información en tiempo real contribuyendo así a una mejor representación de las tendencias a largo plazo en los entornos acuáticos (K. Murphy et al., 2015).

### **3 Justificación**

El monitoreo y pronóstico de la calidad del agua desempeñan un rol importante en las gestiones modernas, proporcionar información en tiempo real, ayuda a tomar decisiones de protección ambiental (Wei et al., 2008, citato en Zhu et al., 2010). Estos sistemas de monitoreo son un gran apoyo ambiental y pueden proporcionar una alerta temprana, además que se puede controlar un sinnúmero de variables (Zhu et al., 2010).

El cloro libre es uno de los principales parámetros de calidad del agua, el cual se encuentra establecido en la Norma Técnica Ecuatoriana NTE INEN 1 108:2011 de Requisitos de Agua potable, siendo de gran importancia ya que su presencia en el agua es la forma de asegurar la inocuidad de esta en el tiempo ya que el cloro libre sigue actuando como desinfectante hasta que el agua llegue a su destino. Y una la mala calidad del agua de consumo puede desencadenar una gran oleada de enfermedades afectando a toda una población según indica el Fondo de las Naciones Unidas para la Infancia (UNICEF, 2010).

El monitoreo del cloro libre residual y de la inexistencia de microorganismos perjudiciales a la salud, son factores con mayor peso dentro de la valoración de la calidad de agua y el hipoclorito de sodio el más grande protagonista dentro de la desinfección del agua, ya que su acción puede llegar a destruir cultivos puros de bacterias presentes en la misma (Muñoz Cardona & Mafla Castaño, 2007).

Y una forma de garantizar la calidad de agua como manifiesta (Tuesca Molina & Rangel Ávila, 2015) y como lo indica en la guía del marco de seguridad del agua de consumo, es asegurando la inocuidad y óptima calidad del agua, esto implica que permanezca bien desde su origen hasta su consumo, que se puede lograr mediante planes de monitoreo, de control, estrategias de mitigación de peligros asociadas al agua de consumo (OMS, 2011). El sensor redox u ORP es una excelente herramienta para el control de la calidad del agua basada en el método electroquímico, de todos los desinfectantes oxidantes en el agua como ácido hipocloroso, hipoclorito, monoloramina, dicloramina, etc. Ya que puede medir su eficiencia y rendimiento total (Spahl, 2012). Estos sensores son una herramienta muy prometedora para el monitoreo continuo en tiempo real, (Pule et al., 2017). Además, que, si se habla de costos, el monitoreo de cloro libre con estos sensores podría ahorrar una significativa cantidad de recursos económicos a los entes reguladores de la calidad de agua de consumo ya que se requiere menos personal técnico y no necesita de reactivos y de igual forma es muy considerable el tiempo que esta demanda frente a otras técnicas siendo mucho más corto.

## **4 Objetivos**

### **4.1 Objetivo General**

- Medir la concentración del cloro libre residual usando técnicas electroquímicas.
- Reemplazar reactivos químicos por técnicas electroquímicas.

### **4.2 Objetivo específico**

- Comprobar la eficacia del método electroquímico en la medición de cloro libre residual.

## **CAPITULO II**

### **5 Marco Teórico**

#### **5.1 Importancia del agua de consumo**

El agua es considerada un recurso renovable el cual está ligado a la calidad de vida de una población y es considerado un factor que determina el funcionamiento del desarrollo económico (Morales & Rodríguez Tapia, 2007). La calidad del agua es un tema de vital importancia como lo indica la Organización Mundial de la Salud (OMS, 2006). Siendo universalmente de importancia para todos, ya que el agua es un recurso esencial para el desarrollo de la vida y toda la población debería disponer de un suministro de calidad, en julio del año 2010, con Resolución 64/292, la Asamblea General de las Naciones Unidas reconoce el derecho humano al agua (ONU, 2010). Y la Constitución de la República del Ecuador, 2008, establece que el Estado debe garantizar sin discriminación los derechos del agua para sus habitantes, siendo este fundamental e irrenunciable, esencial para el desarrollo de la vida.

Se destaca que es importante garantizar la disponibilidad al agua potable en el ámbito de la salud pública, es decir, para garantizar su seguridad e higiene, lo que significa que el agua no está contaminada, y la transparencia y la divulgación de información son importantes para garantizar una protección adecuada desde la recopilación hasta la entrega a los consumidores, este es un factor importante en el manejo en cuanto a la aptitud del agua potable, por tanto, en los procesos de información se debe facilitar a la ciudadanía el acceso a datos importantes asociados a la calidad del agua (Gómez-Gutiérrez et al., 2016). En consecuencia, garantizar un servicio de agua es de vital importancia. Ya que actualmente en el año 2021 siguen existiendo aún cifras devastadoras

ya que según nos informa la ONG (Manos Unidas, 2011), y en el mundo, el 30% de la población no accede a un servicio de agua potable seguro, lo que inclusive llega a desencadenar que muchos niños no se escolaricen (OMS, 2019).

Cifras significativamente preocupantes de habitantes mundiales, no disponen de servicios de agua, como informa la UNICEF y la Organización Mundial de la Salud, siendo más de cuatro mil millones de personas. (UNICEF, 2019). La Directora del Departamento de Salud Pública de la OMS, Doctora María Neira, manifiesta que hay enfermedades vinculadas al consumo de agua, como es la diarrea, las cuales actualmente deberían estar extintas, sin embargo otro es el panorama, por lo que enfatiza la importancia y el rol de los países en reforzar las gestiones de saneamiento asociados al consumo de agua (UNICEF, 2019).

Por tanto, el agua es considerada una necesidad esencial para la vida y contribuye en gran medida al bienestar de la humanidad. La accesibilidad al agua potable, limpia y segura es un derecho humano básico en todo el mundo, y se estima que 3,4 millones de personas mueren cada año a causa de enfermedades virales relacionadas con el agua, un ejemplo de estas es la gastroenteritis que principalmente ocasiona muertes, y contribuyen significativamente a la morbilidad y mortalidad en el mundo (Rashid et al., 2021).

A causa del incremento global de la temperatura ocasionada por variaciones climáticas, se ha visto afectado el recurso agua, surgiendo el proyecto denominado “Los efectos de las elevadas temperaturas del agua en la producción, almacenamiento y distribución del agua potable”, donde uno de los objetivos es la implementación de un sistema de sensores multiparamétricos para el monitoreo de cloro, siendo esta el cloro libre un parámetro



determinante y normado, el cual asegura la calidad del agua de consumo (RETEMA, 2021).

### **5.1.1 Afecciones a la salud por consumo de agua en mala calidad**

Es muy determinante un correcto abastecimiento de agua potable ya sea para el consumo o lavar los alimentos, lo que disminuye la transmisión de enfermedades asociadas con algunos microorganismos como virus como es el enterovirus, virus de la hepatitis, rotavirus que implica diarrea y vómito y generalmente se evidencia más en niños (Ríos-Tobón, Agudelo-Cadavid, & Gutiérrez-Builes, 2017 como se cita en Ferro Mayhua et al., 2019). Conllevando a una alta tasa de mortalidad y morbilidad (OMS, 2011).

Según la OMS (2021), lamentablemente aún ocurren 502.000 muertes ocasionadas por enfermedades como la diarrea, la disentería, la fiebre tifoidea, debido al consumo no apto de agua. En el año 2000 aproximadamente un poco más de mil millones de habitantes el mundo, en ese entonces cerca del 18% de la población, no disponían de un acceso a un abastecimiento permanente de agua potable, y un 33.33% de gente en el mundo, no cuenta con saneamiento adecuado siendo más evidente en países subdesarrollados, con resultados devastadores ya que 6000 niños mueren diariamente por enfermedades que se pueden prevenir mejorando las condiciones de agua y saneamiento (Fernández Cirelli & Du Mortier, 2012).

Por lo cual es tan importante una adecuada desinfección del agua ya que esta puede ser portadora de microorganismos y parásitos los cuales son causantes de enfermedad y muerte en la población (Córdova et al., 2010). Entre algunas especies de alta importancia para la salud están, *Burkholderia sp. B. Pseudomallei*, *Francisella sp. F. Tularensis*,

*Legionella sp. L. Pneumophila*, Micobacteria no tuberculosa del grupo *Mycobacterium avium complex*, *salmonellas* de la especie: *S. enterica*, *S. bongori*, *S. Dysenteriae* (OMS, 2011). Las enfermedades generadas a causa de organismos microbiológicos presentan cuadros agudos en los individuos (Eugene F., 1988). Una de las afecciones vinculadas a un consumo de agua con presencia microbiana es el cólera, la cual es una enfermedad diarreica ocasionada por *Vibrio cholerae*, un bacilo de alta patogenicidad y letalidad (Mata, 1992). Para el año de 2011, Lugones Botell & Ramírez Bermúdez, manifiestan que el cólera aún sigue cobrando víctimas en países como Asia, África, etc.

### **5.1.2 Captación del agua de consumo**

El agua destinada al consumo, es captada mediante el empleo de dispositivos y se conoce como captación de agua bruta, cuyas fuentes de origen son acuíferos, cauces, cuencas, zonas de captaciones, para posteriormente realizar un respectivo tratamiento y asegurar la calidad de la misma (Martínez Carlos, 2019). El agua proveniente de estas fuentes generalmente contiene impurezas ya sean suspendidas o disueltas, las cuales deben ser eliminadas mediante tratamientos químicos o físicos como filtración, sedimentación, floculación, para materia en suspensión y tratamientos más profundos para eliminación de contaminantes disueltos (Guerrero Legarreta, 2012). Para la eliminación de la carga microbiana generalmente se emplea la cloración, aunque existe otros métodos como la ozonificación siendo su principal limitación la inestabilidad en el agua de distribución (Rodríguez Vidal, 2003). Y además el tratamiento con Luz ultravioleta cuya limitación es su elevado coste (Doménech, 2004).

### **5.2 Importancia de la desinfección del agua de consumo**

La desinfección es un proceso esencial al que debe ser sometida el agua para su posterior consumo. Vergara, 2015, menciona que la desinfección es el proceso idóneo para

asegurar la calidad e inocuidad del agua evitando el brote de enfermedades que afecten la población, la desinfección puede ser de naturaleza física empleando directamente energía térmica radiaciones o de naturaleza química aprovechando el poder oxidante de algunas sustancias químicas.

El proceso de cloración ha desarrollado un cargo crítico en la protección de los abastecimientos de agua de consumo, evitando enfermedades infecciosas como el cólera, tifoidea, disentería y hepatitis, en países desarrollados, desempeñando un papel muy relevante en la protección de la salud pública (Muñoz Cardona & Mafla Castaño, 2007).

## **5.2.1 Tipos de desinfectantes del agua de consumo**

### **5.2.1.1 Cloraminas**

Uno de los residuos de cloro que funciona como desinfectante son las cloraminas, las cuales se forman cuando reaccionan con amoníaco presente en el agua, por ejemplo, la monocloramina ( $\text{NH}_2\text{Cl}$ ) es una de sus formas activas, su acción evita la proliferación biológica en lugares de almacenamiento y puntos finales de la red (Guimarães et al., 2001).

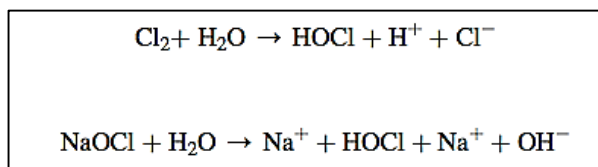
### **5.2.1.2 Ozono**

El ozono es utilizado igualmente para la desinfección del agua, este no genera residuos en el agua, sin embargo, al considerarse una sustancia inestable no puede ser transportado, almacenado ni tampoco puede ser producido en el mismo lugar. Los grupos oxidantes son el  $\text{O}_3$  o radical hidroxilo, este desinfectante es eficaz aún en mínimas dosificaciones siendo eficiente para la eliminación microorganismos perjudiciales como bacterias, virus y protozoarios (Rodríguez Vidal, 2003).

### **5.2.1.3 Cloro**

El cloro ha sido la sustancia desinfectante más empleado durante el último siglo, para la desinfección del suministro de agua, también en el tratamiento de aguas residuales y ayudando al control de incrustaciones, el cloro puede llegar a reaccionar con otros productos químicos generando otras sustancias desinfectantes tóxicas, por lo que una medición precisa de la concentración de cloro residual en el agua clorada es de gran importancia (Li et al., 2021).

Los productos químicos utilizados en la cloración son: cloro elemental, hipoclorito (calcio y sodio), el cloro se agrega al agua como cloro gaseoso o como sodio los cuales reaccionan con el agua como se muestra a continuación (Kaflé, B. P., 2019).



*Figura 1: Reacción del cloro al contacto con el agua*

*Fuente: (Kaflé, B. P., 2019)*

#### 5.2.1.4 Cloro gas

El sistema de cloro gaseoso es muy empleado en la desinfección de aguas, sin embargo este se debe manejar con mucha precaución debido a que puede ser un gas muy tóxico, su presentación es en como gas licuado a presión con concentración del 99%, al adicionarlo al agua la vuelve menos alcalina, debido a la formación ácido clorhídrico y ácido hipocloroso (Chauca & Orozco, 2012).



*Figura 2: Reacción de cloro gas y agua*

*Fuente: (Pérez Ávila, 2013)*

### **5.2.1.5 Cloro tabletas**

El hipoclorito de calcio ha sido largamente empleado en el tratamiento de aguas por su alto poder oxidante a microorganismos como bacterias, algas, hongos, entre algunos que son perjudiciales para la salud humana, de color blanco o beige tiene un aspecto granuloso, por su elevado poder de antisepsia, es empleado para la desinfección de piscinas generalmente se usa en concentración del 70% (Organismo internacional regional de sanidad agropecuaria, 2020).

### **5.2.2 Cloración del Agua de Consumo**

La calidad del agua potable requerida ha cambiado drásticamente desde finales de la década de 1970 debido a una mejor regulación de patógenos y subproductos de la desinfección surgiendo la necesidad de nuevas tecnologías de tratamiento y técnicas analíticas confiables para enfrentar este desafío, las enfermedades transmitidas por el agua se han controlado principalmente mediante la cloración, que es una parte esencial de los tratamientos típicos del agua potable, para prevenir la proliferación bacteriana en las redes de distribución de agua, no obstante se debe tener mucha precaución ya que el cloro puede reaccionar con sustancias orgánicas, formando subproductos de desinfección también conocido como DBP por sus iniciales en inglés, y cancerígenos que se forman como trihalometanos y ácidos haloacéticos, el exceso de cloración también resulta en la corrosión del sistema de distribución de agua y agrega olor y sabor al agua potable (Mehta et al., 2006).

Zhou et al., en 2021, manifiesta que la cloración ha sido la tecnología de desinfección dominante en la región de Estados Unidos y Europa, y que durante el proceso de desinfección con cloro se pueden presentar efectos tanto positivos como negativos:

### **5.2.2.1 Efectos positivos de la cloración**

Su principal función es destruir o eliminar microorganismos que producen enfermedades, también tiene la capacidad de mejora la calidad del agua que resulta de la interacción del cloro con el hierro , amoniaco, manganeso, sulfuro entre otras compuestos orgánicos (Zhou et al., 2021).

### **5.2.2.2 Efectos negativos de la cloración**

El cloro es un producto químico que puede irritar la piel, membranas del organismo y sistema respiratorio produciendo irritación de las membranas mucosas de los ojos, nariz, garganta, vías respiratorias en personas vulnerables, si la gente se encuentra expuesta a periodos extensos de tiempo a bajas dosis de cloro, se puede producir una erupción que se conoce como cloracné y hasta puede producir quemaduras en la piel (Macas Acurio, 2011).

Puede producir efectos adversos que afectan al sabor y olor, se puede intensificarse las características de los fenoles y otros compuestos orgánicos presentes en un suministro de agua, formar compuestos cloroorgánicos potencialmente cancerígenos como el cloroformo (Zhou et al., 2021). Además el cloro es un producto químico que puede irritar la piel, las mucosas y el aparato respiratorio produciendo irritación de las mucosas oculares, nariz, garganta e hiperreactividad bronquial a personas susceptibles, incluso puede producir quemaduras en la piel (Macas Acurio, 2011).

### **5.2.3 Cloración al Breakpoint**

Adicionar cloro inicialmente cumple con dos roles que son la desinfección y oxidación, procesos con lo que se logra la eliminación de hierro, manganeso, azufre, amoníaco y algunas sustancias reductoras, así como suprimir sabores que tenga el agua antes de su desinfección así como disminuir la formación de algas y presencia de microorganismos, se logra mediante la adición de cloro hasta obtener como residuo cloro libre en el agua, proceso conocido como Breakpoint, generalmente 0.5 ppm de cloro libre es una concentración que se requiere (Romero, 2008).

En el tratamiento y distribución de agua potable, la concentración de cloro residual libre debe controlarse estrictamente de modo que esté entre 0,5 y 2 ppm, se debe recalcar concentraciones bajas, el cloro no es eficaz para matar microorganismos patógenos como bacterias y virus y en concentraciones altas el cloro libre reacciona con material orgánico natural que puede disolverse para producir trihalometano y otros subproductos nocivos e inclusive cancerígenos (Hoque et al., 2017).

### **5.3 Parámetros de calidad del agua de consumo**

El agua de consumo está regulada por algunas normativas que varían dependiendo del país, sin embargo, todas ellas tienen en común el mismo fin, el precautelar la calidad de la misma para de esta forma asegurar el bienestar poblacional; la calidad del agua depende de varios factores cuya presencia afecta la calidad del agua, dependiendo de su concentración, estos factores son denominados parámetros de calidad, cuya naturaleza es física y química, cuyos valores máximos y mínimos se encuentran normados.

Como se indica en la Ley General de Salud, el cloro libre constituye un parámetro físico-químicos ubicado en el primer nivel de control de calidad del agua (Organización Panamericana de la Salud, 2005). De igual forma en el Ecuador en la Norma Técnica Ecuatoriana INEN 1 108:2011 (Inst. Ecuatoriano Norm., 2011) el cloro residual se encuentra entre los parámetros específicos de agua potable. Siendo de gran importancia controlar los niveles de cloro residual para asegurar la inocuidad del agua para su consumo.

*Tabla 1 Valores mínimos y máximos de cloro libre residual establecidos en diferentes países*

<b>País</b>	<b>Parámetro</b>	<b>Unidad</b>	<b>Valores mínimos y máximos permitidos</b>
<b>Ecuador</b>	Cloro libre residual	mg/l	0,3 a 1,5
<b>España</b>	Cloro libre residual	mg/l	1 a 2
<b>Estados Unidos</b>	Cloro libre residual	mg/l	> 0,5

*Fuente: Norma. Técnica. Ecuatoriana. NTE INEN 1108, Guía técnica para la prevención y control de la legionelosis en instalaciones, EPA (United States Environmental Protection Agency).*

#### **5.4 Importancia del Cloro libre residual**

En las redes de distribución es muy importante la presencia de cloro libre residual, desde la potabilizadoras donde se realiza la desinfección del agua hasta las viviendas de los usuarios finales, con el fin de asegurar que el líquido vital haya sido correctamente saneado y siga persistiendo su inocuidad (Tinoco Rivera, 2019). Según la filial Agbar Aguas es indispensable la presencia de pequeñas concentraciones de cloro libre residual



en la red de distribución ya que así se asegura la correcta desinfección del agua desde la planta potabilizadora hasta sus consumidores (La Sociedad General de Aguas de Barcelona, 2011).

El cloro que se encuentra presente en el agua se degrada ya sea al oxidar la materia presente y debido a las condiciones físico-hidráulicas como es la agitación y temperatura a las que se encuentra expuesta el agua, además también se produce un consumo en la interfase con las paredes de las conducciones ( Ramos Martínez, 2012).

Una forma de determinar la pérdida de cloro residual en un volumen de agua, según indica Quirós en 2005, puede ser expresada mediante la siguiente ecuación exponencial:

$$C(t) = C_0 \cdot e^{-kt}$$

Donde:

$C(t)$  = Concentración de cloro (mg/l) en el tiempo  $t$ .

$C_0$  = Concentración inicial de cloro (mg/l)

$t$  = Tiempo de reacción.

El servicio de Salud Pública de Estados Unidos en experimentos realizados a 20 a 25 grados centígrados, con un tiempo de contacto, considera como valores mínimos: a un pH de 6-8 0,2mg/l, para pH 8-9 0,4 mg/l, y para un pH de 10 un residual mínimo de 1 mg/l.

#### **5.4.1 Formación de cloro libre residual mediante aplicación de hipoclorito de sodio al agua**

El hipoclorito de sodio, comúnmente conocido como lejía, es un químico oxidante fuerte cuya fórmula es  $\text{NaClO}$ , es transparente, verde amarillento, tiene un fuerte estado de

oxidación, esto se debe a que es un oxidante económico utilizado para la purificación de agua debido a sus propiedades desinfectantes, es estable solo a pH básico en solución acuosa (Armira Camey, 2008).

El hipoclorito de sodio además es el antiséptico más utilizado en la producción alimenticia, cumple múltiples requisitos como desinfectante ideal y además tiene una excelente acción limpiadora, su eficacia en los métodos antisépticos depende de la concentración de cloro disponible y del pH de la solución, el ácido hipocloroso (HOCl) es débil y se descompone en ion hipoclorito ( $\text{ClO}^-$ ) y protón ( $\text{H}^+$ ) dependiendo del pH de la solución, por lo general el ácido hipocloroso es la especie activa en la acción germicida, mientras que la concentración de ion hipoclorito es un factor clave que determina la eficacia de la limpieza (Fukuzaki, 2006).

#### 5.4.2 Propiedades físicas del hipoclorito de sodio

*Tabla 2: Propiedades físicas del hipoclorito de sodio*

<b>Propiedad</b>	<b>Descripción</b>
<b>Peso Molecular (g/mol)</b>	74,4
<b>Estado Físico</b>	Líquido
<b>Punto de Ebullición (°C) (760 mmHg)</b>	120 (Concentración cloro activo: 6.5%) 40 (5% de NaOCl en agua)
<b>Punto de Fusión (°C)</b>	8,6 (Concentración cloro activo: 6.5%) -6 (5% de NaOCl en agua)
<b>Presión de Vapor (mmHg)</b>	17,5 a 20o C (5% de NaOCl en agua)
<b>Gravedad Específica (Agua = 1)</b>	1,11 - 1,2 a 25°C, agua 4°C (Concentración cloro activo: 6.5%) 1,07 - 1,14 (5% de NaOCl en agua)
	No Reportado

<b>Densidad del Vapor (Aire = 1)</b>	
<b>Velocidad de Evaporación (Acetato de Butilo = 1)</b>	No Reportado
<b>Solubilidad en Agua</b>	Soluble en agua fría, se descompone en agua caliente (Concentración cloro activo: 6,5%) 100% en agua (5% de NaOCl en agua)
<b>Límites de Inflamabilidad (% vol)</b>	No combustible
<b>Temperatura de Auto ignición (°C)</b>	No reportado
<b>Punto de Inflamación (°C)</b>	No reportado
<b>pH</b>	No reportado pH 12 (Concentración cloro activo: 6,5%) 9-10 (5% de NaOCl en agua)

*Fuente: (Ministerio de Salud de Colombia, 2015)*

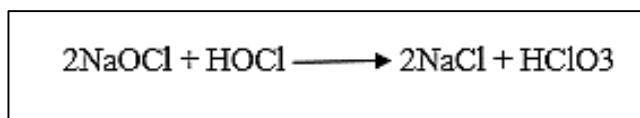
#### **5.4.3 Propiedades químicas del hipoclorito de sodio**

El Hipoclorito es muy eficaz como oxidante, tiene la capacidad de funcionar como un blanqueador y antiséptico; por lo cual se suele emplear para el tratamiento de fibras y la eliminación de microorganismos en el agua (Ministerio de Salud de Colombia, 2015).

El proceso de cloración produce una interacción entre el cloro y compuestos amina (NH) formando la cloramina, que se interpone con los procesos celulares de anabolismo y catabolismo, ya que el cloro es un oxidante fuerte que tiene actividad antibacteriana e

inhibe las enzimas bacterianas provocando la oxidación irreversible de los grupos SH esenciales (grupos sulfhidrilo) (Lara Zambrano, 2015).

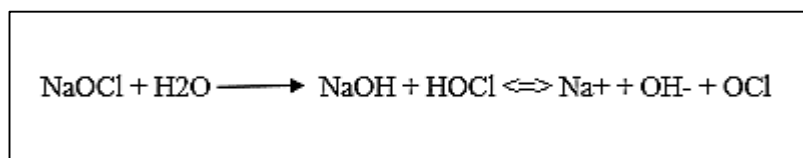
El hipoclorito de sodio forma una reacción con el ácido hipocloroso, de la siguiente forma:



*Figura 3: Reacción del hipoclorito con ácido hipocloroso*

*Fuente: (Ministerio de Salud de Colombia, 2015)*

El pH es un factor determinante en cuanto a la disociación del cloro en el agua ya que a pH ácido, el hipoclorito se desarma más fácilmente que en ambientes alcalinos (Ministerio de Salud de Colombia, 2015). En los compuestos de hipoclorito de sodio se da un equilibrio a la misma velocidad, representado de la siguiente forma (Pişkin & Türkün, 1995).



*Figura 4: Balance dinámico del hipoclorito de sodio*

*Fuente: (Pişkin & Türkün, 1995)*

El hipoclorito de sodio a una concentración de 5% y reservado a 24 ° C, mostro una estabilidad satisfactoria ante la degradación durante un intervalo de tiempo de 200 días frente a otras concentraciones (Pişkin & Türkün, 1995).

#### **5.4.4 Efectos del hipoclorito de sodio sobre la salud**

Las afecciones que puede ocasionar la exposición al cloro será conforme el grado de intensidad que se haya expuesto el individuo, flujo de aire y condiciones de la persona como por ejemplo si este tiene atopia o fuma, pudiendo causar afecciones a los pulmones como un edema pulmonar o producir obstrucciones (Evans, 2005).

### **Mecanismos de toxicidad**

La capacidad del hipoclorito para causar toxicidad "está relacionado con su capacidad oxidante y el pH de la solución. La toxicidad surge de su actividad corrosiva al entrar en contacto con las membranas mucosas y la piel (Slaughter et al., 2019).

### **Frases de Riesgo**

Según el Ministerio de Salud de Colombia, 2015, las fases de riesgo por concentración de hipoclorito de sodio son para :

- Concentración de cloro activo por debajo de una concentración de 10% produce irritación de los ojos y afección a las vías respiratorias.
- Concentración de cloro activo mayor a una concentración de 10%, puede producir quemaduras.

### **Efectos sistémicos**

El Ministerio de Salud de Colombia, 2015, manifiesta que la ingesta de cloro puede provocar irritación e inflamación de las mucosas de la boca, faringe, esófago, y en concentraciones elevadas puede provocar la perforación de los intestinos y el esófago, e inclusive producir un coma a la persona.

### **Efectos gastrointestinales**

Como informa el Departamento de Salud de Columbia, 2015, la ingesta de cloro puede provocar irritación e inflamación de las mucosas de la boca, faringe, esófago, estómago e intestinos, y en concentraciones elevadas puede provocar la perforación de los intestinos y el esófago, como náuseas y coma.

Según informa el Ministerio de Salud de Colombia, 2015, la ingestión de una solución concentrada de hipoclorito de sodio afecta el revestimiento de todo el tracto gastrointestinal e inclusive provocar perforaciones en los intestinos y el esófago, pudiendo también causar necrosis y hemorragia digestiva baja.

### **Otros efectos**

Según el Ministerio de Salud de Colombia, 2015, asevera que el hipoclorito de sodio provoca efectos adversos agudos y crónicos durante el contacto cutáneo, oral o por inhalación en cuanto a efectos neurológicos, endocrinos, inmunológicos, renales, hepáticos, musculares y hematológicos.

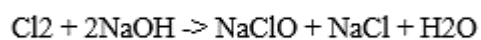
#### **5.4.5 Incompatibilidades con el hipoclorito de sodio**

El hipoclorito de sodio puede reaccionar enérgicamente con una gran variedad de químicos, por lo que no debe ser mezclado con otros reactivos, para su manejo incluso se recomienda disponer de un equipo de protección (Ministerio de Salud de Colombia, 2015). Entre los compuestos susceptibles de reaccionar con el cloro ya que son incompatibles con este se encuentran el amoníaco, aminas, sales de amonio, etilenimina, azidrina, metanol, fenilacetónitrilo, metales oxidables, celulosa, jabones, y bisulfatos (Ministerio de Salud de Colombia, 2015).

#### **5.4.6 Producción y propiedades del hipoclorito de sodio**

López Romero, 2020, afirma que el cloro producido mediante el burbujeo de cloro gaseoso por medio de una solución de hidróxido de sodio (NaOH), produciendo

hipoclorito de sodio (NaClO), sal (NaCl) y agua (H<sub>2</sub>O), como se puede apreciar en la siguiente reacción.



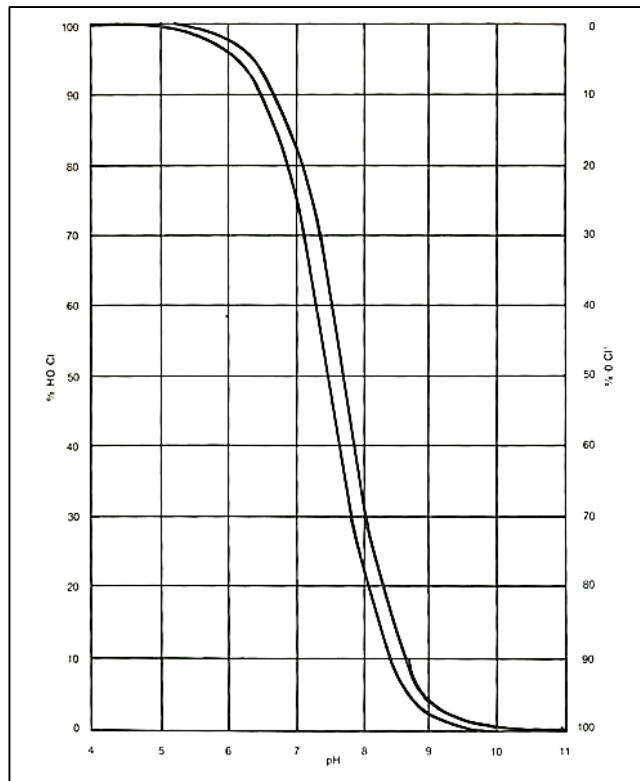
*Figura 5: Reacción de la producción de cloro por burbujeo con hidróxido de sodio*

*Fuente: (Peters y Basrani, 2011, como se citó en López Romero, 2020).*

#### **5.4.7 Reacción del hipoclorito de sodio con el agua**

Un dato importante es que un mol de hipoclorito contiene un mol disponible de cloro, el estado disponible de Cloro es dependiendo del pH de la solución (Peña & Caram, 2017).

La Asociación Española de Abastecimientos de agua y saneamiento, 1984, señala que, al agregar cloro al agua en estado puro, se produce una combinación de ácido hipocloroso (HClO) y ácido clorhídrico (HCl), la cual se forma en pocos segundos a una temperatura normal, y depende de la temperatura y el pH si el ácido hipocloroso se ioniza o disgrega en ion hipoclorito e hidrógeno, la cual es una reacción reversible.



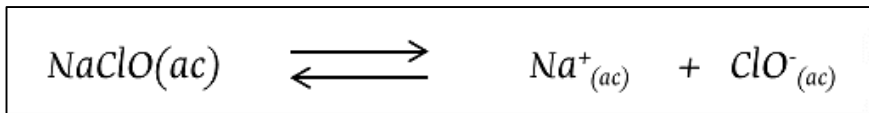
*Figura 6: Distribución del HClO y del OCl- en el agua en función del pH*

*Fuente: (Asociación Española de Abastecimientos de agua y saneamiento, 1984)*

En la gráfica podemos observar que, a pH por debajo del 6, son condiciones para la formación de ácido hipocloroso de  $\text{HOCl}$ , y para pH más alcalinos se forma ion hipoclorito  $\text{OCl}^-$ , y para un pH neutro es decir de 7 existiría una formación de los dos compuestos en porcentajes iguales (Asociación Española de Abastecimientos de agua y saneamiento, 1984).

El ácido hipocloroso tiene mayor eficiencia para desinfectar que el ion hipoclorito como menciona (Pérez Ávila, 2013) además muestra que en cuanto al hipoclorito de sodio, la reacción que tiene lugar es:

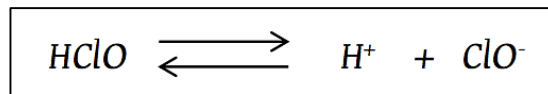




*Figura 7: Disociación del hipoclorito de sodio*

*Fuente:(Pérez Ávila, 2013)*

Donde la formación de los iones de hipoclorito, crean un equilibrio con el ácido hipocloroso, como se muestra a continuación.



*Figura 8: Disociación del ácido hipocloroso*

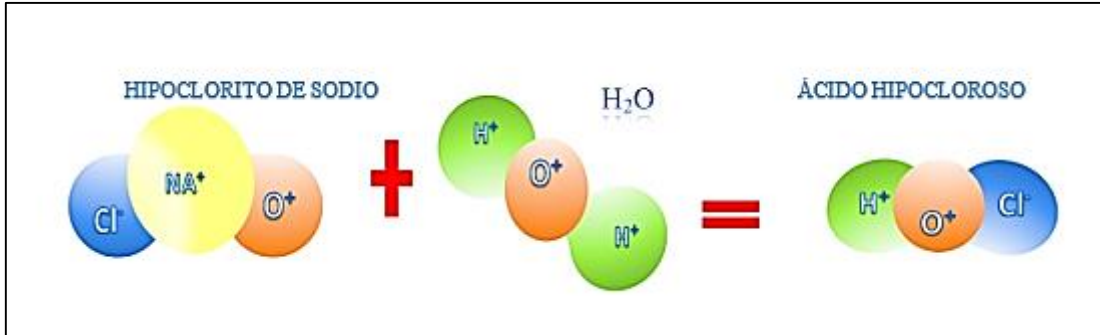
*Fuente:(Pérez Ávila, 2013)*

El cloro presente en aguas previamente tratadas es el cloro que permanece como residuo, el cual puede permanecer libre o combinarse, siendo la suma de estos dos la porción total de cloro residual que se encuentra en el agua, en cuanto al cloro residual libre lo conforman el ácido hipocloroso y el ión hipoclorito; generalmente al combinarse con otras sustancias pueden formarse cloraminas (Camenforte Iglesias, 2014).

La cloración debe realizarse usando una dosis suficientemente alta de cloro para asegurar que el cloro residual permanezca después de un tiempo de exposición suficiente. Esto se denomina "gestión del exceso de cloro" o "cloración al breakpoint", el cual tiene la capacidad de oxidar sustancias y microorganismos perjudiciales que se puedan estar presentes en el agua, así como eliminar otras sustancias o combinarse con ellas, dejando un residuo de cloro libre, la dosis para que este residuo aparezca se conoce como dosis de breakpoint (Quirós, 2005).

#### 5.4.8 Oxidación del hipoclorito de sodio

El cloro es un biocida muy soluble, poco estable es oxidante y anticorrosivo, le afecta la temperatura, la luz, la humedad y las impurezas



*Figura 9: Reacción de oxidación del cloro*

*Fuente: HANNA  
Elaboración: Autores*

#### 5.4.9 Cloro libre residual

El cloro libre residual hace referencia al cloro que se encuentra activo, el cual persiste en el agua después de la desinfección de esta, asegurando su esterilización un tiempo prolongado, la cloración es una de las mejores opciones para un agua microbiológicamente segura, y por sus atributos, el cloro es eficiente para la gran mayoría de microorganismos en el agua, incluyendo bacterias, virus, hongos, levaduras, de igual forma algas y limos que crecen en las tuberías de agua, alimentación y tanque, en circunstancias normales, el cloro residual fluctúa entre 0.2 a 0.5 ppm, la cantidad idónea es de 0,5 ppm no menor a 0,2 ppm, la cloración asegura que el agua que ya ha recibido tratamiento, esté libre de bacterias al pasar por las tuberías y tanques previo a ser consumida, también cabe mencionar que es un proceso económico de realizar (Organización Panamericana de la Salud, 2013).

El cloro se va degradando en el agua a medida que destruye los organismos causantes de enfermedades, entonces al agregar una cantidad suficiente alta de cloro, este quedará en

el agua luego de que se hayan destruido todos los microorganismos; el denominado cloro libre, el cual se preserva en el agua hasta perderse o eliminarse y es el que actúa como desinfectante en caso de que ocurra una nueva contaminación OMS, 2019, como se citó en (Macas Acurio, 2011).

#### **5.4.10 Cloro Combinado:**

El cloro combinado se produce cuando el cloro libre forma una reacción con el amoníaco en el agua para formar compuestos de cloramina, dependiendo del pH y la concentración relativa de amoniaco, se forman tres especies monoclорamina ( $\text{NH}_2\text{Cl}$ ), dicloramina ( $\text{NHCl}_2$ ) y tricloramina ( $\text{NCl}_3$ ) (S. B. Murphy, 1985).

Las monoclорaminas y dicloraminas son mucho menos eficientes como desinfectantes en comparación con residuos de cloro libre, pero duran mucho más tiempo. Para ser tan efectivos, requieren tiempos de contacto mucho más largos que los residuos libres para lograr el mismo grado de tratamiento (Guimarães et al., 2001).

El cloro combinado rara vez se utiliza como modo principal de desinfección, ya que es mucho menos eficaz que el cloro libre, se utiliza para proporcionar un residuo de desinfección de mayor duración para controlar el desarrollo de biopelículas y la colonización de animales dentro de la red de distribución (Gray, 2014).

A diferencia del cloro libre, el cloro combinado, tiene un umbral de sabor mucho más alto de 2 mg L<sup>-1</sup> que minimiza los problemas de sabor y olor que a menudo se asocian con el uso de cloro libre (Gray, 2014).

## 5.5 Técnicas de medición cloro libre residual

La concentración de cloro libre se puede establecer generalmente aplicando algunos métodos que utilizan colorimetría, produciéndose un cambio de color asociado con la reacción del cloro libre con NN-dietil-p-fenilendiamina (DPD), detección por cromatografía líquida, quimioluminiscente, , sin embargo estas técnicas requieren el empleo de reactivos, soluciones de referencia para la calibración que requieren mantenimiento y rellenado y, por lo tanto, no son adecuadas para realizar un monitoreo continuo, autónomo y de bajo costo (Hoque et al., 2017).

El cloro (tanto el Cl total como el libre) se puede determinar por gravimétrico, titrimétrico, amperométrico y métodos del método espectrofotométrico (o método colorimétrico) (Kafle, B. P., 2019). También se han informado varios métodos de detección basados en óptica de cloro residual como quimioluminiscencia y fluorescencia (Zhou et al., 2021).

Durante las últimas dos décadas, un extenso esfuerzo de investigación ha llevado al desarrollo de tres categorías de sistemas de detección cloro residual en línea como sistemas amperométricos, de electrodos selectivos de iones (ISE) y colorimétricos, donde los sistemas de detección en línea amperométricos FC poseen ventajas distintivas de alta sensibilidad, velocidad, configuración de hardware simple y fácil operación, sin embargo, la precisión y confiabilidad de tales sistemas se ven desafiadas por la presencia de especies electroactivas como, hierro y manganeso (Zhou et al., 2021).

También se encuentra la detección espectral de UV-VIS la cual se ha introducido en muchas áreas, incluidas las aguas residuales, el agua potable, los sistemas de río y

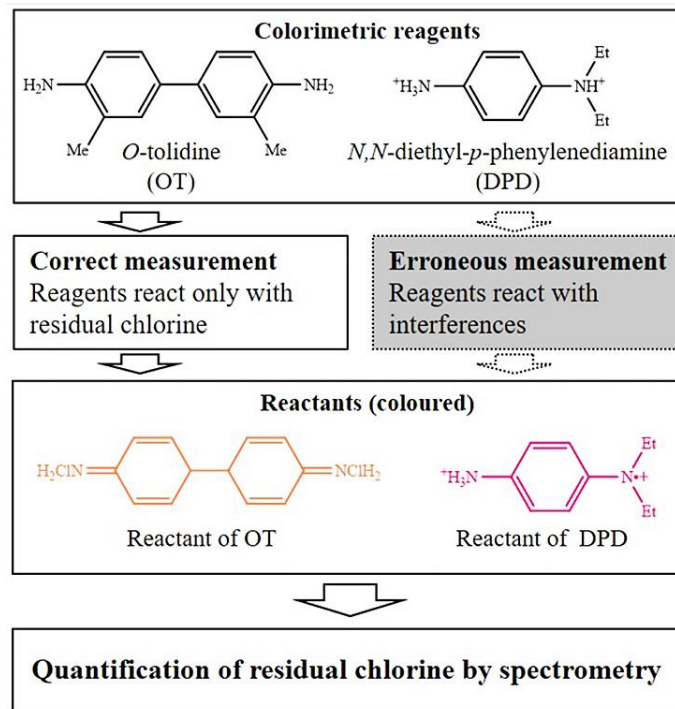
alcantarillado, los subproductos residuales desinfectantes y la desinfección (Malkov et al., 2009).

### **5.5.1 Método colorimétrico**

Los métodos convencionales que utilizan o-tolidina y N, N-dietil-pag-fenilendiamina como reactivos colorimétricos se han aplicado ampliamente en todo el mundo para medir la cantidad de cloro residual ayudando a el control de la calidad del agua y la gestión ambiental (Li et al., 2021).

La colorimetría es una gran herramienta ya que la miniaturización de los instrumentos fotométricos permite una gestión fácil y en el sitio, el DPD se ha convertido en el sustituto dominante de ortotolidina porque este último ha sido reconocido como un carcinógeno (Schieferstein et al., 1989, como se citó en Li et al., 2021).

La medición del cloro se basa en el comportamiento de la reducción de la oxidación química porque el cloro es un agente oxidante fuerte (Li et al., 2021).



*Figura 10: Reactivos colorimétricos, ortotolidina y Dietil p-fenilenediamina.*

*Fuente: (Li et al., 2021)*

### 5.5.1.1 Reactivo DPD (N,N-dietil-p-fenilenediamina)

APHA, 2005 menciona que el método se fundamenta en la reacción inmediata que se origina entre el cloro libre en sus dos formas de ácido hipocloroso e ion hipoclorito, con el indicador N,N-dietil-p-fenilenediamina el cual reacciona en su forma reducida produciendo DPD oxidado de color magenta y es proporcional a la concentración de cloro presente en la muestra (APHA, 2005, como se citó en (Macas Acurio, 2011)).

Una dificultad asociada con el uso de estos derivados de fenilenediamina es su tendencia a decolorarse cuando se mantiene en reposo, Hach Company presentó su primer kit de prueba de cloro basado en la química DPD en 1973, la amina es oxidada por el cloro a dos productos de oxidación a un pH casi neutro, siendo el producto un compuesto catiónico semi-quinoides conocido como tinte Würster (Kafle, B. P., 2019).

#### **5.5.1.1.1 Espectrofotometría**

El análisis espectrofotométrico constituye una parte del análisis colorimétrico, que consiste en la medición de la cantidad de luz absorbida por una solución coloreada, donde la intensidad de color es equivalente a la cantidad de la sustancia a analizar, igualmente la muestra en análisis. Entonces se dice que la espectrofotometría se basa en la cuantificación de energía radiante que es absorbe o transmite un sistema químico en base a las radiaciones ultravioletas y visibles, y a la longitud de onda, proporcionando una información cualitativa limitada de la sustancia que se esté analizando realizando un comparación del espectro que se está midiendo con una de referencia (Abril Díaz et al., 2000).

Los espectrofotómetros UV-VIS son equipos de laboratorio que generalmente se emplean para realizar un análisis de compuestos o sustancias tanto cualitativos como cuantitativos, constituyendo una gran aporte en los sectores industriales químicos, petroquímicos, farmacéuticos, entre muchos otras, su técnica está basada en la cuantificación de la cantidad de elementos y sustancias químicas, midiendo la radiación monocromática que absorbe una molécula (Martínez Osorio & Pérez Epinoza, 2009).

La espectrofotometría en la región ultravioleta visible, es un método analítico muy utilizado, con bajos costos y gran número de aplicaciones desarrolladas, una de sus aplicaciones son las mediciones directas de especies que absorben radiación (Rocha & Teixeira, 2004). Es una gran herramienta que nos permite calcular la cantidad existente de un componente en una solución, basándose en la capacidad que poseen las moléculas de absorber radiaciones electromagnéticas, siendo el porcentaje existente de luz que se ha absorbido igual a la concentración del analito que se desea analizar, obteniendo una

gráfica lineal de concentración y absorción (Abril Díaz et al., 2000). Y la eficiencia de absorción de la energía por parte de la molécula, como lo menciona Camelino et al., 2018, esto a influir según la estructura atómica y de las situaciones del medio como temperatura, pH, fuerza iónica, entre otras.

#### **5.5.1.1.2 Ley de Lambert**

La espectrofotometría se apoya matemáticamente en la ley de Lambert-Beer, para establecer las mediciones de absorción de radiación de sustancias en diferentes estados ya sea sólido, líquido o gaseoso, en la región UV-Vis, e infrarroja del espectro electromagnético, para medir la cantidad que se absorbe de radiación a una longitud de onda determinada (Rocha & Teixeira, 2004).

La primordial ley en que se fundamentan las técnicas espectrofotométricas, es la ley de Lambert Beer, la cual determina la relación lineal existente entre absorbancia, concentración y el paso óptico, esta es usada para conocer la cantidad de un determinado analito presente en una muestra (Martínez Osorio & Pérez Epinoza, 2009).

Como la absorbancia ( $A$ ) no tiene dimensiones, la dimensión del coeficiente de correlación ( $\epsilon$ ) influye en base a la concentración ( $c$ ) y la distancia de la celda ( $l$ ) expresada en cm, cuando incide la radiación monocromática sobre una muestra de una sustancia, absorbe esa longitud de onda mostrándose la intensidad de la radiación que la atraviesa (Martínez Osorio & Pérez Epinoza, 2009).

La absorbancia que presenta un compuesto es igual a su concentración, de manera directa por que al presentar una elevada cantidad de moléculas existe mayor fuerza de interacción

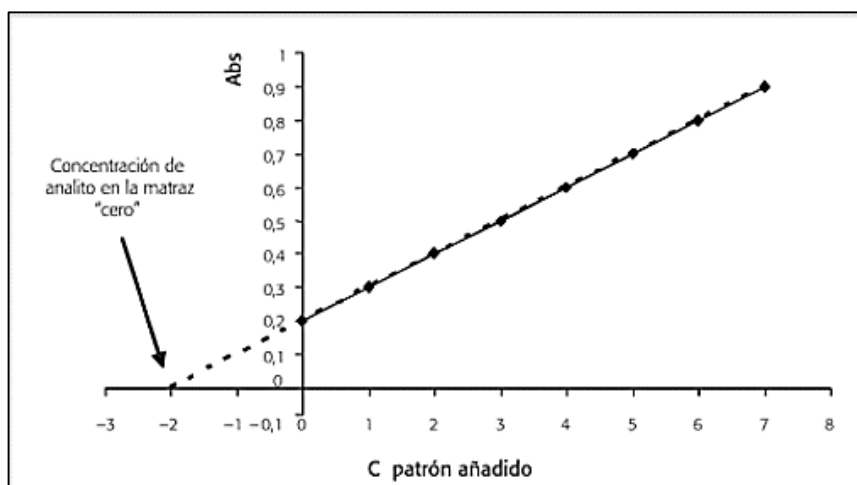


entre la luz y el objeto, esta absorción se afecta por dos factores, la distancia ya que cuanta más luz pasa por la muestra más moléculas detectara y la celda ya que dependerá del factor de extinción que es único para cada cromóforo (Abril Díaz et al., 2000).

La absorbancia de una solución en cuanto a la concentración de una determinada sustancia es directamente proporcional, ya que a mayor número de moléculas mayor será su actividad de relación con la luz, la absorción puede depender de dos factores que son: la extensión que atraviesa la luz ya que mientras mayor es la distancia que atraviesa por la muestra, mayor es la cantidad de moléculas que hallará a su paso y el otro factor del cual depende, es el coeficiente de extinción, conocida como coeficiente de extinción, la cual es concreta de cada cromóforo (Abril Díaz et al., 2000). La ecuación de la Ley de Beer como se la conoce, se cumple siempre y cuando se trate de soluciones diluidas, ya que si se tratase de con elevadas concentraciones del analito, conllevaría a la generación de interferencias al momento de realizar los cálculos (Camelino et al., 2018).

En 2009, Martínez Osorio & Pérez Epinoza, manifiestan que la ley de Lambert Beer es afectadas por algunos factores que pueden producir un error en el análisis, entre los cuales menciona: bajas concentraciones de elementos por debajo de 0.01M, concentraciones elevadas de las especies absorbentes ya que dejan de ser autónomos; interferencias químicas producidas por la unión, división o reacción de las sustancias que se quieran analizar, dependiendo principalmente del pH del medio; interferencias espectrales debido a la radiación no monocromática, también debido a los equipos e instrumentos debido a malas lecturas que generalmente se ocasionan, sin embargo se hace más significativo a valores muy elevado o muy pequeños de absorbancia.

Para realizar un análisis cuantitativo experimentalmente se requiere la preparación de una recta de calibrado la cual nos permita relacionar el valor de la absorbancia del analito de interés con su concentración, seleccionando la longitud de onda con la mayor absorbancia para el componente a analizar, luego se miden la absorbancia de disoluciones patrón del analito crecientes y conocidas, debiendo tener características similares para evitar errores, controlándose principalmente pH, temperatura y tipo de disolvente (Sierra Alonso et al., 2019).



*Figura 11: Recta calibrado por el método de adición estándar*

*Fuente: Sierra Alonso et al., 2019.*

Cuanto mayor sea el valor del  $\epsilon$  (coeficiente de correlación), será mayor y más sensible la determinación de la absorción del compuesto, por lo cual se emplea cromógenos cuyo valor de  $\epsilon$  (coeficiente de correlación) sea elevado (Hernández González, 2007).

### **5.5.1.1.3 Interferencias método colorimétrico**

Los siguientes cinco oxidantes insolubles se indicaron como posibles sustancias interferentes: óxido de manganeso (IV) ( $\text{MnO}_2$ ), óxido de cromo (IV) ( $\text{CrO}_2$ ), óxido de

cromo (III) ( $\text{Cr}_2\text{O}_3$ ), óxido de titanio (IV) ( $\text{TiO}_2$ ) y óxido de hierro (III) ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) (Li et al., 2021).

Dentro de las desventajas del método colorimétrico se considera que existe una generación de desechos la cual requiere un manejo para su disposición y debe realizarse una limpieza de la celda de la muestra, interferencias por sustancias con capacidad de oxidar y oxidantes como el bromo, dióxido de cloro, el permanganato y el cromo, la concentración de  $\text{CaCO}_3$  no debe superar los 1,000 mg / L, sin embargo, este método es estable a cambios de pH, temperatura y concentración de  $\text{Cl}_2$  (Ecología y Ciencia S.R.L., 2017) (Ecología y Ciencia S.R.L.). La falta de mecanismo de prevención hace que el sistema sea menos capaz de encontrar interferencias del color de la muestra, turbidez y otros iones oxidantes, a pesar de los esfuerzos recientes con técnicas avanzadas de microfluidos y nanodetección para eliminar las interferencias mientras se mantiene una alta sensibilidad y precisión con un uso mínimo de productos químicos sigue siendo un desafío para la detección colorimétrica en línea (Zhou et al., 2021).

### **5.5.2 Técnicas electroquímicas**

Los escasos recursos se ven afectados por la presión del cambio climático, resultando en una gran preocupación e impulsando el monitoreo ambiental por parte de las agencias reguladoras, sin embargo son altos los costos asociados con la recolección física de muestras, el transporte y posterior análisis en los laboratorios, siendo una de las razones del bajo nivel de monitoreo a lo largo de los años (K. Murphy et al., 2015).

Como ya se conoce, el desarrollo humano genera a su paso grandes impactos al ambiente, afectando a las diferentes matrices ambientales, surgiendo así una búsqueda de manera agresiva de todos los esfuerzos para mejorar su conservación, siendo el monitoreo

ambiental una de las claves para el control y atenuación de la deterioro ambiental, donde toman protagonismo los sensores inalámbricos ya que son una herramienta muy prometedora para el monitoreo continuo en tiempo real, sin embargo se puede considerar algunas limitaciones como potencia de procesamiento, memoria, ancho de banda de comunicación y energía (Pule et al., 2017). Las tecnologías de estos sensores se basa en métodos para determinación electroquímica y cuenta con electrodos para iones específicos, fotoionización y sensores amperométricos (Storey et al., 2011).

Los sistemas de monitoreo de agua en línea libre de reactivos son limitados, algunos son fabricados por compañías como, Hach HST GuardianBlue, J-MAR BioSentry entre otras, se puede decir que sus costos son inaccesibles para implementaciones a gran escala ya que cuestan decenas de miles de dólares por unidad, los sensores son instalados en celdas de flujo ubicadas en gabinetes y su costo es prohibitivo para implementaciones a gran escala ya que pueden alcanzar costos de decenas de miles de dólares por unidad, menciona que los costos generalmente se atribuyen a controladores y paneles de automatización de instrumentación (Lambrou et al., 2014).

La idea de una red de sensores que funcionen autónomamente proporcionando alerta en tiempo real es posible, aunque siguen existiendo muchos desafíos en el empleo de la actual tecnología como costos, limitación en analitos medibles, siendo necesario producir productos fiables y económicos (K. Murphy et al., 2015).

#### **5.5.2.1 Tipos de técnicas electroquímicas**

Ente algunas técnicas electroquímicas que se emplean, mediante sensores y sondas para la medición de sustancias presentes en el agua, se mencionan los siguientes:

### 5.5.2.1.1 Sensores de electrogravimetría

Como menciona (Moreno Ramírez, 2005) la electrogravimetría es una técnica electroquímica que ha sido empleada a escala industrial para la medición de cobre en corriente constante, mediante el uso de un electrodo el cual permite cuantificar un metal que ha sido depositado aquí este electrodo consiste en una malla catódica de platino limpia la cual es químicamente inerte, previamente pesado, midiendo su incremento en peso mediante la siguiente fórmula:

$$n_E = \left[ \frac{m_1 - m_2 + m_3}{A_E} \right]$$

*Figura 12: Ecuación para la determinación de masa de un elemento por método electrogravimétrico.*

*Fuente:(Moreno Ramírez, 2005)*

Donde:

$n_E$ = Es la cantidad de sustancia del elemento

$m_1$  = Es la masa del electrodo de platino con depósito del elemento metálico y las impurezas

$m_2$ = Es la masa del electrodo de platino

$m_3$ = Es la masa del metal residual

$A_E$ = Es la masa atómica relativa del elemento

### 5.5.2.1.2 Sensores amperométricos

Estos sensores son muy utilizados para determinar cloro libre, comprenden una celda de flujo continuo y una capa de electrodos que pueden realizar mediciones con técnicas amperométricas cuando la cantidad de la sustancia a determinar fluctúa. Los sensores

amperométricos se emplean para realizar medidas continuas y actualmente se encuentra en progreso la integración en la óptica del chip (Storey et al., 2011).

#### **5.5.2.1.3 Electroodos de diamante dopado con boro (BDD)**

Son una alternativa prometedora por su alta durabilidad y la amplia ventana de potencial en soluciones acuosas, también se menciona su utilización en la reacción de oxidación para la detección electroquímica de cloro libre, donde es necesaria una compensación de del pH, donde las películas se depositan sobre un sustrato de silicio utilizando un sistema de deposición de vapor químico asistido por plasma de microondas, y como fuentes de carbono se requieren 10,000 ppm, y una mezcla de acetona y trimetoxiborano con una relación de boro a carbono (Watanabe et al., 2016).

#### **5.5.2.1.4 Sondas Galvánicas**

Basada en técnicas electroquímicas estos sensores son generalmente usados para la medición de oxígeno disuelto en el agua (OD), estas técnicas aplican un sistema de electrodos donde el OD reacciona con el cátodo para producir una corriente, Las sondas galvánicas a menudo no operan varios meses sin reemplazo de electrolitos o membranas, lo que resulta en un menor costo de mantenimiento, este sensor consta de dos electrodos: un ánodo y un cátodo, ambos sumergidos en electrolito que se encuentra internamente en el sensor y un revestimiento filtrable al oxígeno es el que divide al ánodo y al cátodo (Zhuiykov, 2012).

#### **5.5.2.1.5 Biosensores electroquímicos**

Bonetto, 2013, menciona que son los transductores que comprenden un catalizador biológico y un sistema de electrodos, varios de ellos se suelen utilizar como células

microbianas, enzimas, anticuerpos, generándose una señal eléctrica debido a la reacción entre los electrodos y las especies electroactivas, la cual es correspondiente a la concentración del analito.

Los biosensores electroquímicos son considerados herramientas veloces con un sistema más simple, cuyo diseño puede ser miniaturizados (Justino et al., 2010, como se cita en Bonetto, 2013). Para estos sensores generalmente se emplean electrodos de material nobles e inerte como es el Pt, Au u otros, Los electrodos se pueden modificar con una película de polímero para evitar interferencias y optimizar la estabilidad y el rendimiento del biosensor ( Zhang et al., 2000, como se cita en Bonetto, 2013).

Los sensores de cloro residual libre basados en técnicas electroquímica con electrodos de platino u oro están disponibles comercialmente en muchas empresas, para operar estos sistemas se requieren operadores hábiles y calibración frecuente para realizar mediciones confiables porque la reacción electroquímica del cloro libre se ve afectada por varios factores como el pH, el ensuciamiento de la superficie y el oxígeno disuelto (Watanabe et al., 2016).

#### **5.5.2.1.6 Sensores ORP**

Dentro de las técnicas electroquímicas de medición se encuentran los sensores Redox u ORP cuya capacidad es la medición del potencial de óxido reducción mediante un electrodo constituido por metales noble, siendo muy útil para conocer la actividad de los electrones presente en el agua o en sistemas acuosos (Schettino Sanhueza, 2019) . Mide el mecanismo químico real por el cual los oxidantes como el cloro, eliminan microorganismos, mientras más elevado sea el valor del ORP más tomarán electrones de

las células de los microorganismos y, por lo tanto, más eficiente y efectiva será la neutralización de cualquier nueva fuente de contaminación microbiana (Spahl, 2012).

Las lecturas de un sensor ORP son una medida diferencial de los potenciales de mV acumulados entre dos electrodos expuestos a soluciones que contienen agentes oxidantes y / o reductores, esta medida describe la magnitud neta y la dirección del flujo de electrones entre pares de especies químicas, llamados pares REDOX (Spahl, 2012).

En las reacciones de óxido reducción, una de las sustancias química pierde electrones mientras que la otra química gana electrones, los que ganan electrones se denominan sustancias oxidantes como por ejemplo: HOCl, OCl<sup>-</sup>, ClO<sub>2</sub>, bromo, peróxido de hidrógeno, y las sustancias químicas que ceden electrones se denominan reductores como el Li, Mg<sup>2+</sup>, Fe<sup>2+</sup>, Cr (Spahl, 2012).

Los sensores de ORP básicamente están conformados por dos semicélulas electroquímicas, el electrodo de medición en contacto con la solución que se está midiendo y uno de referencia que se encuentra conectado con un depósito aislado de solución salina altamente concentrada, cuando la solución que se mide tiene una alta concentración de oxidantes, acepta más electrones de los que pierde y el electrodo de medición desarrolla un potencial eléctrico mayor que el potencial estable del electrodo de referencia (Spahl, 2012). La diferencia en el potencial eléctrico se mostrará en milivoltios, una lectura positiva indica una solución oxidante y una lectura negativa indica una solución reductora y los valores más positivos o negativos significan que los oxidantes o reductores presentes son más fuertes, están presentes en concentraciones más altas o en ambos (Spahl, 2012).



Entonces se dice que el ORP puede medir la eficacia total de todos los desinfectantes oxidantes que se encuentren en solución en el agua ya sea como por ejemplo: el ácido hipocloroso, hipoclorito, monocloramina, dicloramina, ácido hipobromoso, ozono, ácido peracético (Spahl, 2012).

#### **5.5.2.1.6.1 Mediciones de cloro libre con ORP**

Spahl, 2012, menciona que existe una correlación entre el ORP y los métodos de control de desinfección conocidos, mediciones y recuentos de placa bacteriana, ya que esta medición brinda una imagen precisa de la actividad de desinfección con cloro residual reportada como un número empírico que no está sujeto a interpretaciones visuales como es el caso de técnicas colorimétricas, además manifiesta que esta técnica se ha defendido como la mejor manera de juzgar el poder desinfectante residual del agua clorada por expertos en calidad del agua desde la década de 1960.

Las mediciones de ORP no miden directamente la concentración, pueden correlacionarse con los niveles de cloro libre en ppm, y para esto se deben controlar las variables de pH y la temperatura, así como la presencia de alguna sustancia química interferente o sustancias oxidantes o reductoras las cuales deberán tenerse en cuenta y más idóneamente eliminarlas (Spahl, 2012). Una vez se tenga control de estos el ORP se puede relacionar con las concentraciones mediante experimentación de laboratorio o mediante fórmulas matemáticas como la Ecuación de Nernst, la cual indica la conexión que existe entre el potencial del electrodo de una sustancia química específica en una solución y su concentración, sin embargo este proceso regularmente puede ser complejo y laborioso (Spahl, 2012).

$$E = E^{\circ} - \frac{RT}{nF} \ln(Q)$$

Figura 13: Ecuación de Nerst

Fuente: (Schettino Sanhueza, 2019)

**En donde:**

- E:** es el potencial corregido del electrodo
- E<sup>0</sup>:** es el potencial en condiciones estándar (los potenciales se encuentran tabulados para diferentes reacciones de reducción)
- R:** es la constante de los gases en Joles sobre kelvin por mol
- T:** la temperatura absoluta (escala Kelvin)
- n:** la cantidad de mol de electrones que participan en la reacción
- F:** la constante de Faraday (aproximadamente 96500 C/mol)
- Q:** el cociente de reacción correspondiente

Como indica Rosemount Analytical, 2008, el examen de la ecuación de ácido hipocloroso muestra algunas propiedades importantes del ORP:

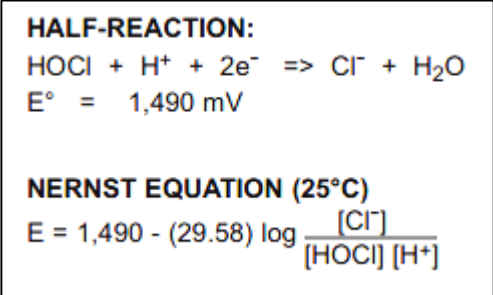


Figura 14: Ecuación de Nerst para la media reacción ácido hipocloroso

Fuente: (Rosemount Analytical, 2008)

1. En el ORP influyen las concentraciones de todas las sustancias presentes en la semirreacción sin incluir el agua, el ORP del ácido hipocloroso depende tanto del ion cloruro ( $\text{Cl}^-$ ) como del pH. (H) como lo hace con el ácido hipocloroso.
2. El ORP es una función del logaritmo de la relación de concentración.
3. El coeficiente que multiplica este logaritmo de concentración es igual a  $-59,16$  mV, dividido por el número de electrones en la semirreacción (n), en este caso,  $n = 2$ ; por lo tanto, el coeficiente es  $-29,58$ . Un cambio de 10 veces en la concentración de  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{HOCl}$ ,  $\text{H}^+$  solo cambiarán el ORP  $\pm 29.58$  Mv

Para verificar una sustancia individual en la semirreacción, la ecuación de Nernst se puede dividir en logaritmos individuales para cada sustancia, y la contribución de esa sustancia se puede calcular sobre su rango de concentración esperado (Rosemount Analytical, 2008).

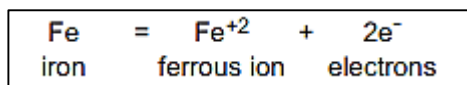
#### **5.5.2.1.6.2 Funcionamiento mediciones ORP**

La medición de ORP se basa en el principio de un electrodo de metal inerte como platino y oro, que por su baja resistencia, cederá electrones a un oxidante o aceptará electrones de un reductor, desarrollando un potencial, debido a la carga acumulada, la precisión típica que suelen tener es de  $\pm 5$  mV (Rosemount Analytical, 2008)

#### **Oxidación**

Es el suceso en el que un átomo, molécula o ion, pierde electrones, cuando dicha sustancia se oxida aumenta su estado, los estados de oxidación adyacentes de una sustancia en particular son conocidos como pares redox., como es el caso de  $\text{Fe}^{+2} / \text{Fe}$ , que se muestra en la figura de abajo, esta ecuación química se denomina semirreacción ya que los electrones perdidos por el átomo de hierro no pueden existir en solución y tienen que ser

aceptados por otra sustancia en solución la cual se va a reducir (Rosemount Analytical, 2008).

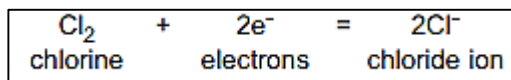


*Figura 15: Reacción de oxidación del Fe*

*Fuente: Rosemount, 2008.*

## **Reducción**

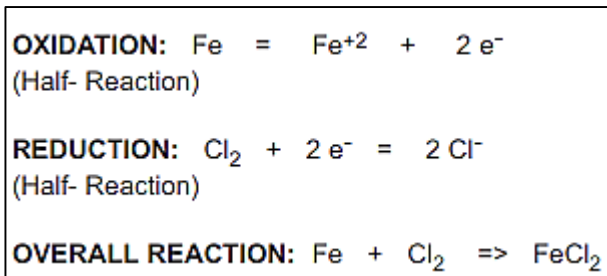
Es el proceso en el que ocurre una ganancia neta de electrones por un átomo, molécula o ión, reduciéndose su estado de oxidación, como se muestra en la siguiente figura ocurre una semirreacción para la reducción de cloro, donde el par redox es Cl<sub>2</sub> / Cl (cloro / cloruro (Rosemount Analytical, 2008).



*Figura 16: Reacción de reducción del Cl<sub>2</sub>*

*Fuente: Rosemount, 2008.*

De igual forma los electrones perdidos en la oxidación deben tener otra sustancia como destino, y los electrones ganados deben provenir de una fuente, y al combinarse las dos semirreacciones dan lugar a una reacción completa donde los electrones perdidos en la reacción de oxidación deben ser iguales a los electrones ganados en la reacción de reducción (Rosemount Analytical, 2008).



*Figura 17: Reacción Redox con Fe y Cl2*

*Fuente: Rosemount, 2008.*

En la figura anterior se observa la reacción donde el hierro (Fe) reduce el cloro (Cl<sub>2</sub>) y se denomina reductor o agente reductor, y el cloro (Cl<sub>2</sub>) oxida el hierro (Fe) y se denomina oxidante u agente oxidante (Rosemount Analytical, 2008).

#### **5.5.2.1.6.3 Lecturas ORP**

Los sensores generalmente no establecen un punto fijo de lectura, sino que puede tener un rebote de hasta 25 mV, especialmente cuando son sistemas portátiles e influye si la sonda es estacionaria o se encuentra en movimiento (Rosemount Analytical, 2008).

Cuando se emplea unidades portátiles para dar lectura de la solución se recomienda que el sensor sea sumergido en el agua donde esta corra durante 30 segundos, y en caso de que se quiera dar lectura a una muestra recolectada en un recipiente, se debe agitar, vaciar el contenido, llenarlo nuevamente con el agua y sumergir el sensor de ORP agitando suavemente durante 30 segundos que es un tiempo practico para los operadores y finalmente se toma la lectura, si el tiempo de medición es mayor será más preciso (Rosemount Analytical, 2008).

#### **5.5.2.1.6.4 Sonda de ORP**

La sonda de ORP no mide exactamente la cantidad de cloro libre existente en el agua por lo que se dice que no es una sonda selectiva al cloro libre, sino que mide la corriente generada por todos los oxidantes presentes en la muestra de agua. Por lo tanto, el ORP es utilizado para estimar la presencia de cloro libre en el agua (White, 2010, como se cita en Van Haute et al., 2019). En cuanto a las mediciones de cloro con sensores ORP, las limitantes que se pueden presentar son el tiempo de respuesta lento y la respuesta no lineal del ORP al cloro libre (Hoorfar, 2014, como se cita en Van Haute et al., 2019). El ORP también ha sido analizado para la evaluación de la eficacia del dióxido de cloro en la desinfección del agua en la industria de empaque de tomates frescos (Tomás-Callejas et al., 2012).

Empelar la sonda de ORP implica grandes y prácticos beneficios, la sonda se puede poner directamente en el agua de lavado ya que no es necesario extraer el flujo de agua y pasarlo por un sistema de tuberías, agregar reactivos ni hacer un análisis titrimétrico o espectrofotométrico en la muestra de agua, como es el caso de la N, N-dietil-p fenilendiamia (DPD) dispositivos de método. Además, el ORP es una medida de voltaje y, como tal, fácil de usar como señal para comunicarse con la bomba de un sistema de dosificación en un circuito de retroalimentación (Van Haute et al., 2019).

#### **5.5.2.1.6.5 Influencias en el ORP**

Durante un proceso de lavado de productos con cloro libre como desinfectante, el ORP depende al menos de cuatro variables principales: el cloro libre mismo, la temperatura, el pH y los constituyentes de la matriz del agua que incluyen la composición química orgánica y mineral del agua, donde el ORP tiende a aumentar con el logaritmo del cloro

libre residual y disminuye la sensibilidad del sensor al aumentar la concentración de cloro libre (Van Haute et al., 2019).

### **Influencia del pH**

El análisis electroquímico permite realizar análisis en línea sin la necesidad de reactivos adicionales, sin embargo la detección de cloro basada en técnicas electroquímicas está influenciada por el pH de la solución, el cual define las especies iónicas de cloro particulares presentes en la solución, siendo importante controlar el pH para permitir la detección electroquímica del cloro residual en el agua (Seymour et al., 2020). El voltaje emitido en una muestra es prácticamente constante para una determinada concentración de cloro libre, se pueden presentar algunas leves variaciones debido al coeficiente de difusión "aparente" cambiante correspondiente a las diferentes relaciones  $\text{HClO} / \text{ClO}^-$  en solución, debido a la diferencia de los coeficientes de difusión de cada especie esta relación tendrá un efecto sobre la corriente observada (Del Campo et al., 2005).

Para determinar la influencia del acidulante en el ORP durante la cloración, Se compararon HCl (Fluka, EE. UU, ), Ácido fosfórico (Mallinckrodt Chemicals, EE. UU.), Ácido cítrico (VWR, EE. UU), determinado que si bien el ácido cítrico es empleado generalmente en el lavado de productos frescos, no se puede recomendar ya que tiene CLD inherente que producen subproductos orgánicos clorados de la desinfección (Fan y Sokorai, 2015, como se cita en (Fan y Sokorai, 2015, como se cita en Van Haute et al., 2019).

El ORP depende del ion cloruro ( $\text{Cl}^-$ ) y del pH ( $\text{H}^+$ ) tanto como del ácido hipocloroso (cloro en agua), cualquier cambio en la concentración de cloruro o el pH afectará el ORP. Por lo tanto, para medir el cloro con precisión, el ión cloruro y el pH deben medirse con

alta precisión o controlarse cuidadosamente a valores constantes (Rosemount Analytical, 2008).

#### 5.5.2.1.6.6 Sensor ORP marca Sensorex,

Este sensor fue empleado para la realización de este proyecto, el cual cuenta con un electrodo de medición y otro de referencia, donde la celda de medición está conformada por un metal noble como platino u oro el cual detecta cambios en el potencial de oxidación y reducción, mientras que la celda de referencia proporciona una señal estable de comparación, el sensor cuenta con múltiples funciones como se muestran a continuación (Sensorex, 2021):

*Tabla 3: Aplicaciones del ORP*

<b>ORP Level (mV)</b>	<b>Aplicaciones</b>
0-150	Sin uso práctico
150-250	Acuicultura
250-350	Torres de enfriamiento
400-475	Piscinas de natación
450-600	Jacuzzis
600	Desinfección de agua
800	Esterilización de agua

*Fuente: (Sensorex, 2021)*

#### **Características del sensor**

A continuación, se muestran algunas de las características del sensor a emplear



*Tabla 4: Características del sensor ORP*

---

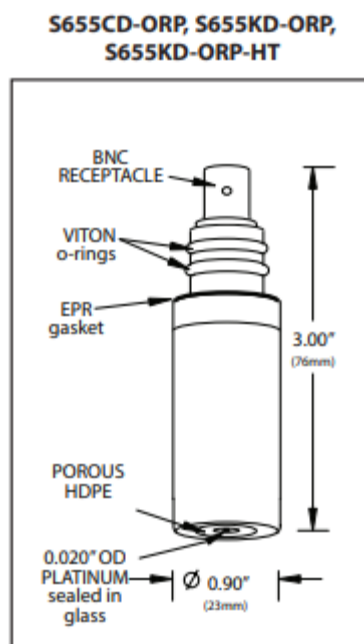
Posee una superficie plana del vidrio sensible al pH es delgada, hay que extremar cuidados para que el vidrio no se raye ni se rompa

El diseño de referencia sellado incorporado de este electrodo elimina la necesidad de agregar soluciones de relleno y minimiza el secado de referencia

Esta característica de diseño también permite que el electrodo se utilice en sistemas presurizados

---

Fuente: (Sensorex, 2021)



*Figura 18: Componentes del sensor ORP*

Fuente: (Sensorex, 2017)

El diseño plano del sensor ORP, optimiza algunos de los procesos (Sensorex, 2017).

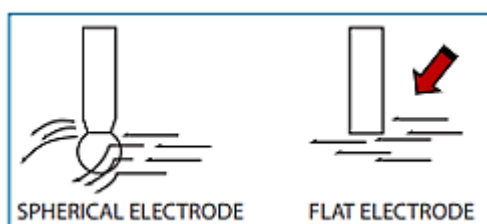


Figura 19: Funcionamiento autolimpieza

Fuente: (Sensorex, 2017)

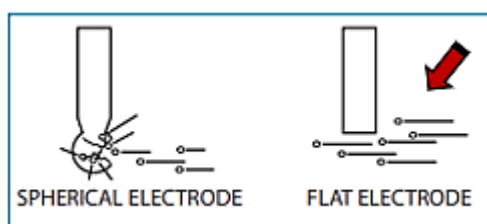


Figura 20: Funcionamiento libre de abrasión

Fuente: (Sensorex, 2017)

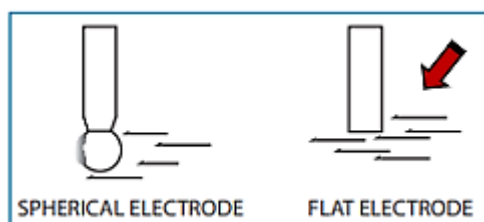
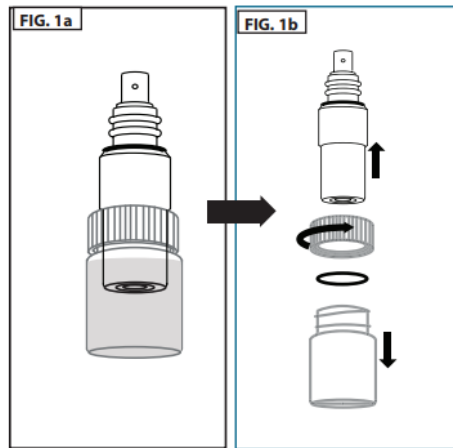


Figura 21: Funcionamiento del material viscoso

Fuente: (Sensorex, 2017)

### Consideraciones del sensor ORP

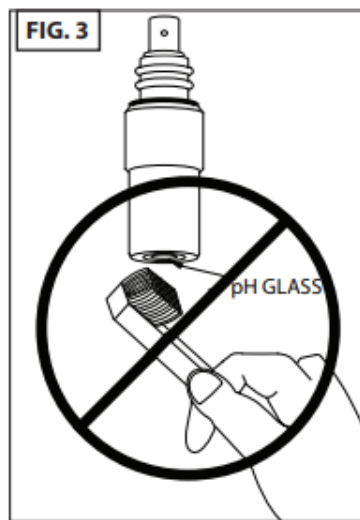
El electrodo de ORP permanece en una botella de remojo que contiene una solución de cloruro de potasio, si el electrodo se usa con poca frecuencia, la tapa, el frasco y la solución deben guardarse y el electrodo debe guardarse en ellos (Sensorex, 2011).



*Figura 22: Sensor ORP*

*Fuente: (Sensorex, 2011).*

Después de la exposición a una muestra, tampón o solución de enjuague, el arrastre se puede minimizar secando, nunca limpiando, el electrodo con un papel limpio no abrasivo o una toalla de tela limpia., nunca se debe usar cepillo en el vidrio (Sensorex, 2011).



*Figura 23: Limpieza inadecuada del sensor ORP*

*Fuente: (Sensorex, 2011).*

Las lecturas se estabilizan más rápido en algunas soluciones que en otras; se debe dejar un tiempo para que la lectura se estabilice, con electrodos nuevos se obtienen lecturas estables en tampón en 10-15 segundos como se observa en la figura 41 (Sensorex, 2011).

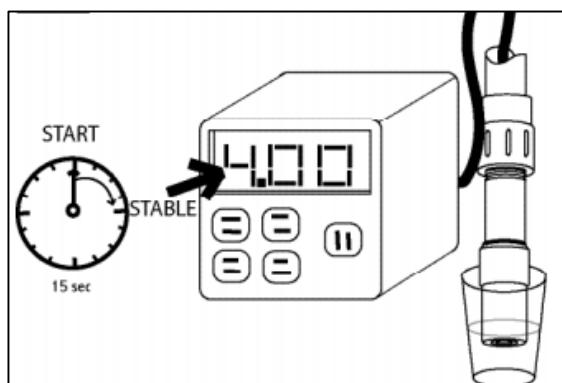


Figura 24: Tiempo de estabilización sensor ORP

Fuente: (Sensorex, 2011).

Tabla 5: Especificaciones del sensor

<b>Rango</b>	0-14pH (0-12pH sin error de Na +) +/- 2000mV para ORP
<b>Materiales húmedos</b>	
Cuerpo / Unión:	CPVC / HDPE (modelos "-CD") PVDF / PVDF poroso (modelos "-KD")
Superficie de medición:	vidrio de pH (pH), platino u oro (ORP)
Juntas tóricas:	Viton
Junta:	EPR
<b>Rango de temperatura / presión</b>	
(todos los modelos terminan en "-CD") = 0C * - 75C (0-100psig), 80C (0-85psig)	
(todos los modelos terminan en "-KD") = 0C * - 100C (0-100psig)	

---

**Nota:** De 0 a 10 ° C, los electrodos exhibirán un tiempo de respuesta más lento.

---

**Tipo de referencia** Ag / AgCl, unión doble sellada

---

**Instalación** en cualquier dirección

---

Fuente: (Sensorex, 2017)

### CAPITULO III

#### 6 Metodología

Para conseguir los objetivos establecidos en este proyecto, de medir la concentración del cloro libre residual mediante técnicas electroquímicas, y comprobar la eficacia del mismo, se empleó un Sensor Redox o también llamado sensor de óxido-reducción ORP, el cual mide el potencial de oxidación del cloro libre presente en el agua. El desarrollo experimental consistió en primer lugar realizar la medición de cloro libre residual en soluciones preparadas con concentraciones conocidas de agua destilada y cloro total el cual se tituló con tiosulfato de sodio; la medición se realizó basándose en la técnica colorimétrica con reactivo Dietil P-fenilen-diamina DPD de la marca (HACH Company, n.d.), la cual se empleó como método de referencia de cloro libre y se empleó el sensor ORP de la marca SENSOREX, el cual se relacionó conjuntamente con las variables de pH y temperatura para crear una base de datos la cual nos permita determinar la cantidad de cloro libre presente en el agua.

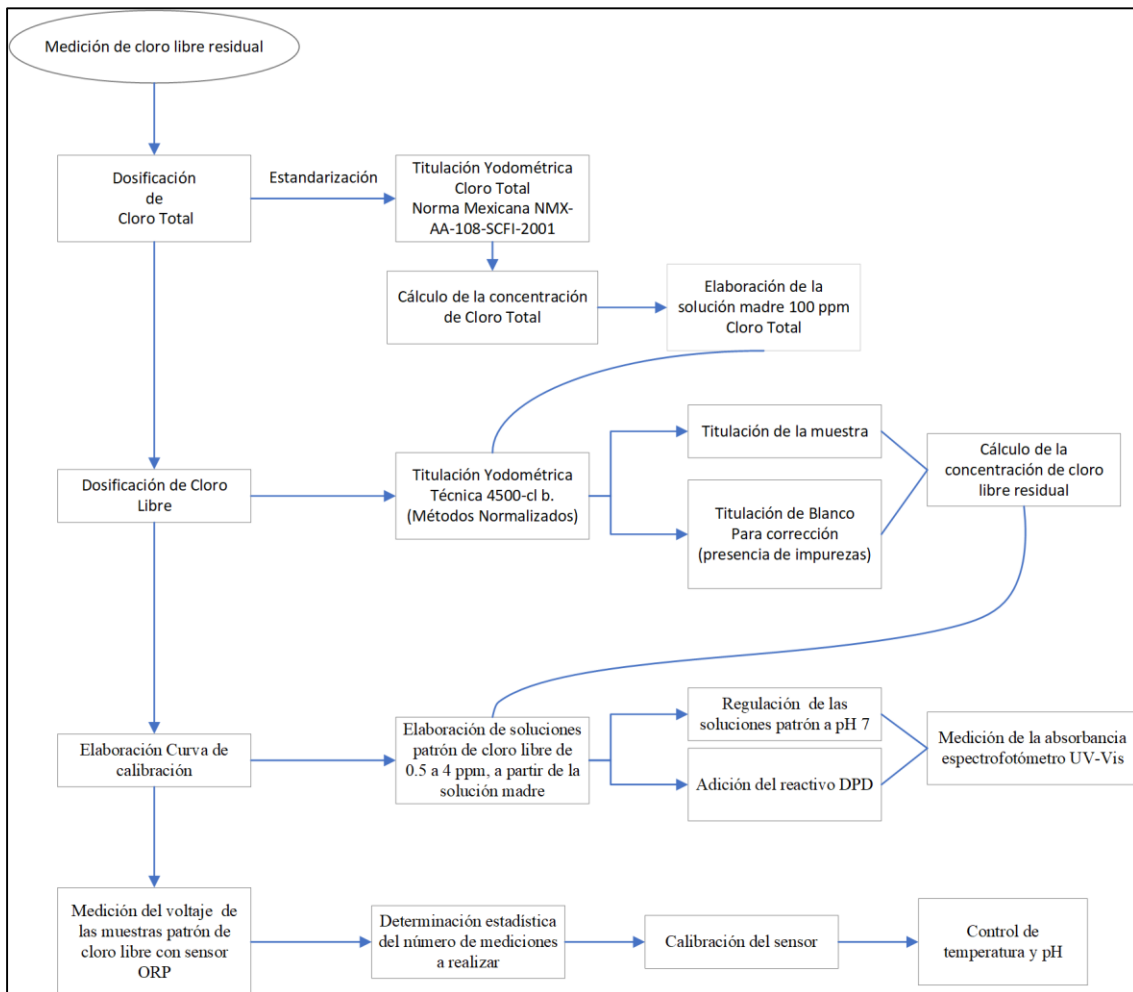


Figura 25: Esquema principal metodología.

Fuente: Autores

## 6.1 Dosificación de Cloro Total

Para poder dosificar el cloro comercial en la preparación de la solución madre, se procedió a titularlo mediante la Norma Mexicana (NMX-AA-108-SCFI-2001, 2001), con la finalidad de estandarizar el cloro, determinando su concentración en porcentaje.

### 6.1.1 Titulación de Cloro Total

Se empleó cloro comercial La Original elaborado por PROQUILARV S.A con registro sanitario NSOH04350-14EC, a una concentración de 5%, con el fin de corroborar su concentración se estandarizó el hipoclorito de sodio mediante la Norma Mexicana (NMX-

AA-108-SCFI-2001, 2001), mediante titulación yodométrica para lo cual se emplearon los siguientes reactivos y materiales:

**Reactivos:**

- Solución de almidón al 1%
- Solución ácido acético glacial al 30 %
- Solución Yoduro de potasio al 10 %
- Solución tiosulfato de sodio 0.1 N

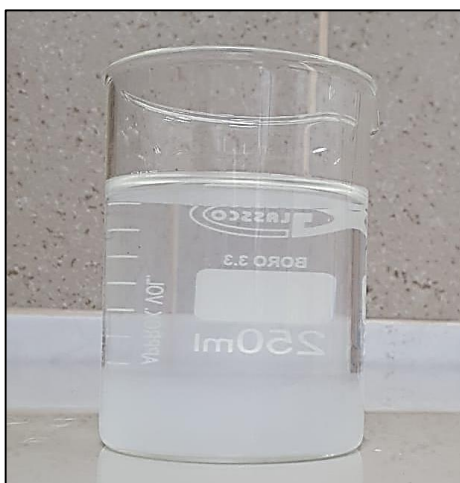
**Equipos y materiales:**

- Agua destilada
- Vasos de precipitación 250ml
- Bureta
- Erlenmeyer 500ml
- Balanza analítica digital
- Pinza doble para bureta
- Soporte universal
- Micropipeta
- Luna de reloj
- Espátula
- Estufa eléctrica

**6.1.1.1 Preparación de solución de Almidón al 1%**

Para preparar la solución de Almidón al 1%, basándonos en el libro de Métodos Normalizados Para el Análisis de Aguas Potables y Residuales (American Public Health Association et al., 1992), para lo cual se procedió a pesar 5g de almidón soluble de yuca y se transfirió a un vaso de 250 ml, se agregó 5 ml de agua destilada, y se agitó con una

varilla de vidrio hasta formar una pasta homogénea libre de grumos, posteriormente en un erlenmeyer de 500 ml se llenó 400 ml de agua destilada y se llevó a ebullición con ayuda de una estufa eléctrica, una vez que le agua llegó a ebullición se añadió la pasta de almidón y se continuó la ebullición hasta llegar a la transparencia de la solución, una vez lograda se apagó la estufa y con la solución una vez fría, se ajustó el volumen a 500 ml con agua destilada. Una vez preparada la solución se dejó reposar por un periodo de 24 horas y se utilizó el sobrenadante.



*Figura 26: Solución de almidón al 1%*

*Fuente: Autores*

#### **6.1.1.2 Preparación de ácido acético glacial al 30 %**

Para preparar ácido acético glacial al 30 %, con ayuda de una micropipeta se tomó un volumen de 3ml de ácido acético glacial puro y se llevó a aforo con agua destilada a un volumen de 10ml.



### 6.1.1.3 Preparación de yoduro de potasio al 10 %

Para preparar yoduro de potasio al 10 %, se pesó 1 gamo de cristales de yoduro con ayuda de una balanza analítica y se llevaron a aforo a un volumen de 10ml con agua destilada, se agito la solución para su total homogenización.



Figura 27: 1,0001 gramos de Yoduro de potasio pesado en la balanza digital

Fuente: Autores

### 6.1.1.4 Preparación de la solución de tiosulfato de sodio 0.1 N

Para preparar la solución de Tiosulfato de sodio 0.1 N, con ayuda de una balanza digital se pesó 1,9765 y se llevó a aforo a un volumen de 250 ml. El Peso molecular del tiosulfito de sodio ( $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$ ) es 158,11g/mol, al ser dividido entre 2 que es el valor de su equivalente químico siendo una sal orgánica, nos da un valor de 79,06 gramos que en un volumen de 1 L es equivalente a una normalidad de 1. Se realizó una relación para determinar la cantidad en gramos a para una normalidad de 0,1.

$79,06 \text{ gramos} \rightarrow 1N$

$X \text{ gramos} \rightarrow 0,1N$

Se necesitan 7,906 gramos para 1 L de solución a 0,1N, ahora relacionamos los valores para encontrar los gramos en una dilución en 250 ml

$7,906 \text{ gramos} \rightarrow 1000 \text{ ml}$

$X \text{ gramos} \rightarrow 250 \text{ ml}$

Determinando que para una solución 0,1N en un volumen de 250 ml necesita 1,9765 gramos del Tiosulfato de sodio.



*Figura 28: 1,9767 gramos Tiosulfato de sodio pesado en la balanza digital*

*Fuente: Autores*

### 6.1.2 Proceso de titulación del cloro total

Para iniciar la titulación con ayuda de una pipeta volumétrica se tomó 1 ml de solución de hipoclorito de sodio y se transfirió a un matraz Erlenmeyer de 300 ml, se agregó 10 ml de yoduro de potasio a una concentración de 10% y 10 ml de ácido acético dejando descansar a solución por 30 segundos, pasado esto, la solución obtenida se tituló con la solución de tiosulfato de sodio hasta una coloración amarillenta, se agregó unas gotas de la solución de almidón hasta el cambio en la coloración de la solución y se procedió a valorar la solución hasta llegar a su transparencia.

### 6.1.3 Cálculo de la concentración de cloro total

Una vez realizada la titulación, se obtuvieron los datos necesarios para la determinación de la concentración de hipoclorito de sodio expresada en porcentaje, para lo cual se empleó la siguiente expresión matemática especificada en la norma (NMX-AA-108-SCFI-2001, 2001).

$$\%Cl = \frac{V * N * 0.355 * 100}{V1 * d}$$

**Donde:**

Cl= es el contenido de hipoclorito de sodio expresado en por ciento

V= es la solución de tiosulfato de sodio empleada en la titulación en ml

N= es la normalidad de la solución de tiosulfato de sodio en mg/ml.

V1= es la solución de hipoclorito de sodio en ml

d= es la densidad del hipoclorito de sodio en g/ml

$$\%Cl = \frac{V * N * 0355 * 100}{V1 * d}$$

$$\%Cl = \frac{15,98\text{ml} * 0,007906 \text{ mg/ml} * 0355 * 100}{1\text{ml} * 1,11\text{g/ml}}$$

$$\%Cl = 4,9783 = 4,98\%$$

Mediante la titulación se determinó que la concentración del hipoclorito de sodio comercial que se empleó en las practicas es de 4,98%.

## **6.2 Dosificación de Cloro Libre Residual**

Para poder dosificar las muestras patrón se tituló la solución madre mediante el método yodométrico, para poder determinar la concentración de cloro libre residual de la solución.

### **6.2.1 Titulación de Cloro Libre Residual**

Se determinó la concentración de cloro libre que contiene la solución madre que fue preparada previamente con cloro comercial La Original, a una concentración de 100 ppm de cloro total, para lo cual se empleó el método yodométrico cuya técnica es la 4500-cl b., establecida en el libro de Métodos Normalizados (American Public Health Association et al., 1992), para la titulación se necesitó:

#### **Reactivos:**

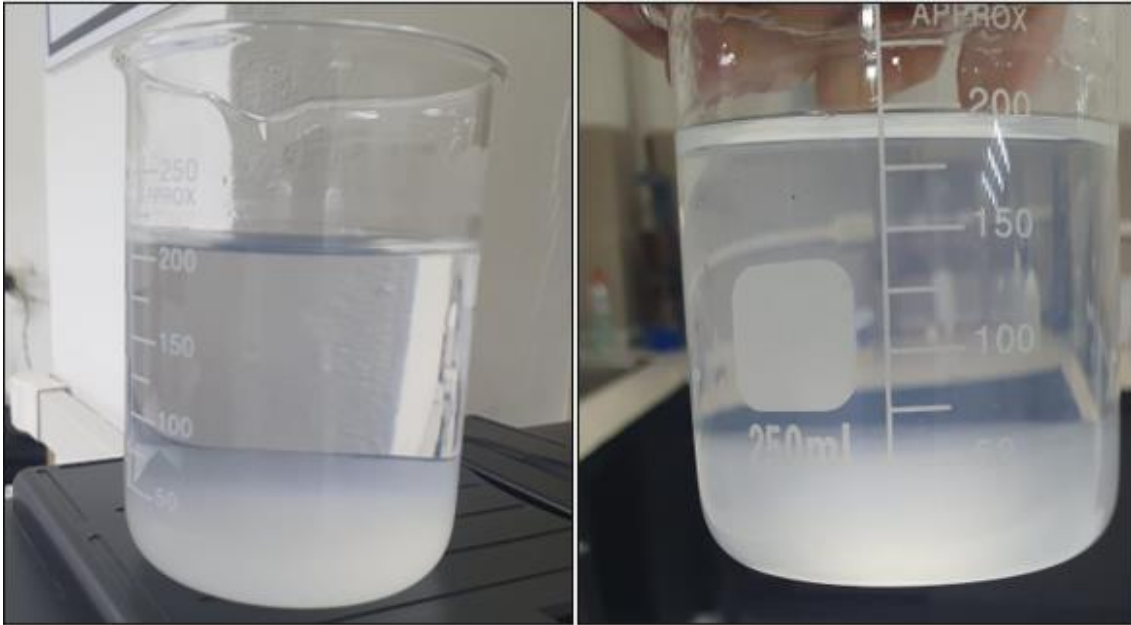
- Solución indicadora de almidón
- Solución Tiosulfato de sodio 0,01N
- Solución de Yodo 0,0282N
- Yodo grado reactivo
- Yoduro de potasio

**Materiales y equipos:**

- Agua destilada
- Vasos de precipitación 250ml
- Bureta
- Erlenmeyer 500ml
- Balanza analítica digital
- Pinza doble para bureta
- Soporte universal
- Micropipeta
- Luna de reloj
- Espátula

**6.2.1.1 Preparación de la solución indicadora de almidón**

Para preparar la solución indicadora de almidón, se pesaron 5 g de almidón de yuca se añadió una pequeña cantidad de agua destilada fría y con ayuda de un mortero se convirtió en una pasta fina, a esta pasta se agregó agua destilada hirviendo hasta alcanzar un volumen de 1L, se procedió a agitar y se dejó en reposo durante una noche y se usó el sobrenadante formado en la solución.



*Figura 29: Solución de almidón*

*Fuente: Autores*

#### **6.2.1.2 Preparación de Tiosulfato de sodio $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$ al 98%**

Para la preparación del titulante se utilizó Tiosulfato de sodio  $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$  al 98% siendo una sal inorgánica cuyo equivalente químico es 2, obteniendo un valor de 70,06 gramos en un volumen de 1000ml que equivalen a una normalidad 1, la normalidad que se quiere alcanzar es de 0,1 para lo cual se realizó una relación para determinar la cantidad en gramos a para una normalidad de 0,01.

$$79,06 \text{ gramos} \rightarrow 1N$$

$$X \text{ gramos} \rightarrow 0,01N$$

Se necesitan 0,7906 gramos para 1 L de solución a 0,01N, ahora relacionamos los valores para encontrar los gramos en una dilución en 250 ml

$$0,7906 \text{ gramos} \rightarrow 1000 \text{ ml}$$

$$X \text{ gramos} \rightarrow 250 \text{ ml}$$

Se necesitan 0,199 gramos para diluirlos en un volumen de 250 ml y obtener una normalidad 0,01; el tiosulfato de sodio contiene una concentración de 98% por lo cual se ajustó el valor a un porcentaje del 100%.

$$\begin{aligned}
 &0,199 \text{ gramos} \rightarrow 98\% \\
 &X \text{ gramos} \rightarrow 100\% \\
 &X = 0.2036 \text{ g en } 250 \text{ ml}
 \end{aligned}$$

Se empleó un peso de 0,2017g en 250 ml para una solución Na<sub>2</sub>S<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 0,01N.



Figura 30: 0,2017gramos de Tiosulfato de sodio pesado en la balanza digital

Fuente: Autores

### 6.2.1.3 Preparación de la solución de yodo 0,0282N

Para prepara solución de yodo 0,0282N, se utilizó yoduro y potasio y I<sub>2</sub>

Peso molecular I<sub>2</sub>= 253,81g/mol

$$\text{Normalidad} = \frac{\text{n}^\circ \text{ de Equivalentes}}{\text{litros de disolución}}$$

$$\text{n}^\circ \text{ de Equivalentes} = \frac{\text{gramos del soluto}}{\text{peso equivalente del soluto}}$$

$$\text{Peq.} = \frac{\text{Peso molecular}}{\text{peso equivalente del soluto}}$$

$$\text{Peq.} = \frac{253,81 \text{ g/mol}}{2} = 126,90$$

Se necesita 126,90 g de I<sub>2</sub> para una solución 1N en 1L de solución

$$126,90 \text{ gramos} \rightarrow 1\text{N}$$

$$X \rightarrow 0,0282\text{N}$$

$$X = 3,578 \text{ g en } 1000\text{ml}$$

X= 3,578g de I<sub>2</sub> para un volumen de 1000 ml.

$$3,578 \text{ gramos} \rightarrow 1000\text{ml}$$

$$X \rightarrow 50 \text{ ml}$$

$$X = 0,1789\text{g}$$

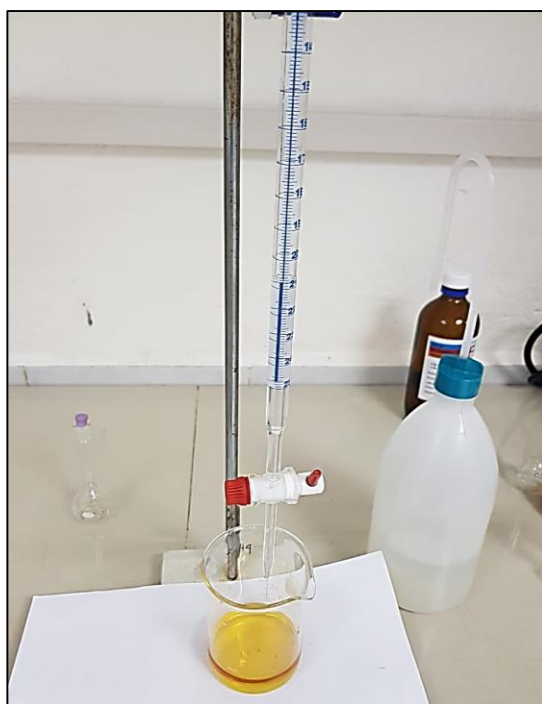
X= 0,1789g de I<sub>2</sub> para un volumen de 50 ml 0,0282N.

De Yoduro de potasio se requiere 10g para una solución de 250ml 0,1N, por lo cual se necesitó 0,564g para una solución de 50 ml 0,0282N.

### 6.2.2 Titulación de la muestra

Para la titulación de la muestra se colocó 20ul de ácido acético (CH<sub>3</sub>-COOH) para reducir el pH hasta un valor comprendido entre 3,0 y 4,0, en un matraz se añadió 1 g de KI, y se vertió una muestra patrón de 100ppm, todo esto se mezcló con una varilla de agitación para su homogenización.





*Figura 31: Reacción colorimétrica de la muestra patrón con  $\text{CH}_3\text{-COOH}$  y  $\text{KI}$*

*Fuente: Autores*

La muestra previamente preparada se tituló fuera de la luz solar directa con  $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$  0,01N en la bureta, hasta la casi desaparición del color amarillo generado por el yodo libre, posterior se añadió 1 ml de solución de almidón utilizando el sobrenadante transparente de la solución previamente preparada, tornándose de color azul y se valoró hasta la desaparición del color azul.



*Figura 32: Reacción colorimétrica de la muestra en titulación al añadir almidón*

*Fuente: Autores*

### **6.2.3 Titulación del blanco**

Se realizó la titulación del blanco para corregir el resultado de valoración de la muestra, ya sea por impurezas oxidantes o reductoras que contenga el reactivo y corregir la concentración del yodo sujeto al almidón en el punto final, se tomó 25 ml de agua destilada, se añadió 5 ml de ácido acético, 1 g de KI y 1 ml de solución de almidón, seguido se procedió a titular con solución de yodo 0,0282N hasta la aparición del color azul y se realizó una segunda titulación por retroceso con  $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$  0,01N hasta la desaparición del color.

### **6.2.4 Cálculo para la determinación de cloro libre residual**

Para determinar el cloro residual total disponible en la muestra de agua:

$$\text{mg Cl como Cl}_2/\text{L} = \frac{(A \pm B) * N * 35.450}{\text{ml de muestra}}$$

**Donde:**

A = titulación en ml para la muestra,

B = titulación en ml para el blanco (positiva o negativa), y

N = normalidad de Na<sub>2</sub>S<sub>2</sub>O<sub>3</sub>.

$$\text{mg Cl como Cl}_2/\text{L} = \frac{(6,2 - 0,6) * N * 35.450}{\text{ml de muestra}}$$

$$\text{mg Cl como Cl}_2/\text{L} = \frac{6,4 * 0,01 * 35,450}{0,025\text{L}}$$

$$\text{mg Cl como Cl}_2/\text{L} = 79,408$$

### **6.3 Elaboración de la curva de calibración de cloro libre residual**

Para realizar la curva de calibración del cloro libre residual, se empleó la técnica de la (HACH Company, 2014) cuyo procedimiento es equivalente a USEPA y al Método Estándar 4500-Cl G para agua potable, el cual se basa en la medición de cloro libre mediante el uso del reactivo dietil p-felinen diamina el cual al entrar en contacto con el cloro libre provoca una coloración rosada en la muestra, la técnica consiste en la aplicación del reactivo contenido en un sobre con recubierta de aluminio diseñada para la protección del mismo asegurando su conservación, el cual se añade a un volumen de 10ml de agua, luego se agita por 20 segundos la solución de tal forma que pueda reaccionar y homogenizarse por completo, posteriormente se procede a medir la absorbancia de la muestra en el espectrofotómetro a una longitud de onda de 530 nm. Para lo cual previamente se preparó una solución madre de 100 ppm a partir de hipoclorito de sodio comercial, y posterior se prepararon soluciones patrón de 0,5 a 4 ppm en intervalos de 0,5.

**Equipos y reactivos empleados:**

- » Espectrofotómetro Ultravioleta Visible
- » Fotómetro Riel 660
- » Fotómetro génesis
- » PHmetro digital
- » Micropipetas (0,5-10; 10-100; 100-1000)ul
- » Termómetro Digital
- » Vasos de precipitado
- » Balones de aforo 10, 25, 100 y 200 ml
- » Hipoclorito de sodio al 5%
- » Ácido Sulfúrico
- » Hipoclorito de Sodio
- » Almohadillas en polvo de reactivo de cloro libre DPD
- » Reactivo DPD-Cloro libre- Riel Fotómetro 660, método 140.

### **6.3.1 Elaboración de concentraciones patrón para la curva de calibración**

Para elaborar la curva de calibración se prepararon soluciones patrón partiendo de la solución madre con concentración conocida de cloro libre residual.

#### **6.3.1.1 Preparación de la solución madre**

Para la preparación de la solución madre a una concentración de 100 ppm, se empleó la Ecuación General de Diluciones definida con la siguiente fórmula (García et al., 2010).

$$C_i \cdot V_i = C_f \cdot V_f$$

**Donde:**

**Ci:** es la concentración de la solución inicial que tenemos

**Vi:** es el volumen que debemos utilizar para la dilución

**Cf:** es la concentración que deseamos

**Vf:** es el volumen final de dilución

- La concentración inicial del cloro es de 50000 mg/l, queriendo llegar a obtener una concentración final de 100mg/l en un volumen de 100 ml.

$$C_i \cdot V_i = C_f \cdot V_f$$

$$\frac{50000\text{mg}}{1} \cdot V_i = \frac{100\text{mg}}{1} \cdot 100\text{ml}$$

$$V_i = \frac{\frac{100\text{mg}}{1} * 100\text{ml}}{\frac{50000\text{mg}}{1}}$$

$$V_i = 0,2 \text{ L}$$

$$V_i = \mathbf{200,00 \text{ ul}}$$

### 6.3.1.2 Preparación de las muestras patrón

Se prepararon 8 muestras estándar a partir de la solución madre, con concentraciones de 0 ppm - 0,5 ppm - 1ppm - 1,5ppm - 2ppm - 2,5ppm - 3ppm – 3,5ppm y 4ppm, mediante la titulación yodométrica, realizada se determinó que la solución madre de concentración 100 ppm de cloro total, contenía una concentración de 79.408 ppm de cloro libre residual, a partir de esta concentración se procedió a preparar las soluciones patrón utilizando la misma Ecuación General de Diluciones empleada anteriormente.

#### 1. Concentración 0,5 partes por millón

$$V_i = \frac{\frac{0,5\text{mg}}{1} \cdot 0,011}{\frac{79,408\text{mg}}{1}}$$

$$V_i = 0,000063\text{L} = 0,063\text{ml} = \mathbf{63\text{ul}}$$

2. **Concentración 1 partes por millón**

$$V_i = \frac{\frac{1\text{mg}}{1} \cdot 0,01\text{l}}{\frac{79,408\text{mg}}{1}}$$

$$V_i = 0,000126\text{L} = 0,126\text{ml} = \mathbf{126\text{ul}}$$

3. **Concentración 1,5 partes por millón**

$$V_i = \frac{\frac{1,5\text{mg}}{1} \cdot 0,01\text{l}}{\frac{79,408\text{mg}}{1}}$$

$$V_i = 0,000189\text{L} = 0,189\text{ml} = \mathbf{189\text{ul}}$$

4. **Concentración 2 partes por millón**

$$V_i = \frac{\frac{2\text{mg}}{1} \cdot 0,01\text{l}}{\frac{79,408\text{mg}}{1}}$$

$$V_i = 0,000252\text{L} = 0,252\text{ml} = \mathbf{252\text{ul}}$$

5. **Concentración 2,5 partes por millón**

$$V_i = \frac{\frac{2,5\text{mg}}{1} \cdot 0,01\text{l}}{\frac{79,408\text{mg}}{1}}$$

$$V_i = 0,000315\text{L} = 0,315\text{ml} = \mathbf{315\text{ul}}$$

6. **Concentración 3 partes por millón**

$$V_i = \frac{\frac{3\text{mg}}{1} \cdot 0,01\text{l}}{\frac{79,408\text{mg}}{1}}$$

$$V_i = 0,000378\text{L} = 0,378\text{ml} = \mathbf{378\text{ul}}$$

7. **Concentración 3,5 partes por millón**

$$V_i = \frac{\frac{3,5\text{mg}}{1} \cdot 0,01\text{ml}}{\frac{79,408\text{mg}}{1}}$$

$$V_i = 0,000441\text{L} = 0,441\text{ml} = \mathbf{441\text{ul}}$$

8. **Concentración 4 partes por millón**

$$V_i = \frac{\frac{4\text{mg}}{1} \cdot 0,01\text{ml}}{\frac{79,408\text{mg}}{1}}$$

$$V_i = 0,000504\text{L} = 0,504\text{ml} = \mathbf{504\text{ul}}$$

*Tabla 6: Tabla de valores de dilución y foro empleados en la preparación de las soluciones patrón*

<b>Descripción</b>	<b>Volumen para la dilución (ul)</b>	<b>Volumen de aforo (ml)</b>	<b>Concentración (ppm)</b>
<b>Solución madre</b>	200	100	100
<b>SDT 1</b>	0	10	0
<b>STD 2</b>	63	10	0,5
<b>STD 3</b>	126	10	1
<b>STD 4</b>	189	10	1,5
<b>STD 5</b>	252	10	2


<b>STD 6</b>	315	10	2,5
<b>STD 7</b>	378	10	3
<b>STD 8</b>	441	10	3,5
<b>STD 9</b>	504	10	4

*Fuente: Autores*

### 6.3.2 Comprobación de la concentración de cloro libre en el Fotómetro

#### Riel

Se realizó una comprobación de las concentraciones de cloro libre residual preparadas, haciendo uso del Fotómetro Riel 680, y empleando el kit de reactivos perteneciente al equipo:



ROBERT RIELE  
GmbH & Co KG  
Kurfürstenstr.75-79  
13467 Berlin  
Germany  
info@riele.de

**PHOTOMETER  
660**

## 140 Cloro

0,1-3 ppm \ 400 Pruebas \ DPD

- Enciende el 660 y entrar **[L][L][E]**
- Entrar factor **[4][.][2][0]** y **[E]**
- Insertar tubo con agua incolor y **[E]**
- Llene con 3.2ml de muestra
- Añada 1 gota de **Cl<sub>2</sub>-1** y mezcle
- Insertar y **[M]** por Cloro libre
- Añada 1 gota de **Cl<sub>2</sub>-2** y mezcle.  
por Cloro combinado (Cl<sub>2</sub> total)

Los reactivos han mejorado la estabilidad sobre almacenaje de refrigerador

El estojo no contiene componentes sujetos en la declaración

Las precauciones esenciales para productos químicos que se manejan deberían ser sin embargo observadas

*Figura 33: Guía del kit para la determinación de cloro libre*

*Fuente: Autores*

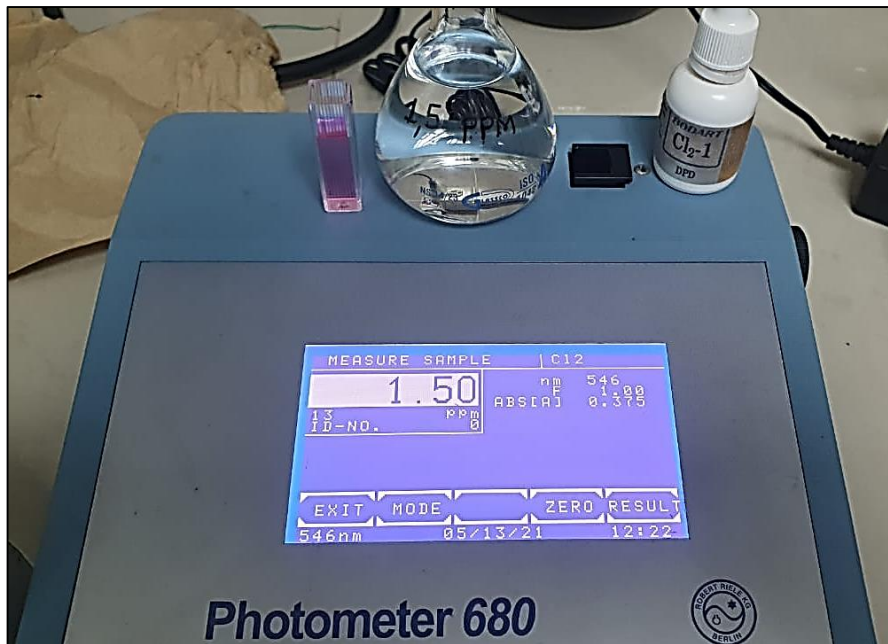




*Figura 34: Kit de reactivos para determinación de cloro libre*

*Fuente: Autores*

Para lo cual se procedió a elegir dentro del menú del fotómetro la opción de método de determinación de cloro 140 a una longitud de onda de 546 nanómetros, luego se tomó 3,2 ml de la muestra de la solución, la cual se colocó en un frasco ámbar y se procedió a añadir una gota de reactivo Cl<sub>2</sub>-1 DPD como lo indica el manual, se agitó durante 20 segundos para asegurar su homogenización y posterior a ello se midió la concentración de cloro libre residual.

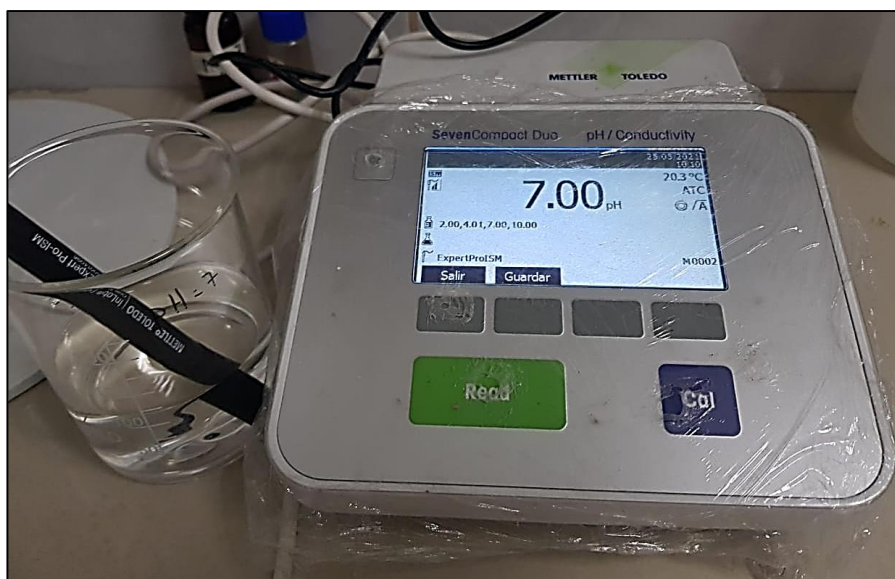


*Figura 35: Lectura del fotómetro riel de una muestra patrón de 1.5 ppm de cloro libre*

*Fuente: Autores*

### **6.3.3 Regulación del pH de las concentraciones patrón**

Como muestra la técnica seguida el pH de la solución para poder ser medida debe ser entre un valores de 6 y 7, por lo que la solución madre fue llevada al pHmetro para medir su concentración de iones de hidrógeno, encontrándose la solución a un pH de 10, a la cual se añadieron 6 gotas de ácido sulfúrico ( $H_2SO_4$ ) sustancia acidificante indicada en las especificaciones del manual HACH, el cual no genera interferencias con el cloro presente en la muestra, el pH final de la muestra fue pH7 que se encuentra dentro del rango establecido en el manual, de igual forma se midió el pH en cada una de las soluciones patrón.



*Figura 36: Lectura del pH de la solución madre, empleando un pH-metro*

*Fuente: Autores*

#### **6.3.4 Adición del reactivo DPD a las concentraciones patrón**

A cada solución patrón se le agregó el contenido de una almohadilla de polvo y se agitó durante 20 segundos para mezclar y que reaccione con el reactivo. El espectrofotómetro UV-VIS se encuentra conectado a una PC por lo cual se procedió a encender los dos equipos y se lo dejó reposar durante 30 minutos para su estabilización según las especificaciones, posteriormente fue calibrado y encerado, se ajustó a la longitud de onda de 530 nm y gráfica lineal. Se añadió el blanco (agua destilada) sin trazas de cloro libre residual en una celda la cual se procedió a limpiar antes de su medición, posterior se realizó el mismo proceso para celda con cada concentración en orden jerárquico de menor a mayor, midiendo la absorbancia de cada una



*Figura 37: Muestras patrón con reactivo DPD*

*Fuente: Autores*

### **6.3.5 Medición de la absorbancia en el espectrofotómetro UV-Vis**

Una vez añadido el reactivo a las soluciones patrón, se procedió a medir su absorbancia haciendo uso de un espectrofotómetro Ultravioleta-visible de la marca Jasco

#### **6.3.5.1 Especificaciones del Espectrofotómetro UV-Vis**

Para la medición de la absorbancia se empleó el espectrofotómetro ultravioleta-visible de la marca Jasco, modelo UV-630.



*Figura 38: Espectrofotómetro UV-630*

*Fuente: Autores*

Tabla 7: Especificaciones Espectrofotómetro UV-Vis

---

<b>Especificaciones Jasco UV-Vis 630</b>
Espectrofotómetro de Doble Haz con un monocromador
Detectores de Fotodiodos de Silicio
Rango de Medida desde 190 hasta 1100 nm
Ancho de Banda fijo de 1.5 nm
Velocidad de Barrido hasta 8.000 nm/min

---

Fuente: (Jasco, 2000)

### **6.3.6 Comprobación de los valores de absorbancia con el espectrofotómetro Génesis**

Se realizó una medición de las concentraciones patrón con el espectrofotómetro Génesis, como referencia con la finalidad de verificar la eficacia de los valores con el fin de comprobar la precisión de las lecturas de absorbancia de las concentraciones patrón, estas también fueron medidas en el fotómetro génesis para su comparación.

## **6.4 Métodos para la determinación de la concentración de cloro libre residual de muestras de concentración desconocida**

A continuación, se establecieron algunos métodos para la determinación de la concentración de cloro libre residual a partir del valor de absorbancia obtenido en el espectrofotómetro.

### **6.4.1 Ley de Lambert Beer**

Como manifiesta (Martinez Osorio & Pérez Epinoza, 2009) para hacer uso de la ecuación de la Ley de Beer para cumplir con el criterio de aceptación el coeficiente de correlación

deberá ser mayor o igual a 0.999, por lo cual si cumple con este criterio, a continuación, se muestra la ecuación a aplicar:

$$\varepsilon = \frac{A}{b \cdot C}$$

**Donde:**

**b**= Paso óptico o longitud de la celda

**C**= Coeficiente de extinción molar

**A**= Absorbancia de la muestra

El paso óptico o longitud de la celda que se empleó, en este caso es igual a 1cm, y dadas los valores de absorbancia medidos se determinó el coeficiente de extinción molar:

*Tabla 8: Valores de coeficiente de extinción molar de las soluciones patrón*

<b>Concentración</b>	<b>Absorbancia</b>	<b><math>\varepsilon</math></b>
<b>0,5</b>	0.0340604	0.068
<b>1</b>	0.150898	0.151
<b>1,5</b>	0.231571	0.154
<b>2</b>	0.346023	0.173
<b>2,5</b>	0.456486	0.183
<b>3</b>	0.556270	0.185
<b>3,5</b>	0.629749	0.180
<b>4</b>	0.719643	0.180

*Fuente: Autores*

El coeficiente de extinción molar promedio calculado es de 0.16, con el mismo que se procedió a establecer la fórmula para determinar las diferentes concentraciones:

$$\text{mg de Cl/L} = \frac{\lambda \text{ de max. absorbancia obtenida de la curva de calibración} * \text{longitud de paso óptico}}{\varepsilon}$$

$$\text{mg de Cl/L} = \frac{\lambda * 1\text{cm}}{0.153}$$

### 6.4.2 Interpolación

Aquí se determinó la concentración por interpolación para una absorbancia de 0.0569351

$$y = y_0 + \left[ \frac{x - x_0}{x_1 - x_0} \right] (y_1 - y_0)$$

$x_0=0,5$	$y_0=0.0340604$
$x =$	$y =0.0569351$
$x_1=1$	$y_1=0.150898$

$$0.0569351 = 0.0340604 + \left[ \frac{x - 0,5}{1 - 0,5} \right] (0.150898 - 0.0340604)$$

$$0.02287 = \left[ \frac{x - 0.5}{0.5} \right] (0.1168)$$

$$0,1958 = \left[ \frac{x - 0.5}{0.5} \right]$$

$$0.5 * 0.4584 = x - 0,5$$

$$x = 0.5979 \text{ mg de Cl -/L}$$

### 6.4.3 Ecuación de la recta:

La ecuación que se muestra a continuación fue proporcionada por el software del espectrofotómetro UV-Vis, para el cálculo de la concentración, como se muestra en la fig. 32.

$$Y = A * X + B$$

Donde:

$$A = 0.197093$$

$$B = -0.0528712$$

$$Y = 0.197093 * X - 0.0528712$$

$$m = \frac{\Delta x}{\Delta y} = \frac{y_2 - y_1}{x_2 - x_1}$$

$$m = \frac{\Delta x}{\Delta y} = \frac{0.719643 - 0.0340604}{4 - 0.5}$$

$$m = 0.1958807$$

Con la ecuación obtenida, se realizó el cálculo para determinar la concentración para una absorbancia de 0.0569351

$$Y = 0.197093 * X - 0.0528712$$

$$0.0569351 = 0.197093 * X - 0.0528712$$

$$0.1098063 = 0.197093 * X$$

$$X = 0.5571 \text{ mg/l}$$

Además, se calculó la ecuación para la determinación de la concentración empleando la ecuación de la recta:

### **Modelo punto y pendiente**

$$(y - y_1) = m(x - x_1)$$

$$(y - 0.0340604) = 0.1958807(x - 0.5)$$

$$y - 0.0340604 = 0.1958807x - 0.0979403$$

$$y - 0.1958807x = -0.0638799$$



$$y = Ax + b$$

$$0.0340604 = 0.1958807(0.5) + b$$

$$b = -0.06387$$

$$y = 0.1958807x - 0.0638799$$

Empleando la ecuación para una absorbancia de 0.557129, obtenemos como concentración:

$$y = 0.1958807x - 0.0638799$$

$$0.0569351 = 0.1958807x - 0.0638799$$

$$0.120815 = 0.1958807x$$

$$x = 0.6168 \text{ mg/l}$$

## **6.5 Medición de cloro libre residual con sensores ORP**

Una vez comprobada la concentración de cloro libre residual en las muestras patrón, se procedió a realizar la medición de cloro libre de las mismas.

Ya que el cloro se trata de una sustancia oxidante el sensor medirá el potencial de oxidación a través de la emisión de un voltaje único en milivoltios (mV), dando valores positivos las sustancias oxidantes, y las sustancias reductoras emiten una señal de un valor de ORP negativo.

### **6.5.1 Determinación del número de mediciones a realizar**

Debido a que se desconoce el valor verdadero de la magnitud que se va a medir, se realiza una estimación del mismo y de su cota de error (Posadas, 2009).

**Formulas:**

<b>Error Absoluto</b>	<b>Error relativo</b>
$\Delta_x = x - x_0$	$\varepsilon = \frac{ \Delta_x }{x_0}$

Como indica (Posadas, 2009), para poder conseguir cierta validez estadística en las mediciones es conveniente repetir varias veces su determinación; este número está en función de la dispersión, por lo cual se calcula la misma basada en tres mediciones realizadas a una solución estándar, haciendo uso de las siguientes formulas estadísticas:

$$\bar{x}_3 = \frac{\sum_{i=1}^3 x_i}{3}$$

### **Dispersión**

$$D = x_{\text{máximo}} - x_{\text{mínimo}}$$

### **Tanto % de dispersión**

$$T = 100 \cdot \frac{D}{\bar{x}_3}$$

### **Error Absoluto**

$$\Delta_x = 13.47$$

### **Error relativo**

$$\varepsilon = 5.89\%$$

*Tabla 9: Lecturas de voltaje y error absoluto*

<b>Temperatura</b>	<b>Voltaje</b>
<b>°C</b>	<b>mV</b>
<b>18</b>	<b>215,1 ± 13.5</b>

18	215,2 ± 13.4
18	215,1 ± 13.5

Fuente: Autores

Tabla 10: Resultados estadísticos de dispersión

<	$\bar{x}_3 =$	<b>215.13</b>
<b>Dispersión</b>	D=	0.1
<b>Porcentaje dispersión</b>	T =	0.05 %

Fuente: Autores

Tabla 11: Casuística para la determinación del número de mediciones

D	T	N	$x_0$	$\Delta_x$
D<S		3	$\bar{X}_N = \frac{\sum_{i=1}^N x_i}{N}$	S
D>S	T ≤ 2%	3		S
	2% ≤ T ≤ 8%	6		máx{D6/4, S}
	8% ≤ T ≤ 15%	15		$\Delta_x = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (x_i - \bar{X}_N)^2}{N \cdot (N - 1)}}$
	15% ≤ T	>50		

Fuente: (Posadas, 2009)

Según (Posadas, 2009), al obtener un porcentaje de dispersión de 0.05%, como se muestra en la tabla 10, el número de muestras a elegir es de 3, sin embargo un mayor número de repeticiones disminuye el error aleatorio, y al tratarse de una sustancia inestable como es el cloro libre, se tomó n= 5 número de mediciones.

## 6.5.2 Calibración del sensor ORP

Se empleó una solución calibradora con el fin de verificar las lecturas de voltaje del sensor redox que se conectó al equipo Seven Multi TTL de Metter Toledo.

Tabla 12: Valores de solución estándar ORP

222mV 25°C			
°C	mV	°C	mV
10	242	30	215
15	235	35	209
20	227	38	205
25	222	40	201

Fuente: (Sanxin, n.d.)



Figura 39: Lectura de la solución calibradora de ORP

Fuente: Autores

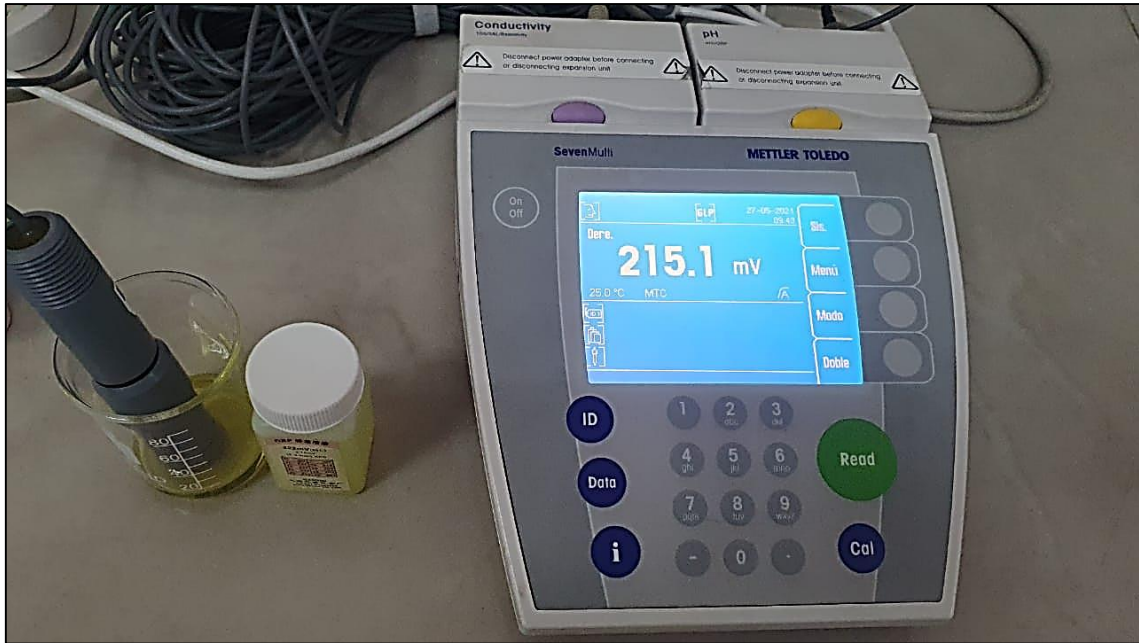


Figura 40: Lectura de la solución calibradora de ORP

Fuente: Autores

$$y = y_0 + \left[ \frac{x - x_0}{x_1 - x_0} \right] (y_1 - y_0)$$

$x_0=15$	$y_0=235$
$x =19$	$y =$
$x_1=20$	$y_1=227$

$$y = 235 + \left[ \frac{19 - 15}{20 - 15} \right] (227 - 235)$$

$$y = 235 + \left[ \frac{3}{5} \right] (-213)$$

$$y = 228,6\text{mV}$$

El rango de precisión de la solución es de  $\pm 15$  mV, por lo cual corroboramos que la lectura obtenida está dentro del rango establecido, obteniendo para una temperatura de  $18^\circ\text{C}$ , 215 mV.

### 6.5.3 Lecturas del voltaje

Los valores del voltaje de mediciones realizadas con sensores ORP, pueden variar en función del grado de temperatura en que se encuentre la solución que se quiere medir , por lo cual para este proyecto se realizaron mediciones a concentraciones conocidas en partes por millón de cloro libre residual a diferentes rangos de temperatura, comprendidas desde temperaturas bajas de 5°C hasta temperaturas más elevadas de 30°C, en intervalos de 5 °C entre los valores indicados, las muestras además fueron llevadas a diferentes valores de pH que comprendían valores de 6; 6.5 y 7.

Se inició preparando previamente las muestras estándar con concentraciones conocidas de cloro libre residual, comprendido entre rangos desde 0.5 ppm a 4ppm, con intervalos de 0.5; cada una de las muestras estándar se regulo con ácido y sustancia alcalinas para obtener los pH requeridos en la solución, se empleó como sustancia acidificante ácido sulfúrico 0.1N y como alcalinizante hidróxido de sodio 0.01N, el pH fue controlado con la ayuda de un pHmetro Metter Toledo y la temperatura de las muestras fue controlada con un termómetro digital.



*Figura 41: Termómetro digital para controlar de la temperatura de la solución*

*Fuente: Autores*

Todas las muestras realizadas fueron preparadas con agua destilada, para así asegurar q no haya inferencias con otras sustancias evitando la contaminación de las mismas, con el fin de asegurar la precisión de los resultados obtenidos, para regular la temperatura se empleó una hornilla eléctrica y bolsas de gel frío.



*Figura 42: Bolsas de gel frio para control reducir la temperatura de la solución*

*Fuente: Autores*

El sensor redox fue conectado al equipo Meter Toledo, en el mismo se determinó la función de medición de ORP y para cada lectura se presionó el botón leer (Read) y el tiempo estimado hasta la estabilización del valor en la pantalla fue de 5 a 10 minutos, una vez estable, se procedía a anotar el valor leído por el equipo.

## CAPITULO IV

### 7 Resultados:

#### 7.1 Valores de la Curva de Calibración Cloro Libre

A continuación, se muestran la tabla de concentraciones con el valor de las lecturas de absorbancia respectivas, obtenidas mediante espectrofotometría, cuyo coeficiente de correlación fue de 0,9985, siendo este valor aceptado dentro de los criterios.

*Tabla 13: Valores de absorbancia de las concentraciones patrón de cloro libre, en el espectrofotómetro UV-Vis*

<b>Estándar</b>	<b>Concentración (mg/l)</b>	<b>Absorbancia</b>
STD 0,5	0,5	0.0340604
STD 1	1	0.150898
STD 1,5	1,5	0.231571
STD 2	2	0.346023
STD 2,5	2,5	0.456486
STD 3	3	0.556270
STD 3,5	3,5	0.629749
STD 4	4	0.719643

*Fuente: Autores*



## 7.1.1 Gráfica curva de calibración

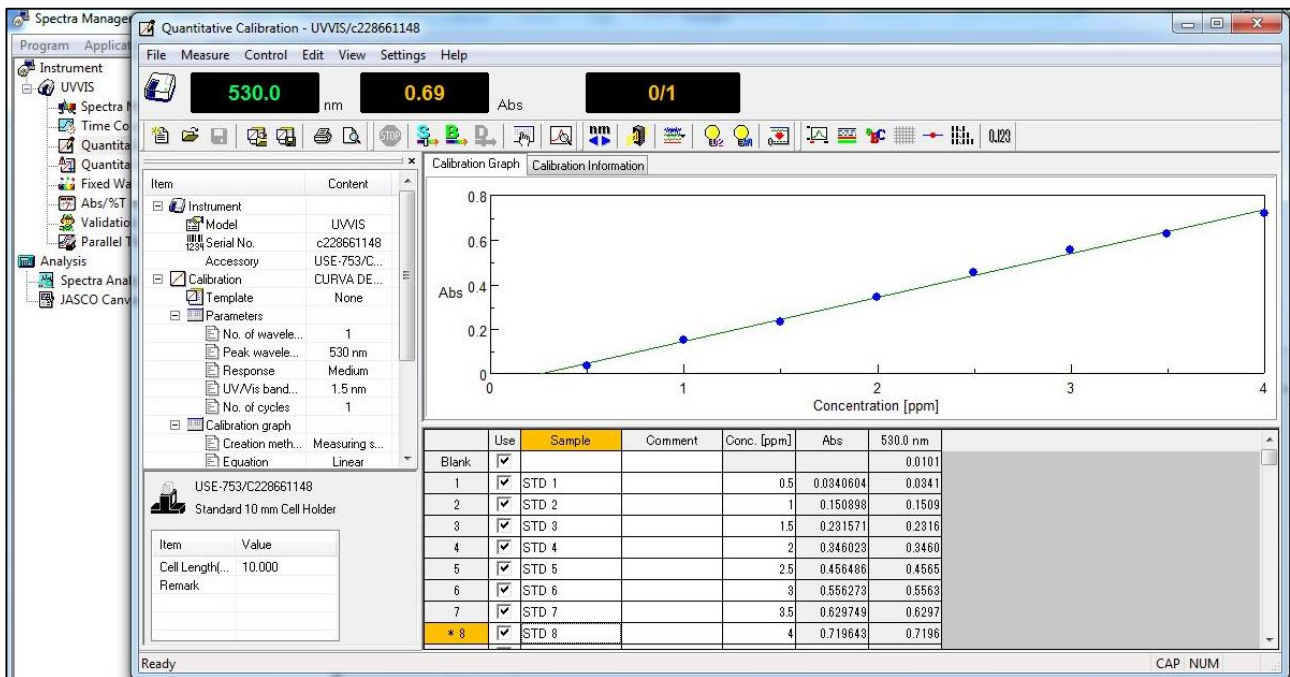


Figura 43: Curva de calibración espectrofotómetro UV-Vis

Fuente: Autores

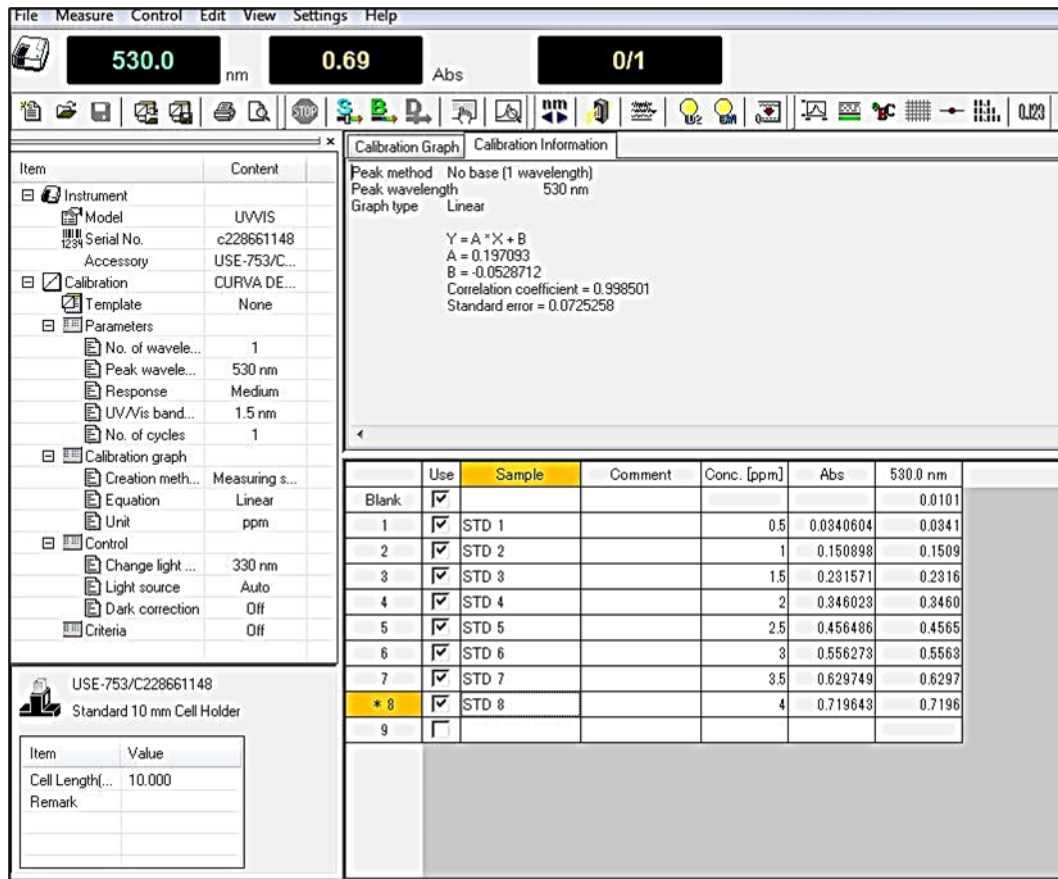


Figura 44: Coeficiente de correlación de la curva realizada en el espectrofotómetro UV-Vis

Fuente: Autores

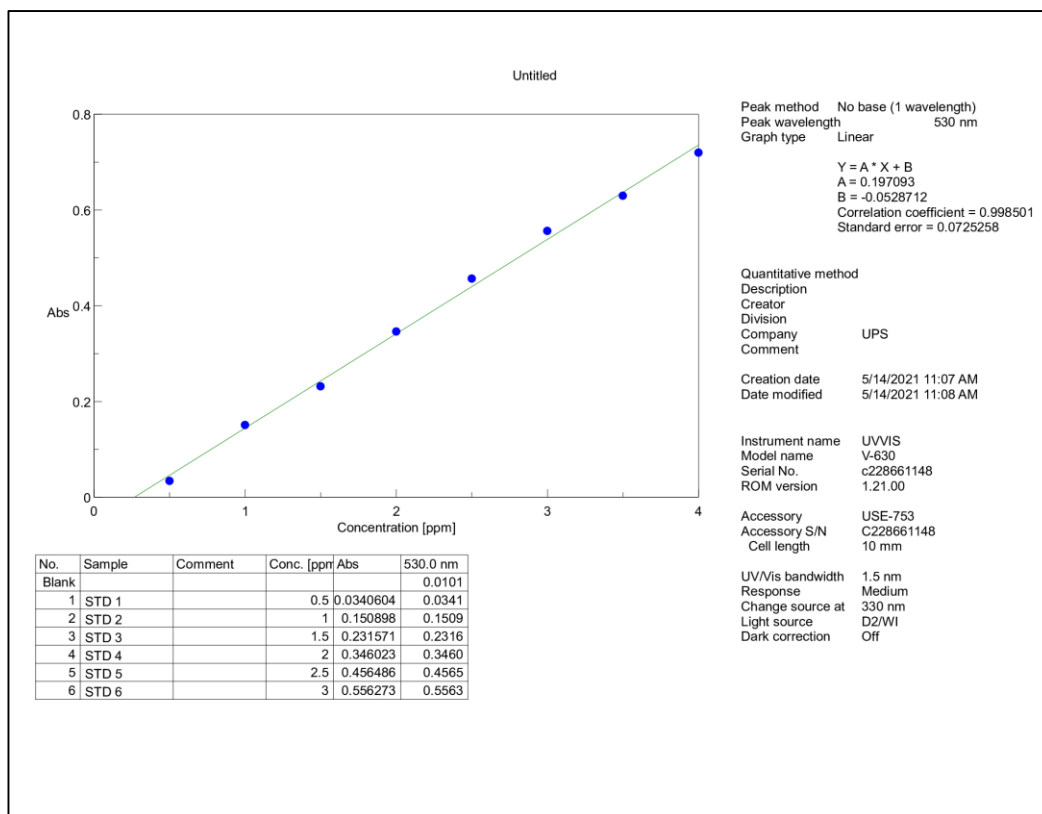


Figura 45: Reporte de la curva de calibración de cloro libre residual realizada en el espectrofotómetro Uv-Vis

Fuente: Autores

### 7.1.2 Comprobación de los valores de absorbancia en el espectrómetro UV-VIS y espectrofotómetro Genesis

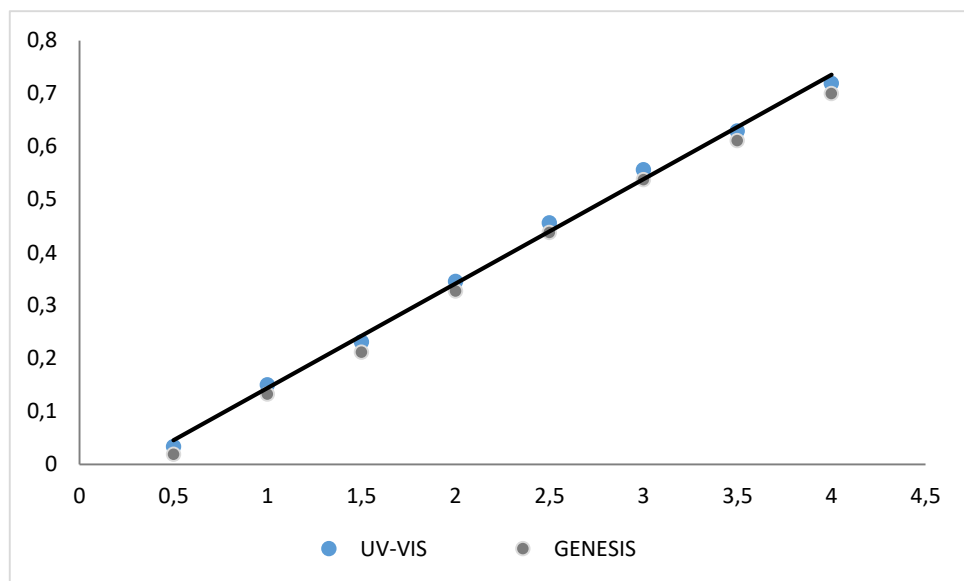
La curva obtenida en el espectrofotómetro génesis versus la curva obtenida en el espectrofotómetro UV-Vis tiene un margen de diferencia es de 0,018 mg/L

Tabla 14: Valores de absorbancia de las concentraciones patrón de cloro libre, en el espectrofotómetro Génesis

Estándar	Concentración (mg/l)	Absorbancia
<b>STD 0,5</b>	0,5	0,020
<b>STD 1</b>	1	0,133
<b>STD 1,5</b>	1,5	0,212

<b>STD 2</b>	2	0,328
<b>STD 2,5</b>	2,5	0,438
<b>STD 3</b>	3	0,538
<b>STD 3,5</b>	3,5	0,612
<b>STD 4</b>	4	0,700

*Fuente: Autores*



*Figura 46: Comparación de la curva de cloro libre residual en el espectrofotómetro Génesis y espectrofotómetro UV-Vis*

*Fuente: Autores*

## 7.2 Valores de medición de cloro libre con el sensor ORP

Tabla 15: Valores de medición a pH6 de concentraciones a diferentes temperaturas

<b>pH6</b>						
<b>Concentración (ppm)</b>	<b>Voltaje (mV)</b>					
	<b>Temperatura</b>					
	<b>5°C</b>	<b>10°C</b>	<b>15°C</b>	<b>20°C</b>	<b>25°C</b>	<b>30°C</b>
<b>0,5</b>	713	696	679	662	645	630
<b>1</b>	759,2	742,2	725,2	708,2	691,2	679,6
<b>1,5</b>	797,2	780,2	762,1	743,8	728,4	714,2
<b>2</b>	823,6	807,7	789,6	772,6	755,6	738,5
<b>2,5</b>	845	828	811	794	777	762
<b>3</b>	859	842	826,3	808	791	776
<b>3,5</b>	865,5	848,5	831,5	814,5	797,5	782,5
<b>4</b>	870,9	854,6	834,5	819	800,5	787,5

*Fuente: Autores*

Tabla 16: Valores de medición a pH6.5 de concentraciones a diferentes temperaturas

<b>pH 6.5</b>						
<b>Concentración (ppm)</b>	<b>Voltaje (mV)</b>					
	<b>Temperatura</b>					
	<b>5°C</b>	<b>10°C</b>	<b>15°C</b>	<b>20°C</b>	<b>25°C</b>	<b>30°C</b>
<b>0,5</b>	703	685,5	668,5	651,5	634,5	619,5
<b>1</b>	750,4	733,8	716,4	699,4	681,75	666,85
<b>1,5</b>	789,25	769,2	752,7	733,4	719,9	702,75
<b>2</b>	812,9	797,4	778,9	761,9	744,9	727,2
<b>2,5</b>	835	817,5	800,5	783,5	766,5	751,5
<b>3</b>	850,5	833,5	817,8	799,6	780,9	765,9
<b>3,5</b>	856	839	821,5	805	788	771,2
<b>4</b>	858,4	842,35	822	806,5	789,25	774,5

*Fuente: Autores*

Tabla 17: Valores de medición a pH 7 de concentraciones a diferentes temperaturas

<b>pH7</b>						
<b>Concentración (ppm)</b>	<b>Voltaje (mV)</b>					
	<b>Temperatura</b>					
	<b>5°C</b>	<b>10°C</b>	<b>15°C</b>	<b>20°C</b>	<b>25°C</b>	<b>30°C</b>
<b>0,5</b>	689	671	654	637	620	605
<b>1</b>	734,2	718	700,2	683,2	664,9	653,1
<b>1,5</b>	773,3	755,2	737,1	718,8	703,4	687,7
<b>2</b>	798,6	783,5	764,6	747,6	730,6	712,3
<b>2,5</b>	821	803	786	769	752	737
<b>3</b>	834	817	801,3	784,8	766	752
<b>3,5</b>	840,5	823,5	806,5	789,5	772,5	757,5
<b>4</b>	845,9	830,1	809,5	794	776	761,5

Fuente: Autores

Tabla 18: Valores de medición a pH4 y 20°C

<b>PH 4 - Temperatura 20°C</b>						
<b>Concentración (ppm)</b>	<b>Voltaje (mV)</b>					
	<b>Promedio</b>	<b>Día 1</b>	<b>Día 2</b>	<b>Día 3</b>	<b>Día 4</b>	<b>Día 5</b>
<b>0,5</b>	713,9	718,9	710	716,3	709,8	714,5
<b>1</b>	759	763,7	755,5	761	754,5	760,3
<b>1,5</b>	795,7	800,7	791,8	798	791,2	796,8
<b>2</b>	823,1	826,1	819,2	825,5	818,9	825,8
<b>2,5</b>	845,9	850,9	842	848,1	841,4	847,1
<b>3</b>	859	864	855,3	861,4	854,7	859,6
<b>3,5</b>	864,6	869,6	860,7	867	860,1	865,6
<b>4</b>	870,9	875,8	867,1	872,8	866,4	872,4

Fuente: Autores

Tabla 19: Valores de medición a pH5 y 20°C

<b>PH 5 - Temperatura 20°C</b>						
<b>Concentración (ppm)</b>	<b>Voltaje (mV)</b>					
	<b>Promedio</b>	<b>Día 1</b>	<b>Día 2</b>	<b>Día 3</b>	<b>Día 4</b>	<b>Día 5</b>
<b>0,5</b>	687,6	693,9	687,4	696,5	691,5	668,7
<b>1</b>	734,7	740,2	733,7	742,9	738,2	718,5
<b>1,5</b>	772	778,2	771,4	780,9	775,9	753,6
<b>2</b>	800	806,3	799,7	806,9	803,9	783,2
<b>2,5</b>	820,1	826,2	819,5	829	824	801,8
<b>3</b>	833,2	839,3	832,6	841,9	836,9	815,3
<b>3,5</b>	840,6	846,9	840	849,5	844,5	822,1
<b>4</b>	842,8	848,5	842,1	851,5	846,6	825,3

*Fuente: Autores*

Tabla 20: Valores de medición a pH6 y 20°C

<b>PH 6 - Temperatura 20°C</b>						
<b>Concentración (ppm)</b>	<b>Voltaje (mV)</b>					
	<b>Promedio</b>	<b>Día 1</b>	<b>Día 2</b>	<b>Día 3</b>	<b>Día 4</b>	<b>Día 5</b>
<b>0,5</b>	662	664,4	658,1	667	657,9	662,6
<b>1</b>	708,2	710,2	704,7	712,9	703,7	709,5
<b>1,5</b>	743,8	746,1	739,9	748,8	739,3	744,9
<b>2</b>	772,6	775	768,7	775,6	768,4	775,3
<b>2,5</b>	794	796,2	790,1	799	789,5	795,2
<b>3</b>	808	810,4	804,3	813	803,7	808,6
<b>3,5</b>	814,5	816,9	810,6	819,5	810	815,5
<b>4</b>	819	820,9	815,2	823,9	814,5	820,5

*Fuente: Autores*

Tabla 21: Valores de medición a pH6.5 y 20°C

<b>PH 6.5 - Temperatura 20°C</b>						
<b>Concentración (ppm)</b>	<b>Voltaje (mV)</b>					
	<b>Promedio</b>	<b>Día 1</b>	<b>Día 2</b>	<b>Día 3</b>	<b>Día 4</b>	<b>Día 5</b>
<b>0,5</b>	647,7	650,1	643,6	643,8	652,7	648,3
<b>1</b>	692,05	694,05	687,55	688,55	696,75	693,35
<b>1,5</b>	728,75	731,05	724,25	724,85	733,75	729,85
<b>2</b>	754,66	757,06	750,46	750,76	757,66	757,36
<b>2,5</b>	776,55	778,75	772,05	772,65	781,55	777,75
<b>3</b>	791,9	794,3	787,6	788,2	796,9	792,5
<b>3,5</b>	796,85	799,25	792,35	792,95	801,85	797,85
<b>4</b>	799,95	801,85	795,45	796,15	804,85	801,45

*Fuente: Autores*

Tabla 22: Valores de medición a pH6.8 y 20°C

<b>PH 6.8 - Temperatura 20°C</b>						
<b>Concentración (ppm)</b>	<b>Voltaje (mV)</b>					
	<b>Promedio</b>	<b>Día 1</b>	<b>Día 2</b>	<b>Día 3</b>	<b>Día 4</b>	<b>Día 5</b>
<b>0,5</b>	640,6	645,6	636,7	643	636,5	641,2
<b>1</b>	685,15	689,85	681,65	687,15	680,65	686,45
<b>1,5</b>	722,05	727,05	718,15	724,35	717,55	723,15
<b>2</b>	747,26	750,26	743,36	749,66	743,06	749,96
<b>2,5</b>	769,05	774,05	765,15	771,25	764,55	770,25
<b>3</b>	785	790	781,3	787,4	780,7	785,6
<b>3,5</b>	790,15	795,15	786,25	792,55	785,65	791,15
<b>4</b>	792,75	797,65	788,95	794,65	788,25	794,25

*Fuente: Autores*



Tabla 23: Valores de medición a pH7 y 20°C

<b>PH 7 - Temperatura 20°C</b>						
<b>Concentración (ppm)</b>	<b>Voltaje (mV)</b>					
	<b>Promedio</b>	<b>Día 1</b>	<b>Día 2</b>	<b>Día 3</b>	<b>Día 4</b>	<b>Día 5</b>
<b>0,5</b>	630,2	632,6	626,1	626,3	635,2	630,8
<b>1</b>	674,1	676,1	669,6	670,6	678,8	675,4
<b>1,5</b>	709,7	712	705,2	705,8	714,7	710,8
<b>2</b>	738,5	740,9	734,3	734,6	741,5	741,2
<b>2,5</b>	761,3	763,5	756,8	757,4	766,3	762,5
<b>3</b>	774,2	776,6	769,9	770,5	779,2	774,8
<b>3,5</b>	781	783,4	776,5	777,1	786	782
<b>4</b>	784,3	786,2	779,8	780,5	789,2	785,8

*Fuente: Autores*

Tabla 24: Valores de medición a pH7.2 y 20°C

<b>PH 7.2 - Temperatura 20°C</b>						
<b>Concentración (ppm)</b>	<b>Voltaje (mV)</b>					
	<b>Promedio</b>	<b>Día 1</b>	<b>Día 2</b>	<b>Día 3</b>	<b>Día 4</b>	<b>Día 5</b>
<b>0,5</b>	625,1	627,5	621,2	630,1	621	625,7
<b>1</b>	668,3	670,3	664,8	673	663,8	669,6
<b>1,5</b>	704,8	707,1	700,9	709,8	700,3	705,9
<b>2</b>	733,52	735,92	729,62	736,52	729,32	736,22
<b>2,5</b>	756,4	758,6	752,5	761,4	751,9	757,6
<b>3</b>	768,6	771	764,9	773,6	764,3	769,2
<b>3,5</b>	776,1	778,5	772,2	781,1	771,6	777,1
<b>4</b>	777,7	779,6	773,9	782,6	773,2	779,2

*Fuente: Autores*

Tabla 25: Valores de medición a pH 7.5 y 20°C

<b>PH 7.5 - Temperatura 20°C</b>						
<b>Concentración (ppm)</b>	<b>Voltaje (mV)</b>					
	<b>Promedio</b>	<b>Día 1</b>	<b>Día 2</b>	<b>Día 3</b>	<b>Día 4</b>	<b>Día 5</b>
<b>0,5</b>	616,7	612,6	612,8	621,7	619,1	617,3
<b>1</b>	659,6	655,1	656,1	664,3	661,6	660,9
<b>1,5</b>	696,2	691,7	692,3	701,2	698,5	697,3
<b>2</b>	724,5	720,3	720,6	727,5	726,9	727,2
<b>2,5</b>	747,6	743,1	743,7	752,6	749,8	748,8
<b>3</b>	760,6	756,3	756,9	765,6	763	761,2
<b>3,5</b>	767,5	763	763,6	772,5	769,9	768,5
<b>4</b>	770,9	766,4	767,1	775,8	772,8	772,4

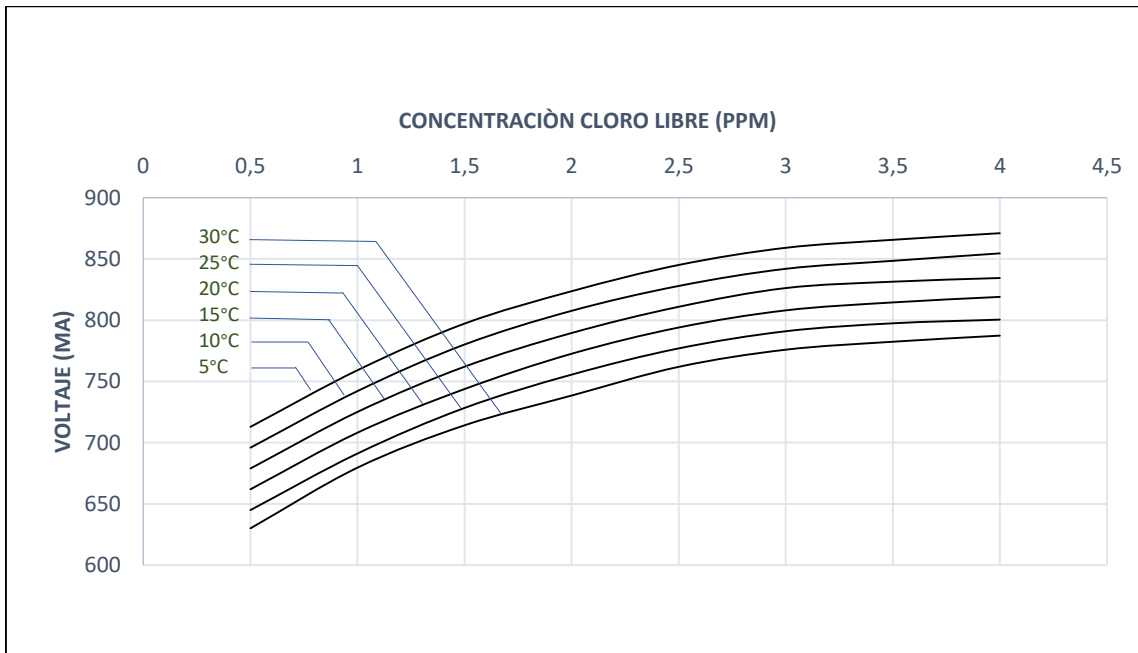
Fuente: Autores

Tabla 26: Valores de medición a pH8 y 20°C

<b>PH 8 - Temperatura 20°C</b>						
<b>Concentración (ppm)</b>	<b>Voltaje (mV)</b>					
	<b>Promedio</b>	<b>Día 1</b>	<b>Día 2</b>	<b>Día 3</b>	<b>Día 4</b>	<b>Día 5</b>
<b>0,5</b>	600,5	596,4	602,9	605,5	596,6	601,1
<b>1</b>	644	639,5	646	648,7	640,5	645,3
<b>1,5</b>	682,9	678,4	685,2	687,9	679	684
<b>2</b>	706,8	702,6	709,2	709,8	702,9	709,5
<b>2,5</b>	728,4	723,9	730,6	733,4	724,5	729,6
<b>3</b>	739,4	735,1	741,8	744,4	735,7	740
<b>3,5</b>	748,7	744,2	751,1	753,7	744,8	749,7
<b>4</b>	754,2	749,7	756,1	759,1	750,4	755,7

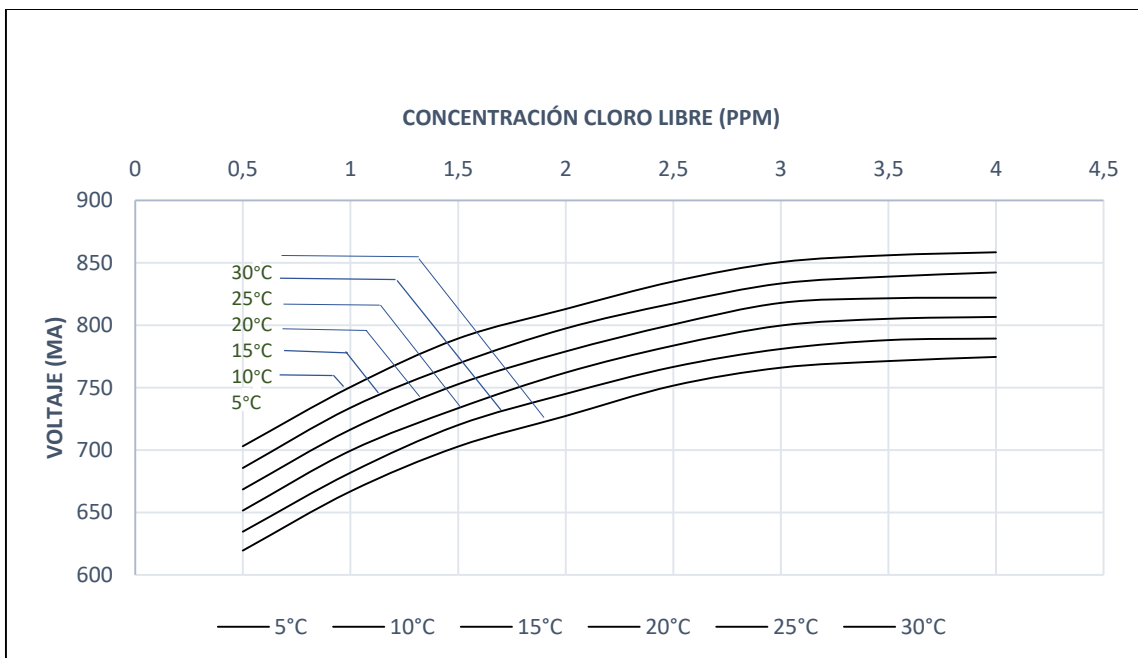
Fuente: Autores

**Gráficas:**



*Figura 47: Curva de ORP a pH 6*

*Fuente: Autores*



*Figura 48: Curva de ORP a pH 6.5*

*Fuente: Autores*

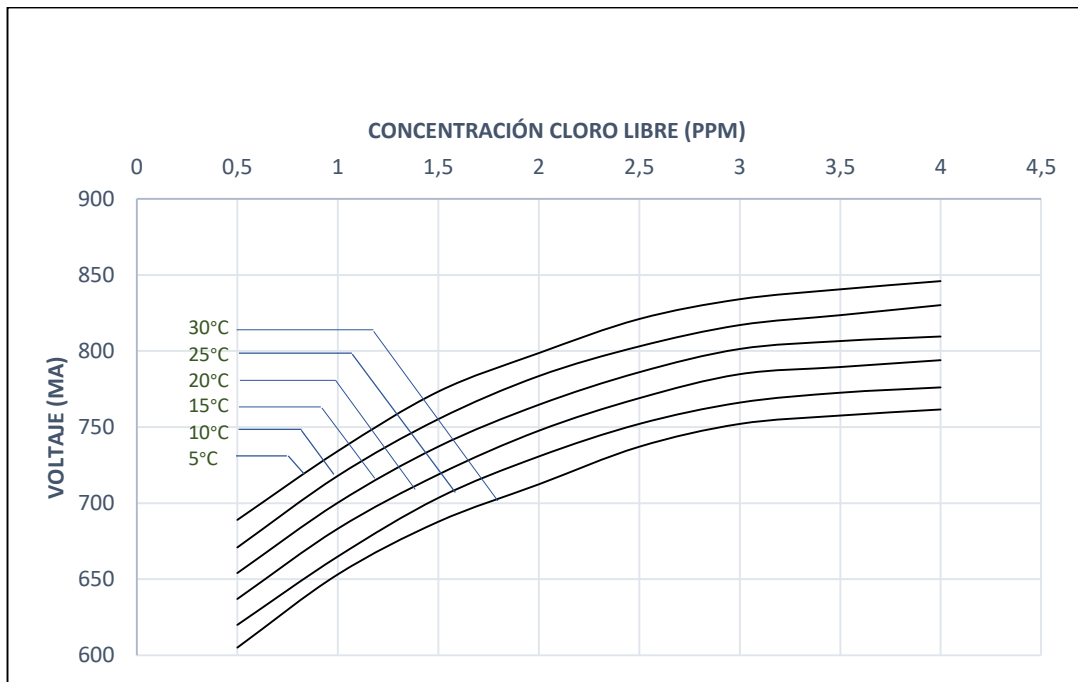


Figura 49: Curva de ORP a pH 7

Fuente: Autores

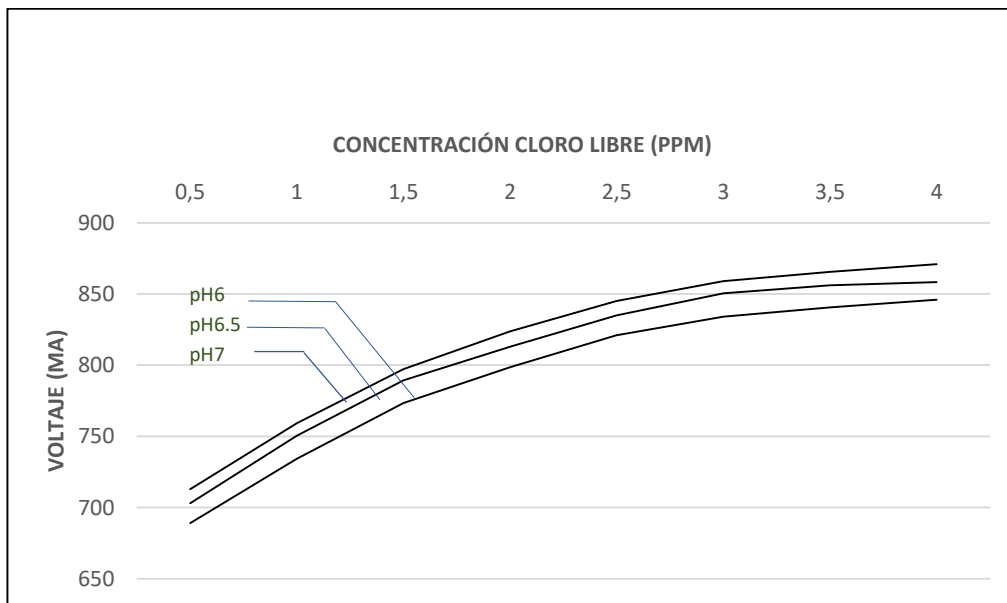


Figura 50: Curva de ORP a 5°C

Fuente: Autores

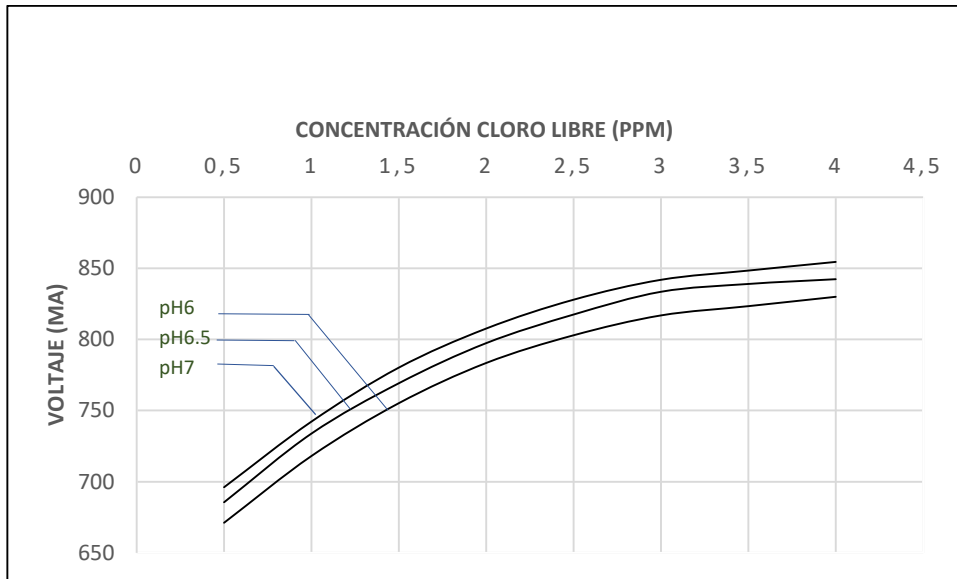


Figura 51: Curva de ORP a 10°C

Fuente: Autores

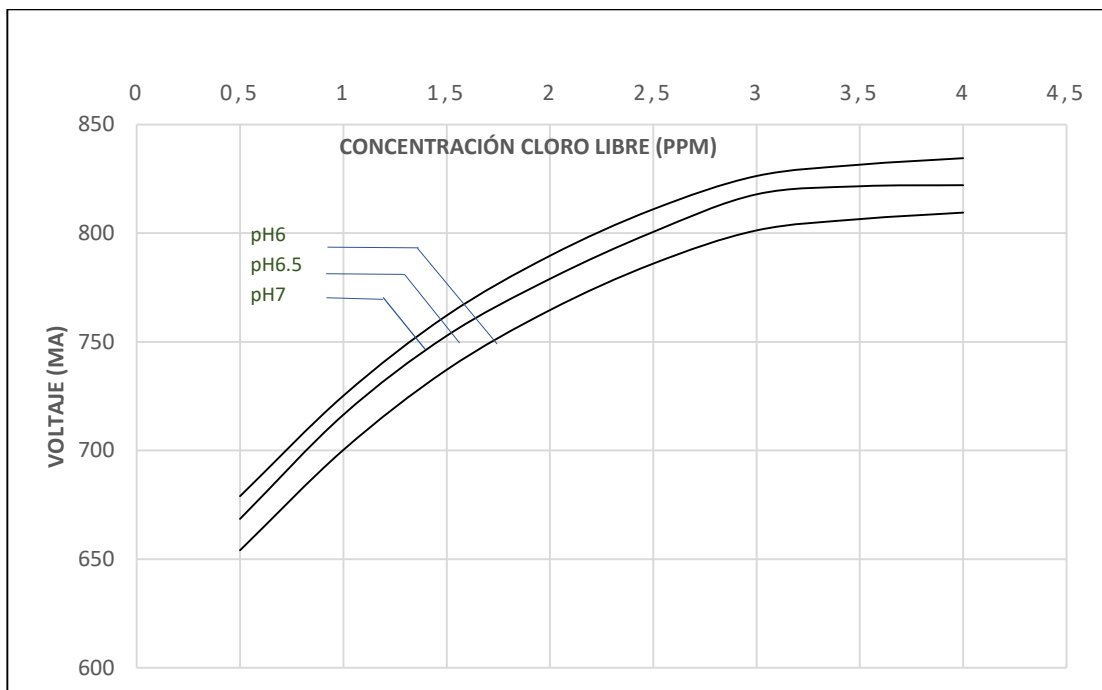


Figura 52: Curva de ORP a 15°C

Fuente: Autores

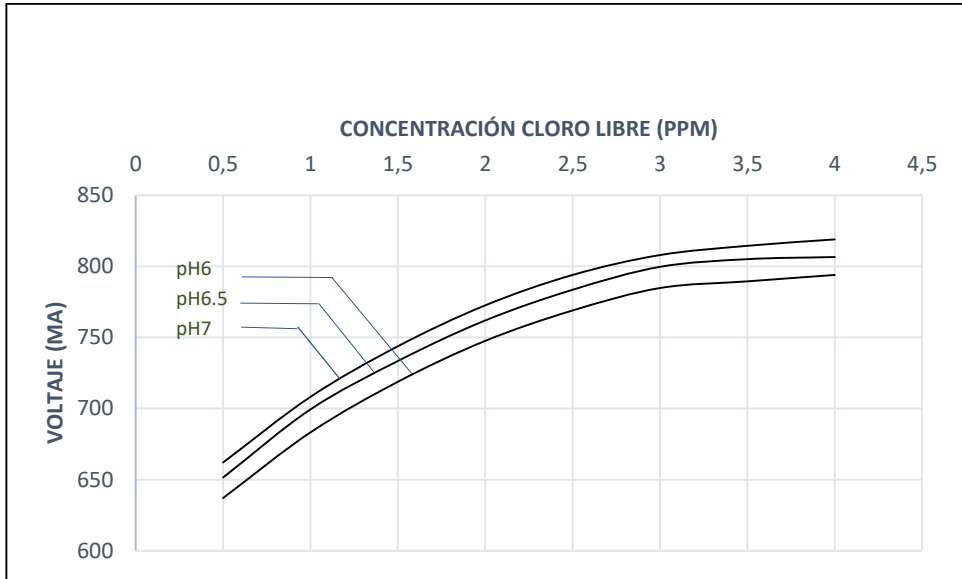


Figura 53: Curva de ORP a 20°C

Fuente: Autores

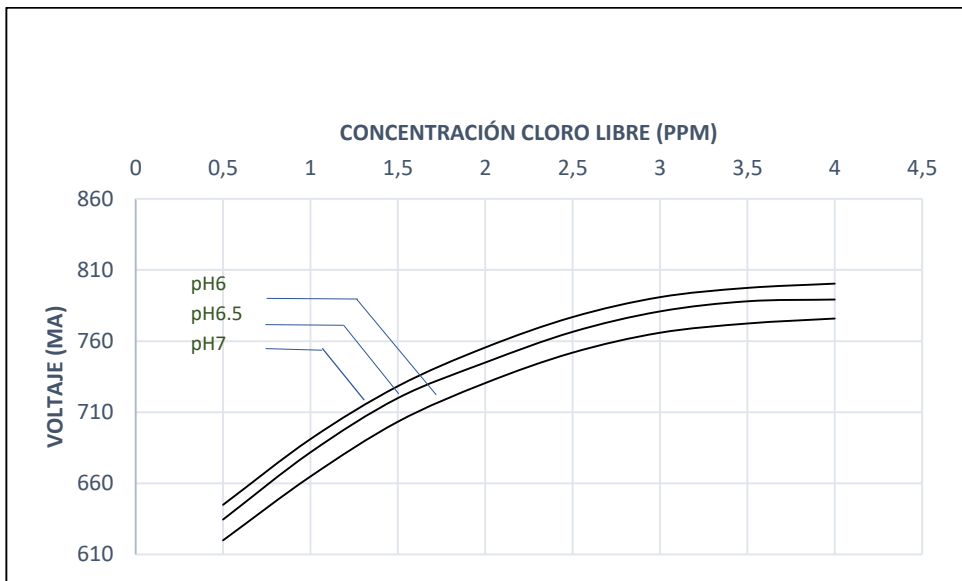


Figura 54: Curva de ORP a 25°C

Fuente: Autores

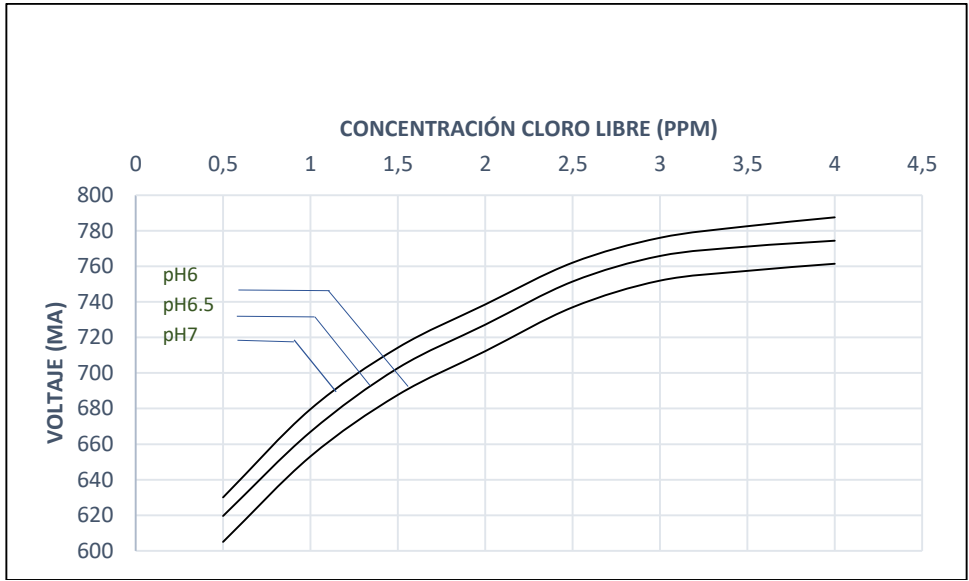


Figura 55: Curva de ORP a 30°C

Fuente: Autores

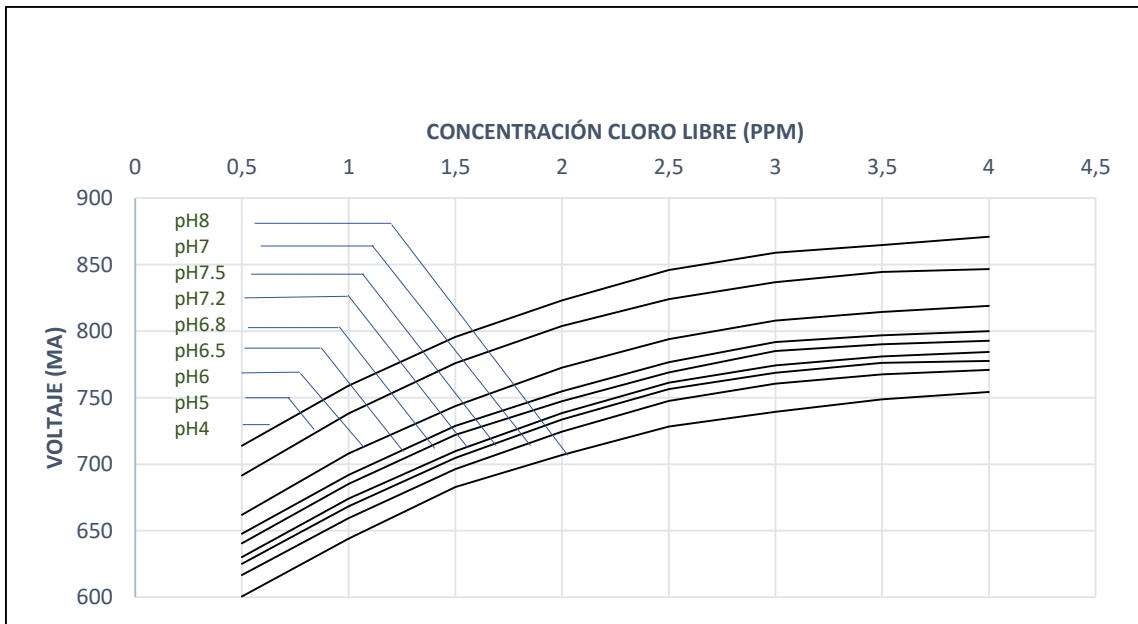


Figura 56: Curva de ORP a 20°C (Temperatura Ambiente)

Fuente: Autores

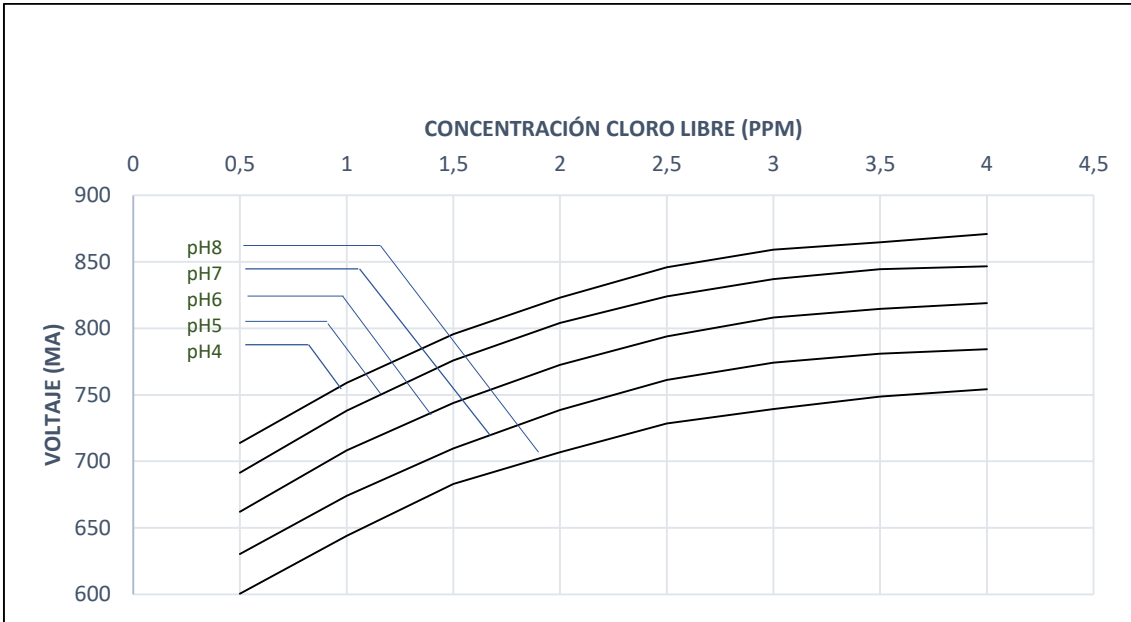


Figura 57: Curva de ORP a 20°C Temperatura Ambiente

Fuente: Autores

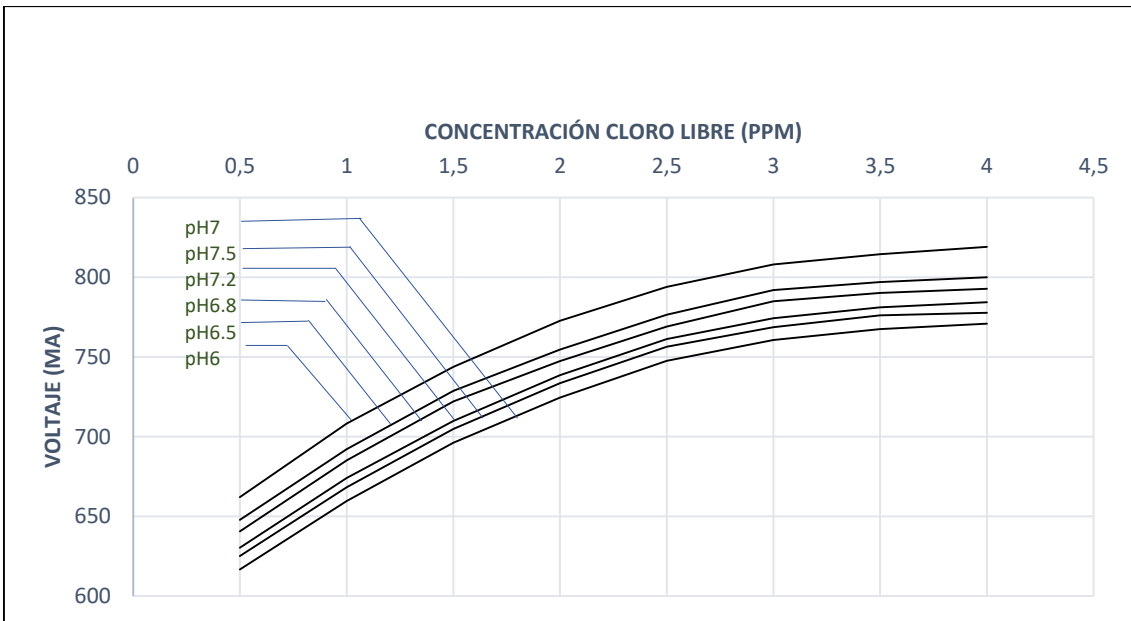


Figura 58: Curva de ORP a 20°C (Temperatura Ambiente)

Fuente: Autores



### 7.3 Análisis estadístico

#### Precisión

La precisión puede ser medida, ya sea por el grado de reproducibilidad o de repetibilidad del método analítico, bajo condiciones operativas normales (González Hinojosa, 2006).

Por lo cual emplearemos la repetibilidad para determinar la precisión de las mediciones.

#### Fórmulas:

Media aritmética	Desviación estándar	Coefficiente de variación
$\bar{y} = \frac{\sum y}{n}$	$S = \sqrt{\frac{n(\sum y^2) - (\sum y)^2}{n(n-1)}}$	$cv = \frac{S}{\bar{y}} * 100$

Tabla 27: Coeficiente de variación de las muestras a 20°C y pH 4

Técnica Electroquímica con Sensor ORP (n=5 cada nivel)		
Temperatura 20°C		pH 4
Concentración adicionada (ppm)	Promedio (Concentración medida ± Desviación estándar) ppm	Coefficiente de variación CV (%)
0,5	713.9 ± 3.97	0.56
1	759 ± 3.88	0.51
1,5	795. ± 4.09	0.51
2	823.1 ± 3.70	0.45
2,5	845.9 ± 4.08	0.48
3	859 ± 3.98	0.46
3,5	864.6 ± 4.10	0.47
4	870.9 ± 4.02	0.46

Fuente: Autores

Tabla 28: Coeficiente de variación de las muestras a 20°C y pH 5

<b>Técnica Electroquímica con Sensor ORP</b> (n=5 cada nivel)		
<b>Temperatura 20°C</b>		<b>pH 5</b>
<b>Concentración adicionada (ppm)</b>	<b>Promedio (Concentración medida ± Desviación estándar) ppm</b>	<b>Coeficiente de variación CV (%)</b>
0,5	687.6 ± 1.61	1,45
1	734.7 ± 1.31	1,31
1,5	772 ± 1.41	1,41
2	800 ± 1.23	1,23
2,5	820.1 ± 1.32	1,32
3	833.2 ± 1.27	1,27
3,5	840.6 ± 1.30	1,30
4	842.8 ± 1.23	1,23

Fuente: Autores

Tabla 29: Coeficiente de variación de las muestras a 20°C y pH 6

<b>Técnica Electroquímica con Sensor ORP</b> (n=5 cada nivel)		
<b>Temperatura 20°C</b>		<b>pH 6</b>
<b>Concentración adicionada (ppm)</b>	<b>Promedio (Concentración medida ± Desviación estándar) ppm</b>	<b>Coeficiente de variación CV (%)</b>
0,5	662 ± 3.97	0.60
1	708.2 ± 3.88	0.55
1,5	743.8 ± 4.09	0.55
2	772.6 ± 3.70	0.48
2,5	794 ± 4.08	0.51
3	808 ± 3.98	0.49
3,5	814.5 ± 4.10	0.50
4	819 ± 4.02	0.49

Fuente: Autores

Tabla 30: Coeficiente de variación de las muestras a 20°C y pH 6.5

<b>Técnica Electroquímica con Sensor ORP</b> (n=5 cada nivel)		
<b>Temperatura 20°C</b>		<b>pH 6.5</b>
<b>Concentración adicionada (ppm)</b>	<b>Promedio (Concentración medida ± Desviación estándar) ppm</b>	<b>Coefficiente de variación CV (%)</b>
0,5	647.7 ± 3.97	0.61
1	692.05 ± 3.88	0.56
1,5	728.75 ± 4.09	0.56
2	754.66 ± 3.70	0.49
2,5	776.55 ± 4.08	0.53
3	791.9 ± 3.98	0.50
3,5	796.85 ± 4.10	0.51
4	799.95 ± 4.02	0.50

Fuente: Autores

Tabla 31: Coeficiente de variación de las muestras a 20°C y pH 6.8

<b>Técnica Electroquímica con Sensor ORP</b> (n=5 cada nivel)		
<b>Temperatura 20°C</b>		<b>pH 6.8</b>
<b>Concentración adicionada (ppm)</b>	<b>Promedio (Concentración medida ± Desviación estándar) ppm</b>	<b>Coefficiente de variación CV (%)</b>
0,5	640.6 ± 3.97	0.62
1	685.15 ± 3.88	0.57
1,5	722.05 ± 4.09	0.57
2	747.26 ± 3.70	0.50
2,5	769.05 ± 4.08	0.53
3	785 ± 3.98	0.51
3,5	790.15 ± 4.10	0.52
4	792.75 ± 4.02	0.51

Fuente: Autores

Tabla 32: Coeficiente de variación de las muestras a 20°C y pH 7

<b>Técnica Electroquímica con Sensor ORP</b> (n=5 cada nivel)		
<b>Temperatura 20°C</b>		<b>pH 7</b>
<b>Concentración adicionada (ppm)</b>	<b>Promedio (Concentración medida ± Desviación estándar) ppm</b>	<b>Coefficiente de variación CV (%)</b>
0,5	630.2 ± 3.97	0.63
1	674.1 ± 3.88	0.58
1,5	709.7 ± 4.09	0.58
2	738.5 ± 3.70	0.50
2,5	761.3 ± 4.08	0.54
3	774.2 ± 3.98	0.51
3,5	781 ± 4.10	0.52
4	784.3 ± 4.02	0.51

Fuente: Autores

Tabla 33: Coeficiente de variación de las muestras a 20°C y pH 7.2

<b>Técnica Electroquímica con Sensor ORP</b> (n=5 cada nivel)		
<b>Temperatura 20°C</b>		<b>pH 7.2</b>
<b>Concentración adicionada (ppm)</b>	<b>Promedio (Concentración medida ± Desviación estándar) ppm</b>	<b>Coefficiente de variación CV (%)</b>
0,5	625.1 ± 3.97	0.64
1	668.3 ± 3.88	0.58
1,5	704.8 ± 4.09	0.58
2	733.5 ± 3.70	0.51
2,5	756.4 ± 4.08	0.54
3	768.6 ± 3.98	0.52
3,5	776.1 ± 4.10	0.53
4	777.7 ± 4.02	0.52

Fuente: Autores

Tabla 34: Coeficiente de variación de las muestras a 20°C y pH 7.5

<b>Técnica Electroquímica con Sensor ORP</b> (n=5 cada nivel)		
<b>Temperatura 20°C</b>		<b>pH 7.5</b>
<b>Concentración adicionada (ppm)</b>	<b>Promedio (Concentración medida ± Desviación estándar) ppm</b>	<b>Coefficiente de variación CV (%)</b>
0,5	616.7 ± 3.97	0.64
1	659.6 ± 3.88	0.59
1,5	9696.2 ± 4.09	0.59
2	724.5 ± 3.70	0.51
2,5	747.6 ± 4.08	0.55
3	760.6 ± 3.98	0.52
3,5	767.5 ± 4.10	0.53
4	770.9 ± 4.02	0.52

Tabla 35: Coeficiente de variación de las muestras a 20°C y pH 8

<b>Técnica Electroquímica con Sensor ORP</b> (n=5 cada nivel)		
<b>Temperatura 20°C</b>		<b>pH 8</b>
<b>Concentración adicionada (ppm)</b>	<b>Promedio (Concentración medida ± Desviación estándar) ppm</b>	<b>Coefficiente de variación CV (%)</b>
0,5	600.5 ± 3.97	0.66
1	644.0 ± 3.88	0.60
1,5	682.9 ± 4.09	0.60
2	706.8 ± 3.70	0.52
2,5	728.4 ± 4.08	0.56
3	739.4 ± 3.98	0.54
3,5	748.7 ± 4.10	0.55
4	754.2 ± 4.02	0.53

Fuente: Autores

La precisión se analizó mediante el valor del coeficiente de variación como se establece en la Validación de métodos analíticos (Vázquez, 2008), la cual al ser menor del 1.5% se tiene un sistema preciso en el intervalo de concentración de 0.5 a 4 ppm de cloro libre.

#### 7.4 Análisis de resultados

- Efectivamente se corrobora que existe una relación entre el valor del voltaje y la concentración presente de cloro libre presente en las muestras, y se determinó que se trata de una relación directamente proporcional, ya que como se evidencia, al aumentar la concentración de cloro libre en las muestras aumenta el valor del voltaje, sin embargo, esta relación no es lineal, a una concentración de 2.5 ppm aproximadamente la gráfica tiende a estabilizarse, volviéndose relativamente más lineal.
- Como se observa en la figura 47, 48 y 49, donde se muestran las curvas de ORP a diferentes concentraciones, se puede evidenciar que existe relación entre el voltaje y la temperatura, siendo esta inversa ya que al disminuir el pH de la solución el voltaje aumenta, al ser las soluciones de pH de 6; 6.5 y 7 el mayor valor de ORP lo tiene la solución con pH 7.
- De las figuras 50, 51, 52, 53, 54 y 55 de las curvas de ORP y cloro libre, a diferentes temperaturas, se constata que existe una relación inversamente proporcional entre la temperatura a la que se encuentra la solución y el valor del voltaje.
- Las mediciones de voltaje que se obtuvieron y se graficaron, nos son lineales, en cuanto a la precisión calculada mediante repetibilidad, ningún coeficiente de variación supera el valor de 1.5 % por lo cual se dice que se encuentra dentro del criterio de aceptación, por lo cual se dice que el sistema es preciso en cuanto a las mediciones de cloro libre residual.

## **8 Conclusiones y recomendaciones**

Con la elaboración del presente proyecto concluimos que se puede llevar a cabo la medición de uno de los principales parámetros establecidos en la normativa de calidad del agua, que es la concentración del cloro libre residual, basada en técnicas electroquímicas específicamente con el uso de sensores ORP, ya que se comprobó que existe una relación directamente proporcional entre el voltaje que presenta la solución y la concentración de cloro libre presente en la solución, sin embargo las mediciones están ligadas a factores como pH y temperatura, que son dos factores determinantes en el voltaje de la solución, por lo que se recomienda su consideración para futuras mediciones, de igual forma es importante controlar sustancias oxido-reductoras presentes en el agua ya que el sensor no es selectivo al cloro libre y puede ser susceptible a ser interferido por estas sustancias.

Los sensores ORP son una excelente herramienta para la medición de cloro libre a gran o pequeña escala, tanto para grandes ciudades como para pequeños poblados siendo estos últimos administrados por Juntas de agua potable, ya que no requieren el empleo de sustancias químicas las cuales son tóxicas tanto para la salud como para el medio ambiente que pueden llegar a afectar el desarrollo de la vida acuática y cuyos residuos se consideran peligrosos.

Las mediciones con ORP al contrario de las técnicas convencionales demandan de menor tiempo relativamente ya que el cloro al tratarse de una sustancia inestable requiere mayor tiempo para la estabilización de la lectura con un tiempo mínimo de 5 minutos y máximo aproximado entre 10 y 15 minutos, además entre las ventajas de técnica está que no requiere el uso de laboratorios ni la movilización de muestras de agua, obviando incluso la demanda de personal técnico, siendo una gran opción ya que su costo con relación a las técnicas colorimétricas convencionales es relativamente mucho menor.

Mediante un análisis estadístico se comprobó que el sensor ORP es una herramienta precisa, y con ella se puede llevar un monitoreo continuo y en tiempo real del cloro libre residual y consigo la calidad del agua.

Para una correcta recolección de datos se recomienda realizar una calibración del sensor y equipo, de igual forma es aconsejable guardar el sensor en una solución reguladora de pH 7 neutra cuando este no se encuentre en uso para evitar un deterioro del equipo que conlleve a lecturas erróneas.



## 9 Bibliografía

- Abril Díaz, N., Bárcena Ruiz, J. A. B., Fernández Reyes, E., Galván Cejudo, A., Jorrín Novo, J., Peinado Peinado, J., Meléndez Valdés, F. T., & Túnez Fiñana, I. (2000). Espectrofometría: Espectros de absorción y cuantificación colorimétrica de biomoléculas. SAE Technical Papers, 1–8. <https://doi.org/10.4271/841496>
- American Public Health Association, American Water Works Association, & Water Pollution Control Federation. (1992). MÉTODOS NORMALIZADOS Para el Análisis de Aguas Potables y Residuales (Díaz de Santos (ed.)).
- Armira Camey, L. M. (2008). “EVALUACIÓN COMPARATIVA DEL PODER BACTERICIDA DEL HIPOCLORITO DE SODIO Y EL AGUA OZONIZADA SOBRE BACTERIAS TIPO ENTEROCOCCUS FAECALIS, PARA LA DESINFECCIÓN DE CONDUCTOS RADICULARES (ESTUDIO IN VITRO)”. [Universidad de San Carlos de Guatemala.]. <http://www.repositorio.usac.edu.gt/12374/>
- Asociación Española de Abastecimientos de agua y saneamiento. (1984). Manual de la Cloración. Comisión Central de Saneamiento, 1–32. [https://www.asoaeas.com/sites/default/files/Documentos/AEAS\\_Manual\\_de\\_la\\_Cloracion.pdf](https://www.asoaeas.com/sites/default/files/Documentos/AEAS_Manual_de_la_Cloracion.pdf)
- BEHQ. (2016). Ficha de datos de seguridad Ficha de datos de seguridad R-0600 REACTIVO ORTOTOLIDINA.
- Bonetto, M. C. (2013). Desarrollo de biosensores / bioensayos para la determinación rápida de parámetros indicadores de calidad de agua : Técnicas electroquímicas , BOD y toxicidad. “Facultad de Ciencias Exactas y Naturales. Universidad de Buenos Aires. <http://digital.bl.fcen.uba.ar/>”
- Burgues, M. (2021). DÍA MUNDIAL DEL AGUA 2021: LA IMPORTANCIA DEL AGUA QUE NO SABEMOS. Boletín Electronico; Ok Diario. <https://okdiario.com/salud/dia-mundial-del-agua-2021-importancia-del-agua-que-no-sabemos-6988152>
- Camelino, S. O., Minchiotti, M., Bariles, R., López Padilla, R., & Colazo, J. (2018). Optimización de un procedimiento para la determinación de oro mediante espectrofotometría UV/Vis. Revista Materia, 23(2), 2–8. <https://doi.org/10.1590/s1517-707620180002.0342>
- Camenforte Iglesias, M. (2014). ALTERNATIVA A LA DESINFECCIÓN DEL AGUA

CON CLORO : OZONIZACIÓN. 1–20.

- Campoverde Barros, J. A. (2014). “Maestría En Toxicología Industrial Y Ambiental .” NMX-AA-108-SCFI-2001, 22 (2001).
- Cepeda Granda, J. G. (2015). DISMINUCIÓN DE LA CALIDAD DEL AGUA POR VARIACIONES DEL CLORO LIBRE RESIDUAL ENTRE LA RED DE DISTRIBUCIÓN Y LA RED INTERNA DE LOS USUARIOS EN URBANIZACIÓN CIUDAD VERDE DE LA CIUDAD DE MACHALA, PROVINCIA DE EL ORO. Trabajo de Titulación Ingeniería Civil, 151(1), 10–17. <http://repositorio.utmachala.edu.ec/handle/48000/2956>
- Chauca, C. A. F., & Orozco, C. L. S. (2012). “Diseño E Implementación De Un Sistema Automatizado Para La Dosificación De Cloro En El Tratamiento De Agua Potable En La Comunidad San Vicente De Lacas”. 166. <http://dspace.esPOCH.edu.ec/handle/123456789/1888>
- Córdova, M. A., Del Coco, V. F., & Basualdo, J. A. (2010). Agua y salud humana. *Química Viva*, 9(3), 105–119.
- Del Campo, F. J., Muñoz, F. J., Ordeig, O., Mas, R., Gonzalo, J., & de Haro, C. (2005). Continuous Detection of Hypochlorous Acid/Hypochlorite for Water Quality Monitoring and Control.
- Doménech, J. (2004). Ozono frente a cloro. *Offarm*, 23(5), 120–126. [http://apps.elsevier.es/watermark/ctl\\_servlet?\\_f=10&pident\\_articulo=13061803&pident\\_usuario=0&pident\\_revista=4&fichero=4v23n05a13061803pdf001.pdf&ty=139&accion=L&origen=doymafarma&web=www.doymafarma.com&lan=es](http://apps.elsevier.es/watermark/ctl_servlet?_f=10&pident_articulo=13061803&pident_usuario=0&pident_revista=4&fichero=4v23n05a13061803pdf001.pdf&ty=139&accion=L&origen=doymafarma&web=www.doymafarma.com&lan=es)
- Ecología y Ciencia S.R.L. (2017). Sensores Amperométricos o Analizadores DPD.
- Evans, R. B. (2005). Chlorine: State of the art. *Lung*, 183(3), 151–167. <https://doi.org/10.1007/s00408-004-2530-3>
- Fernández Cirelli, A., & Du Mortier, C. (2012). Evaluación de la condición del agua para consumo humano en Latinoamérica. *Tecnologías Solares Para La Desinfección y Descontaminación Del Agua*, 1–16. [https://www.psa.es/es/projects/solarsafewater/documents/libro/01\\_Capitulo\\_01.pdf](https://www.psa.es/es/projects/solarsafewater/documents/libro/01_Capitulo_01.pdf)
- Ferro Mayhua, F. P., Ferró Gonzales, P. F., & Ferró Gonzáles, A. L. (2019). Temporary distribution of acute diarrheal diseases, its relationship with temperature and residual chlorine in drinking water in the city of Puno, Peru. *Revista de Investigaciones Altoandinas*, 21(1), 69–80.
- Fukuzaki, S. (2006). Mechanisms of actions of sodium hypochlorite in cleaning and

- disinfection processes. *Biocontrol Science*, 11(4), 147–157.  
<https://doi.org/10.4265/bio.11.147>
- García, A., Jiménez, J., Colón, E., & Martínez, M. (2010). *MANUAL DE PRACTICAS DE LABORATORIO DE QIMICA GENERAL II* (3ra edició).
- Gómez-Gutiérrez, A., Miralles, M. J., Corbella, I., García, S., Navarro, S., & Llebaria, X. (2016). La calidad sanitaria del agua de consumo. *Gaceta Sanitaria*, 30, 63–68.  
<https://doi.org/10.1016/j.gaceta.2016.04.012>
- González Hinostroza, C. M. (2006). Aplicación del cálculo de incertidumbre combinada ala validación de una metodología analítica por hplc, en un producto que contiene citalopram bromhidrato. *Universidad Austral de Chile*, 66.
- Gray, N. F. (2014). Chapter Thirty-One - Free and Combined Chlorine. *Microbiology of Waterborne Diseases (Second Edition)*, 571–590.  
<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780124158467000317>  
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780124158467000317?via%3Dihub>
- Guedes Alonso, R. (2021). ¿Por qué puede empeorar la calidad del agua del grifo? *Boletin Electronico -Universidad de Las Palmas de Gran Canarias*.  
<https://theconversation.com/por-que-puede-empeorar-la-calidad-del-agua-del-grifo-154395>
- Guerrero Legarreta, M. (2012). El agua. In L. C. para Todos (Ed.), *La Granja: Revista de Ciencias de la Vida* (5ta edició, Issue 1). <https://doi.org/10.17163/lgr.n2.2003.06>
- Guimarães, J. R., Ibáñez, J., Litter, M., & Pizarro, R. (2001). Desinfección de agua. *Eliminación de Contaminantes Por Fotocatálisis Heterogénea.*, 375–388.
- HACH. (2011). Hoja De Datos De Seguridad. 2012, 1–4.
- HACH Company. (n.d.). Método USEPA DPD1. Método 8021.
- HACH Company. (2014). Chlorine , Free.
- Hernández González, A. (2007). *Bioquímica clínica y patología molecular (ELSEVIER (ed.); 2nd ed.)*.
- Hoque, E., Hsu, L. H. H., Aryasomayajula, A., Selvaganapathy, P. R., & Kruse, P. (2017). Pencil-Drawn Chemiresistive Sensor for Free Chlorine in Water. *IEEE Sensors Letters*, 1(4), 1–4. <https://doi.org/10.1109/lsens.2017.2722958>
- Jasco. (2000). V-600 Series UV-Vis/NIR Spectrophotometers.
- La Sociedad General de Aguas de Barcelona. (2011). Cloro residual. In *Aquagest*.  
<http://www.aquagest-regiondemurcia.es/img/contenidos/1/ficha-sobre-calidad-del->

agua.pdf

- Lambrou, T. P., Anastasiou, C. C., Panayiotou, C. G., & Polycarpou, M. M. (2014). A low-cost sensor network for real-time monitoring and contamination detection in drinking water distribution systems. *IEEE Sensors Journal*, 14(8), 2765–2772. <https://doi.org/10.1109/JSEN.2014.2316414>
- Lara Zambrano, I. L. (2015). RESISTENCIA ADHESIVA DE BRACKETS ORTODÓNTICOS TRAS EL USO O NO DE HIPOCLORITO DE SODIO AL 5.25% PREVIO AL CONDICIONAMIENTO ÁCIDO EMPLEANDO RESINAS DE AUTO Y FOTOPOLIMERIZACIÓN SOBRE DIENTES BOVINOS. UNIVERSIDAD CENTRAL DEL ECUADOR, FACULTAD DE ODONTOLOGÍA UNIDAD.
- Li, P., Furuta, T., & Kobayashi, T. (2021). Micro-particles as interfering substances in colorimetric residual chlorine measurement. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 207(August 2020), 111279. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2020.111279>
- López Romero, A. (2020). “INFLUENCIA DEL TIEMPO, TEMPERATURA Y MEDIO DE ALMACENAMIENTO EN LA CONCENTRACIÓN DEL HIPOCLORITO DE SODIO EN UNA SOLUCIÓN DE IRRIGACIÓN AL 2.5% ” [Universidad Autónoma de Querétaro Facultad de Medicina]. <http://ri-ng.uaq.mx/handle/123456789/2202>
- Lugones Botell, M., & Ramírez Bermúdez, M. (2011). *Revista Cubana de Medicina General Integral* Cólera. 1854, 1–4.
- Macas Acurio, A. J. (2011). Validación de métodos analíticos para la determinación de cloro libre residual, cromo hexavalente, cromo total y nitritos en muestras de agua, en el centro de investigaciones y control ambiental “CICAM” [UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO]. <https://repositorio.uta.edu.ec/handle/123456789/3136>
- Malkov, V. B., Zachman, B., & Scribner, T. (2009). Comparison of on-line chlorine analysis methods and instrumentation built on amperometric and colorimetric technologies. *Water Quality Technology Conference and Exposition 2009*, 30–51.
- Manos Unidas, O. (2011). *La importancia del agua en el cuerpo humano*. Prensa Libre. [https://www.prensalibre.com/vida/salud-y-familia/importancia-agua-cuerpo-humano\\_0\\_484151758-html/](https://www.prensalibre.com/vida/salud-y-familia/importancia-agua-cuerpo-humano_0_484151758-html/)
- Martinez Osorio, F. S., & Pérez Epinoza, I. de los A. (2009). Calibración de un espectrofotómetro UV-Visible y evaluación de la incertidumbre. <http://riul.unanleon.edu.ni:8080/jspui/retrieve/2738>

- Mata, L. (1992). *Cólera Historia Prevención y Control* (De la Univ).  
<https://books.google.es/books?hl=es&lr=&id=xrkbZXMWYkC&oi=fnd&pg=PA31&dq=7.%09Leonardo+Mata,+Cólera+Historia+Prevención+y+Control,+San+José,+Costa+Rica,+1992.&ots=OInFzUUTbD&sig=vkONGKz1OSbNoQOa015hM2RiEIk#v=onepage&q=7.%09Leonardo+Mata%2C+Cólera+Histori>
- Mehta, A., Shekhar, H., Hyun, S. H., Hong, S., & Cho, H. J. (2006). A micromachined electrochemical sensor for free chlorine monitoring in drinking water. *Water Science and Technology*, 53(4–5), 403–410. <https://doi.org/10.2166/wst.2006.146>
- Ministerio de Salud de Colombia. (2015). Condiciones para el manejo y almacenamiento del Hipoclorito de Sodio. *Hipoclorito*, 277–292. <http://documentacion.ideam.gov.co/openbiblio/bvirtual/018903/Links/Guia18.pdf>
- Molina, A., Pozo, M., & Serrano, J. (2018). Agua, saneamiento e higiene: medición de los ODS en Ecuador. [https://www.ecuadorencifras.gob.ec/documentos/web-inec/Bibliotecas/Libros/AGUA,\\_SANEAMIENTO\\_e\\_HIGIENE.pdf](https://www.ecuadorencifras.gob.ec/documentos/web-inec/Bibliotecas/Libros/AGUA,_SANEAMIENTO_e_HIGIENE.pdf)
- Morales, J. A., & Rodriguez Tapia, L. (2007). *Economía del Agua* (Universida).
- Moreno Ramírez, G. (2005). *MEDICIÓN DE PUREZA DE COBRE ” Q en A Ma .* Genoveva Moreno Ramírez Centro de Investigación y Desarrollo Tecnológico en Electroquímica Dr . Raúl Ortega Borges.
- Muñoz Cardona, J. M., & Mafla Castaño, L. A. (2007). Monitoreo del cloro residual libre, presente en una seprincipal de distribución del Acueducto Cestillal el Diamante ACUCESDI, comprendida entre la planta de tratamiento de Alegrías alto y la vereda Filobonito sector Cajones, con miras a establecer los cor (Issue 235) [Universidad tecnológica de Pereira]. [http://digilib.unila.ac.id/4949/15/BAB II.pdf](http://digilib.unila.ac.id/4949/15/BAB%20II.pdf)
- Murphy, K., Heery, B., Sullivan, T., Zhang, D., Paludetti, L., Lau, K. T., Diamond, D., Costa, E., O’Connor, N., & Regan, F. (2015). A low-cost autonomous optical sensor for water quality monitoring. *El Sevier*. <https://doi.org/10.1016/j.talanta.2014.09.045>
- Murphy, S. B. (1985). *Modeling Chlorine Concentrations in Municipal Water Systems*. NJ Health. (2011). *Derecho a Saber Hoja Informativa sobre Sustancias Peligrosas Descripción y uso*. New Jersey Department of Health, 6. <http://nj.gov/health/workplacehealthandsafety/right-to-%0Ahttp://nj.gov/health/eoh/rtkweb/documents/fs/1594sp.pdf>
- Instituto Ecuatoriano de Normalización, Instituto Ecuatoriano de Normalización 21 (2011).

- OMS. (2006). WHO guidelines for drinking- water quality. WHO Chronicle, 1.
- OMS. (2011). Guías para la calidad del agua de consumo humano. Organización Mundial de La Salud, 4, 608.  
<https://apps.who.int/iris/bitstream/handle/10665/272403/9789243549958-spa.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- OMS. (2019). 1 de cada 3 personas en el mundo no tiene acceso al agua potable, según UNICEF y la OMS. Comunicado de Prensa, 3.  
<https://www.unicef.org/es/comunicados-prensa/1-de-cada-3-personas-en-el-mundo-no-tiene-acceso-a-agua-potable%0Ahttps://www.who.int/es/news/item/18-06-2019-1-in-3-people-globally-do-not-have-access-to-safe-drinking-water---unicef-who%0Ahttps://www.who.int/>
- OMS. (2021). Agua. 1–5.
- ONU. (2010). El derecho humano al agua y al saneamiento. 28 De Julio De 2010, 1–7.  
[http://www.un.org/spanish/waterforlifedecade/pdf/human\\_right\\_to\\_water\\_and\\_sanitation\\_media\\_brief\\_spa.pdf](http://www.un.org/spanish/waterforlifedecade/pdf/human_right_to_water_and_sanitation_media_brief_spa.pdf)
- Organismo internacional regional de sanidad agropecuaria. (2020). Guía para uso de cloro en desinfección de frutas y hortalizas de consumo fresco , equipos y superficies en establecimientos Dirección Regional de Inocuidad de los Alimentos. 15.  
<https://www.oirsa.org/contenido/2020/Guia para uso de cloro como desinfectante en establecimientos 23.06.2020.pdf>
- Organización Panamericana de la Salud. (2005). La Gaceta. 2–5.  
<http://extwprlegs1.fao.org/docs/pdf/cos73577.pdf>
- Organización Panamericana de la Salud. (2013). Guía Rápida para la Vigilancia Sanitaria del Agua. Acciones para garantizar agua segura a la población.  
[https://www.ucm.es/data/cont/docs/24-2013-11-20-APA\\_Normas\\_resumen.pdf](https://www.ucm.es/data/cont/docs/24-2013-11-20-APA_Normas_resumen.pdf)
- Peña, G., & Caram, J. (2017). Determinacion de cloro activo en diferentes soluciones de Hipoclorito de Sodio. Universidad Nacional de Cuyo, 11(1), 21–26.  
<http://search.ebscohost.com/login.aspx?direct=true&profile=ehost&scope=site&authtype=crawler&jrnl=16674243&AN=126540762&h=S8%2FMQEboTUP2%2BhOuwOLG7JvZG%2Benz9T52UO8f%2FjnkNV7D2UgN0bcFFDQyf4IUyJ27YTzG9JKIUFQgYXsPCP58A%3D%3D&crl=f>
- Pérez Ávila, C. (2013). Protocolo de validación para la determinación del cloro libre en agua con N,N-dietil-p-fenilendiamina [Universidad Nacional Autónoma de México].  
<https://www.zaragoza.unam.mx/portal/wpcontent/Portal2015/Licenciatura>

s/qfb/tesis/tesis\_avila\_perez.pdf

- Pişkin, B., & Türkün, M. (1995). Stability of various sodium hypochlorite solutions. *Journal of Endodontics*, 21(5), 253–255. [https://doi.org/10.1016/S0099-2399\(06\)80991-X](https://doi.org/10.1016/S0099-2399(06)80991-X)
- Posadas, A. (2009). Determinación de errores y tratamiento de datos. *Revista Científica*, 9(125), 1–15. <https://w3.ual.es/~aposadas/TeoriaErrores.pdf>
- Pule, M., Yahya, A., & Chuma, J. (2017). Wireless sensor networks: A survey on monitoring water quality. *Journal of Applied Research and Technology*, 15(6), 562–570. <https://doi.org/10.1016/j.jart.2017.07.004>
- Quirós, F. R. (2005). Desinfección del agua con cloro y cloraminas. *Tecnica Lindustrial*, 55–63.
- Ramos Bayas, M. L. (2017). El capital social de Juntas Administradoras de Agua Potable y Riego del Ecuador JAAPRE y la Ley Orgánica de recursos hídricos, usos y aprovechamiento del agua (2009–2015). Facultad Latinoamericana de Ciencias Sociales, FLACSO Ecuador.
- Ramos Martínez, E. (2012). Evaluación del desarrollo de biofilms en los sistemas de distribución de agua potable mediante la extracción de conocimiento a través de los datos (knowledge discovery in databases-KDD).
- Rashid, M., Khan, M. N., & Jalbani, N. (2021). Detection of Human Adenovirus, Rotavirus, and Enterovirus in Tap Water and Their Association with the Overall Quality of Water in Karachi, Pakistan. *Food and Environmental Virology*, 13(1), 44–52. <https://doi.org/10.1007/s12560-020-09448-8>
- RETEMA. (2021). agua en relación con el cambio climático Política de Cookies Política de. 1–21.
- Rocha, F. R. P., & Teixeira, L. S. G. (2004). Estratégias para aumento de sensibilidade em espectrofotometria UV-VIS. *Química Nova*, 27(5), 807–812. <https://doi.org/10.1590/s0100-40422004000500021>
- Rodríguez Vidal, F. J. (2003). Procesos de potabilización del agua e influencia del tratamiento de ozonización (Diaz de Sa).
- Romero, M. (2008). Tratamientos Utilizados En La Potabilización De Agua. *Boletín Electronico Facultad de Ingeniería - Universidad Rafael Landívar*, 08, 1–12.
- Rosemount Analytical. (2008). Fundamentals of Orp Measurement. Application Data Sheet ADS 43-014/rev.B. Application Data Sheet, 43–014(May). <http://www.myronl.com/PDF/fcetr.pdf>

- Sanxin. (n.d.). No Title. <https://www.shanghaisanxin.com/>
- Schettino Sanhueza, E. A. (2019). Desarrollo de sistema de control y mantenimiento de calidad de agua dulce en grandes concentraciones mediante IoT [Universidad Andres Bello]. [http://repositorio.unab.cl/xmlui/bitstream/handle/ria/17973/a131451\\_Schettino\\_E\\_Desarrollo\\_de\\_sistemas\\_de\\_control\\_2019\\_tesis.pdf?sequence=1&isAllowed=y](http://repositorio.unab.cl/xmlui/bitstream/handle/ria/17973/a131451_Schettino_E_Desarrollo_de_sistemas_de_control_2019_tesis.pdf?sequence=1&isAllowed=y)
- Secretaria del Agua. (2016). Instructivo Para Conformación Y Legalización De Juntas Administradoras De Agua Potable Y Saneamiento ; Juntas Administradoras De Agua Potable Y Saneamiento Regional ; Y , Juntas De Segundo Y Tercer Grado , Y El “ Instructivo Para Conformación Y Legaliz. 45.
- Sensorex. (2011). Flat Surface CPVC and PVDF pH and ORP Sensors.
- Sensorex. (2017). Flat-Surface, Self-Cleaning pH and ORP Electrodes.
- Sensorex. (2021). ¿Qué es ORP?
- Seymour, I., O’Sullivan, B., Lovera, P., Rohan, J. F., & O’Riordan, A. (2020). Electrochemical detection of free-chlorine in Water samples facilitated by in-situ pH control using interdigitated microelectrodes. *Sensors and Actuators, B: Chemical*, 325(August), 128774. <https://doi.org/10.1016/j.snb.2020.128774>
- Sierra Alonso, I., Gómez Ruiz, S., Pérez Quintanilla, D., & Morante Zarcero, S. (2019). Análisis Instrumental (L. Bello (ed.); Netbiblo), <https://books.google.es/books?hl=es&lr=&id=7kqqf47xB1cC&oi=fnd&pg=PA1&dq=Análisis+Instrumental,+Netbiblo&ots=TPO6QuUJvO&sig=qTTDF2n75RuZ-svdU57sIKLoihg#v=onepage&q=Análisis+Instrumental%2C+Netbiblo&f=false>
- Slaughter, R. J., Watts, M., Vale, J. A., Grieve, J. R., & Schep, L. J. (2019). The clinical toxicology of sodium hypochlorite. *Clinical toxicology Vol 57 n°5*.
- Spahl, R. J. (2012). FC E<sup>TM</sup>: Groundbreaking Measurement of Free Chlorine Disinfecting Power in a Handheld Instrument Myron L Company ’ s Free Chlorine Equivalent ( FC E<sup>TM</sup> ): <http://www.myronl.com/PDF/fcetr.pdf>
- Storey, M. V., van der Gaag, B., & Burns, B. P. (2011). Advances in on-line drinking water quality monitoring and early warning systems. *Water Research*, 45(2), 741–747. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2010.08.049>
- Tinoco Rivera, J. (2019). NIVELES DE CLORO RESIDUAL LIBRE EN LA RED DE DISTRIBUCIÓN DE AGUA POTABLE EN UNA INSTITUCIÓN DE EDUCACIÓN SUPERIOR EN LA CIUDAD DE CALI EN EL AÑO 2019. In *Angewandte Chemie International Edition*, 6(11), 951–952.



- Tomás-Callejas, A., López-Velasco, G., Valadez, A. M., Sbodio, A., Artés-Hernández, F., Danyluk, M. D., & Suslow, T. V. (2012). Evaluation of current operating standards for chlorine dioxide in disinfection of dump tank and flume for fresh tomatoes. *Journal of Food Protection*, 75(2), 304–313. <https://doi.org/10.4315/0362-028X.JFP-11-347>
- Tuesca Molina, R., & Rangel Ávila, H. (2015). Fuentes de abastecimiento de agua para consumo humano: análisis de tendencia de variables para consolidar mapas de riesgo, el caso de los municipios ribereños del departamento del Atlántico. Universidad del Norte.
- UNICEF. (2019). 1 de cada 3 personas en el mundo no tiene acceso a agua potable. Comunicado de Prensa. <https://www.unicef.org/es/comunicados-prensa/1-de-cada-3-personas-en-el-mundo-no-tiene-acceso-a-agua-potable>
- UNICEF, E. F. de las N. U. para la I. (2010). No Enfermedades comunes relacionadas con el agua y el saneamiento. Title.
- Valarezo Sinche, J. M. (2015). UNIDAD ACADÉMICA DE CIENCIAS EMPRESARIALES COORDINACIÓN DEL CENTRO DE POSTGRADO TESINA PARA LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE ESPECIALISTA EN TRIBUTACIÓN [Universidad Tecnica de Machala]. <http://repositorio.utmachala.edu.ec/handle/48000/7140>
- Van Haute, S., Zhou, B., Luo, Y., Sampers, I., Vanhaverbeke, M., & Millner, P. (2019). The use of redox potential to estimate free chlorine in fresh produce washing operations: Possibilities and limitations. *Postharvest Biology and Technology*, 156(July), 110957. <https://doi.org/10.1016/j.postharvbio.2019.110957>
- Vázquez, A. (2008). Instituto Politecnico Nacional Unidad Profesional Interdisciplinaria De Biotecnología Ingeniero Farmacéutico Presenta. 47. <http://tesis.ipn.mx/bitstream/handle/123456789/14634/ayded%0Avazquezmoreno.pdf?sequence=1>
- Vergara, M. del B. (2015). CLORACIÓN FRENTE A OZONIZACIÓN EN EL TRATAMIENTO DE AGUA POTABLE. VENTAJAS Y DESVENTAJAS DE AMBOS PROCESOS [UNIVERSIDAD COMPLUTENSE TRABAJO]. [http://147.96.70.122/Web/TFG/TFG/Memoria/VIRGINIA SAMPABLO NUÑEZ.pdf](http://147.96.70.122/Web/TFG/TFG/Memoria/VIRGINIA_SAMPABLO_NUÑEZ.pdf)
- Watanabe, T., Akai, K., & Einaga, Y. (2016). The reduction behavior of free chlorine at boron-doped diamond electrodes. *Electrochemistry Communications*, 70, 18–22.

<https://doi.org/10.1016/j.elecom.2016.06.010>

- Zhou, M., Li, T., Zu, M., Zhang, S., Liu, Y., & Zhao, H. (2021). Membrane-based colorimetric flow-injection system for online free chlorine monitoring in drinking water. *Sensors and Actuators, B: Chemical*, 327(July 2020), 128905. <https://doi.org/10.1016/j.snb.2020.128905>
- Zhu, X., Li, D., He, D., Wang, J., Ma, D., & Li, F. (2010). A remote wireless system for water quality online monitoring in intensive fish culture. *Computers and Electronics in Agriculture*, 71(SUPPL. 1), 53–59. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2009.10.004>
- Zhuiykov, S. (2012). *Sensors and Actuators B: Chemical* Solid-state sensors monitoring parameters of water quality for the next generation of wireless sensor networks. *Sensors & Actuators: B. Chemical*, 161(1), 1–20. <https://doi.org/10.1016/j.snb.2011.10.078>
- Zuñiga Carrasco, Renato Iván Morales Samperio, H. (2019). Importancia de la cloración del agua : sitios de abastecimiento con presencia de bacterias patógenas Importance of water chlorination : pathogenic bacteria in supply sites Resumen Introducción Desinfectantes y colonización bacteriana Efectos del material. *ENF INF MICROBIOL*, 39(3), 86–92. <https://www.medigraphic.com/cgi-bin/new/resumen.cgi?IDARTICULO=92252>