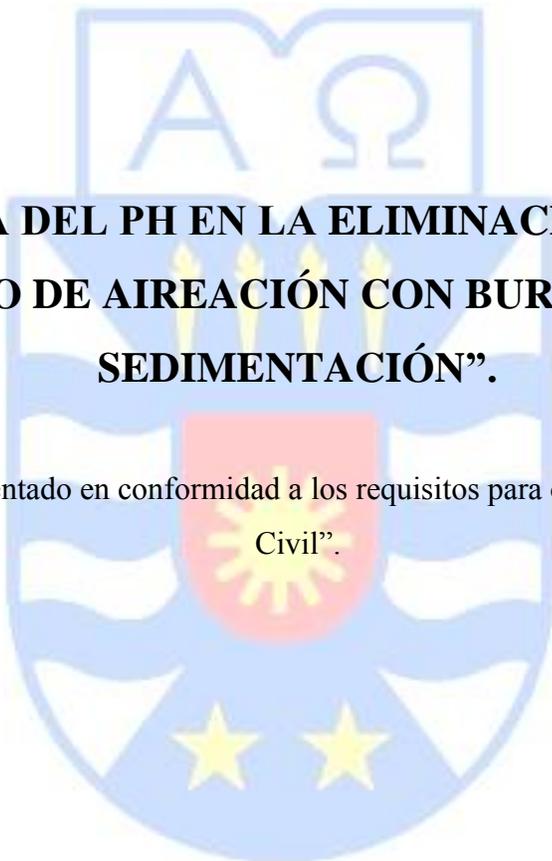


UNIVERSIDAD DEL BÍO-BÍO

FACULTAD DE INGENIERÍA

DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA CIVIL Y AMBIENTAL

Profesor Patrocinante : Pedro Cisterna Osorio



“INFLUENCIA DEL PH EN LA ELIMINACIÓN DE FIERRO POR MEDIO DE AIREACIÓN CON BURBUJA FINA Y SEDIMENTACIÓN”.

“Proyecto de Título presentado en conformidad a los requisitos para obtener el título de Ingeniero Civil”.

MARÍA FERNANDA BAHAMONDE CÁRDENAS

Concepción, Abril de 2014

AGRADECIMIENTO

En primera instancia quiero agradecer a Heriberto Moya por entregar su ayuda e interés en el desarrollo de este proyecto de título desinteresadamente y apoyarme sin esperar nada a cambio.

A Natalia Carvajal y su equipo del Laboratorio de Biodivesa por ayudar con el análisis de las muestras de fierro y apoyarme en la realización de las experiencias.

A Pedro Cisterna por confiar en mí para realizar esta investigación.

A mis padres, hermanas y Nena por no dejar de creer en mí.

A mis compañeros y a Carlo Becerra que ayudaron a que la experiencia universitaria fuera inolvidable.

INDICE	
RESUMEN	1
ABSTRACT	2
CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN	3
1.1 Descripción de la propuesta	4
1.2 Justificación de la propuesta	5
1.3Objetivos	6
1.4.1 Objetivo General	6
1.4.2 Objetivos Específicos	6
CAPÍTULO 2: ESTADO DEL ARTE	7
2.1 Fierro	7
2.1.1 Fierro en las aguas	7
2.1.2 Cinética de oxidación de fierro	8
2.2 Aireación	10
2.3 pH	11
2.3.1 Disolución Amortiguadora	11
2.3.2 Solución Amortiguadora Fosfato	12
CAPÍTULO 3: METODOLOGÍA	13
3.1 Fase Experimental	13
3.1.1 Sistema Utilizado	13
3.2 Descripción de Fases Experimentales.	14
3.3 Metodología de Ensayo	15
3.3.1 Preparación de Solución Amortiguadora	15
3.3.2 Proceso de aireación	15
3.3.3 Proceso de sedimentación.	16

	iv
CAPÍTULO 4: ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS	17
4.1 Comportamiento del pH en el proceso de aireación	17
4.2 Comportamiento de la Saturación de oxígeno	19
4.3 Remoción de fierro disuelto en Aireación	20
4.4 Remoción de fierro en Sedimentación.	21
4.5 Eficiencia del Proceso de Eliminación de Fierro	23
CAPÍTULO 5: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	26
5.1 Conclusiones	26
5.2 Recomendaciones	27
REFERENCIAS	28
ANEXOS	
ANEXO A: TEORÍA DE TRASFERENCIA DE OXÍGENO.	i
ANEXO B: EQUIPO DE TRABAJO.	iii
ANEXO C: DATOS CUANTITATIVOS FASE EXPERIMENTAL	vi
C.1 Datos experimentales etapa de aireación.	vi
C.2 Datos experimentales proceso eliminación.	vii

INFLUENCIA DEL PH EN LA ELIMINACIÓN DE FIERRO POR MEDIO DE AIREACIÓN CON BURBUJA FINA Y SEDIMENTACIÓN

MARÍA FERNANDA BAHAMONDE CÁRDENAS

Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental, Universidad del Bio-Bío

marbaham@alumnos.ubiobio.cl

PROFESOR PATROCINANTE

Sr. Pedro Cisterna Osorio

Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental, Universidad del Bio-Bío

pcisterna@ubiobio.cl

RESUMEN

Encontrar agua con fierro en las aguas subterráneas es muy usual, sobre todo en la región del Bio-Bío. Si bien el fierro no es dañino en primera instancia, no permite obtener un agua de calidad ya que afecta su estética. Además muchas veces la concentración de estas aguas sobrepasa el contenido que la norma indica. Es por esto que se necesita realizar una investigación para poder concebir una planta de eliminación de fierro a nivel domiciliario.

El objetivo de este proyecto de título es analizar la influencia del pH en el proceso de eliminación del fierro disuelto por medio del proceso aireación-sedimentación. A una muestra de agua cruda con una concentración de 1,856 mg/L de fierro, se le aireó en un tanque con burbujas finas de 3 mm durante 2 horas y se dejó sedimentar durante 3,5 horas. Esto se realizó para distintos valores de pH los que fueron logrados a través de una solución amortiguadora con Fosfato.

La remoción que se obtuvo en la etapa de aireación fue sobre el 48% del fierro inicial, siendo el pH 7,0 el que obtuvo mayor porcentaje de remoción con 86%. Estos porcentajes fueron los que influenciaron la eficiencia global del proceso de eliminación puesto que en la etapa de sedimentación el pH que obtuvo mayor remoción fue de 19%. Se concluyó que el rango de pH con el cual se obtuvo mayor eficiencia en la remoción de este metal es el mismo con los cuales se encuentran con mayor frecuencia las aguas subterráneas en Chile y además está dentro del rango permitido por la NCh. 409 Of.2005.

Palabras Claves: pH, Fierro, Aireación.

6.323 Palabras Texto +12 Figuras/Tablas*250=9.323 Palabras Totales

INFLUENCE OF PH ON THE ELIMINATION OF IRON BY BUBBLE AERATION WITH FINE AND SEDIMENTATION

MARÍA FERNANDA BAHAMONDE CÁRDENAS

Department of Civil Engineering and Environmental, University Bío-Bío

marbaham@alumnos.ubiobio.cl

PROFESSOR SPONSOR

Sr. Pedro Cisterna Osorio

Department of Civil Engineering and Environmental, University Bío-Bío

pcisterna@ubiobio.cl

ABSTRACT

It is very usual to find iron in underground water, especially in región of Bio-Bío. Even though iron is not harmful at first instance, it does not allow obtaining a good water quality, because it affects the esthetic of it. Furthermore, many times the concentration of iron in water exceeds what the standard indicates. This is why this research is needed, to develop and to design an iron removal plant at household level.

The goal of this thesis is to analyze the influence of pH at the dissolved iron elimination process by aeration-sedimentation procedure. A tank of raw water sample with an iron concentration of 1.865 mg L⁻¹ was aired with fine bubbles of 3mm for 2 hours. Later, it was allowed to let settle for 3.5 hours. This process was repeated for different pH values, trough a phosphate buffer solution.

The removal obtained in the aeration step was over 48% of the initial iron, the pH 7.04 which scored highest percentage of 86% removal. These percentages were those that influenced the overall efficiency of the removal process as in step settling the pH to greater removal obtained was 19%. It was concluded that the pH range with greater efficiency, that was obtained in the removal of this metal, is the same who are more frequently groundwater in Chile and is also within the range allowed by the NCh. 409 Of.2005.

Keywords: pH, Iron, Aeration

CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN.

El agua es un elemento necesario para todos los seres vivos, en especial para los seres humanos, ya que el desarrollo de las civilizaciones se ha realizado en torno de ésta. Su uso va desde los procesos industriales y agrícolas hasta actividades básicas a nivel domiciliario como el aseo y el consumo. Es por ello que se hace necesario su tratamiento para que pueda ser consumida por el hombre teniendo la seguridad que no será dañina para su salud. Por lo cual es que algunas aguas deben ser tratadas para que puedan ser aptas para el consumo humano, a las cuales se les denomina agua potable.

En las zonas rurales más alejadas de las ciudades es más difícil el abastecimiento de agua potable, por lo que muchas veces se consumen aguas que no están dentro de los parámetros establecidos por las normas que las rigen. Esto trae consigo efectos agudos y/o crónicos sobre la salud, dependiendo de la composición química del agua.

El mayor porcentaje de las aguas para consumo humano en sectores rurales provienen de aguas subterráneas debido a que son de mejor calidad que las aguas superficiales y de más fácil accesibilidad, puesto que corren por los suelos. Además tienden a ser dulces y la circulación subterránea hace como una especie de filtro, depurando partículas y contaminantes. A pesar de ello están sujetas de igual forma a la contaminación humana o natural, principalmente debido a la utilización de diversos compuestos químicos manejados en la agroindustria, que posteriormente son depositados en los suelos e infiltrados a las napas subterráneas.

Las características intrínsecas de los diversos cursos de agua, ya sea superficial o subterráneo, están dadas principalmente por la composición del medio que los soporta, erosión, minerales y/o sustancias disueltas. Éstos varían dependiendo de su estructura química y del contacto que éstas aguas tiene con rocas y los distintos tipos de suelo. En Chile los principales componentes químicos que teóricamente que se encontrarán en cualquier muestra de agua subterránea incluyen a los cationes Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ y K^+ , y a los aniones Cl^- , SO_4^{2-} y HCO_3^- (Huerta, 2009). Además en algunos cursos de agua, existen otras sustancias en menor porcentaje como el Fe^{2+} , NO_3^- y SiO_2 . Lo anterior está sujeto a la localización de estas aguas. Específicamente en la región del Bío-Bío la presencia de fierro, manganeso y a veces mercurio son las sustancias que generalmente exceden la norma de Chile (Donoso et al., 1999).

Los componentes que contiene el agua hacen romper el equilibrio que está posee. El pH para un agua pura a 25 ° C es de 7,0 lo que se considera neutro. Pero sustancias al disolverse cambian este parámetro aumentando o disminuyendo. Por lo general, en las aguas subterráneas se tendrá un pH entre 6,5 y 8,0 y en muy pocas ocasiones entre 5,5 y 8,5 (Huerta, 2009)

1.1. Descripción de la Propuesta

Para solucionar el problema de fierro en las aguas se propone utilizar un sistema de aireación-sedimentación discontinuo. Éste proceso de aireación permite aumenta las concentraciones de oxígeno disuelto en las aguas y con ello oxidar el ión ferroso disuelto en las aguas para obtener hidróxido de fierro (III), el cual es insoluble. Por acción de la gravedad las partículas precipitarán en el tanque de aireación durante la etapa de sedimentación, obteniendo un clarificado con menor concentración de ión ferroso disuelto.

La importancia radicada en el pH es que incide en la oxidación del ión ferroso debido a que la cinética de oxidación de fierro se relaciona de segundo orden con la concentración de ión hidróxido. Tanto así que se logra un aumento de 100 veces por cada aumento de unidad de pH (Stumm y Lee, 1961). Además este parámetro incide en la formación del precipitado de fierro, ya que desde el pH 5 comienza la formación de hidróxido de fierro (III) y cercano al pH neutro se percibe que este compuesto alcanza el máximo valor de insolubilidad.

Se logrará la variación de este parámetro en forma controlada mediante la utilización de una solución amortiguadora de fosfato y así poder obtener valores que podrán cuantificar el efecto que genera la variable sobre este tratamiento.

1.2. Justificación del Tema

Como es sabido para que una sustancia sea tóxica depende de dos factores, la dosis y el tiempo de exposición. Es por esto que el hierro que se encuentre en las aguas subterráneas no significa a priori una amenaza para la salud de las personas. Aunque en el largo plazo se puede manifestar los efectos sobre la salud. Además en el corto plazo influye en el aspecto estético y en la distribución de las aguas.

Tomando en cuenta que el uso de estas aguas será a nivel domiciliario o manipulado por pequeñas zonas rurales, no son viables las formas existentes de bajar la concentración de hierro, como el uso de permanganatos, puesto que el precipitado que se obtiene requiere un manejo especial. Es por ello que se hace necesario investigar sobre este tema con el fin de poder concebir un prototipo de planta que sea de fácil uso y accesible para la eliminación de este metal.

En esta línea, Fuentes (2013) ha identificado el tipo de aireación y mezcla con la cual se obtienen mejores resultados. Gómez (2013) tomó en cuenta la experiencia en donde sensibilizó con respecto al tipo de burbujas que se debe utilizar para así sea más eficiente la eliminación de este metal.

Las características que posean las aguas a tratar como la presencia otros elementos, la concentración de materia orgánica, la temperatura, la alcalinidad, el pH influyen en el proceso de eliminación de este metal. Pero es el pH el que determina la reacción para la oxidación del hierro además de la formación del precipitado. Es por ello que se debe estudiar cuan influyente es esta variable en particular.

1.3. OBJETIVOS

1.3.1. Objetivo General

- Analizar la influencia del pH en la eliminación del hierro por oxidación y la sedimentación secuencial de aguas subterráneas.

1.3.2. Objetivos Específicos

- Definir rangos de pH con los cuales se trabajará en la eliminación de hierro por medio del proceso aireación-sedimentación, a través de literatura revisada.
- Definir la metodología experimental con que se llevará a cabo las experiencias para evaluar la influencia del pH en la eliminación de hierro.
- Verificar la estabilidad del pH durante el proceso de aireación y analizar el efecto en la concentración final del hierro total.
- Evaluar la eficiencia global que posee el sistema en la eliminación de hierro en las aguas subterráneas.

CAPÍTULO 2: ESTADO DEL ARTE.

El fierro es el cuarto elemento químico y el segundo metal más abundante en la corteza terrestre. Por esto se lo puede encontrar recurrentemente en las aguas subterráneas.

2.1. Fierro

El fierro es un mineral que el cuerpo humano necesita. Se ha estimado que se debe consumir entre 10 a 50 mg/día dependiendo de la edad, sexo y estado fisiológico. Pero son posibles las intoxicaciones por dosis altas de fierro entre 300 a 600 mg por kilo de peso corporal, las cuales causan depresión, respiración agitada, convulsiones, fallas respiratorias, problemas cardiacos e incluso coma (Marpin, 1996; citado por Burbano y Sánchez, 2007).

Otro aspecto que se ve considerablemente afectado es el aspecto estético de estas aguas, olor, sabor, color y niveles de turbiedad. Para ello se ha estimado una concentración límite por la Norma Chilena de Agua Potable (NCh 409/1 of.2005) la cual no permite concentraciones mayores a las 0,3 mg/L en las aguas para el consumo humano, asegurando así un agua que sea bebible sin problemas de rechazo por parte de los usuarios.

En aspecto técnico, el precipitado de fierro es un problema en las redes de distribución ya que se deposita en el interior de las tuberías que transportan estas aguas, disminuyendo considerablemente su diámetro que en algunos casos ha llegado hasta el 70% de reducción (Petkova y Iliiev, 2001) lo que se traduce en mayores pérdidas de carga. Además contribuyen a la formación de biopelículas en las redes de distribución incrementando los riesgos microbiológicos (Burbano y Sánchez, 2007).

2.1.1. Fierro en las aguas

La presencia de fierro en las aguas se debe a la disolución del fierro que contienen las rocas y minerales por medio de la erosión que ejerce el agua sobre ellas. La concentración de fierro en el agua subterránea es menor a 5 mg/l (Hem, 1989; Davis, 1997; citado por Sharma, 2001.).

En las aguas subterráneas se encuentra el fierro en dos estados de oxidación, como ión ferroso bivalente reducido (Fe^{2+}) y en ión férrico trivalente reducido (Fe^{3+}). El fierro puede estar presente en las aguas subterráneas de las siguientes cinco formas: disuelto como ión ferroso, complejo inorgánico, complejo orgánico, coloide y suspendido (Sharma, 2001). La forma en la que se encuentre el fierro en las aguas depende del pH y su potencial oxidación-reducción.

Si existe oxígeno suficiente en el medio, los iones férricos predominarán en las aguas. La Figura 1 muestra el diagrama de solubilidad del hidróxido férrico, donde se puede observar que el hierro forma hidróxidos en valores bajo de pH (Esteban y Ferreira, 2006).

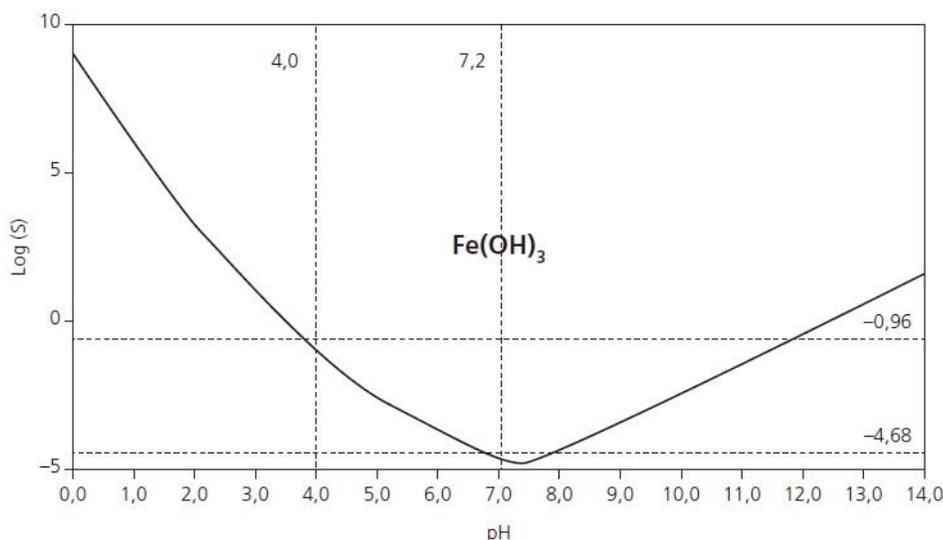


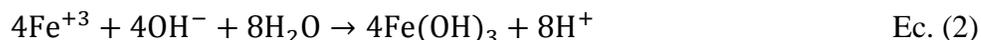
Figura 1. Diagrama de solubilidad del hidróxido férrico según pH. Fuente: Pessim, 2000; Utilizado por Esteban y Ferreira, 2006

2.1.2. Cinética de oxidación de hierro

El ión ferroso que contienen las aguas al entrar en contacto con el oxígeno disuelto se oxida cediendo un ión y convirtiéndose en Fe^{+3} . Así la ecuación química es



El ion férrico a su vez tiene mucha afinidad con los iones de hidroxilo, lo cual lo hace insoluble y de color amarillo rojizo



Lerk (1965) sugirió que la reacción de oxidación de hidrólisis para ión ferroso es:



O para pH elevado



Se ha demostrado que la tasa de oxidación de hierro ferroso en solución de bicarbonato es de primer orden, con respecto a su concentración y la concentración de oxígeno disuelto, y de segundo orden con respecto al ión OH^- (Stumm y Lee, 1961). Esto es:

$$\frac{-d[Fe^{2+}]}{dt} = k_o pO_2 [Fe^{2+}] [OH^-]^2 \quad \text{Ec. (5)}$$

Donde: $d[Fe^{2+}]/dt$ = la tasa de oxidación de ión Fe^{2+} ($mol\ l^{-1}\ min^{-1}$)

K_o = Constante de reacción ($l^2\ mol^{-2}\ atm^{-1}\ min^{-1}$)

pO_2 = Presión parcial de oxígeno (atm)

$[Fe^{2+}]$ = Concentración de fierro ferroso (mol/l)

$[OH^-]$ = Concentración de ion hidroxilo (mol/l)

De la ecuación 5, la tasa de oxidación depende fuertemente del pH, aumentando 100 veces por cada aumento de unidad del pH. Por lo tanto, la velocidad de oxidación de Fe^{+2} es lenta a pH bajos. Los estudios de Stumm y Lee (1961) también demostraron que se debe esperar que la oxidación del fierro ferroso se produzca rápidamente en aguas bien oxigenadas con valores de pH superiores a 7,2. Además Singley (1986) agregó que la reacción de oxidación se produce más rápidamente en los pH 7 a 7,5 (figura 2).

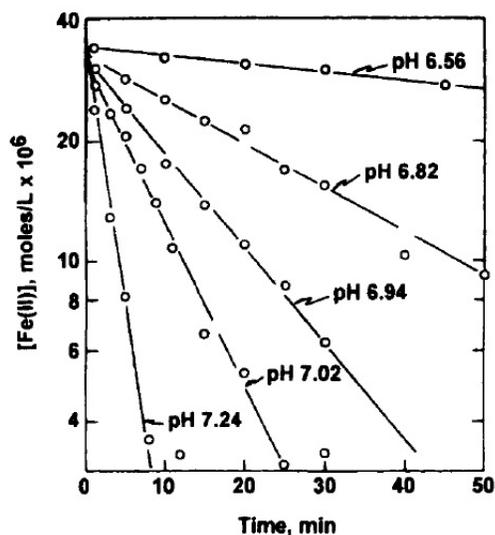


Figura 2. Tasa de oxigenación de fierro ferroso es proporcional a Fe^{2+} y está fuertemente influenciado por el pH. Fuente: Stumm and Lee, 1961.

Esto se debe a que a pH neutro, la mayoría de Fe^{3+} forma precipitado con el hidroxilo con una superficie positiva. Por consecuencia OH^- es atraído a la superficie; entonces, el pH de la capa del precipitado de Fe^{3+} es mayor al de la solución base. Entonces el Fe^{2+} absorbido en la superficie del precipitado de Fe^{3+} es oxidado en tasa mucho más altas ya que se sabe que la velocidad de

oxidación es proporcional al cuadrado de la concentración de OH^- (Tufekci y Sarikaya, 1996; citados por Sharma, 2001).

Se suma el hecho de que el pH influye además en la etapa de la formación del precipitado. Por ejemplo, Domenech (2006) indica que la formación del Fe^{3+} se realiza a partir de un pH mayor al 5, ya que para pH menores que éste la reacción que se produce es autocatalítica.

2.2. Aireación

Debido a que las aguas subterráneas contienen muy poco o nada de oxígeno disuelto la aireación facilita el arrastre o barrido de sustancias volátiles gracias a la mezcla turbulenta del agua con aire y por lo tanto la oxidación de los metales y gases. La aireación provee el oxígeno disuelto necesario para convertir el fierro que se está en la forma ferrosa, como se encuentra en las aguas subterráneas, a su forma insoluble hidróxido férrico (Petrusevski, 2003; citado por Burbano y Sanchez, 2007). Existen muchas formas de proveer la aireación. Los métodos más utilizados son el método por aireación difusa y aireación mecánica.

La aireación difusa utiliza aireadores de burbujeo, que están hechos por un material poroso, metal perforado o membrana con agujeros pequeños para dispersar el aire. Las burbujas liberadas transfieren el oxígeno y agitan el medio. Estos aireadores se clasifican a su vez por tamaño del orificio en aireadores de burbuja fina (2 a 3 mm) o gruesa (hasta los 25 mm). Al aumentar el diámetro de la burbuja se reduce el área específica y el tiempo de residencia de la burbuja, aunque se aumenta la turbulencia.

La aireación mecánica provoca el arrastre de oxígeno atmosférico al medio líquido mediante la agitación por medios mecánicos de la superficie líquida. La transferencia de oxígeno ocurre mediante la transferencia en la superficie turbulenta del líquido o mediante la transferencia de gotas especiadas por las palas de la unidad. Usualmente este sistema es utilizado cuando se posee mayor área.

Fuentes (2013) obtuvo que con la aireación difusa se redujo un 70% la concentración inicial de fierro en las muestras. Por ende en este trabajo se utilizará este tipo de aireación. Además Gómez (2013) obtuvo un máximo de 9,46 mg/L de oxígeno disuelto en las aguas utilizando burbujas finas, muy superior a la utilización de burbuja gruesas de 6mm.

2.3. pH.

El pH es la medida con la cual se cuantifica la concentración de iones de hidrógeno (H^+) en una sustancia determinada. Está definida como el logaritmo negativo de la concentración del ión hidrógeno (en mol/L). Con ello se formó la escala de pH que va del 0 al 14 en disolución acuosa. Las sustancias ácidas son aquellas con pH menos que 7 y las básicas las superiores a 7; las disoluciones iguales a 7 indican neutralidad (Chang, 1999).

$$pH = -\log[H^+] \quad \text{Ec. (6)}$$

En este ámbito la norma NCh 409 Of. 2005 también se refiere presentando un rango de valores que va desde el pH 6,5 hasta el 8,5 para ser bebidas por los usuarios. Aunque las aguas subterráneas generalmente tienen un pH que varía entre los 6,5 y 8, lo cual se encuentra en la norma, en muy pocas ocasiones alcanzan los extremos de 5,5 a 8,5 (Huerta, 2009).

2.3.1. Disolución Amortiguadora.

También llamadas disolución reguladora, son mezclas de un ácido débil y su base conjugada. Ello cual hace que posean la propiedad de mantener el pH de una disolución estable.

El pH que posee esta mezcla está dado por la ecuación Henderson- Hasselbalch (Chang, 1999). Considera que la concentración del ión de ácido libre es aproximadamente igual a la del ácido total y la concentración del ión de la base conjugada coincide con la concentración de la sal. Con ello la ecuación expresa el pH como la suma del pK del ácido y el logaritmo de la razón entre la concentración de sal y la concentración de ácido, es decir:

$$pH = pKa + \log \left(\frac{[S]}{[A]} \right) \quad \text{Ec. (7)}$$

Donde: pH = pH del Tampón Químico.

pKa= Constante de disociación del ácido utilizado.

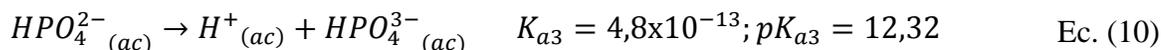
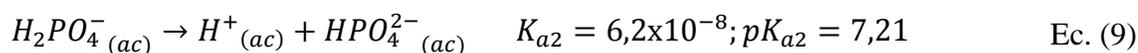
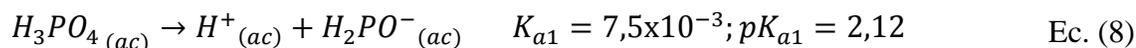
[S] = Concentración de la sal o especie básica

[A] = Concentración del ácido o la especie ácida.

Se debe tener en cuenta que cada sistema amortiguador tiene su propio rango efectivo de pH, el cual depende de la constante de equilibrio del ácido o base empleado, generalmente este es $pK_{a-1} < pH < pK_{a+1}$. Por ende el sistema de amortiguamiento más adecuado es aquel cuyo valor de pK_a está lo más cercano posible al pH que se desea regular.

2.3.2. Solución reguladora Fosfato

Los ácidos fosfáticos son definidos como polióticos, que tiene la capacidad de ceder más de un ión hidrógeno por molécula. Por lo tanto se debe utilizar más de dos constantes de disociación.



Las ecuaciones anteriores muestran las tres etapas de ionización del ácido fosfórico con los valores de K_a y pK_a (Chang, 1999).

Para efectos de este proyecto, se desea obtener 5 valores de pH en el rango que se encuentran las aguas subterráneas en Chile (de 5,5 a 8,5). El rango que mejor se adecua a este requerimiento es la segunda ionización del Fosfato.

Para la investigación se utilizó ácido fosfato monosódico y su base conjugada fosfato disódico. Debido a que es de bajo costo con respecto a otras sales químicas y se encuentra en el mercado, pero tiene como restricción no poder adquirirlas de manera fácil ya que solamente se encuentran en tiendas especializadas.

Con respecto al fosfato, las normas chilenas (NCh 405 of. 2005; NCh 1333 of. 1978) no hacen referencias a las concentraciones mínimas o máximas de él en las aguas, debido a que es un componente requerido por nuestro cuerpo. Por lo tanto no presenta un riesgo para nuestra salud.

CAPÍTULO 3: METODOLOGÍA

En esta investigación se reconoce como variable el pH en las aguas ferrosas. Como consecuencia las variables dependientes serán la concentración de fierro total en las aguas y la eficiencia de la eliminación de éste en las aguas que han sido tratadas.

3.1. Fase Experimental

3.1.1. Sistema Utilizado

Para lograr los objetivos se implementará un sistema a escala de laboratorio el cual posee un recipiente que cumpla la función del tanque de aireación que posee un sistema de difusores de burbuja fina; una bomba que entrega el caudal necesario de aire para lograr la oxigenación y con Oxímetro YSI 550 se mide la cantidad de oxígeno disuelto en el agua.

Por medio de mangueras plásticas se conecta la bomba de aire a los difusores. Así se conduce el aire a ellos y el aire saldrá en forma de burbujas, las cuales al estar en contacto con el agua producirá la transferencia de oxígeno.

Paralelamente se utiliza balanza para pesar las sales necesarias para lograr los rangos de pH requeridos y un pHmetro para el registro de los pH durante el proceso de aireación. La descripción de los equipos e instrumentos con los cuales se trabajó se detallan en el anexo A.

El agua a utilizar tiene procedencia de un pozo ubicado en la Reserva Nonguén, Concepción, Región del Bío-Bío. Se trabajó con ella en su estado natural, es decir, no se agregó ningún tipo de conservantes y tampoco ha sido clorada.

La concentración inicial de fierro que contiene estas aguas fue medida in situ, la toma de muestra se realizó del mismo método que se utilizó en la etapa de sedimentación (Ver 3.3.3), esta arrojó una concentración inicial de 1,856 mg/L. Y el pH que tenía esta la muestra en estado natural es de 7,28.

3.2. Descripción de Fases Experimentales

- i. *Fase de preparación de soluciones tampones:* Se debe masar la cantidad sal ácida y su sal conjugada de tal manera que se obtendrá al realizar la solución el pH esperado. Luego de tener las cantidades listas se procederá a disolverlas en el agua cruda, hasta que ambas sales estén completamente disueltas.
- ii. *Fase de llenado* Una vez disueltas las sales se procede a verter las soluciones al tanque de aireación y se deberá llenar este mismo con el agua cruda hasta obtener el volumen de 8 L con el cual se trabaja.
- iii. *Fase de aireación* Se procede a inyectar aire al tanque por medio de la bomba y los difusores de burbuja fina, las cuales se rompen en la superficie del agua produciéndose un intercambio gaseoso eficaz, ya que se crea una corriente y una agitación que aumenta la superficie de contacto con el aire.
Al aumentar el aire en el agua se produce la oxidación y con ello el hidróxido de fierro (II) pasa a ser hidróxido de fierro (III) el cual es insoluble.
- iv. *Fase de Sedimentación* Al finalizar la etapa anterior se detiene la agitación de agua. Al quedar en reposo el hidróxido de fierro (III) precipita hacia el fondo obteniendo el clarificado en la superficie. El porcentaje de precipitado depende del tiempo en cual se deja reposando.
- v. *Fase vaciado* El agua que se toma como muestra se obtiene por medio de los orificios laterales. Posteriormente se lleva al laboratorio para obtener la concentración de hidróxido de fierro (II) disuelto. El agua restante se procede a vaciar de forma manual. Al finalizar esta etapa se lava el tanque para eliminar cualquier precipitado de fierro que hubiese quedado y así prevenir ensuciar las siguientes muestras.

3.3. Metodología de Ensayo

Se requiere realizar un plan de trabajo que permita estandarizar los experimentos y precisar cómo se va a manipular los equipos. Para así poder trabajar las variables independientes y ver los resultados de las variables dependientes.

3.3.1. Preparación de Solución Amortiguadora

En este proceso se deberá masar las sales por separadas con las cantidades correspondientes a cada rango de pH que se requiera. Estas cantidades fueron calculadas por la ecuación de Henderson- Hasselbalch (ec. 7) teniendo en cuenta que se usa la concentración 0,2 molar para asegurar la estabilidad de la solución.

Se define el pH teórico como aquél que se obtuvo a partir del cálculo de las sales por la ecuación. Análogamente se define un pH obtenido que es aquel que arroja los ensayos de la mezcla de las sales calculadas en la tabla 1.

Tabla 1. Gramos de las sales a utilizar para cada ensayo

Ensayo	pH teórico	NaH ₂ PO ₄ (gr)	Na ₂ HPO ₄ (gr)
1	5,7	206,4	27,9
2	6,0	193,6	52,8
3	6,5	151,2	135,1
4	7,0	86,1	261,6
5	8,0	11,7	406,2

Una vez pesadas las sales se deberán disolver en el agua a tratar en un volumen de 8 litros total, teniendo en cuenta que la sal se agrega al agua y no inversamente, para así prevenir cualquier tipo de reacción de las sales, como la solidificación. La disolución de éstas también debe realizarse en forma separada.

3.3.2. Proceso de aireación

El proceso tendrá una duración de 120 minutos y un caudal de aire de 9,2 L/min, con ello se logra un 70% de reducción en la concentración de fierro de la muestra (Fuentes, 2013).

Se utilizará burbuja fina, debido a que posee mayor superficie de contacto. Gómez (2013) obtuvo con el mismo caudal de oxígeno y una burbuja fina de 3mm un máximo de 9,46 mg/L de oxígeno disuelto en el agua.

Durante este proceso se monitoreará el pH y el oxígeno disuelto que posee el agua, midiendo a ambos cada 5 minutos los primeros 30 minutos, luego en intervalos de 10 minutos hasta los 60 y

en intervalos de 20 minutos hasta completar los 120 minutos del proceso de aireación. Con ello se tomará registro si existe variación del pH durante la etapa de aireación y si el proceso de transferencia de oxígeno presenta diferencias con respecto a las anteriores investigaciones.

3.3.3. *Proceso de Sedimentación*

La sedimentación se llevará a cabo durante 210 minutos a continuación de la aireación, debido a que el tipo de sedimentación que se llevará en el tanque de aireación es del tipo partículas discretas ya que estas no cambian sus características durante la precipitación. Además es de sedimentación simple ya que una vez formado los floculos precipitará por gravedad (Gómez, 2013)

En esta etapa tomarán 15 muestras en total, 3 por ensayo, las cuales son enviadas a un laboratorio en envases de polipropileno de alta densidad de un litro que contienen ácido nítrico para la conservación de los metales que se encuentren en las aguas.

En cada experiencia las muestras son tomadas al inicio de la sedimentación, es decir, inmediatamente luego de haber terminado la aireación. Luego a los 105 minutos de iniciado la sedimentación y al finalizar esta, a los 210 minutos.

Al tener todas las muestras se ensayarán en el laboratorio, pasando por un proceso de digestión con ácido nítrico y ácido sulfúrico para así ser llevados al espectrofotómetro por Absorción Atómica, el cual arrojará la concentración de fierro total en las aguas ya tratadas.

CAPÍTULO 4: ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS.

En este capítulo se dará a conocer los datos cuantitativos que se obtuvieron en la etapa experimental. En primera instancia se analizará el comportamiento que tuvo la solución amortiguadora de fosfato con respecto al pH durante todo el proceso de aireación de las aguas. Posteriormente se analizará la influencia que el pH sobre la oxigenación del agua y sedimentación. En la oxigenación su análisis se basa en el porcentaje de saturación que logra el agua en la etapa de aireación. En la etapa de sedimentación se espera cuantificar el hierro eliminado.

4.1. Comportamiento del pH en el proceso de aireación

Para cada ensayo se calculó un pH teórico el cual sería alcanzado por las sales de fosfato. Se ha registrado el pH durante todo el proceso de aireación lo cual se resume en la tabla 2.

Tabla 2. Análisis de pH obtenidos con respecto a pH teórico.

Ensayo	1	2	3	4	5
pH teórico	5,70	6,00	6,50	7,00	8,00
Rango pH	5,63-5,68	5,94-5,97	6,52-6,53	7,03-7,05	8,06-8,10
pH promedio	5,64	5,96	6,52	7,04	8,08
pH obtenido	5,6	6,0	6,5	7,0	8,1

Se ve una clara tendencia a que los pH obtenidos durante cada ensayo se aproximan considerablemente al pH teórico. Se puede apreciar que la diferencia más significativa entre el promedio de pH obtenido en la etapa de aireación y el pH teórico fue en el ensayo número cinco, el cual marca una diferencia de 0,08 puntos. La menor variación que se obtuvo fue de 0,02 puntos. Lo anterior valida el uso de la segunda ionización del Fosfato, como dice la teoría, los pH requeridos para los distintos ensayo fueron alcanzados satisfactoriamente.

Por otra parte, la variación de pH que se obtuvo durante la etapa de aireación no es consecuencia de esta si no que del uso de estas sales, debido a que esta variable es estable, manteniéndose constante en torno a estos valores, lo cual se ve reflejado en la figura 3.

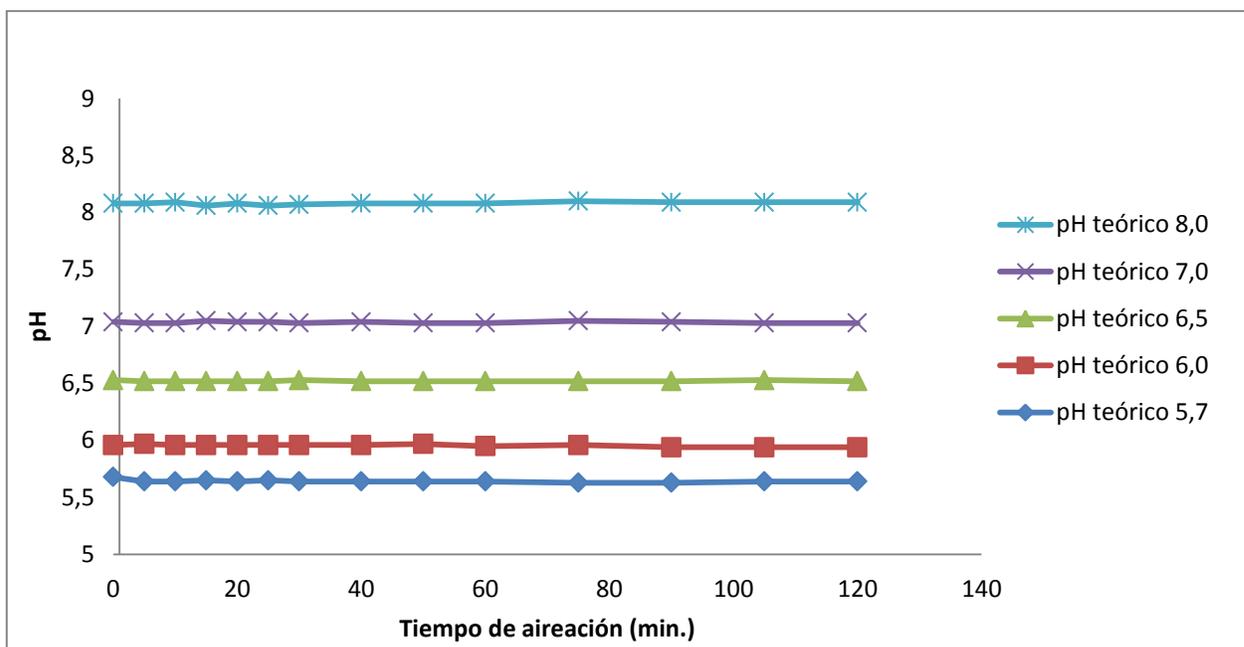


Figura 3. Variación de pH en cada ensayo durante la aireación. Fuente: Propia.

Por lo tanto, se puede asumir que el tampón fosfato no fue partícipe de la oxidación del hierro disuelto ya que de lo contrario éste hubiese variado el pH en gran medida, lo cual hace afirmar que su uso fue el indicado.

4.2. Comportamiento de la Saturación de oxígeno.

En todos los ensayos, la saturación de oxígeno es alcanzada en los 15 primeros minutos de aireación de las aguas. Luego, hasta terminar el proceso de aireación, los valores de saturación no poseen gran variación, oscilando con respecto a un valor, como lo muestra la figura 4.

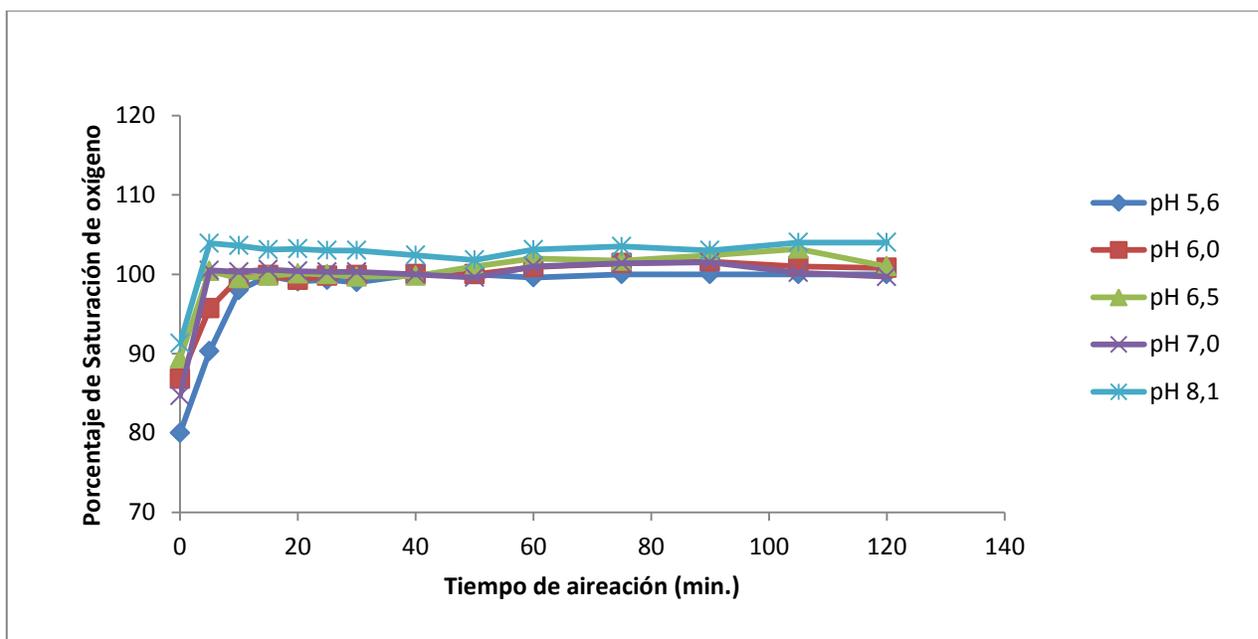


Figura 4. Porcentaje de saturación de oxígeno durante el proceso de aireación, para cada ensayo. Fuente: Propia.

Se percibe que la saturación de oxígeno en las aguas se logra más pronto en las aguas más básicas que las ácidas, alcanzándose en las primeras en los 10 primeros minutos y en las ácidas a los 15 minutos de haber comenzado la aireación.

En la literatura revisada no se hace mención a que el pH sea influyente en el proceso de transferencia de oxígeno en el medio acuoso, debido a que este es un proceso relacionado más a lo físico que con lo químico, como lo es el pH. Es por esto que no se muestra mayor variación en los resultados que se obtuvieron en los diversos ensayos. Si se hace una comparación con los resultados de Gómez (2013), se puede verificar que él obtuvo la saturación de oxígeno en sus ensayos en los 15 primeros minutos, por lo que hace suponer que la variación de tiempo de 5 minutos entre los pH ácidos y neutros es insignificante.

4.3. Remoción de hierro disuelto en Aireación

En el proceso de aireación el hidróxido de hierro (II) se oxida y pasa a ser hidróxido de hierro (III) o ferroso. La muestra in situ, arrojó que la concentración de hierro total en el agua cruda corresponde a 1,856 mg/L, seis veces sobre lo que es aceptado por la NCh 409 Of. 2005. La concentración antes mencionada es el patrón de comparación que se tendrá para el análisis del proceso aireación y sedimentación.

La figura 5 muestra que en la aireación se alcanzó una remoción máxima de 1,60 mg/L en el ensayo correspondiente al pH 7,0 seguido por el pH 6,5 y 8,1. Esto refuerza lo que se presenta en la cinética de oxidación donde se espera que para pH mayores la oxidación sea más rápida.

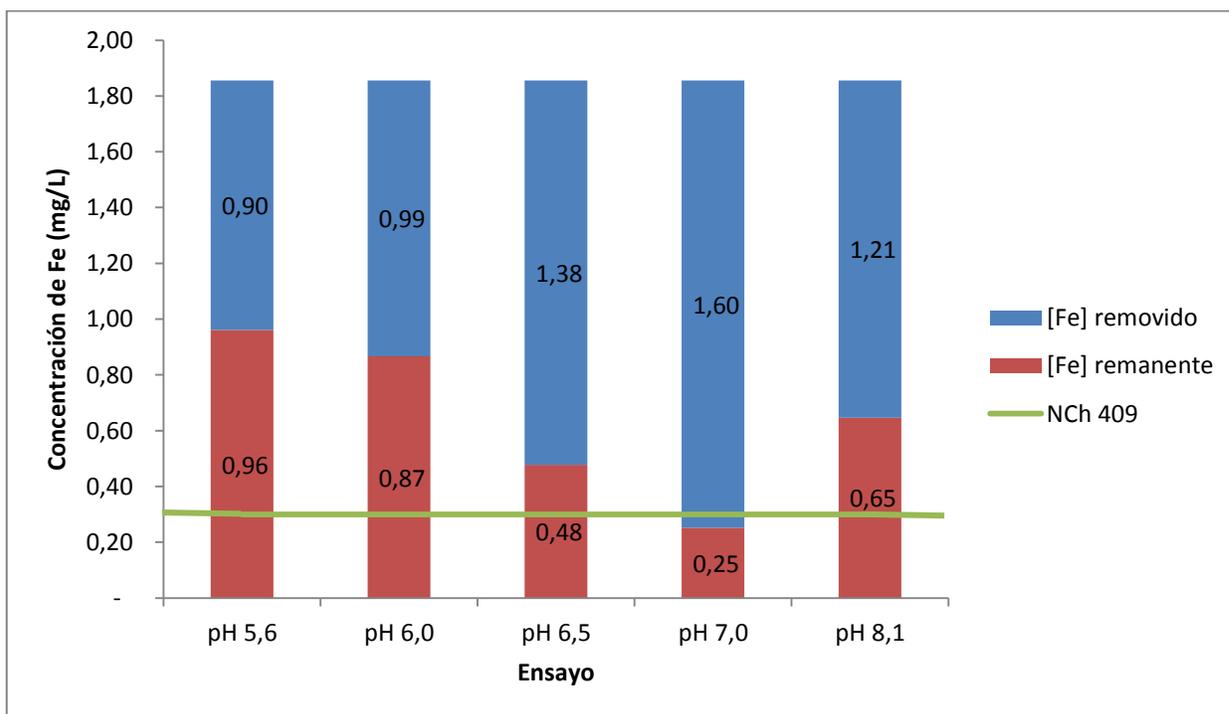


Figura 5 Concentración de hierro disuelto para cada ensayo. Fuente: Propia.

Para los pH más bajos se ha dicho en la literatura que la oxidación de hierro es más lenta, lo que explica que para los ensayos de pH 5,64 y 5,96 la concentración de remoción sea mucho menor que los otros.

Además se aprecia que para el pH 7,0 durante esta etapa se alcanzó una concentración de hierro disuelto bajo la norma, siendo este valor de pH el óptimo en esta etapa.

Por lo tanto en la etapa de aireación la oxidación del hierro disuelto y la remoción del hidróxido férrico es mejor para los pH comprendido entre 6,5 y 8,0 según lo arrojado en esta investigación, lo cual corresponde a los pH con los cuales se encuentran la mayoría de las aguas subterráneas en Chile.

4.4. Remoción de hierro en Sedimentación

La sedimentación tuvo una duración de 210 minutos y se realiza inmediatamente a continuación de la etapa de aireación; en los cuales se realizaron 3 muestras en cada ensayo del clarificado que se obtuvo. El promedio de remoción de hierro en esta etapa es de 0,058mg/L. La variación de hierro más significativa se produce para el pH 6,04 que tuvo una remoción de 0,091 mg/L de este metal, siendo hasta ahora lo más alto y se escapa sobre los otros 4 ensayos ya que el que le sigue en términos de eliminación es el ensayo 3, correspondiente al pH 6,0 que obtuvo una remoción de 0,7 mg/L.

Lo anteriormente dicho, se hace evidente en la figura 6 que permite realizar la comparación de los 5 ensayos con respecto a la remoción del hierro y la concentración de hierro remanente en cada ensayo.

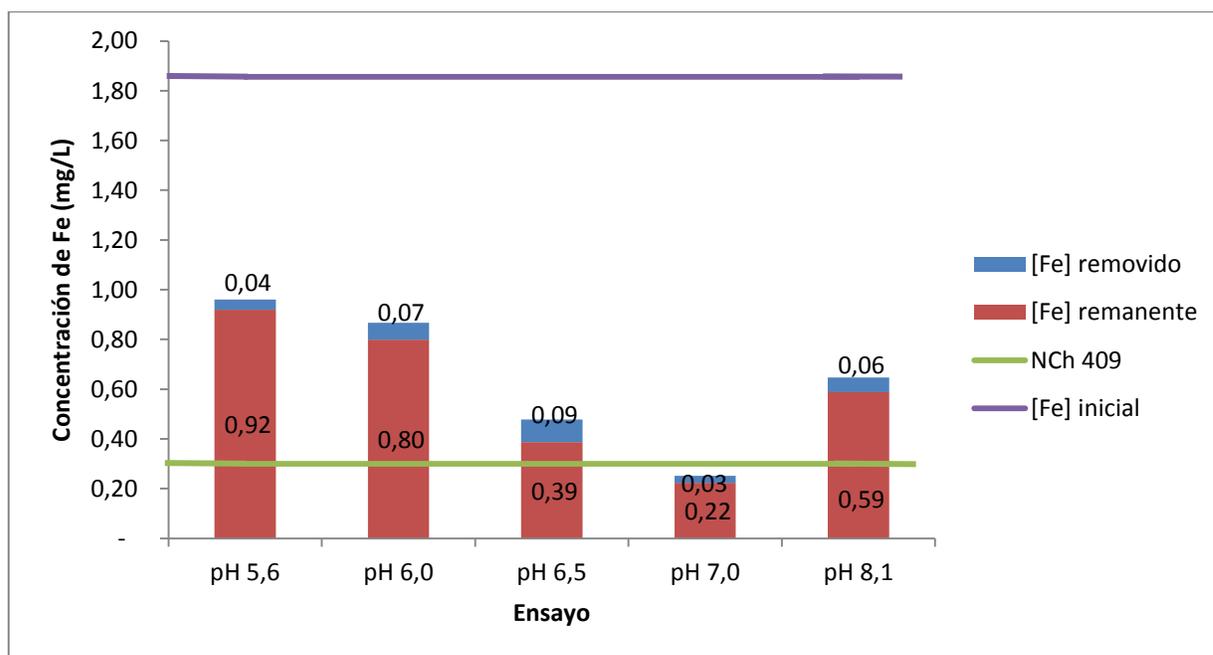


Figura 6. Concentración de hierro removido y remanente en cada ensayo. Fuente: Propia.

Análogamente el pH con menor remoción en esta etapa es el pH 7,0 el cual sólo obtuvo una baja de 0,028 mg/L en la concentración de hierro. Esto se debe a que en la etapa de aireación se eliminó la mayor parte de hierro disuelto dejando una concentración muy baja. Si se analiza del punto de vista de la eficiencia de remoción con respecto a las concentraciones iniciales solamente en la etapa de la sedimentación se obtiene que la remoción es de un 11,11%, que como se mostrará en el análisis global, es el segundo ensayo con obtener mayor porcentaje de remoción, por lo tanto los resultados obtenidos en este ensayo son eficientes.

Si se analiza con respecto el tiempo que se dejó sedimentar el hidróxido férrico se obtuvo que no hubieron variaciones significativas en el proceso por la variación de pH. En la figura 7 se observa que las tazas de sedimentación del hidróxido de hierro son relativamente parecidas para los cinco distintos pH.

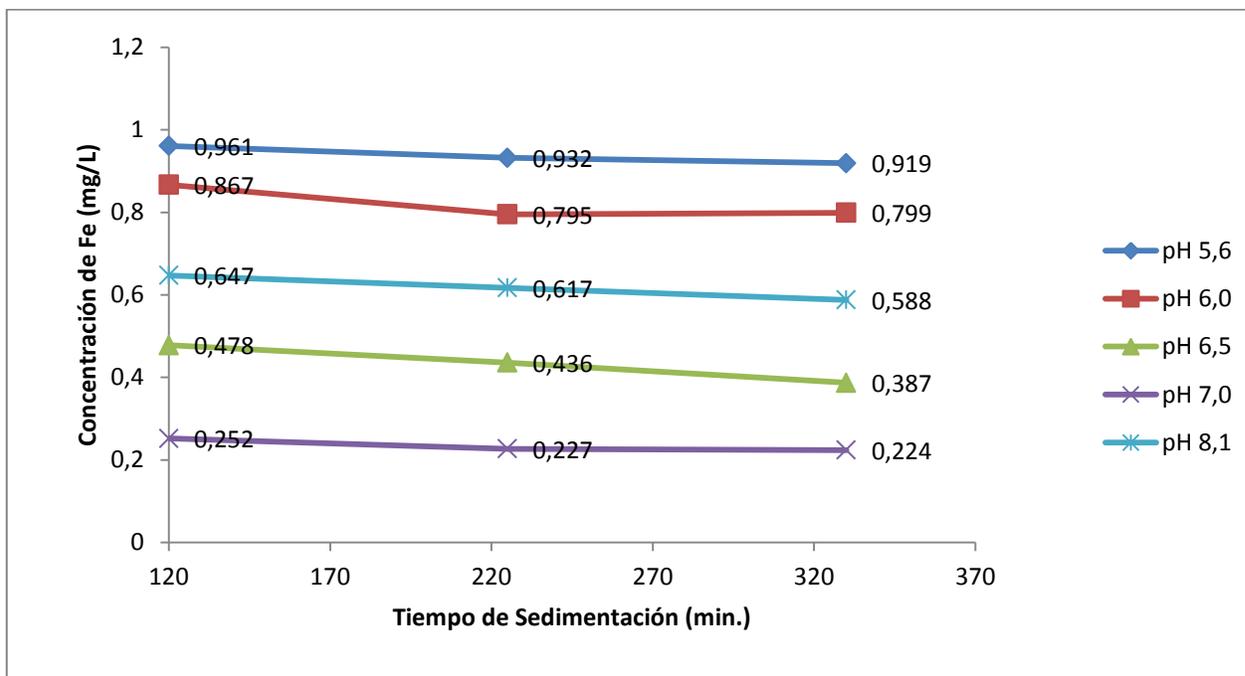


Figura 7 Sedimentación del fierro (III) con respecto al tiempo de sedimentación. Fuente: Propia.

Los pH con mayor porcentaje de eliminación de Fe por este proceso a aireación-sedimentación son 6,52 y 7,04. Los cuales obtuvieron una remoción de fierro de 1,47 y 1,63 mg/L, respectivamente. Así se puede afirmar que el rango de pH en que se encuentran recurrentemente las aguas subterráneas es el rango óptimo para la eliminación de fierro mediante el proceso de aireación-sedimentación, el cual es entre los pH 6,5 y 8,0.

Por lo tanto el proceso de sedimentación no se ve mayormente afectado por la variación del pH lo que hace suponer que esta variable no posee incidencia en este proceso.

4.5. Eficiencia del Proceso de Eliminación de Hierro.

Se concibió un proceso en el cual se busca obtener la eliminación de hierro disuelto hacia valores que estén dentro de la norma chilena de agua potable (NCh 409 of. 2005).

Los porcentajes de remoción que se obtuvieron durante el proceso de aireación-sedimentación para los ensayos realizados arrojaron que el pH con el cual se obtuvo mayor remoción es de 7,04 con un 87,93% global, es decir, que de 1,856 mg/L se logró bajar la concentración de hierro disuelto a 0,224 mg/L final. Se hace notable que los pH óptimos para este proceso están dentro de los valores de pH 6,5 y 8 en este rango se obtuvieron los mayores porcentajes de remoción, superiores a los 67% que se ha obtenido en este mismo proceso por Fuentes (2013).

Tabla 3. Porcentaje de eficiencia en la eliminación de hierro en el proceso de aireación-sedimentación.

Proceso	pH 5,6	pH 6,0	pH 6,5	pH 7,0	pH 8,1
Aireación	48,22%	53,29%	74,25%	86,42%	65,14%
Sedimentación	4,37%	7,84%	19,04%	11,11%	9,12%
Global	50,48%	56,95%	79,15%	87,93%	68,32%

Además se percibe que el proceso de aireación a pesar que es de menor duración es mucho más efectivo en la eliminación de hierro; como se muestra en la tabla 4 al menos el 50% de hierro en las aguas es eliminado en este proceso. Ello se reafirma en la figura 6 la cual muestra que en el proceso de aireación la pendiente de remoción hierro es mucho más pronunciada que la pendiente de la sedimentación.

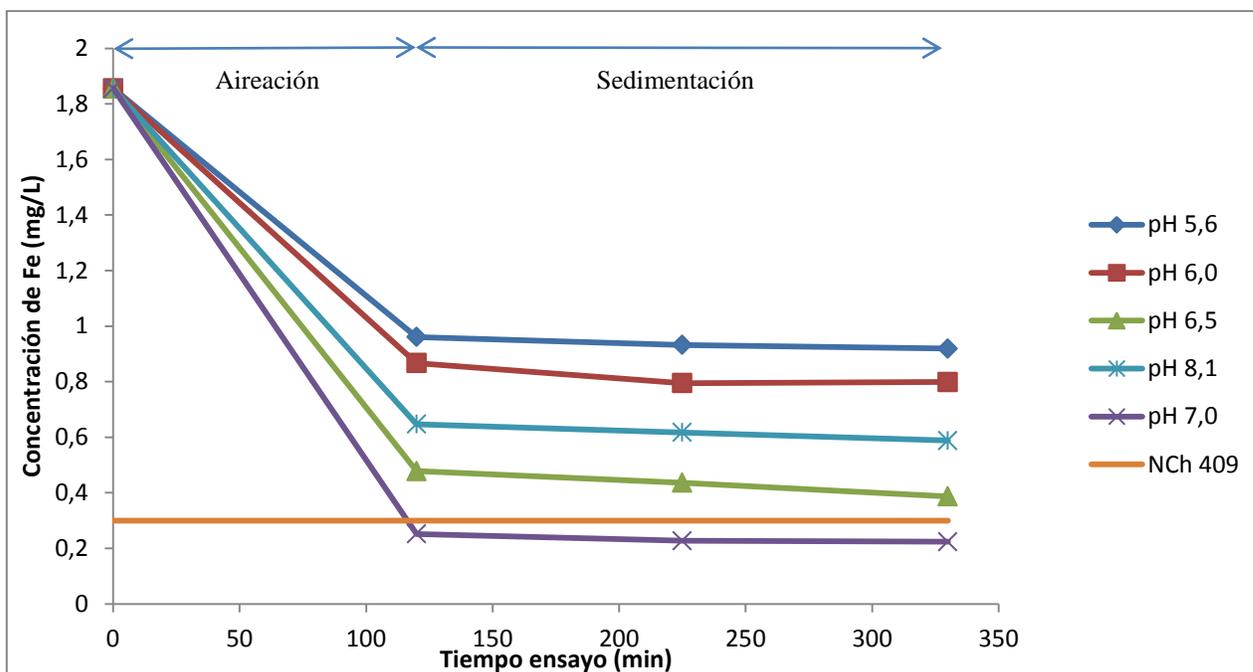


Figura 8. Gráfico de comparación en la eliminación de Fe por ensayo. Fuente: Propia

Para el pH 8, 1 se esperaba obtener una tasa de eliminación mayor a la tasa que se obtuvo para el pH 7,0 ya que la cinética de oxidación del ión ferroso es del segundo orden con respecto a las concentraciones del ión hidróxido (Ec.5). Esto se debió a que en pH superiores al neutro la tendencia de la constante de solubilidad de hidróxido férrico es a ser mayor por ende tiende a que el ión férrico predomine antes del hidróxido de hierro (Ver figura 1). Por eso para pH menor igual a 7,0 la cinética de oxidación del ión ferroso se potencia con la insolubilidad del hidróxido de hierro aumentando la formación de este último compuesto haciendo que precipite. No ocurre lo mismo para pH 8,1 debido a que predominó la solubilidad del ión férrico.

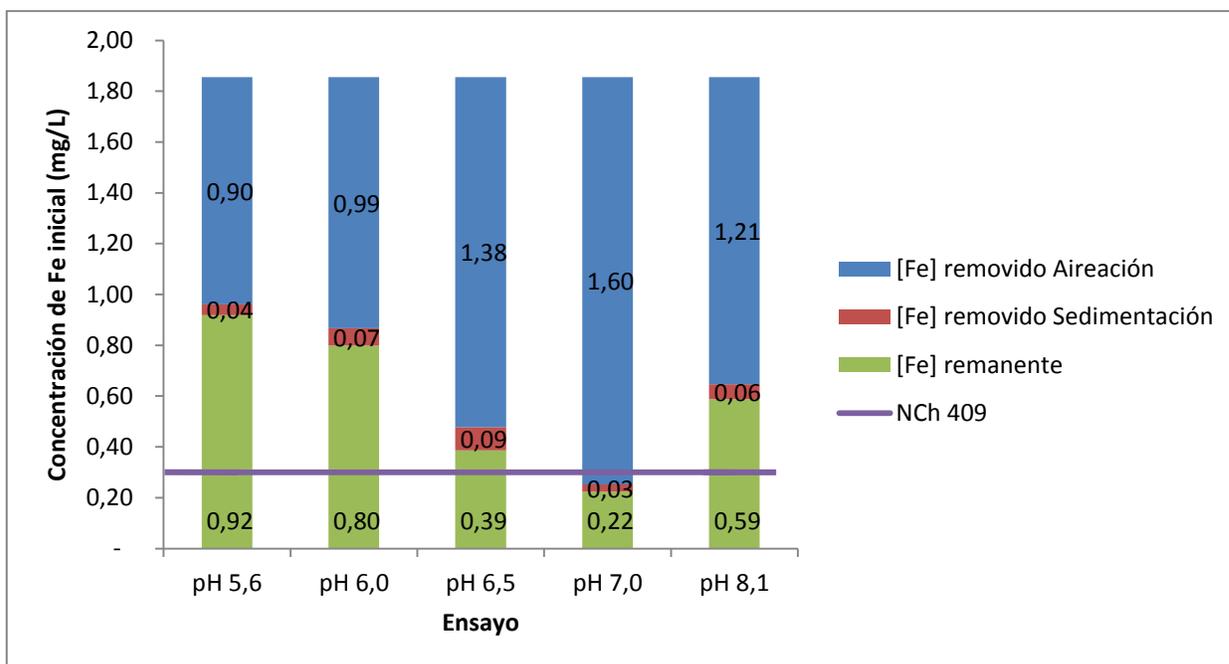


Figura 9 Gráfico comparativo del proceso de aireación y sedimentación por ensayo y fierro remanente.
Fuente: Propia.

La etapa de la aireación es la que establece los niveles de remoción que tendrá el proceso completo de eliminación de fierro. Esto se hace evidente en la figura 9 que evidencia en la etapa de sedimentación la remoción que se obtuvo en cuanto a concentraciones es poco significativa si se compara con la etapa de aireación y el fierro remanente.

Del total de ensayos que se realizaron solamente uno logró reducir la concentración de fierro disuelto a valores bajo la norma NCh 409 Of. 2005 el cual corresponde al pH 7,0 que se correlaciona con que ha sido el ensayo con el cual se obtuvo la mayor remoción. Si bien todos los ensayos se obtuvieron concentraciones menores a 1 mg/L de fierro disuelto, los pH comprendidos entre 6,5 y 8,1 son los que obtuvieron menor concentración. Se obtuvo una remoción como mínimo un 68% de fierro disuelto.

CAPÍTULO 5: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.

A continuación se dará a conocer las conclusiones y recomendaciones que se desprenden del proceso de investigación y posterior fase experimental con el fin de desarrollar el prototipo de planta que se requiere a nivel domiciliario.

5.1. Conclusiones

Con respecto al tampón fosfato se concluye que cumplió su objetivo, alcanzar y estabilizar los pH a distintos valores predeterminados, de tal modo que se logra la comparación de la influencia de esta variable en la oxidación del fierro disuelto en aguas subterráneas.

Al ser efectivo el uso de este tampón se puede utilizar como método para lograr la variación de pH en aguas, sin modificar negativamente sus características para el proceso de eliminación de fierro por medio de la aireación-sedimentación.

Los resultados del tratamiento aireación-sedimentación son satisfactorios, los porcentajes finales obtenidos de remoción de este metal están comprendidos entre 50 a 88%. De hecho para el pH 7,0 se logra la reducción de fierro menor al 0,3 mg/L que exige la norma.

Tradicionalmente el proceso de aireación ha sido utilizado como método de pretratamiento en la eliminación de fierro. Se puede asegurar que es efectivo en la eliminación de fierro, debido a que esta etapa es la que se remueve el mayor porcentaje de fierro.

Los pH que se acercan al neutro son los más óptimos en el proceso de eliminación de fierro por medio de aireación y posterior sedimentación, obteniendo una remoción global de superior al 80%. Lo cual es satisfactorio ya que el rango de pH en que se encuentran las aguas subterráneas es de 6,5 a 8. Lo anterior muestra que este proceso es adecuado para el tratamiento de las aguas subterráneas dentro de los rangos que se encuentran estas aguas.

5.2. Recomendaciones

Como la mayor parte de eliminación de fierro ocurre en el proceso de aireación se propone la idea de crear un proceso de aireación sea continuo, con un tiempo de residencia hidráulica de 2 horas se obtendrían, según lo que se ha realizado, como mínimo una remoción del 48 % del fierro disuelto.

Analizar la optimización del uso de las sales de fosfato variando la concentración de éstas. Midiendo si se obtiene el mismo efecto y estabilidad de los pH durante la etapa de aireación.

Estudiar el precipitado que se forma luego de este proceso y determinar el tiempo con el cual se debe trabajar para eliminar este precipitado y que no afecte al clarificado.

REFERENCIAS

1. Arumí, j. L. Y oyarzún, r. A. (2006). Las aguas subterráneas en Chile. Boletín geológico y minero, 117 (1): 37-45.
2. Burbano, L., & Sánchez, L. D. (2007). Remoción de hierro y manganeso por oxidación-filtración para agua potable. Avances en investigación y desarrollo en agua y saneamiento para el cumplimiento de las metas del milenio, 288.
3. Chang, r. (1999) química general. México. Mcgraw-hill.
4. Domènech, Xavier; Jardim, Wilson F.; Litter, Marta I. (2001). Procesos avanzados de oxidación para la eliminación de contaminantes. Eliminación de contaminantes por fotocatalisis heterogénea. Editor: miguel blesa, red cyted viii-g, vol. 3, p. 26.
5. Donoso, G., Cancino, J y Magri A. (1999). Effects of agricultural activities and wáter pollution with nitrates and pesticides inthe central valley of chile. Wat. Sci. Tech., 39(3), 49-60
6. Esteban Borcado, P. A.; Ferreira Rocha, S. D. (2006). Precipitación de hierro (iii) utilizando óxido de magnesio en lecho fluidizado. Revista de metalurgia, 42 (4), 270-278.
7. Gómez r. (2013) Evaluación el efecto-mezcla en la oxidación del fierro para potabilización del agua. Proyecto de Título. Departamento ingeniería civil y ambiental. Universidad del Bio Bío, chile, Concepción
8. González, L., Mardones, M., Silva, A., Campos, E., (1999). Hidrogeoquímica y comportamiento del agua subterránea en la cuenca del río claro, Región del Bio-Bío, Chile. Rev. Geológica de Chile, 26(2), 145-157.
9. Fuentes H. (2013). Proceso avanzados de oxidación en la remoción de hierro en aguas subterráneas de abastecimiento. Proyecto de Título. Departamento Ingeniería Civil y Ambiental. Universidad del Bio-Bío, Chile, Concepción.

10. Huerta G. (2009). Hidrogeoquímica de aguas subterráneas en la cuenca del estero punitqui, iv región. Memoria de Grado. Departamento de Geología. Universidad de Chile, Chile, Santiago.
11. NCh 409/1 of 2005: Agua Potable – parte 1- Requisitos. Chile
12. NCh 1333 of 1978, modificada 1987:Requisios de Calidad del agua para diferentes usos. Chile.
13. Lerk C. F. (1965) Some Aspects of removal of iron from groundwater. Ph.D. Dissertation Technical University Delft, the Netherlands ph.d. Dissertation technical university delft, the netherlands.
14. Petkova S. V. E Iliev M. M. (2001). Remoción de hierro y manganeso del agua para consumo humano. Simposium gestión integral del agua. Guanajuato, méxico, septiembre.
15. Ramalho, R.S. (1996). Tratamiento de aguas residuales. Ed. Reverté, S.A.
16. Sharma, S.K. (2001). Adsorptive iron removal from groundwater. Phd Thesis, The Academic Board of Wageningen University and the Academic Board if the International Institute for Infrastructural, Hydraulic and Enviromental Engineering, Netherlands.
17. Singley, J. (1986). Revisión de la teoría de coagulación del agua. Gainesville, Estados Unidos: Universidad de la Florida, p. 9-26.
18. Stumm, W. & Lee, G.F, (1961). Oxygenation of ferrous iron. Industrial engineering and chemistry, 53 (2), 143-146.

ANEXO A. TEORÍA DE TRANSFERENCIA DE OXÍGENO

La explicación más simple del mecanismo de transferencia de gases es la dada por la teoría de la doble película propuesto por Lewis y Whitman. De acuerdo con esta teoría, es la presencia de dos capas, una líquida y otra gaseosa, en la interfase gas-líquido, la que proporciona la mayor parte de la resistencia al paso de las moléculas de gas de la masa en fase gaseosa a la líquida (Ramalho, 1996)

La cantidad de gas transferido por unidad de tiempo es la misma a través de cada película; esto se ha definido a través de 4 pasos:

- Paso 1: Paso del gas de la fase vapor a la interfase gas-líquido.
- Paso 2: Paso del gas a través de una película de gas, situada en el lado del vapor de la interfase.
- Paso 3: Paso a través de una película líquida situada en el lado del líquido de la interfase.
- Paso 4: Gas disperso a través de la masa principal de la solución.

Se sabe, que para gases de baja solubilidad en fase líquida, como es el caso del oxígeno, la resistencia limitante está en la película líquida. Además que en baja turbulencia la resistencia a la difusión en la masa de la fase líquida es mayor que la resistencia de la película líquida. Así cuando se suben los niveles de turbulencia, se rompe la película de líquido y la transferencia de oxígeno se controla por el factor de renovación superficial, que es a frecuencia con la cual gotas de líquido reemplazan el líquido interfacial.

La cantidad másica de gas transferido se calcula con base a la teoría de Fick para describir el fenómeno de difusión, aplicada a través de la película del líquido:

$$N = K_L \cdot A \cdot (C_s - C_L) \quad \text{Ec. (A.1)}$$

Donde: N Masa de transferencia de oxígeno por unidad de tiempo (g/L)

K_L Coeficiente de la película del líquido (m/h)

A Área interfacial de transferencia (m^2)

C_s Concentración de saturación de O_2 en la interfase (mg/L)

C_L Concentración de O_2 en el seno del líquido (mg/L)

Debido a en forma práctica es imposible medir el valor de A, se requiere un nuevo término K_{LA} , este coeficiente de transferencia global es función de la resistencia de las fases líquidas y

gaseosas y se define a partir del coeficiente de película, el área interfacial de transferencia y el volumen del reactor.

$$K_{LA} = K_L \cdot \frac{A}{V} \quad \text{Ec. (A.2)}$$

Al sustituir la Ec. (7) en (6) se obtiene la velocidad de transferencia de un gas en función de su concentración, es así que se obtiene

$$N_C = K_{LA}(C_s - C_L) \quad \text{Ec. (A.3)}$$

Donde N_C es la concentración de transferencia de oxígeno por unidad de tiempo (mg/L)

ANEXO B. EQUIPO DE TRABAJO

- *Tanque de aireación* Consiste en un tanque de acrílico transparente que posee una base de 20 cm de diámetro y 45 cm. de altura. Posee orificios laterales de salida a distintas alturas, lo que permite elegir el volumen de trabajo y obtener las muestras.



Figura B.1: Tanque de aireación.

Fuente: Fuentes, 2013

- *Bomba de aire* Compresor de aire que posee 4 salidas. Su caudal mínimo y máximo es de aproximadamente 3,7 y 9,2 [L/min] respectivamente.



Figura B.2: Bomba de aire.

Fuente: Fuentes, 2013

- *pHmetro* Instrumento el cual permitirá medir y corroborar el pH que se desea obtener durante todo el proceso. Se utilizará el pHmetro Hanna Instrument, modelo HI 8424.



Figura B.3: pHmetro.
Fuente: Propia

- *Oxímetro* Equipo que mide la saturación del oxígeno en el agua tratada. En estas experiencias utilizaremos el instrumento YSI 550.

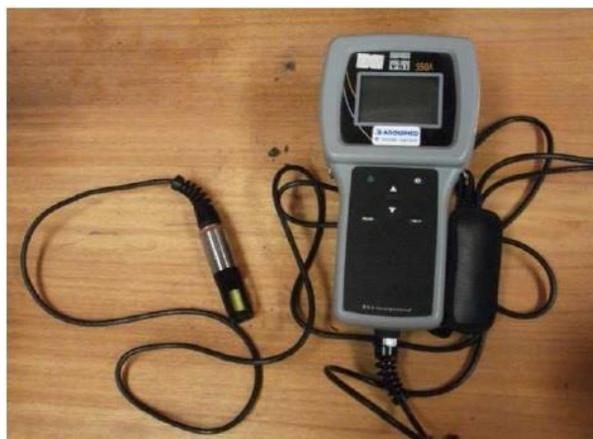


Figura B.4: Oxímetro
Fuente: Fuentes, 2013

- *Sales Fosfato* Para este experimento se utilizará el ácido débil NaH_2PO_4 y su sal conjugada Na_2HPO_4 , en una concentración en la disolución de 2 molar.



Figura B.5: Sales Fosfato
Fuente: Propia

- *Difusores* Dispositivos de aireación que producen burbujas de 3mm de diámetro. Se ubican en la base del tanque
- *Otros instrumentos.* Se utilizarán mangueras plásticas que dirigirán el oxígeno a los difusores. Vasos precipitados de plástico para poder masar y disolver las sales. Y envases de polietileno de alta densidad para la toma de muestras del clarificado de cada ensayo.

ANEXO C. : DATOS CUANTITATIVOS FASE EXPERIMENTAL.

C.1 Datos experimentales en etapa de aireación.

A continuación se dará el detalle de la medición que se obtuvo en cada ensayo que se realizó para este proyecto de título. Esta consta de la medición con el oxímetro del porcentaje de saturación que posee el agua cruda durante el proceso de aireación así como también la medición del pH que fue tomado paralelamente.

Tabla. C.1. pH obtenidos durante el proceso de aireación por cada ensayo.

Minuto	pH teórico 5,7	pH teórico 6,0	pH teórico 6,5	pH teórico 7,0	pH teórico 8,0
0	5,68	5,96	6,53	7,04	8,08
5	5,64	5,97	6,52	7,03	8,08
10	5,64	5,96	6,52	7,03	8,09
15	5,65	5,96	6,52	7,05	8,06
20	5,64	5,96	6,52	7,04	8,08
25	5,65	5,96	6,52	7,04	8,06
30	5,64	5,96	6,53	7,03	8,07
40	5,64	5,96	6,52	7,04	8,08
50	5,64	5,97	6,52	7,03	8,08
60	5,64	5,95	6,52	7,03	8,08
75	5,63	5,96	6,52	7,05	8,10
90	5,63	5,94	6,52	7,04	8,09
105	5,64	5,94	6,53	7,03	8,09
120	5,64	5,94	6,52	7,03	8,09

Tabla. C.2. Porcentaje saturación de oxígeno durante etapa de aireación por cada ensayo.

Minuto	pH 5,6	pH 6,0	pH 6,5	pH 7,0	pH 8,1
0	80	86,8	89,4	84,7	91,3
5	90,3	95,7	100,4	100,5	103,9
10	98	99,5	99,5	100,3	103,6
15	99,8	99,9	99,8	100,6	103,1
20	99,1	99,3	100,1	100,4	103,2
25	99,3	99,8	100	100,3	103
30	99	99,9	99,7	100,3	103
40	100	100	99,8	100	102,4
50	100	100	101	99,6	101,8
60	99,6	100,9	102	101	103,1
75	100	101,4	101,7	101,4	103,50
90	100	101,6	102,4	101,5	103
105	100	101	103,2	100,2	104
120	100	100,8	101	99,7	104

C.2 Datos experimentales proceso eliminación.

Se mostrará en tabla C.3 las concentraciones en mg/L de remoción que se obtuvieron luego de 330 minutos que dura el proceso de Aireación-Sedimentación.

Tabla C.3 Concentraciones remoción de fierro disuelto en el Proceso de eliminación

Proceso	pH 5,64	pH5,96	pH 6,52	pH 7,04	pH 8,08
Aireación (mg/L)	0,90	0,99	1,38	1,60	1,21
Sedimentación (mg/L)	0,04	0,07	0,09	0,03	0,06
Global (mg/L)	0,94	1,06	1,47	1,63	1,27

Luego de las 5,5 horas que dura el proceso de aireación-sedimentación se obtuvieron las concentraciones finales de fierro disuelto en el clarificado.

	pH 5,6	pH 6,0	pH 6,5	pH 7,0	pH 8,1
Fe Remanente (mg/L)	0,92	0,80	0,39	0,22	0,59