

Universidad de Lima
Facultad de Ingeniería y Arquitectura
Carrera de Ingeniería Industrial



ESTUDIO DE LA REMOCIÓN DE ARSÉNICO EN AGUAS PARA RIEGO MEDIANTE LA ADICIÓN DE IONES FERRATO(VI)

Trabajo de investigación para optar el Título Profesional de Ingeniero Industrial

Patricia Mahela Prieto Veramendi

Código 20122098

Asesor

Javier Quino Favero, MSc

Lima – Perú

Setiembre de 2019

**STUDY OF ARSENIC REMOVAL FROM
IRRIGATION WATER BY THE ADDITION
OF FERRATE(VI) IONS**

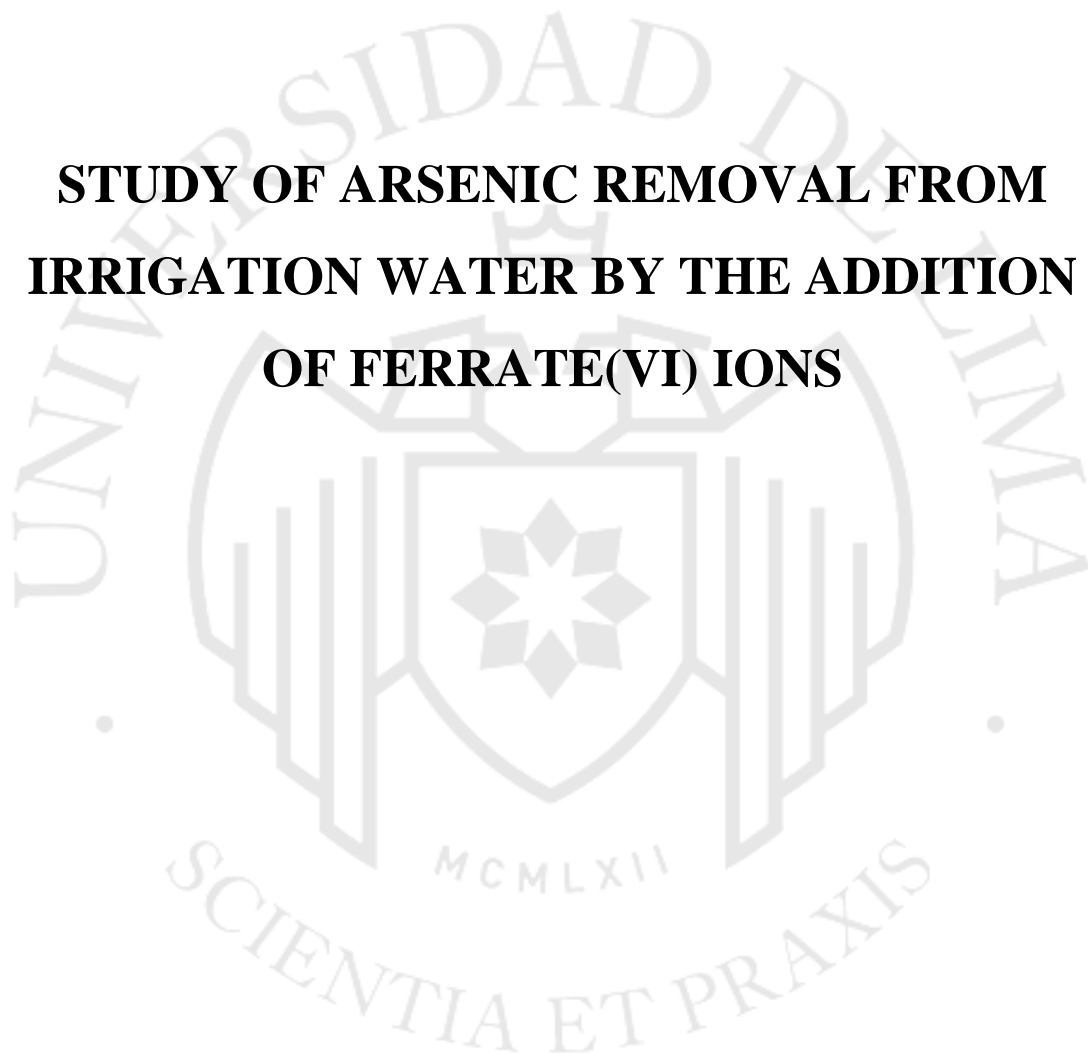


TABLA DE CONTENIDO

1. RESUMEN	1
2. ABSTRACT.....	2
3. INTRODUCCIÓN	3
1. CAPÍTULO I. ASPECTOS GENERALES	4
1.1 Problemática	4
1.2 Objetivos.....	6
1.2.1 Objetivo general.....	6
1.2.2 Objetivos específicos	6
1.3 Justificación.....	6
1.3.1 Justificación Técnica.....	6
1.3.2 Justificación Económica	7
1.3.3 Justificación Social	7
1.4 Alcances y limitaciones	8
1.5 Marco referencial.....	8
1.6 Hipótesis	9
1.6.1 Variable dependiente	9
1.6.2 Variables independientes	9
1.6.3 Formulación de la hipótesis general	9
1.6.4 Formulación de las hipótesis específicas	9
2. CAPÍTULO II. ASPECTOS TEÓRICOS	11
2.1 El arsénico	11
2.1.1 Formas de ocurrencia del arsénico.....	11
2.1.2 Principales usos del arsénico	11
2.1.3 Presencia de arsénico en las aguas naturales	12
2.1.4 Toxicidad del arsénico	13
2.2 El ferrato(VI)	14
2.2.1 Propiedades físicas y químicas del ferrato(VI).....	14
2.2.2 Uso del ferrato(VI) para el tratamiento de agua	15
2.2.3 Métodos de producción de ferrato(VI)	16
2.3 La coagulación en el tratamiento de agua	18
2.4 Filtración por membranas.....	19

2.4.1	Regímenes de flujo	21
2.4.2	<i>Fouling</i> de la membrana	22
2.5	Aspectos fisicoquímicos de la calidad del agua	23
3.	CAPÍTULO III. MATERIALES Y MÉTODOS	29
3.1	Recolección de muestra	29
3.2	Caracterización del agua de riego.....	29
3.2.1	Medición de Alcalinidad.....	30
3.2.2	Medición de Hierro total.....	33
3.2.3	Medición de Sólidos Suspendidos Totales	35
3.2.4	Medición de Sulfatos	39
3.3	Preparación del agua modelo.....	40
3.4	Producción del ferrato	41
3.5	Medición de la concentración del ferrato(VI)	42
3.6	Descripción de la prueba de jarras.....	43
3.7	Microfiltración.....	45
3.8	Medición del arsénico.....	45
3.8.1	Preparación de reactivos	46
3.9	Evaluación del costo de tratamiento.....	47
4.	CAPÍTULO IV. RESULTADOS.....	48
4.1	Producción de ferrato(VI).....	48
4.2	Resultados de la caracterización inicial.....	48
4.3	Resultados del tratamiento con iones ferrato(VI) y cloruro férrico ...	51
4.4	Resultados de la caracterización final	57
4.5	Análisis de costos	59
4.5.1	Costo de producción de ferrato	59
	Costo de tratamiento.....	61
5.	CAPÍTULO V. INGENIERÍA DEL PROYECTO.....	63
5.1	Características del producto	63
5.2	Tecnologías y procesos existentes.....	63
5.2.1	Alúmina activada	64
5.2.2	Coagulación- Filtración mejorada	64
5.2.3	Intercambio iónico	64
5.2.4	Ablandamiento con cal mejorado	65
5.2.5	Ósmosis inversa	65

5.2.6	Remoción biológica	65
5.2.7	Selección de la tecnología.....	66
5.3	Proceso de producción.....	66
5.3.1	Proceso de producción del ferrato	66
5.3.2	Sistema de control.....	69
5.3.3	Proceso propuesto de tratamiento de agua para riego.....	69
5.4	Balance de materia	73
5.5	Características de los equipos.....	77
5.6	Capacidad instalada	80
5.6.1	Cálculo del número de equipos y operarios requeridos	80
5.6.2	Cálculo de la capacidad instalada	82
5.7	Identificación de los aspectos e impactos en el proceso.....	83
5.8	Disposición de planta	86
5.8.1	Características físicas del proyecto	86
5.8.2	Determinación de las zonas físicas requeridas	86
5.8.3	Cálculo de áreas para cada zona	86
5.8.4	Disposición general.....	89
6.	CONCLUSIONES	90
7.	RECOMENDACIONES	92
8.	REFERENCIAS.....	93
9.	BIBLIOGRAFÍA	99
10.	ANEXOS.....	100

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.1 Disponibilidad hídrica a nivel nacional según vertiente, en Hm ³	4
Tabla 2.1 Potencial Redox para diferentes oxidantes utilizados en el tratamiento de agua y de aguas residuales	14
Tabla 2.2 Parámetros para agua destinada al riego de vegetales	24
Tabla 3.1 Parámetros fisicoquímicos medidos en el punto de muestreo	29
Tabla 3.2 Parámetros fisicoquímicos a medir en laboratorio	30
Tabla 3.3 Reactivos empleados en la medición de arsénico total	45
Tabla 4.1 Resultados de los parámetros medidos en campo	50
Tabla 4.2 Resultados de los parámetros medidos en laboratorio	50
Tabla 4.3 Dosificaciones con Fe(VI)/Fe(III) que remueven el arsénico a concentraciones menores a las que establece el ECA para agua de riego	55
Tabla 4.4 Coeficientes de la regresión multivariable	55
Tabla 4.5 Resumen del modelo de regresión	56
Tabla 4.6 Resultados de la caracterización final	57
Tabla 4.7 Energía consumida a corriente constante	59
Tabla 4.8 Precios de consumibles para cada ciclo de producción	60
Tabla 4.9 Costo total de consumibles para cada ciclo de producción	61
Tabla 4.10 Costo de consumibles para un metro cúbico de agua	62
Tabla 5.1 Mejores tecnologías disponibles para la remoción de arsénico de agua potable	63
Tabla 5.2 Especificaciones de los equipos y dispositivos para la producción de ferrato	77
Tabla 5.3 Especificaciones de los equipos e instrumentos para el tratamiento de agua para riego	78
Tabla 5.4 Número de equipos requeridos para el tratamiento de agua	80
Tabla 5.5 Número de equipos requeridos para la producción de ferrato	81
Tabla 5.6 Capacidad instalada para la producción de ferrato	82
Tabla 5.7 Capacidad instalada para el tratamiento de agua	83
Tabla 5.8 Matriz de caracterización para la producción de ferrato	84
Tabla 5.9 Matriz de caracterización para el proceso de tratamiento de agua ...	85
Tabla 5.10 Método de Guerchet	87

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1 Especies de As(V) como función de pH	12
Figura 2.2 Especies de As(III) como función de pH	13
Figura 2.3 Esquema del proceso de separación a través de una membrana semipermeable	20
Figura 2.4. Diagrama conceptual de las principales partículas rechazadas según el tipo de membrana	20
Figura 2.5 Filtración de flujo tangencial y filtración de punto muerto.....	21
Figura 3.1 Instrumento, materiales y reactivos para medir alcalinidad.....	31
Figura 3.2 Titulación para determinar alcalinidad.....	32
Figura 3.3 Coloración del punto final de la titulación para medir alcalinidad .	33
Figura 3.4 Equipo, materiales y reactivos para medir Hierro total.....	33
Figura 3.5 Ubicación de la celda en el colorímetro DR 890	34
Figura 3.6 Filtrado de muestra para determinación de SST	38
Figura 3.7 Secado y pesado de las muestras.....	38
Figura 3.8 Muestras desecadas	38
Figura 3.9 Equipo, materiales y reactivos para medir sulfatos.....	39
Figura 3.10 Configuración del reactor de ferrato(VI)	41
Figura 3.11 Producción de ferrato	42
Figura 3.12 Muestras diluidas de ferrato	42
Figura 3.13 Configuración de la prueba de jarras	44
Figura 4.1 Presencia de grasa en el reservorio del INIA	49
Figura 4.2 Coloración que indica la presencia de algas	49
Figura 4.3 Cambio de color durante la reducción del ferrato(VI).....	51
Figura 4.4 Concentración de arsénico remanente después del tratamiento con iones ferrato(VI)	52
Figura 4.5 Concentración de arsénico remanente empleando iones ferrato(VI) y férrico.....	53
Figura 4.6 Concentración de arsénico remanente con otras dosis Fe(VI)/Fe(III)	56
Figura 4.7 Remoción de algas luego del tratamiento	58
Figura 4.8 Energía consumida durante la producción de ferrato(VI).....	60

Figura 5.1 Diagrama de operaciones y procesos para el armado del reactor electroquímico productor de ferrato(VI)	68
Figura 5.2 Bocatoma.....	69
Figura 5.3 Filtro de rejas y sistema de inundación	70
Figura 5.4 Sedimentadores	70
Figura 5.5 Disposición de filtros en la unidad de filtración tangencial.....	71
Figura 5.6 Diagrama de flujo del proceso de tratamiento de agua para riego..	72
Figura 5.7 Balance de materia del proceso de tratamiento de agua para riego	75
Figura 5.8 Balance de materia del proceso de producción de ferrato.....	76
Figura 5.9 Área total de terreno requerido	88
Figura 5.10. Plano de planta propuesto	89



ÍNDICE DE ANEXOS

Anexo 1: Decreto supremo N° 004-2017-MINAM Estándares de calidad ambiental (ECA) para agua	101
Anexo 2: Instrumentos, equipos materiales y reactivos	102
Anexo 3: Datos de ensayos de prueba de jarras	105
Anexo 4: Datos de ensayos con otras dosis Fe(VI)/Fe(III)	106
Anexo 5: Cotización para el Hidróxido de sodio al 50%	107
Anexo 6: Cotización para el cloruro férrico al 40%	108
Anexo 7: Tarifario de energía eléctrica	109



RESUMEN

Se informa acerca del estudio de una nueva tecnología para el tratamiento de agua de riego. Esta tecnología consiste en adicionar al agua iones ferrato(VI) seguidos de una solución de cloruro férrico (FeCl_3) como coagulante y culminar el proceso con una microfiltración. Las concentraciones evaluadas de los iones ferrato(VI) fueron 1, 2 y 3 mg/L; mientras que las concentraciones de los iones férricos (Fe^{3+}) fueron 3, 6 y 9 mg/L. El pH final fue llevado a 7. Las pruebas y análisis realizados demuestran que al añadir iones ferrato(VI) a una concentración de 1 mg/L e iones férricos (Fe^{3+}) en concentración igual a 3 mg/L, seguido de microfiltración, la concentración de arsénico disminuyó desde 500 $\mu\text{g/L}$ hasta concentraciones inferiores de 100 $\mu\text{g/L}$. Este resultado obtenido está de acuerdo con el valor Estándar Nacional de Calidad Ambiental (ECA) para agua destinada al riego de vegetales. Además, se evidenció que la adición de iones ferrato(VI) permite reducir la cantidad de coagulante empleado para alcanzar una concentración de arsénico por debajo de lo que indica el estándar, lo que permite una reducción del costo de tratamiento.

Palabras clave: ferrato, arsénico, agua para riego, microfiltración, coagulación

ABSTRACT

The study of a new technology for treatment of irrigation water is reported. This technology consists of adding ferrate(VI) ions to the water followed by a ferric chloride solution (FeCl_3) as a coagulant, and completing the process with microfiltration. The evaluated concentrations of ferrate(VI) ions were 1, 2 and 3 mg/L; while ferric (Fe^{3+}) ion concentrations were 3, 6 and 9 mg/L. Final values of pH were adjusted to 7. Results show that adding 1 mg/L of ferrate(VI) ions and 3 mg/L of ferric (Fe^{3+}) ions followed by microfiltration, decreased the arsenic initial concentration from 500 $\mu\text{g/L}$ to concentrations below 100 $\mu\text{g/L}$. This result complies with the National Standard for Environmental Quality (ECA) for water intended for vegetable irrigation. Furthermore, it was evidenced that the addition of ferrate(VI) ions allows to reduce the amount of coagulant used to reach an arsenic concentration below what the standard states, which makes it possible a reduction of treatment cost.

Keywords: ferrate, arsenic, irrigation water, microfiltration, coagulation

INTRODUCCIÓN

Esta investigación evalúa el uso de ferrato(VI) como un agente a ser usado en el tratamiento de un agua modelo para riego con la finalidad de reducir la concentración de arsénico. El uso del ferrato(VI) permite tener un proceso más limpio, ya que se trata de una sustancia amigable con el medio ambiente. Asimismo, el ferrato(VI) puede desempeñar una doble función como oxidante y desinfectante; y a la vez forma un subproducto no tóxico que es el hierro(III) (Sharma, Anquandah, Kim, Jiang, & Zboril, 2013). Se estudia el efecto de la adición de la solución de ferrato(VI) seguida de los procesos de coagulación y microfiltración.

Este trabajo ha sido desarrollado en cinco capítulos. El capítulo I presenta la problemática, los objetivos de la investigación, el alcance y la hipótesis. El capítulo II aborda conceptos relacionados al arsénico, el ferrato, la coagulación y la microfiltración; así como los aspectos fisicoquímicos de la calidad del agua. El capítulo III detalla la metodología a emplear para realizar los cálculos y para el desarrollo de los experimentos. El capítulo IV muestra los resultados de los experimentos, y el capítulo V propone la implementación de una planta de tratamiento de agua de riego que emplea la solución de ferrato(VI), los iones férricos y la microfiltración en sus procesos.

Finalmente, cabe mencionar que este trabajo de investigación es desarrollado en el marco del proyecto “Implementación del riego automatizado y mejora de la calidad de aguas no seguras para la agricultura mediante un sistema de tratamiento de aguas con iones ferrato(VI) en el Centro Experimental La Molina y la Estación Experimental Agraria Moquegua” del Programa Nacional de Innovación Agraria (PNIA) y el Instituto de Investigación Científica de la Universidad de Lima (IDIC).

CAPÍTULO I. ASPECTOS GENERALES

1.1 Problemática

En el Perú, tal como se muestra en la Tabla 1.1, se dispone principalmente de aguas superficiales. Las aguas superficiales pueden ser destinadas al uso agrícola, al uso industrial, al consumo de la población o al desarrollo de otras actividades. La actividad agrícola cobra importancia no solo por suministrar variedad de alimentos a la población, sino también porque a ella se destina el 80% del total de agua superficial empleada (Autoridad Nacional del Agua [ANA], 2009). Por ello, el riego representa un factor determinante para el incremento de la seguridad alimentaria y el crecimiento agrícola y productivo (Ministerio de Economía y Finanzas [MEF], 2011).

Tabla 1.1

Disponibilidad hídrica a nivel nacional según vertiente, en Hm³

Vertiente	Pacífico	Atlántico	Titicaca	Total
Superficial	34,136	1,895,226	6,259	1,935,621
Subterránea	3,124	542,992	614	546,730

Fuente: Instituto Nacional de Estadística e Informática (2015)
Elaboración propia

La calidad del agua para riego “[...] está determinada por la concentración o el grado de elementos, sustancias o parámetros físicos, químicos y biológicos que no representa riesgo significativo para la salud de las personas ni al ambiente” (Ministerio del Ambiente [MINAM], 2017). La calidad puede verse afectada por las condiciones naturales del entorno o por el desarrollo de actividades humanas alrededor de sus fuentes; por ello las descargas de los efluentes de las actividades productivas, de las aguas residuales domésticas y la escorrentía superficial de los campos de cultivo constituyen fuentes de contaminación de las aguas de riego. La contaminación se manifiesta a través de la presencia de sustancias indeseables tales como compuestos orgánicos, inorgánicos y microorganismos que afecten la calidad de los cultivos irrigados. Por este motivo, es necesario contar con fuentes de agua inocuas, ya sea de origen natural o a través de procesos de tratamiento de costo accesible para el productor agrícola.

Según Henke (2009), uno de los contaminantes inorgánicos que puede presentar el agua para riego es el arsénico, cuya distribución y concentración está principalmente relacionada a las características mineralógicas, químicas y físicas de los suelos, sedimentos y rocas en contacto con el agua. Las personas que han estado expuestas durante periodos prolongados a este elemento presentan diversos daños a su salud, por esta razón el Instituto Nacional de Ciencias de la Salud Ambiental de los Estados Unidos reconoce al arsénico como cancerígeno, mientras que la Organización Mundial de la Salud lo considera una de las prioridades de investigación (The National Institute of Environmental Health Sciences, 2005).

En América Latina, la presencia de arsénico en aguas superficiales y subterráneas se relaciona principalmente al vulcanismo desarrollado en la Cordillera de Los Andes (Castro de Esparza M. L., 2015), mientras que Perú es ubicado como el tercer país de América del Sur en tener parte de su población expuesta al arsénico (Bernex, 2015). En consecuencia, se tiene casos como el de la región Tacna, donde se ha identificado “[...] una situación de descontrol en la cantidad de arsénico contenido en el agua tanto potable como de uso agropecuario” (Chávez, 2015).

Por otro lado, como señalan Howe, Hand, Crittenden, Trussell y Tchobanoglous (2016), mientras que la demanda de agua aumenta, cada vez son más exiguos los suministros de agua de alta calidad que sean disponibles localmente. Asimismo, la capacidad para detectar contaminantes ha adquirido un mayor nivel de complejidad y los efectos negativos sobre la salud de algunos de los componentes del agua son cada vez más evidentes; lo que conlleva a regulaciones más estrictas, por un lado, y por el otro, a demandas más enérgicas del consumidor por agua de más alta calidad. La creciente tendencia hacia el uso de fuentes de agua de baja calidad, aunada a estos efectos, ha estimulado una tendencia hacia tratamientos más avanzados que requieren más energía y recursos, lo que contribuye a una mayor contaminación y degradación del ambiente; por lo tanto, combinar la sostenibilidad y el consumo de energía en los procesos y prácticas de diseño contrarrestará esas tendencias y permitirá mayores niveles de tratamientos de agua sin efectos negativos (Howe et al., 2016).

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo general

Evaluar la efectividad de los iones ferrato(VI), producidos electroquímicamente, en la remoción de arsénico presente en aguas para riego obtenidas del Instituto Nacional de Innovación Agraria (INIA)- Centro Experimental La Molina.

1.2.2 Objetivos específicos

- Producir iones ferrato(VI) a través de la disolución anódica de un electrodo de hierro.
- Evaluar la remoción de arsénico de agua modelo para riego mediante la dosificación de una solución de ferrato(VI), seguido de un coagulante y microfiltración, para obtener agua de riego acorde a los Estándares Nacionales de Calidad Ambiental para Agua.
- Realizar una evaluación del costo del tratamiento del agua modelo para riego empleando las soluciones de ferrato(VI) y cloruro férrico.

1.3 Justificación

1.3.1 Justificación Técnica

La tecnología para la producción del ferrato ha sido evaluada anteriormente empleando diferentes métodos (oxidación seca, oxidación húmeda y el método electroquímico), en este proyecto se presenta una tecnología con que permite obtener los iones ferrato(VI) por el método electroquímico.

Los experimentos para validar la tecnología se realizarán en el laboratorio de investigación de la Facultad de Ingeniería y Arquitectura de la Universidad de Lima, por lo que se cuenta con materiales, reactivos y equipos necesarios.

1.3.2 Justificación Económica

Actualmente, los sistemas de tratamiento de agua tradicionales pueden presentar costos elevados, mientras que el sistema que se evalúa en este trabajo se espera que tenga un costo bajo en los costos operativos, lo que la podría convertir en una propuesta interesante y atractiva para las empresas agroindustriales que pueden verla como una oportunidad para mejorar la calidad de agua que emplean para sus actividades.

1.3.3 Justificación Social

El calentamiento global agudiza los problemas relacionados al agua, ya que según Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura (UNESCO, 2003), un 20% del incremento de la escasez mundial del agua obedecerá al cambio climático, el mismo que ocasionará que en las zonas húmedas probablemente las precipitaciones lluviosas aumenten, mientras que en muchas zonas disminuirán y serán más irregulares. Chávez (2015) señala que, ante inminentes cambios en la dinámica del transporte de las masas de agua “[...] es probable esperar que el descontrol de la concentración de arsénico se acentúe y aumente el riesgo de impactar negativamente en la salud de las personas”. En relación a la importancia del agua en nuestra vida, la Organización de las Naciones Unidas (ONU) ha planteado un conjunto de Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) que están orientados a garantizar la disponibilidad de agua, su gestión sostenible y saneamiento (ODS6).

Seimer, Reinhart, Sharma y Austin (2007) señalan que los subproductos de la oxidación con ferrato no son biocidas, ni carcinogénicos y no impactan negativamente en la salud ni en el medio ambiente, por lo que no afectaría las especies vegetales irrigadas. Por esta razón, el uso de los iones ferrato para tratar las aguas de riego constituye una alternativa de solución para obtener productos agrícolas libres de agentes contaminantes.

La Organización de las Naciones Unidas para la agricultura y la alimentación (2002) afirma que contar con un mecanismo efectivo para remover el arsénico de aguas destinadas a la agricultura permitirá al sector agrario encontrarse mejor preparado para enfrentar los efectos del cambio climático; mientras que el suministro de alimentos inocuos y nutritivos permitiría incrementar la seguridad alimentaria para las personas.

1.4 Alcances y limitaciones

Esta investigación evalúa la reducción de la concentración del arsénico del agua de riego, más no la reducción de concentración de otros contaminantes, si lo hubieren.

Uno de los objetivos del proyecto marco de esta investigación es evaluar la calidad del agua tratada con la unidad automatizada en el Centro Experimental La Molina y la Estación Experimental Agraria de Moquegua. Por ello, se evaluará la reducción de una concentración inicial de arsénico de 500 µg/L y se verificará si la concentración de arsénico remanente cumple con los 100 µg/L establecido por el Estándar Nacional de Calidad Ambiental-ECA para Agua, categoría 3, subcategoría D1 (Riego de cultivos de vegetales). La concentración inicial fue establecida tomando como referencia la concentración promedio de arsénico reportada en la literatura de los ríos Callazas y Salado, los que pertenecen a la cuenca del río Locumba, en el sur de Perú; con concentraciones de arsénico de hasta 0.640 y 1.680 mg As/L, respectivamente (como se cita en McClintock y otros, 2012).

Debido a la complejidad de realizar un muestreo y el tiempo que demanda lograr que las muestras sean representativas, los ensayos se realizan tomando como modelo el agua del reservorio del Instituto Nacional de Innovación Agraria. Dicho reservorio almacena agua proveniente del río Rímac que ha recibido un pre-tratamiento. La Autoridad Nacional del Agua (ANA) clasifica al río Rímac en la Categoría 3, y el Ministerio del Ambiente señala que las aguas de esta categoría pueden ser destinadas al riego de vegetales y bebida de animales (Ministerio del Ambiente [MINAM], 2017).

1.5 Marco referencial

La especiación del arsénico en muestras de agua procedente de ríos incluye especies inorgánicas y orgánicas; siendo dominantes las primeras, que suelen presentarse como Arsénico(V) bajo la forma de arseniato AsO_4^{-3} y como Arsénico(III) bajo la forma de arsenito AsO_3^{-3} . La especie arsenito, por encontrarse sin carga eléctrica al pH de las aguas naturales, no se adsorbe a la mayoría de superficies minerales, lo que dificulta su remoción (Chavez, 2009).

En el Perú, se han encontrado concentraciones elevadas de arsénico en aguas superficiales, principalmente en las regiones de Lima, Moquegua y Tacna (Castro de Esparza, 2006). Por otro lado, se han realizado diversos estudios que confirman el

impacto del empleo de aguas no seguras para los cultivos. Específicamente, se ha demostrado que la presencia de elevadas concentraciones de arsénico en el suelo y en las aguas de riego conducen a concentraciones elevadas de arsénico en los cultivos y por consiguiente constituyen un riesgo elevado para la seguridad de los alimentos, ya que muchos de los contaminantes, tales como los metales pesados, son absorbidos por los cultivos (Arora et al., 2008), persisten en el suelo (Khan, Cao, Zheng, Huang, & Zhu, 2008) y terminan en el producto de consumo directo (Cabezas, 2014).

Asimismo, un equipo de investigadores de la Universidad de Valladolid y del Instituto de Recursos Naturales y Agrobiología de Salamanca, ha evaluado la bioacumulación del arsénico en plantaciones de patata, remolacha, zanahoria y trigo y ha encontrado que el arsénico almacenado en hojas y raíces es mayor cuando la concentración medida en el agua de riego es más alto (Moreno, 2009).

1.6 Hipótesis

1.6.1 Variable dependiente

Concentración final de arsénico total.

1.6.2 Variables independientes

Concentración de iones ferrato(VI), concentración de iones férricos.

1.6.3 Formulación de la hipótesis general

La aplicación de iones ferrato(VI) disminuye la cantidad de cloruro férrico utilizado como coagulante en el proceso de remoción de arsénico, logrando disminuir la concentración de arsénico en el agua para alcanzar un estándar de calidad de agua viable para riego.

1.6.4 Formulación de las hipótesis específicas

- La adición de iones ferrato(VI) al agua modelo para riego permite reducir la concentración inicial de arsénico.

- La aplicación de iones ferrato(VI) seguido de iones férricos permite reducir la concentración del arsénico del agua hasta concentraciones menores a 100 $\mu\text{g/L}$.
- El empleo de iones ferrato(VI) permite reducir los costos de los consumibles para el tratamiento, en las condiciones evaluadas.



CAPÍTULO II. ASPECTOS TEÓRICOS

2.1 El arsénico

2.1.1 Formas de ocurrencia del arsénico

El arsénico (As) es un semimetal, por lo que tiene varias, pero no todas las propiedades físicas y químicas de los metales. La abundancia promedio de arsénico en la corteza terrestre es de 1.8 mg/L; en los suelos es de 5,5 a 13 mg/L; en aguas superficiales es inferior a 2 µg/L, y en aguas subterráneas generalmente es inferior a 100 µg/L (American Public Health Association, 1998).

Henke (2009) señala que el arsénico puede existir en los estados de oxidación 0 (elemental), +3 (trivalente, arsenitos) y +5 (pentavalente, arseniatos). Otro compuesto de arsénico con estado de oxidación -3 es la arsina, un gas incoloro que tiene varios usos industriales y es un agente hemolítico sumamente potente. En la mayoría de los casos y para propósitos toxicológicos, los estados de oxidación del arsénico más relevantes son las formas +3 y +5, que también pueden ser identificadas como As(III) y As(V), respectivamente. La importancia toxicológica de estos dos estados de oxidación radica en que las formas trivalentes de arsénico, tanto orgánicas como inorgánicas, son generalmente más tóxicas que las formas pentavalentes.

2.1.2 Principales usos del arsénico

Durante siglos, los compuestos de arsénico han sido utilizados en una amplia variedad de productos, que incluyen pigmentos, medicinas, pesticidas, preservantes de madera, herbicidas, cristalería y como depilatorio en la manufactura de cuero. Asimismo, las propiedades tóxicas del arsénico son bien conocidas y han sido ampliamente usadas en agentes de guerra química y para cometer asesinato y suicidio desde tiempos antiguos (Henke, 2009). La Organización Mundial de la Salud (OMS, 2011) afirma que los compuestos de arsénico son usados en el ámbito comercial e industrial como agentes de aleación en la manufactura de transistores, láseres y semiconductores.

2.1.3 Presencia de arsénico en las aguas naturales

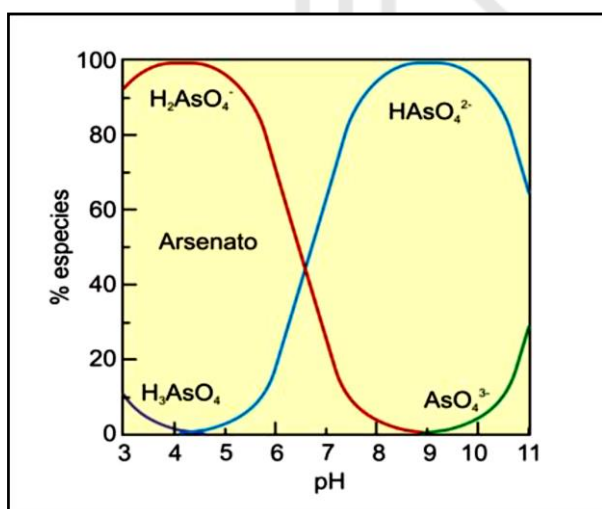
El arsénico llega al agua a través de la disolución de rocas y minerales; de efluentes industriales, que incluyen desechos mineros y vía deposición atmosférica (OMS, 2011).

En aguas naturales, el arsénico puede existir como una o más especies disueltas; sin embargo, no se encuentra como iones As^{3+} o As^{5+} sino como oxianiones. El As(III) forma H_3AsO_3 y el As(V) forma H_3AsO_4 . Debido a que son ácidos débiles, las moléculas de arsénico se ionizan poco para formar moléculas cargadas. Estas formas químicas del arsénico se forman en función del pH (Howe et al., 2016). Por lo tanto, como se observa en la Figura 2.1 y en la Figura 2.2, la especiación del arsénico disuelto en el agua dependerá del pH, las condiciones redox y otras características químicas del agua, así como de la actividad biológica. Así, en aguas superficiales bien oxigenadas, generalmente está presente el arsénico(V); mientras que, en condiciones reductoras, como aquellas frecuentemente encontradas en aguas subterráneas o sedimentos profundos de lagos, la forma predominante es el arsénico(III).

Por otro lado, un incremento del pH podría incrementar la concentración del arsénico disuelto en el agua (OMS, 2011).

Figura 2.1

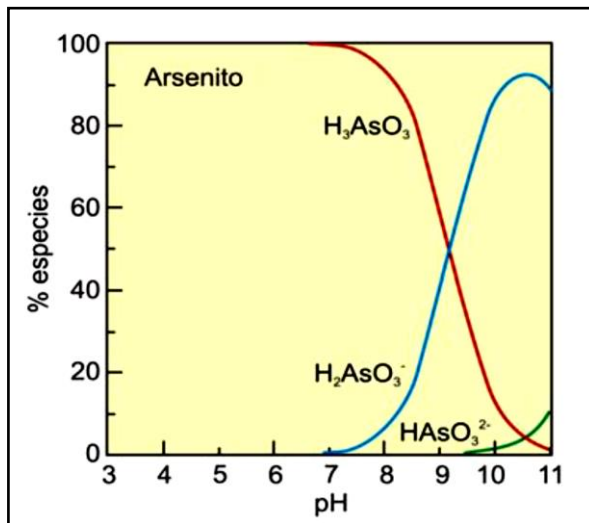
Especies de As(V) como función de pH



Fuente: Lillo, Javier (2008)

Figura 2.2

Especies de As(III) como función de pH



Fuente: Lillo, Javier (2008)

2.1.4 Toxicidad del arsénico

La exposición al arsénico puede resultar en una variedad de problemas a la salud, que incluyen varias formas de cáncer, enfermedades cardiovasculares y diabetes. Generalmente, tanto las formas inorgánicas y orgánicas del arsénico(III) tienden a ser más tóxicas para los humanos que las formas de arsénico(V). La exposición al arsénico puede ser a través de la inhalación, absorción por la piel e ingestión de comida y agua (Henke, 2009).

La intoxicación grave puede darse por la ingestión de una cantidad tan pequeña como 100 mg de trióxido de arsénico, mientras que los efectos crónicos pueden resultar de la acumulación de compuestos de arsénico en el cuerpo a bajos niveles de ingesta. Para la protección de la vida acuática, la concentración promedio de arsénico(III) en el agua no debe exceder de 72 $\mu\text{g/L}$ y la concentración máxima no debe exceder de 140 $\mu\text{g/L}$. La concentración máxima recomendada por Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura para las aguas de riego es de 100 $\mu\text{g/L}$ (American Public Health Association, 1998).

2.2 El ferrato(VI)

2.2.1 Propiedades físicas y químicas del ferrato(VI)

En la naturaleza, el hierro mayormente existe en los estados de oxidación +2 y +3 (ferroso, Fe(II) y férrico, Fe(III)) (Yates, Zboril, & Sharma, 2014). Bajo condiciones fuertemente oxidantes se presentan estados de oxidación más altos como +4, +5 y +6 y +8. Estos estados de valencia altos del hierro usualmente son generados como oxianiones de hierro, llamados ferratos, de los cuales el estado de valencia del más estable es el +6, dicho compuesto se conoce como ferrato(VI), el cual tiene un color morado oscuro similar al permanganato (MnO_4^{2-}) pero su comportamiento es diferente en todos los aspectos (Alsheyab, Jiang, & Stanford, 2010).

El ion ferrato(VI) tiene la fórmula molecular FeO_4^{2-} y es un fuerte oxidante, tal que, bajo condiciones ácidas tiene un potencial redox mayor que del cloro y del ozono, pudiendo llegar a potenciales de óxido-reducción de hasta 2,2 V, como se puede observar en la Tabla 2.1. Cabe resaltar que la velocidad de descomposición del ferrato(VI) es fuertemente dependiente del pH (Tiwari & Lee, 2011). Se ha demostrado que, luego de evaluar un rango de pH de 7.7 - 12.2, la descomposición del ferrato en agua ocurre a una menor velocidad en el rango 9.4 - 9.7, lo que indicaría una región de alta estabilidad. Esto es corroborado por Mácová y otros (2009), quienes reportan haber encontrado una mayor estabilidad del ferrato(VI) en soluciones fuertemente alcalinas.

Tabla 2.1

Potencial Redox para diferentes oxidantes utilizados en el tratamiento de agua y de aguas residuales

Oxidante	Reacción	E°, Voltios
Cloro	$\text{Cl}_2(\text{g}) + 2\text{e}^- \rightleftharpoons 2\text{Cl}^-$	1,358
	$\text{ClO}^- + \text{H}_2\text{O} + 2\text{e}^- \rightleftharpoons \text{Cl}^- + 2\text{OH}^-$	0,841
Hipoclorito	$\text{HClO} + \text{H}^+ + 2\text{e}^- \rightleftharpoons \text{Cl}^- + \text{H}_2\text{O}$	1,482
Dióxido de cloro	$\text{ClO}_2(\text{ac}) + \text{e}^- \rightleftharpoons \text{ClO}_2^-$	0,954
Perclorato	$\text{ClO}_4^- + 8\text{H}^+ + 8\text{e}^- \rightleftharpoons \text{Cl}^- + 4\text{H}_2\text{O}$	1,389
Ozono	$\text{O}_3 + 2\text{H}^+ + 2\text{e}^- \rightleftharpoons \text{O}_2 + \text{H}_2\text{O}$	2,076
Peróxido de hidrógeno	$\text{H}_2\text{O}_2 + 2\text{H}^+ + 2\text{e}^- \rightleftharpoons 2\text{H}_2\text{O}$	1,776
Oxígeno disuelto	$\text{O}_2 + 4\text{H}^+ + 4\text{e}^- \rightleftharpoons 2\text{H}_2\text{O}$	1,229

(continúa)

(continuación)

Permanganato	$\text{MnO}_4^- + 4\text{H}^+ + 3\text{e}^- \rightleftharpoons \text{MnO}_2 + 2\text{H}_2\text{O}$	1,679
	$\text{MnO}_4^- + 8\text{H}^+ + 5\text{e}^- \rightleftharpoons \text{Mn}^{2+} + 4\text{H}_2\text{O}$	1,507
Cromato	$\text{Cr}_2\text{O}_7^{2-} + 14\text{H}^+ + 6\text{e}^- \rightleftharpoons 2\text{Cr}^{3+} + 7\text{H}_2\text{O}$	1,33
Ferrato(VI)	$\text{FeO}_4^{2-} + 8\text{H}^+ + 3\text{e}^- \rightleftharpoons \text{Fe}^{3+} + 4\text{H}_2\text{O}$	2,20
	$\text{FeO}_4^{2-} + 4\text{H}_2\text{O} + 3\text{e}^- \rightleftharpoons \text{Fe}(\text{OH})_3 + 5\text{OH}^-$	0.72

Fuente: Tiwari y Lee (2011) y Jiang, Durai, Winzenbacher, Petri y Seitz (2014)

2.2.2 Uso del ferrato(VI) para el tratamiento de agua

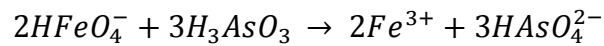
Debido a su fuerte propiedad oxidante, el ferrato(VI) es relativamente inestable en presencia del agua. Así, durante el proceso de oxidación, los iones ferrato(VI) se reducirán a iones férricos o hidróxidos férricos (Jian & Lloyd, 2002), como se observa en la Tabla 2.1. Estos subproductos son recursos básicos para el proceso de coagulación (Jiang, Durai, Winzenbacher, Petri, & Seitz, 2014). El Fe(III) producido luego de la reducción del ferrato(VI) es un buen coagulante/floculante, lo que convierte al ferrato(VI) en un producto químico de tratamiento de aguas multipropósito para la oxidación, coagulación y desinfección del agua (Tiwari & Lee, 2011).

Por otro lado, la rápida reducción del ferrato(VI) a un óxido férrico ambientalmente benigno ha sido la base para sugerir el uso de ferrato como una alternativa más segura a la purificación del agua por cloración (Light & Yu, 2005). Ya que “[...] el cloro favorece la generación de subproductos de desinfección” (*disinfection by-products*, DBPs por sus siglas en inglés) (Serrano, Montesinos, Cardador, Silva, & Gallego, 2015) al reaccionar con la materia orgánica disuelta que se encuentra en todas las aguas. Los DBPs son sustancias tóxicas que pueden causar genotoxicidad (Liviac, Creus, & Marcos, 2009).

La propiedad coagulante del ferrato(VI) también ha demostrado remoción eficiente de algunos metales tóxicos, nutrientes, radionúclidos y materia orgánica natural. Por lo que el ferrato puede ser aplicado en un proceso de pre-oxidación así como en el proceso de coagulación (Yates, Zboril, & Sharma, 2014).

En cuanto al uso del ferrato(VI) para remover especies de arsénico del agua, se debe tener en cuenta que se requieren dos pasos: la oxidación y la posterior coagulación. Al respecto, Lee y otros (2003) consideran que el ferrato(VI) es el candidato ideal para

la remoción de arsénico debido a su función dual como oxidante y coagulante. En su trabajo, sostienen que el proceso de oxidación del arsénico(III) se da por la transferencia del oxígeno; y propone la siguiente reacción para la oxidación del arsénico(III) por el ferrato(VI).



Asimismo, el ferrato(VI) ha llegado a ser considerado una sustancia química emergente para el tratamiento de agua al momento de abordar la preocupación de la formación de los DBPs asociados con las sustancias químicas que se usan actualmente, tales como el cloro libre, cloraminas y ozono. Por ejemplo, el ferrato no mostró reactividad con el ion bromuro, por lo tanto el ion bromato que es carcinogénico no se produce en el tratamiento de agua que contenga dicho ion (Yates, Zboril, & Sharma, 2014). El ferrato(VI) no genera la aparición de bromato y hasta puede ser utilizado conjuntamente con el ozono por el efecto inhibidor que proporciona durante la formación del ion bromato (Han, Wang, Dong, Liu, & Yin, 2013).

Además, el ferrato(VI) tiene la capacidad de degradar un rango amplio de compuestos presentes en las aguas residuales y efluentes industriales; y más importante aún, puede oxidar contaminantes emergentes tales como estrógenos fenólicos, bisphenol-A, sucralosa, antibióticos y medios de contraste de rayos X (Yates, Zboril, & Sharma, 2014).

2.2.3 Métodos de producción de ferrato(VI)

El ferrato(VI) puede ser producido básicamente mediante dos métodos: químico y electroquímico. El método electroquímico es más prometedor que el método químico para la generación de ferrato en la medida que se trata de un proceso más simple y no requiere de reactivos químicos costosos (Alsheyab, Jiang, & Stanford, 2010).

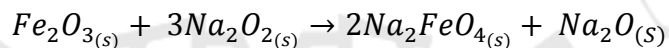
Entre las características más importantes a tener en cuenta, ante una posible síntesis práctica y uso del ferrato(VI), están la solubilidad y la estabilidad de las sales de ferrato(VI). La solubilidad indica cuan fácilmente la sal de ferrato(VI) puede ser transferida de una solución, donde es mayormente producida, al estado sólido. Mácová (2009) considera que el estado sólido es necesario para almacenar esta sal por largo tiempo, ya que la estabilidad del ferrato(VI) es influenciada negativamente por la

humedad. Asimismo, propone el estado sólido para su uso en el tratamiento de agua, ya que la adición de ferrato(VI) disuelto, a diferencia del sólido, incrementaría el pH y la salinidad de la solución.

Los métodos para producir iones ferrato son: oxidación seca, oxidación húmeda y el método electroquímico (Sharma, Chen, & Zboril, 2016).

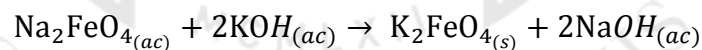
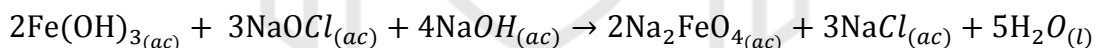
Oxidación seca

En la oxidación seca, el ferrato se obtiene calentando una mezcla de óxidos de hierro con álcali y nitratos a altas temperaturas y presión. La mezcla final incluye las sales de ferrato, subproductos y reactantes sobrantes. Al sintetizar ferrato por este método ocurre la siguiente reacción:



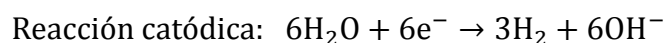
Método húmedo

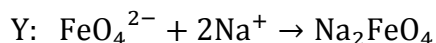
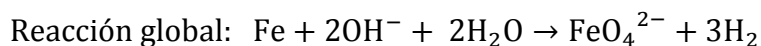
El método húmedo incluye la oxidación de iones férricos por hipoclorito de sodio concentrado en presencia de hidróxido de sodio, obteniéndose ferrato de sodio. Luego de una recristalización con hidróxido de potasio se obtiene ferrato de potasio. Las reacciones que ocurren durante el proceso son:



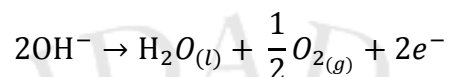
Método electroquímico

El método electroquímico tiene como principio básico la disolución del ánodo de hierro durante el proceso de electrólisis, teniendo como electrolito una solución fuertemente alcalina con una corriente eléctrica para oxidar el hierro a Fe(VI) (Alsheyab, Jiang, & Stanford, 2010). Cabe indicar que este método permite obtener ferrato de alta pureza (Mácová et al., 2009). Las posibles reacciones anódicas y catódicas son las siguientes:





Asimismo, en la cámara anódica también se produce el desprendimiento del gas oxígeno, el cual compete con la producción del ferrato (Máková, Bouzek, & Sharma, 2009). Máková et al. (2009) señalan que la reacción es la siguiente:



Los tres principales parámetros que influyen en la producción de ferrato son la densidad de corriente, la concentración del electrolito y el contenido de carbono en el acero (Alsheyab, Jiang, & Stanford, 2010).

2.3 La coagulación en el tratamiento de agua

El agua a tratar puede contener una variedad de impurezas solubles e insolubles; en estas últimas destacan las partículas coloidales, las sustancias húmicas y los microorganismos en general. Las impurezas coloidales presentan una carga superficial negativa, que impide que las partículas se aproximen unas a otras y que las lleva a permanecer en un medio que favorece su estabilidad (American Water Works Association, 2011).

Howe et al. (2016) señalan que la coagulación implica la adición de un químico coagulante con la finalidad de acondicionar la materia suspendida, coloidal y disuelta; y para crear condiciones que permitan la remoción posterior de la materia suspendida disuelta. Coagulantes como el sulfato de aluminio, el cloruro férrico y el sulfato férrico se hidrolizan con rapidez cuando se mezclan con agua. Cuando esos químicos se hidrolizan, forman precipitados insolubles que desestabilizan partículas, adsorben la superficie de las partículas y neutralizan su carga (reducen las fuerzas repulsivas). En consecuencia, la coagulación por la adición de químicos como las sales de aluminio o las sales de hierro puede implicar la desestabilización de materia coloidal y suspendida, la adsorción y reacción de porciones de materia orgánica natural coloidal y disuelta; y la creación de precipitados floculantes que se extienden por el agua atrapando todo el material suspendido, coloidal y disuelto en el momento en que se asienta.

En algunos casos, dependiendo del proceso, la coagulación puede ser seguida por una etapa de floculación, la cual permite reunir las partículas desestabilizadas para formar aglomeraciones de mayor peso y tamaño que sedimenten con mayor eficiencia. La floculación “[...] implica agregar partículas desestabilizadas (carga eléctrica superficial reducida) y los productos de precipitación formados por la adición de coagulantes que los convierten en partículas más grandes conocidas como partículas floculantes (flóculos)”. El flóculo agregado se puede eliminar posteriormente por sedimentación o filtración (Howe et al., 2016).

2.4 Filtración por membranas

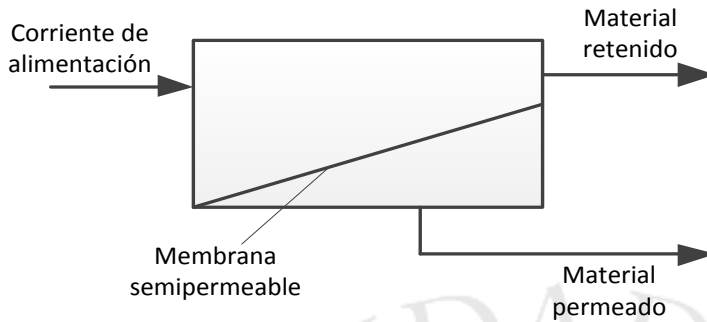
Las membranas se utilizan en dos procesos fisicoquímicos específicos para el tratamiento de agua: el filtrado por membranas y la ósmosis inversa. El filtrado por membranas es un proceso de separación impulsado por la presión o el vacío, en el cual las partículas son removidas de una suspensión a través del cribado a medida que el fluido pasa por el material poroso. Mientras que la ósmosis inversa es un proceso de separación por membranas impulsado por presión, en el que los elementos disueltos son separados de una solución (Howe et al., 2016).

En el filtrado por membranas, el material filtrante es una delgada película sintética, la cual contiene diminutos poros a través de los cuales puede pasar el agua (Howe et al., 2016). El mecanismo de filtración por membranas depende de la fuerza impulsora que se origina por la diferencia de presión para la separación y el proceso de filtrado (Al-Mashharawi, 2011).

Durante el filtrado, el agua pasa por los poros de la membrana semipermeable, pero las partículas quedan atrapadas en la superficie del material debido a su tamaño (Figura 2.3). El agua que atraviesa una membrana se llama agua por permeado (Howe et al., 2016).

Figura 2.3

Esquema del proceso de separación a través de una membrana semipermeable

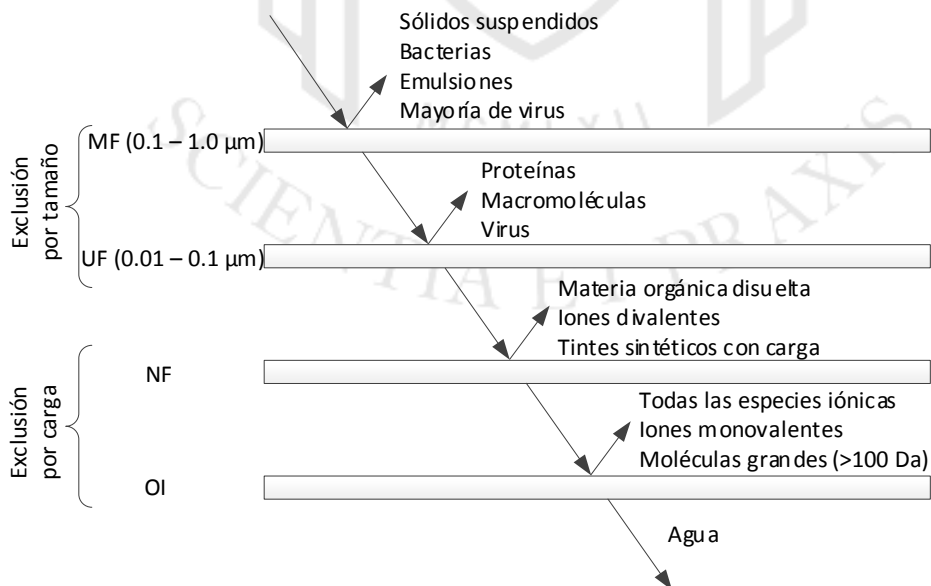


Fuente: Howe, Hand, Crittenden, Trussell, & Tchobanoglous (2016)

Las membranas de filtración presentan diferentes tamaños de poros y según ello se dividen en 4 categorías que son: microfiltración (MF), ultrafiltración (UF), nanofiltración (NF) y osmosis inversa (OI). Las aplicaciones varían según el tamaño de poro, como se muestra en la Figura 2.4.

Figura 2.4.

Diagrama conceptual de las principales partículas rechazadas según el tipo de membrana



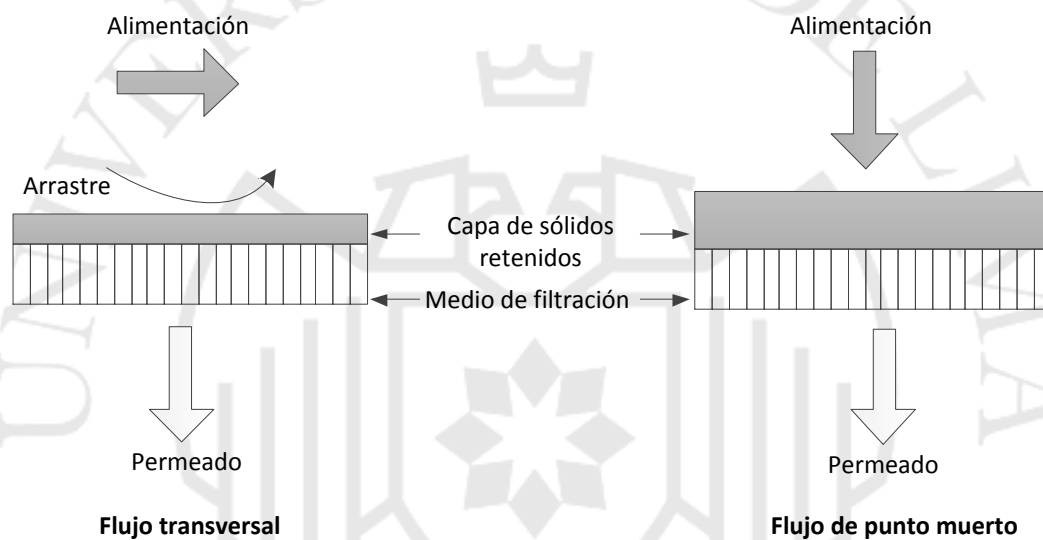
Fuente: Yoon, Seong-Hoon (2015)

2.4.1 Regímenes de flujo

Se utilizan principalmente dos configuraciones del sistema de filtración: punto muerto y flujo transversal. La principal diferencia entre ellas es la relación entre la dirección del agua de alimentación y la superficie de la membrana, como se observa en la Figura 2.5. En consecuencia también difieren en la velocidad del filtrado, la recuperación, el flujo y la calidad del filtrado (Al-Mashharawi, 2011).

Figura 2.5

Filtración de flujo tangencial y filtración de punto muerto



Fuente: Yoon, Seong-Hoon (2015)

Regimen de punto muerto

En esta configuración la recuperación es del 100%, pero parte de esta porción se usa para el lavado a contracorriente. Por consiguiente, en el modo de punto muerto se tiene que el caudal de alimentación es igual al caudal de permeado.

En esta configuración la membrana opera sin una velocidad definida de flujo transversal continuo por lo que los sólidos se acumulan en ella durante todo el ciclo de filtrado. Esta mayor acumulación de sólidos puede generar valores menores de caudal promedio que los que se alcanzan con el filtrado de flujo transversal (Howe et al., 2016). En consecuencia, este modo requiere retrolavado con mayor frecuencia que las filtraciones de flujo cruzado. Además, después de un tiempo, la presión transmembrana se incrementa y el retrolavado se vuelve más difícil, lo que significa que necesita una

limpieza adicional que se denomina retrolavado mejorado químicamente (Al-Mashharawi, 2011).

La mayoría de las plantas de desalinización que usan membranas de microfiltración o ultrafiltración utilizan el régimen de punto muerto porque requiere menos energía en comparación con la alta velocidad del agua de alimentación requerida en el flujo transversal para prevenir incrustaciones que resultan en una mayor pérdida de carga y consumo de energía (Al-Mashharawi, 2011).

Regimen de flujo transversal

Su denominación se debe a que la alimentación se mueve paralelamente a la superficie del filtro y el permeado fluye perpendicular al flujo de alimentación (Figura 2.5). En este caso, el caudal de alimentación es igual al caudal de permeado más el caudal de concentrado, el cual usualmente se recircula.

En la filtración de flujo transversal, el espesor de la capa de sólidos retenidos se puede controlar mediante el efecto de erosión/arrastre (*scouring*), pero se requiere energía adicional para mover el agua de alimentación lo suficientemente rápido. Si el efecto de arrastre y la deposición de partículas están equilibrados, la capa de sólidos apenas crece durante un período prolongado (Yoon, 2015).

El filtrado de flujo transversal requiere una recirculación sustancial del material retenido (el flujo de permeado suele ser del 15 al 20% del flujo de alimentación) (Howe et al., 2016).

Generalmente, el modo de filtración de flujo cruzado se usa para agua con gran cantidad de sólidos suspendidos totales (SST), mientras que el modo de filtración de punto muerto es para agua con baja concentración de SST. Esto se debe a que la filtración en punto muerto no es sostenible sin eliminar los sólidos acumulados, para ello el filtro debe ser reemplazado o retrolavado periódicamente. La filtración en punto muerto puede ser energéticamente eficiente debido a la falta de flujo cruzado, pero propensa a pérdidas de rendimiento debido a la acumulación de sólidos (Yoon, 2015).

2.4.2 Fouling de la membrana

Al-Mashharawi (2011) señala que el *fouling* (ensuciamiento) está fuertemente relacionado con el flujo, ya sea disminuyendo el flujo en el caso de procesos de presión

constante o aumentando la presión transmembrana en el caso de flujo constante. El *fouling* de la membrana se puede dar en dos fases:

- ***Fouling reversible***: Se da por la acumulación de sólidos en la membrana durante un ciclo de filtración o entre intervalos de limpieza.
- ***Fouling irreversible***: Se da durante la vida útil del módulo de membrana, Puede deberse a la acumulación de partículas o incrustaciones coloidales, incrustaciones orgánicas y *biofouling* (primero por fijación y luego por formación de una biopelícula).

2.5 Aspectos fisicoquímicos de la calidad del agua

La importancia de la calidad del agua para riego se debe a su impacto directo en los suelos y, en consecuencia, en los cultivos que se realizarán. Ello se debe a que el suelo recibe aporte de sales durante el riego, cuya concentración en el suelo puede incrementarse cuando el cultivo absorbe el agua y ocurre evaporación en la superficie. Los efectos de la calidad de agua empleada pueden variar de acuerdo a las características del suelo y del cultivo a regar, de las condiciones climáticas, de la intensidad y frecuencia del riego, del manejo de suelo y del cultivo; y del sistema de riego utilizado (Grupo de hidrología subterránea, 2018).

Los valores de los parámetros de calidad de agua para riego son establecidos por el decreto supremo N° 004 – 2017 – MINAM Estándares Nacionales de Calidad Ambiental (ECA); el seguimiento está a cargo de la Autoridad Nacional del Agua. La Tabla 2.2 muestra los valores del ECA para los parámetros a tener en cuenta en este trabajo.

El Decreto Supremo mencionado se adjunta en el Anexo 1.

Tabla 2.2

Parámetros para agua destinada al riego de vegetales

Parámetro	Unidad	ECA
Físicos – Químicos		
Conductividad	μS/cm	2 500
Oxígeno Disuelto (valor mínimo)	mg/L	4
Potencial de Hidrógeno (pH)	Unidad de pH	6,5 – 8,5
Sulfatos	mg/L	1000
Temperatura ¹	°C	Δ 3
Nitritos (NO_2^- -N)	mg/L	10
Inorgánicos		
Arsénico	mg/L	0,1
Hierro	mg/L	5

¹ Variación de 3 grados Celsius respecto al promedio mensual multianual del área evaluada.

Fuente: Ministerio del Ambiente, MINAM (2015)

Elaboración propia

Adicionalmente, se medirá la cantidad de Sólidos Suspendedos Totales (SST), la alcalinidad y la turbidez; por ser parámetros que se utilizan en la interpretación y el control de los procesos de tratamiento de agua y aguas residuales (American Public Health Association, 1998).

A continuación, se señala la importancia de la medición de cada parámetro.

Conductividad

La conductividad es una medida de la capacidad de una solución acuosa para transportar una corriente eléctrica. Esta habilidad depende de la concentración total de los iones presentes y de la temperatura de medida. Las soluciones de la mayoría de los compuestos inorgánicos son conductores relativamente buenos. Mientras que, las moléculas de compuestos orgánicos que no se disocian en solución acuosa conducen muy mal la corriente, si es que lo hacen (American Public Health Association, 1998).

El principal efecto de una elevada conductividad eléctrica del agua en la productividad de los cultivos es la incapacidad de la planta para competir por el agua con los iones en la solución del suelo. Cuanto más alta es la conductividad eléctrica, menos agua hay disponible para las plantas, aunque el suelo pueda parecer húmedo, debido a que las plantas solo pueden transpirar agua "pura", el agua que las plantas pueden utilizar de la solución del suelo disminuye dramáticamente a medida que aumenta la conductividad eléctrica (Bauder, Waskom, & Davis, 2007).

Oxígeno Disuelto

La concentración de oxígeno disuelto (OD) en las aguas naturales y residuales depende de las actividades físicas, químicas y bioquímicas en el cuerpo de agua; y su variación puede deberse al intercambio gaseoso a través de la superficie del agua, la producción fotosintética, el consumo respiratorio y otros procesos (Arroyo, 2012).

Según Arroyo (2012), el oxígeno disuelto es importante en los procesos de fotosíntesis, oxidación-reducción, solubilidad de minerales y la descomposición de materia orgánica. Sin embargo, existe una gran variedad de microorganismos (bacterias, hongos y protozoarios) para los cuales el oxígeno no es indispensable (anaerobios facultativos), otros no lo utilizan, siendo indiferentes a su presencia (aerotolerantes) e incluso, para algunos el oxígeno resulta ser tóxico o inhibitorio para el crecimiento (anaerobios estrictos).

La Asociación Americana de Salud Pública (American Public Health Association, 1998) señala que el análisis de la concentración de OD es una prueba clave en la contaminación del agua y el control del proceso de tratamiento de residuos.

Potencial de Hidrógeno (pH)

La prueba de pH mide el equilibrio entre los iones de hidrógeno positivos (H^+) y los iones hidroxilo negativos (OH^-). Esto indica si el agua es alcalina ($pH > 7$), neutra (7) o ácida (< 7) (DPI Agriculture Water and Irrigation Unit, 2016).

La Asociación Americana de Salud Pública (American Public Health Association, 1998) indica que la medición del pH es una de las pruebas más importantes y de uso frecuente en la química del agua. Esto se debe a que prácticamente todas las fases del suministro de agua y el tratamiento de aguas residuales dependen del pH, por ejemplo, la neutralización ácido-base, el ablandamiento del agua, la precipitación, la coagulación, la desinfección y el control de la corrosión.

En el caso del agua para riego, un pH de 5.5 a 8.5 es adecuado para la mayoría de las plantas. Si el pH es mayor a 8, el calcio en el suelo puede precipitar y puede bloquear los equipos. Si el pH es menor a 6, puede comenzar la corrosión de las tuberías y accesorios de metal. Y si el pH es menor a 4, el agua puede contribuir a la acidez del suelo (DPI Agriculture Water and Irrigation Unit, 2016).

Sulfatos

El sulfato (SO_4^{2-}) está ampliamente distribuido en la naturaleza y puede estar presente en las aguas naturales en diferentes concentraciones (American Public Health Association, 1998). Las grandes concentraciones de sulfato tienen un efecto laxante en algunas personas y, en combinación con otros iones, dan al agua un sabor amargo (Driscoll, Carter, Williamson, & Putnam, 2002). La toxicidad rara vez es un problema, excepto en concentraciones muy altas donde el sulfato alto puede interferir con la absorción de otros nutrientes. El sulfato en el agua de riego tiene beneficios de fertilidad (Bauder, Waskom, & Davis, 2007).

Temperatura

La Asociación Americana de Salud Pública (American Public Health Association, 1998) señala que las lecturas de temperatura se utilizan en el cálculo de diversas formas de alcalinidad, en estudios de saturación y estabilidad con respecto al carbonato de calcio, en el cálculo de la salinidad y en las operaciones generales de laboratorio. Las plantas industriales a menudo requieren datos sobre la temperatura del agua para el uso del proceso o cálculos de transmisión de calor.

Hierro

El hierro (Fe) es el cuarto elemento más abundante en la corteza terrestre. Se encuentra en hematites, magnetita y limonita; así como en componentes importantes para los seres vivos, como la hemoglobina. El hierro es ampliamente utilizado para la elaboración del acero y otras aleaciones.

Generalmente, en las aguas subterráneas el oxígeno disuelto está agotado, por ello cualquier hierro soluble se encuentra en estado ferroso; cuando es expuesto al aire o con la adición de oxidantes, el hierro ferroso se oxida al estado férrico (Fe^{3+}) y puede hidrolizarse para formar un óxido férrico hidratado, insoluble, rojo.

Las concentraciones elevadas de hierro en el agua pueden causar manchas en la plomería, lavandería y utensilios de cocina, y pueden impartir sabores y colores objetables a los alimentos. La concentración recomendada para las aguas de riego de la

Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura es de 5 mg/L (American Public Health Association, 1998).

Sólidos suspendidos totales (SST)

Según el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (2007):

Las aguas crudas naturales contienen tres tipos de sólidos no sedimentables: suspendidos, coloidales y disueltos. Los sólidos suspendidos son transportados gracias a la acción de arrastre y soporte del movimiento del agua; los más pequeños (menos de 0.01 mm) no sedimentan rápidamente y se consideran sólidos no sedimentables, y los más grandes (mayores de 0.01 mm) son generalmente sedimentables. Los sólidos coloidales consisten en limo fino, bacterias, partículas causantes de color, virus, etc., los cuales no sedimentan sino después de periodos razonables, y su efecto global se traduce en el color y la turbiedad de aguas sedimentadas sin coagulación. Los sólidos disueltos, materia orgánica e inorgánica, son invisibles por separado, no son sedimentables y globalmente causan diferentes problemas de olor, sabor, color y salud, a menos que sean precipitados y removidos mediante métodos físicos y químicos.

Alcalinidad

La alcalinidad es un indicador de la capacidad de neutralizar ácidos y una medida cuantitativa de los iones hidroxilo (OH^-) totales o potenciales. La alcalinidad es una consecuencia de la presencia de bicarbonatos (HCO_3^-) y carbonatos (CO_3^{2-}) en el agua. Se mide como mg/L de CaCO_3 equivalente (DPI Agriculture Water and Irrigation Unit, 2016).

Según la Asociación Americana de Salud Pública (American Public Health Association, 1998), los valores medidos también pueden incluir contribuciones de boratos, fosfatos, silicatos u otras bases si están presentes. La alcalinidad en exceso de las concentraciones de metales alcalinotérreos es importante para determinar la idoneidad de un agua para el riego.

Sin embargo, como los bicarbonatos suelen ser el principal contribuyente a la alcalinidad, las altas concentraciones pueden causar problemas que se mencionan a continuación (DPI Agriculture Water and Irrigation Unit, 2016):

- <90 mg/L, bajo riesgo de problemas.
- 90 – 335 mg/L, riesgo moderado de problemas del suelo y reducción del crecimiento de las plantas por el uso prolongado y la acumulación de incrustaciones blancas en plantas regadas por aspersión en climas de alta humedad.
- > 335 mg/L, alto riesgo de problemas del suelo y crecimiento reducido de la planta. Asimismo, se presenta acumulación de incrustaciones que bloquean las tuberías.
- 500 mg/L, puede ser perjudicial para la salud humana. No obstante, el agua desarrolla un sabor desagradable mucho antes de esta concentración.

Turbidez

La turbidez es una expresión de la propiedad óptica que hace que la luz se disperse y absorba en lugar de transmitirse sin cambios en la dirección a través de la muestra (American Public Health Association, 1998). La turbidez en el agua es causada por materia suspendida y coloidal, como arcilla, limo, materia orgánica e inorgánica finamente dividida, plancton y otros organismos microscópicos. La unidad de medida de la turbidez es la unidad nefelométrica de turbidez o NTU por sus siglas en inglés (*Nephelometric Turbidity Unit*).

CAPÍTULO III. MATERIALES Y MÉTODOS

3.1 Recolección de muestra

Se realizó un muestreo de tipo manual en el reservorio del Instituto Nacional de Innovación Agraria - Centro Experimental La Molina. Dicho reservorio almacena agua del río Rímac que ha recibido pre-tratamiento mediante un filtro de rejillas y dos sedimentadores.

Las muestras de agua fueron recolectadas directamente con el envase, lo que permitió tomar nota de cualquier característica especial de la muestra de agua. Para el muestreo se empleó un envase opaco de polietileno que fue enjuagado tres veces con la misma muestra antes de ser llenado. Seguidamente, la muestra fue rotulada indicando la hora y lugar de muestreo; y se tomó nota de los parámetros medidos en campo (Tabla 3.1) de acuerdo a lo establecido en el procedimiento de operación estándar para muestreo de agua (Department of Water, 2009).

3.2 Caracterización del agua de riego

Se evaluaron algunos parámetros fisicoquímicos del agua de riego del Instituto Nacional de Innovación Agraria (INIA). La medición en campo de los parámetros fisicoquímicos fue realizada mediante electrodos e instrumentos apropiados. Los equipos y métodos empleados para la medición en campo y en laboratorio se muestran en la Tabla 3.1 y Tabla 3.2, respectivamente.

Las especificaciones de los instrumentos y equipos empleados para los ensayos se encuentran en el Anexo 2.

Tabla 3.1

Parámetros fisicoquímicos medidos en el punto de muestreo

Parámetro	Unidades	Instrumento de medición
Conductividad	$\mu\text{S/cm}$	Conductivímetro
Oxígeno disuelto	% de saturación	Oxímetro

(continúa)

(continuación)

pH	Unid. de pH	Sensor de pH
Temperatura	°C	Termómetro
Turbidez	NTU	Turbidímetro

Elaboración propia

Tabla 3.2

Parámetros fisicoquímicos a medir en laboratorio

Parámetro	Unidades	Método	Equipo
Alcalinidad	mg/L CaCO ₃	Método fenolftaleína y total	Titulador Digital HACH 16900
Arsénico total	mg/L As	Generación de hidruros y espectroscopia de fluorescencia atómica	Analizador de Arsénico Millennium PSA
Hierro total	mg/L Fe	Método FerroVer	Colorímetro Hach DR890
Sólidos suspendidos totales (SST)	mg/L	SST en agua secados a 103 – 105 °C	Horno digital, balanza analítica, desecador
Sulfatos	mg/L SO ₄	Método SulfaVer 4	Colorímetro Hach DR890

Elaboración propia

3.2.1 Medición de Alcalinidad

Para medir este parámetro se empleó el método 8203 del manual del titulador digital – método fenolftaleína y total (Hach Company, 2013). El instrumento, los reactivos y materiales empleados se muestran en la Figura 3.1.

Figura 3.1

Instrumento, materiales y reactivos para medir alcalinidad



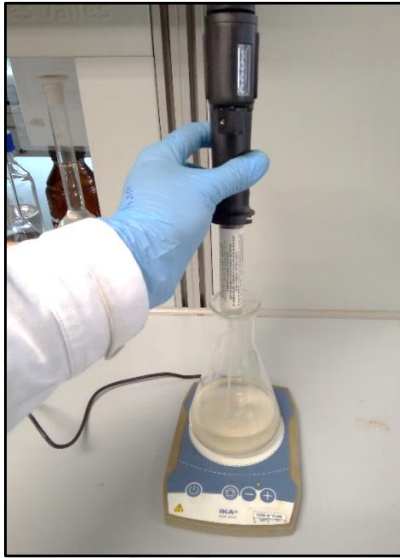
Elaboración propia

Procedimiento

1. Insertar un tubo de dosificación limpio en el cartucho de ácido sulfúrico 1.6 N y luego colocar el cartucho en el Titulador Digital HACH 16900.
2. Girar la perilla del titulador digital hasta expulsar unas cuantas gotas de solución valorada. Resetear el marcador a cero y limpiar la punta.
3. Usar una probeta graduada para separar 100 mL de muestra, luego transferir la muestra un matraz Erlenmeyer limpio de 250 mL.
4. Añadir el contenido de una almohadilla de indicador fenolftaleína en polvo y agitar en círculos para mezclar
5. Si la solución se tiñe de rosado, titular hasta el punto final en que desaparece la coloración. Para ello, ubicar el tubo de dosificación en la solución y agitar el matraz mientras se titula con ácido sulfúrico (Figura 3.2). Anotar el número de dígitos requeridos.

Figura 3.2

Titulación para determinar alcalinidad



Elaboración propia

6. Si la solución es incolora antes de titular con ácido sulfúrico, la alcalinidad F es cero. Proseguir con el paso 7.

7. Equivalencia:

$$\text{Dígitos requeridos} = \frac{mg}{L} CaCO_3$$

8. Añadir el contenido de una almohadilla de indicador Verde Bromocresol - Rojo de Metilo al matraz y agitar en círculos para mezclar.

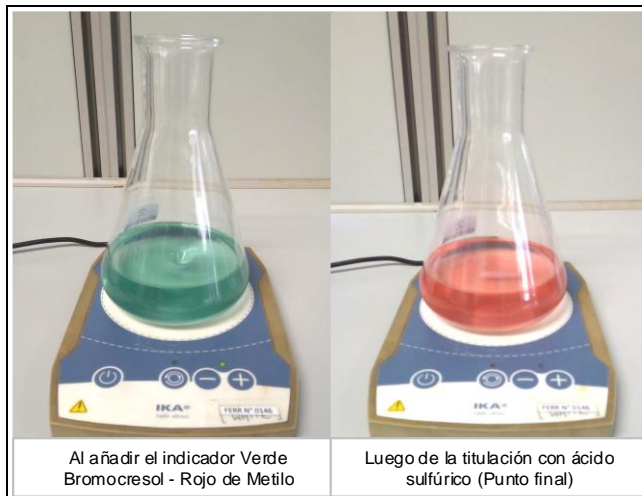
9. Continuar con la titulación con ácido sulfúrico hasta un color rosado claro (Figura 3.3). Anotar el número de dígitos requeridos

10. Equivalencia:

$$\text{Dígitos requeridos} = \frac{mg}{L} CaCO_3 \text{ Alcalinidad Total}$$

Figura 3.3

Coloración del punto final de la titulación para medir alcalinidad



Elaboración propia

3.2.2 Medición de Hierro total

Para medir este parámetro se empleó el método 8008 del manual del colorímetro Hach DR 890 (Hach Company, 2013). Los reactivos a emplear se muestran en la Figura 3.4.

Figura 3.4

Equipo, materiales y reactivos para medir Hierro total



Elaboración propia

Procedimiento

1. Presionar :33 ENTER. La pantalla mostrará mg/L Fe y el ícono ZERO.
2. Llenar una celda limpia de 10 mL con la muestra.
3. Ubicar el blanco en el soporte de la celda. Cubrir bien la celda de muestra con la tapa del instrumento (Figura 3.5).

Figura 3.5

Ubicación de la celda en el colorímetro DR 890



Fuente: Hach Company (2013)

4. Presionar: ZERO. El cursor se moverá a la derecha, luego la pantalla mostrará: 0 mg/L SO₄.
5. Llenar otra celda con 10 mL de muestra.
6. Añadir el contenido de una almohadilla de reactivo en polvo FerroVer a la celda de la muestra. Tapar la celda e invertir varias veces para mezclar. Se verá una coloración anaranjada si hay hierro en la muestra.
7. Presionar: TIMER ENTER. Comenzará un periodo de reacción de 3 minutos.
8. Ubicar la muestra preparada en el soporte de la celda. Cubra bien la celda de muestra con la tapa del instrumento (Figura 3.5).

9. Presionar: READ. El cursor se moverá a la derecha, luego el resultado en mg/L de hierro (Fe) será mostrado.

3.2.3 Medición de Sólidos Suspendedos Totales

El método que se empleó es un método gravimétrico que se basa en la retención de las partículas sólidas en un filtro de fibra de vidrio a través del cual se hace pasar una muestra homogénea de agua; el residuo que queda retenido se seca a 103-105°C. El incremento en el peso del filtro representa la cantidad de sólidos suspendidos totales (Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales [IDEAM], 2007).

El método empleado es según el procedimiento indicado por el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales de Colombia, el cual se indica a continuación.

Preparación de estándares de control de calidad

En un vaso de 250 mL coloque alrededor de 10 gramos de caolín y séquelo a 103-105°C durante dos horas, como mínimo. Deje enfriar dentro de un desecador, hasta temperatura ambiente. Prepare las siguientes muestras como control de calidad:

- Estándar control de concentración 50 mg/L: En un vaso de 250 mL, pese directamente 0.0050 g de caolín y adicione 100 mL de agua destilada medidos con una probeta. Agite para homogeneizar. Peso esperado de residuo seco: 5 mg
- Estándar control de concentración 500 mg/L: Pesar 0,0500 g de caolín para preparar 100 mL de suspensión. Siga el procedimiento indicado anteriormente para el patrón de 50 mg/L. Peso esperado de residuo seco: 50 mg.

Preparación del filtro o disco de fibra de vidrio

Siempre maneje el disco mediante pinzas metálicas y/o microespátula metálica. No manipule el filtro con la mano.

1. Marque cada cápsula de aluminio con un número, de forma consecutiva.

2. Coloque el disco sobre el soporte, con el lado rugoso hacia arriba, aplique vacío.
3. Lave el disco con tres porciones sucesivas de 20 mL de agua destilada, medidos con probeta.
4. Deje el vacío durante 1 minuto adicional para secar el disco.
5. Cuidadosamente y con la ayuda de una microespátula o de unas pinzas, retire el disco y colóquelo dentro de la cápsula de aluminio correspondiente.
6. Seque el conjunto (cápsula de aluminio + disco) en el Horno precalentado a 105°C por 1 h.
7. Lleve el conjunto a un desecador y deje enfriar aproximadamente por 15 minutos, hasta temperatura ambiente.
8. Pese y registre el peso del conjunto
9. Repita el ciclo de secado, enfriado y pesado. Registre el nuevo peso.
 - Mantenga el conjunto en un desecador hasta que se vaya a utilizar.
10. La máxima variación aceptada en el peso del conjunto es de cinco unidades en la cuarta cifra decimal.

Procesamiento de la muestra

1. Retire del desecador el conjunto correspondiente a la muestra que va a procesar. Instale el disco en el equipo de filtración. Haga vacío en el sistema y fije el disco con una pequeña cantidad de agua destilada (Figura 3.6).
2. Agite invirtiendo el recipiente de la muestra varias veces.

3. De la muestra recién agitada, tome rápidamente una alícuota medida con probeta, transfiera cuantitativamente al filtro y registre el volumen total filtrado.
4. Deje el vacío por un minuto adicional para retirar el exceso de humedad del filtro.
5. Retire cuidadosamente el disco con ayuda de una microespátula y colóquelo en la cápsula de aluminio correspondiente.
6. Seque el conjunto en el Horno a 103-105°C, durante 1 hora.
7. Lleve el conjunto a un desecador y deje enfriar aproximadamente por 15 minutos, hasta temperatura ambiente (Figura 3.7 y Figura 3.8).
8. Pese y registre el peso del conjunto.
9. Repita el ciclo de secado, enfriado y pesado. Registre el nuevo peso.
10. La máxima variación aceptada en el peso del conjunto es de cinco unidades en la cuarta cifra decimal.

Procesamiento de datos y cálculo de resultados

1. Efectúe los cálculos por medio de la ecuación:

$$SST = \frac{(A - B) * 1000}{V}$$

Donde:

SST: Sólidos Suspendidos Totales, en mg/L

A: Peso final del conjunto (disco + cápsula de aluminio) con el residuo seco, en mg.

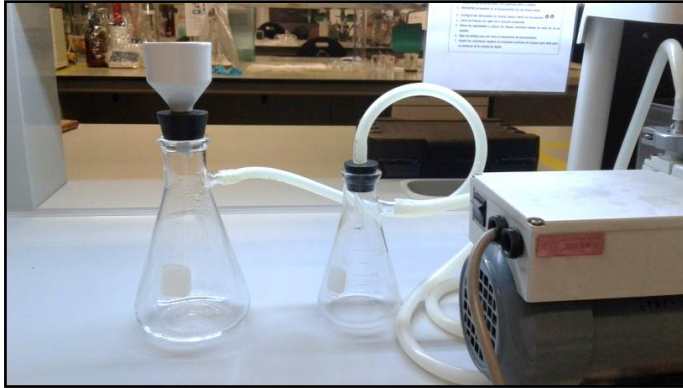
B: Peso inicial del conjunto (disco + cápsula de aluminio), en mg.

V: Volumen de muestra filtrada, en mL.

2. Registre los resultados, con dos cifras significativas.

Figura 3.6

Filtrado de muestra para determinación de SST



Elaboración propia

Figura 3.7

Secado y pesado de las muestras



Elaboración propia

Figura 3.8

Muestras desecadas



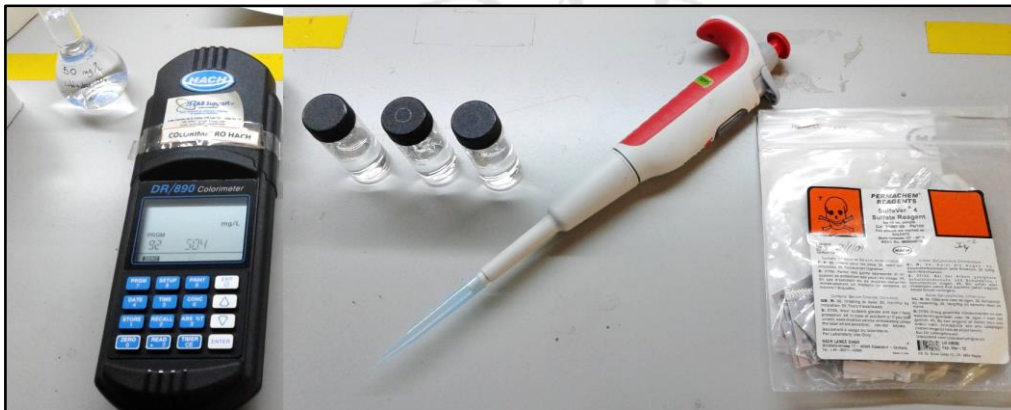
Elaboración propia

3.2.4 Medición de Sulfatos

Para medir este parámetro se empleó el método 8051 (Método SulfaVer) del manual del colorímetro HACH DR 890 (Hach Company, 2013). Los reactivos a emplear se muestran en la Figura 3.9.

Figura 3.9

Equipo, materiales y reactivos para medir sulfatos



Elaboración propia

1. Presionar :91 ENTER. La pantalla mostrará mg/L SO_4^{2-} y el ícono ZERO.
2. Llenar una celda limpia de 10 mL con la muestra. Filtrar muestras con alta turbidez o color, tanto para la muestra como para el blanco.
3. Añade el contenido de una almohadilla de reactivo en polvo SulfaVer a la celda de la muestra. Tapa la celda e invierte varias veces para mezclar. Se verá una turbidez blanca si hay sulfatos en la muestra. (Nota: La precisión no es afectada por el polvo no disuelto)
4. Presionar: TIMER ENTER. Comenzará un periodo de reacción de 5 minutos. Dejar reposar la celda.

5. Luego de la alerta del temporizador, llena una segunda celda con 10 mL de muestra (el blanco).
6. Ubica el blanco en el soporte de la celda. Cubra bien la celda de muestra con la tapa del instrumento.
7. Presionar: ZERO. El cursor se moverá a la derecha, luego la pantalla mostrará: 0 mg/L SO₄²⁻.
8. Dentro de los 5 minutos siguientes a la alerta del temporizador, ubicar la muestra preparada en el soporte de la celda. Cubra bien la celda de muestra con la tapa del instrumento (Figura 3.5).
9. Presionar: READ. El cursor se moverá a la derecha, luego se mostrará el resultado en mg/L de sulfato.

3.3 Preparación del agua modelo

El agua modelo fue preparada a partir de muestras tomadas del reservorio del Instituto Nacional de Innovación Agraria. Este reservorio almacena agua proveniente del río Rímac que ha recibido un pre-tratamiento. Durante la caracterización de la muestra se encontró que la concentración de arsénico total era de 19.6 µg/L, por lo que iones de arsénico fueron añadidos para alcanzar una concentración de 500 µg/L, similar a la concentración promedio de arsénico encontrada en la cuenca del río Locumba (Castro de Esparza, 2006), ubicado en la zona sur del Perú. La adición de iones de arsénico a las muestras (*spiking*) hasta alcanzar la concentración deseada ha sido realizada en investigaciones similares por Hwang et al. (2002), Amy et al. (2000), Eaton et al. (1998) y Boerschke et al. (2002).

Para preparar el agua modelo, se añadió arsénico al agua muestreada hasta alcanzar una concentración de arsénico total de 500 µg/L, constituida por 250 µg/L de cada especie de arsénico. El arsénico añadido fue una mezcla de una solución estándar

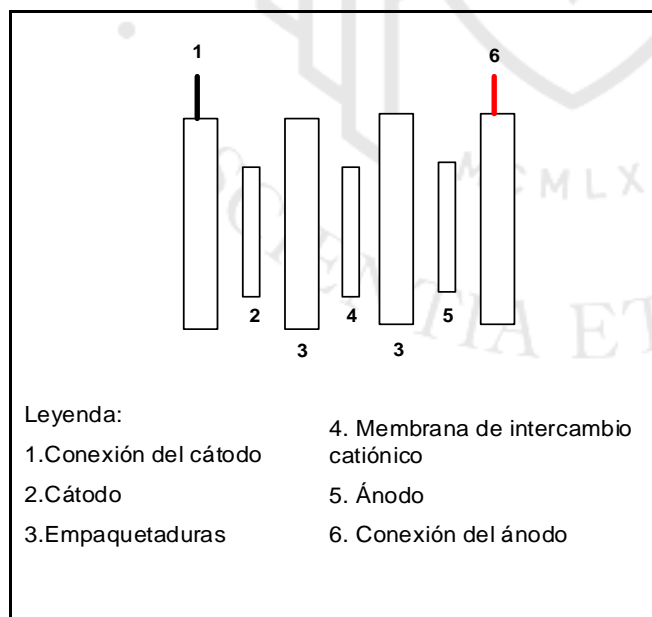
de arseniato de Sodio (Merck 119773 trazable a SRM de NIST H_3AsO_4 en HNO_3 0.5 mol/L) y una solución de arsenito de sodio (Merck 106277, preparado con trióxido de arsénico).

3.4 Producción del ferrato

En esta investigación se empleó el método electroquímico para la producción de ferrato. La solución de ferrato fue obtenida por medio de un reactor electroquímico, el cual posee dos cámaras separadas por una membrana de intercambio catiónico. Los electrodos fueron ubicados verticalmente y paralelos uno de otro (Figura 3.10). Se empleó un cátodo de grafito y un ánodo de acero dulce, soportadas en placas de polimetilmetacrilato (PMMA). Se usó una fuente de poder regulada (BK Precision 1740B) a corriente constante (Figura 3.11). En base a un estudio anterior que evaluó los parámetros de producción de ferrato (Quino-Favero, Eyzaguirre, Mogrovejo, Prieto, & Del Pino, 2018) se consideraron los valores que se indican a continuación. La duración del proceso de electrólisis fue de 4 horas a una densidad de corriente de 100 A/m^2 y el electrolito usado fue una solución concentrada de hidróxido de sodio de 20 mol/L.

Figura 3.10

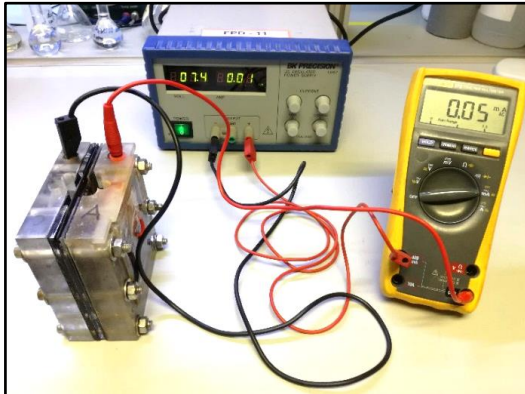
Configuración del reactor de ferrato(VI)



Fuente: Perú Patente N° 8577 (2016)
Elaboración propia

Figura 3.11

Producción de ferrato



Elaboración propia

3.5 Medición de la concentración del ferrato(VI)

La concentración de la solución de ferrato producido(VI) se midió por medio de espectroscopia ultravioleta-visible usando un espectrofotómetro Perkin-Elmer Lambda 40 UV/Vis.

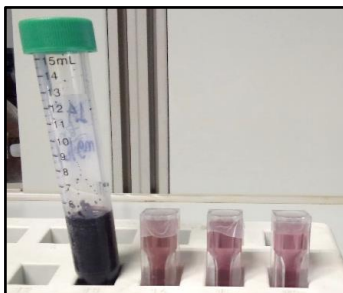
Para obtener la concentración de iones de ferrato(VI) se empleó la siguiente relación:

$$[\text{Ferrato(VI)}] = \frac{\Delta Abs \cdot V_{final}}{\epsilon \cdot L \cdot V_{muestra}}$$

Donde ΔAbs es la diferencia de extinción con el blanco medido a 505 nm, V_{final} es el volumen de la muestra ($V_{muestra}$) más el volumen de solución de hidróxido de sodio añadido para diluir (Figura 3.12), ϵ es el coeficiente molar de extinción de ferrato reportado de $1050 \text{ M}^{-1}\text{cm}^{-1}$ (Stanford, Jiang, & Alsheyab, 2009) y L es la longitud de la celda, en cm.

Figura 3.12

Muestras diluidas de ferrato



Elaboración propia

3.6 Descripción de la prueba de jarras

La prueba de jarras se realiza para determinar los químicos, la dosificación y las condiciones requeridas para lograr resultados óptimos en los procesos de coagulación-floculación. Esta prueba permite evaluar variedad de contribuciones de coagulantes y floculantes usados en el tratamiento de agua y aguas residuales, considerando que todas las pruebas se realizan con la misma agua y las mismas condiciones experimentales. Asimismo, esta prueba sirve para evaluar los efectos de las concentraciones de los coagulantes y floculantes; y el orden en que son añadidos (American Society for Testing and Materials, 2013).

Para la prueba de jarras se emplea un agitador múltiple con variación continua de velocidad (Figura 3.13). Las paletas de agitación deben ser de un material resistente a la corrosión y todas deben tener la misma configuración y tamaño. La base iluminada es útil para observar la formación de flocs. Todas las jarras son de la misma forma y tamaño (American Society for Testing and Materials, 2013). El uso de recipientes cuadrados limita la formación de flujos de vórtices en los que las partículas rotarían en la misma posición en relación con las demás (Howe et al., 2016).

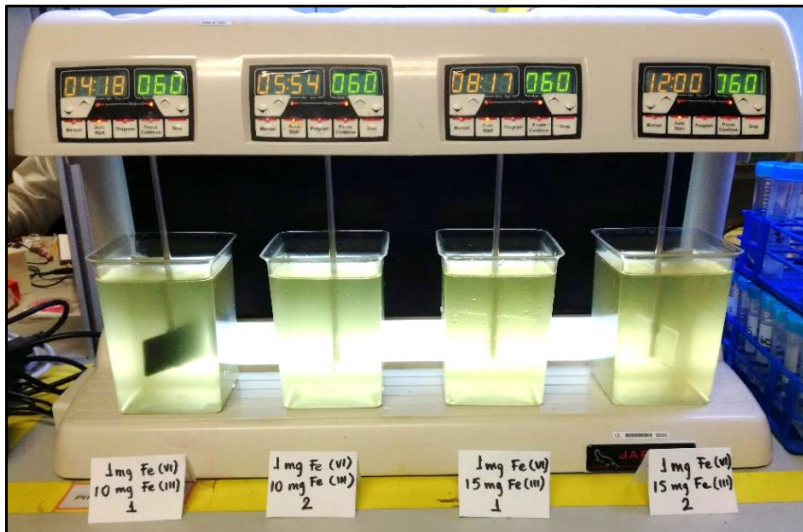
Procedimiento

1. Medir volúmenes iguales de 1000 mL de muestra en cada uno de las jarras. Ubicar los vasos de manera que las paletas queden centradas. Se utilizó un agitador (Jar Tester Platypus) para realizar las mezclas.
2. Arrancar el agitador múltiple a la velocidad de "mezcla rápida" de 200 rpm. Agregar la solución de oxidante y coagulante, según la concentración y secuencia definidos previamente. Mezcla instantánea durante 1 minuto después de las adiciones de productos químicos.
3. Luego, reducir la velocidad según sea necesario al mínimo requerido para mantener las partículas de floc uniformemente suspendidas durante el período de "mezcla lenta". La mezcla lenta dura 15 minutos. Si se usan coagulantes, la velocidad de mezcla es crítica porque la agitación excesiva tiende a romper la formación temprana de flóculos y pueden redispersarse (American Society for Testing and Materials, 2013).

- Después del periodo de agitación lenta, retirar las paletas y proceder con la microfiltración. Luego, medir turbidez, pH y otros parámetros.

Figura 3.13

Configuración de la prueba de jarras



Elaboración propia

Las concentraciones de reactivos para cada jarra fueron 1, 2 y 3 mg/L de ferrato(VI). El ferrato(VI) se encuentra como ion FeO_4^{2-} (Light & Yu, 2005). Para añadir 1 mg de ferrato(VI) a un litro de agua se añadió 0.0217 mL de la solución de ferrato(VI) obtenida en la cámara anódica del reactor, dicho volumen a añadir fue calculado como sigue:

$$10^{-3} g FeO_4^{2-} \times \frac{1 mol FeO_4^{2-}}{119.843 g} \times \frac{L_{solución}}{0.384 mol FeO_4^{2-}} \times \frac{10^3 mL}{L} = 0.0217 mL de solución$$

La solución de ferrato(VI) fue añadida al comienzo de la prueba en una mezcla rápida a 200 rpm durante 1 minuto (gradiente de velocidad de $726 s^{-1}$), luego se continuó con una mezcla lenta a 60 rpm durante 15 minutos (gradiente de velocidad de $119.9 s^{-1}$), con el objeto de permitir las colisiones entre las partículas coloidales.

Como coagulante se empleó una solución de cloruro férrico ($FeCl_3$), el cual “es uno de los agentes coagulantes ampliamente usado en el tratamiento de agua para

consumo y aguas residuales” (Jian & Lloyd, 2002). Para los cálculos se consideraron los iones férricos, los cuales fueron añadidos 5 segundos después de añadir el ferrato(VI). Las concentraciones de iones férricos fueron 3, 6 y 9 mg/L.

Finalmente, para evaluar la remoción de arsénico en las mismas condiciones de pH, en todas las jarras se ajustó el pH a 7 con ácido clorhídrico.

Todas las pruebas de jarra se realizaron por duplicado.

3.7 Microfiltración

Todas las pruebas de microfiltración se realizaron “en línea”, es decir, se omitió la etapa de sedimentación. Konieczny y otros (2009) señalan que realizar la filtración “en línea” permite reducir la dosis del coagulante y la duración del tratamiento del agua. Esto es de especial importancia en el caso de pequeñas estaciones de tratamiento de agua, ya que la superficie requerida por la instalación puede reducirse a un mínimo.

Luego de la mezcla con el ferrato(VI) y el coagulante, se hizo pasar la muestra a través de unos filtros de 0.45 μm de 47 mm de diámetro, empleando para ello una bomba de vacío. En seguida se colectó 12.5 mL del filtrado para analizar la concentración de arsénico remanente. Cada prueba se realizó por duplicado.

3.8 Medición del arsénico

Para medir el arsénico total remanente se empleó el equipo PSA Millennium Excalibur que se basa en la generación de hidruros y espectroscopía de fluorescencia atómica. El detalle de los reactivos requeridos para el análisis se muestra en la Tabla 3.3.

Tabla 3.3

Reactivos empleados en la medición de arsénico total

Reactivo	Características
Solución reductora	0.7% NaBH_4 (m/v) en 0.4% NaOH (m/v)
Blanco/ <i>Carrier</i>	HCl 25% (v/v) con KI y ácido ascórbico
Gas para secado	Aire comprimido
<i>Carrier gas</i>	Argón

Elaboración propia

3.8.1 Preparación de reactivos

Solución reductora

Disolver 7.0 g de borohidruro de sodio (NaBH_4) en 500 mL de agua ultrapura y añadir 4 g de hidróxido de sodio (NaOH). Enrasar con agua ultrapura a 1 L.

Solución yoduro de potasio/ácido ascórbico

Disolver 25 g de yoduro de potasio (KI) y 5 g de ácido ascórbico ($\text{C}_6\text{H}_8\text{O}_6$) en aproximadamente 40 mL de agua ultrapura y enrasar a 50 mL.

Blanco/Carrier

Para cada 1000 mL añadir 250 mL de ácido clorhídrico concentrado y 20 mL de la solución yoduro de potasio/ácido ascórbico, enrasar con agua ultrapura.

Preparación de estándares y muestras

Se prepararon estándares de 25, 50, 75, 100 y 125 $\mu\text{g/L}$ de una mezcla de As(III) y As(V) en proporción 1:1. Se emplea una solución estándar de arseniato de Sodio (Merck 119773 trazable a SRM de NIST H_3AsO_4 en HNO_3 0.5 mol/l) y una solución estándar preparada de arsenito.

El estándar para arsenito se preparó de un estándar primario de trióxido de arsénico. Para ello, se disolvió 989.2 mg de As_2O_3 (base de metal traza 99.995%, Aldrich) con unos cuantos pellets de NaOH en aproximadamente 100 mL de agua ultrapura, luego se neutralizó la solución usando HCl y un electrodo de vidrio; se enrasó a un volumen de 1000 mL para obtener una solución 0.01 mol/L As(III) .

Las muestras a analizar se diluyeron 1:4, para ello se añadió 6.25 mL del agua proveniente del test de jarras, 12.5 mL de HCl concentrado, 0.5 mL de la solución yoduro de potasio/ácido ascórbico, se mezcló y se dejó reposar durante 30 minutos. Finalmente, se enrasó a 25 mL con agua ultrapura.

Para la curva de calibración los estándares fueron leídos tres veces cada uno, mientras que las muestras fueron leídas dos veces.

La eficiencia de remoción del arsénico del agua fue calculada con la siguiente fórmula:

$$\text{Eficiencia de remoción}(\%) = \frac{(\text{Concentración}_{\text{inicial}} - \text{Concentración}_{\text{final}})}{\text{Concentración}_{\text{inicial}}}$$

3.9 Evaluación del costo de tratamiento

Como se mencionó en el punto 3.5, el tratamiento empleado consta de tres etapas secuenciales: la adición de ferrato, la coagulación con cloruro férrico y la microfiltración. El costo de consumibles para la producción del ferrato fue calculado, mientras que el precio del cloruro férrico fue obtenido del precio de mercado a través de una cotización (Anexo 6). El costo de la microfiltración considera el consumo de energía eléctrica es realizado por la electrobomba que alimenta a la unidad de filtración tangencial. A partir de esos costos, se calculó el costo de tratamiento de 1 m³ de agua, tomando como modelo el agua pre-tratada proveniente del reservorio del INIA – Centro Experimental La Molina.

Para la producción de ferrato, los consumibles empleados son el Hidróxido de Sodio 20 mol/L, la placa de hierro y la energía eléctrica. Se calculó primero la cantidad requerida de cada consumible para producir un kilogramo de ferrato. Para determinar los costos de los consumibles, se determinó el consumo de cada uno durante el ciclo de producción de 4 horas a 250 mA de corriente constante.

El consumo del electrolito (hidróxido de sodio) durante un ciclo de producción está determinado por el volumen de la cámara anódica que es constante. El consumo de hierro se calculó empleando la Ley de Faraday según la siguiente fórmula:

$$\text{Consumo de Fe (g)} = \frac{Mit}{zF}$$

Donde M es la masa molar del hierro (g/mol), I es la corriente aplicada (A), t es el tiempo (s), z es el número de electrones transferidos (igual a 2, considerando el mínimo número de electrones que se desprenden del ánodo) y F es la constante de Faraday igual a 96485 C/mol.

El consumo de energía eléctrica se calculó empleando las mediciones de voltaje realizadas cada hora durante el ciclo de producción de 4 horas. Para ello, se calculó primero la energía consumida en kWh mediante la integración del área debajo de la curva Watt-hora.

CAPÍTULO IV. RESULTADOS

4.1 Producción de ferrato(VI)

Cálculo de la concentración de ferrato

Luego de leer la muestra diluida de la solución de ferrato obtenida en el reactor, se tuvo que los valores promedio de absorbancia netos medidos a 505 nm fueron de 1.6415 y 1.5725 para el primer y segundo ciclo de producción, respectivamente. La dilución empleada, en ambos casos fue de 10:2510. De la ecuación descrita en el apartado 3.4, se tiene para el cálculo de la concentración de la solución de ferrato del primer ciclo de producción:

$$[\text{Ferrato(VI)}] = \frac{\Delta Abs. V_{final}}{\epsilon \cdot L \cdot V_{muestra}} = \frac{1.6415 \times 2510 \mu\text{L}}{1050 \text{ M}^{-1} \text{cm}^{-1} \times 1 \text{ cm} \times 10 \mu\text{L}} = 0.392 \text{ M}$$

Se realizaron dos ciclos de producción de ferrato. Luego de una electrólisis de 4 horas a una densidad de corriente de 100 A/m², la concentración obtenida de ferrato(VI) fue de 0.392 mol/L y 0.376 mol/L en el primer y segundo ciclo, respectivamente. La concentración de ferrato promedio fue de 0,384 mol/L.

4.2 Resultados de la caracterización inicial

Se realizaron las mediciones según la metodología previa. Los resultados de los parámetros medidos en campo se muestran en la Tabla 4.1. La temperatura del agua muestreada fue de 20.8°C.

Durante el muestreo se tomó nota de las características de la fuente de agua. Se observó que había presencia de grasa en los contornos del reservorio, como puede observarse en la Figura 4.1. Asimismo, se observó una coloración verdosa del agua, debido a la presencia de algas (Figura 4.2).

Figura 4.1

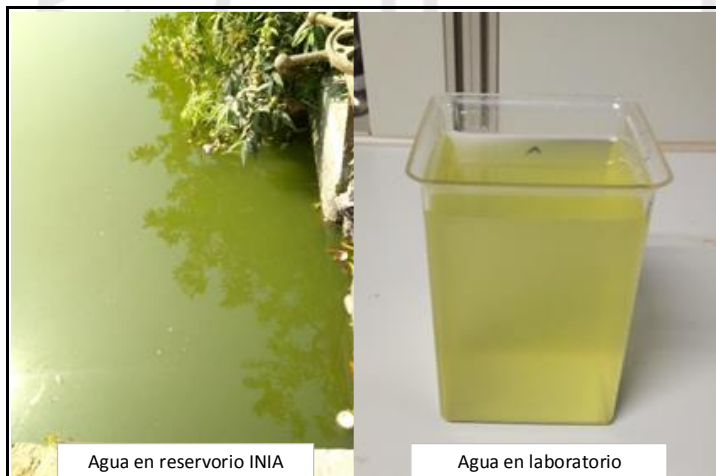
Presencia de grasa en el reservorio del INIA



Elaboración propia

Figura 4.2

Coloración que indica la presencia de algas



Elaboración propia

De lo observado en la Figura 4.2, cabe mencionar que la eutrofización del agua de superficie es un problema mundial, y su significancia se está incrementando. La eutrofización es causada por un ingreso excesivo de nutrientes, especialmente fosforo, que estimula el indeseable crecimiento de algas. El masivo crecimiento de algas puede ser causa de olores y sabores desagradables, algunos tipos de alga causan obstrucción de los filtros e incluso pueden penetrar el filtro, lo que conlleva al deterioro de la calidad del agua. Asimismo, las algas son precursoras de los subproductos de desinfección y su

remoción del proceso de tratamiento de agua es difícil debido a su pequeño tamaño y baja gravedad específica (Ma & Liu, 2002).

Tabla 4.1

Resultados de los parámetros medidos en campo

Parámetro	Valor medido	ECA-Categoría 3	Unidades
pH	9.84	6,5 – 8,5	Unid. de pH
Oxígeno disuelto	8.32	4	mg/L
Conductividad	504	2500	μS/cm
Turbidez	41,53	No indica	NTU

Fuente: Ministerio del Ambiente (2015)
Elaboración propia

La Tabla 4.1, muestra que un valor del pH ligeramente alcalino y es superior al valor que indica el Estándar Nacional de Calidad Ambiental-ECA para Agua, categoría 3, subcategoría D1 (Riego de vegetales). Mientras que los demás parámetros sí están dentro de los estándares.

Los resultados de los parámetros medidos en laboratorio se muestran en la Tabla 4.2, en la que se observa los parámetros cumplen con los valores del estándar mencionado.

Tabla 4.2

Resultados de los parámetros medidos en laboratorio

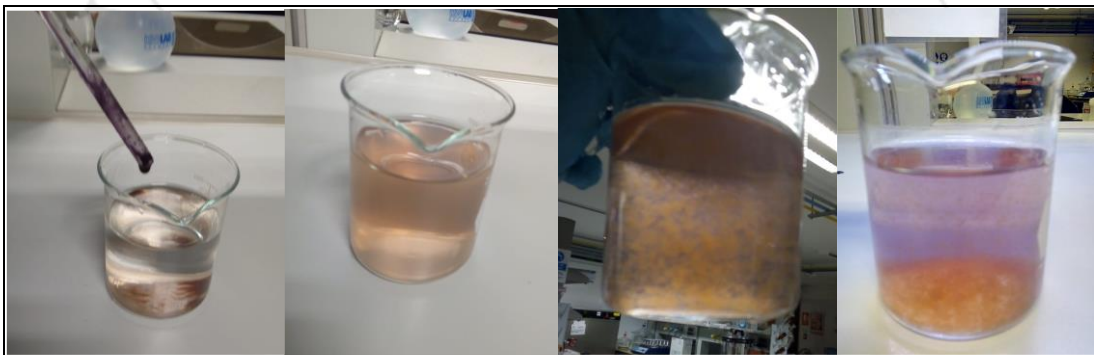
Parámetro	Valor	ECA - Categoría 3	Unidades
Sólidos suspendidos totales	50	No indica	mg/L
Sulfatos	179.7	1000	mg/L SO ₄
Alcalinidad	27	No indica	mg/L CaCO ₃
Hierro total	0.02	5	mg/L Fe
Arsénico total	19,6	100	μg/L

Fuente: Ministerio del Ambiente (2015)
Elaboración propia

4.3 Resultados del tratamiento con iones ferrato(VI) y cloruro férrico

Se evaluó el desempeño del ferrato(VI) como coagulante, ya que luego de actuar como oxidante, se reduce a óxidos o hidróxidos férricos. El proceso de coagulación permite eliminar el As(V) inorgánico disuelto en el agua mediante la adsorción y co-precipitación del As(V) a un precipitado de hidróxido férrico. El proceso de reducción del ferrato(VI) se observa en la Figura 4.3, en ella puede apreciarse que la solución de ferrato(VI) era inicialmente de color púrpura, la cual rápidamente se volvió amarillenta a medida que el ferrato(VI) se descompone. Asimismo, se observa la formación de algunos precipitados amarillos en el fondo del vaso de precipitados.

Figura 4.3
Cambio de color durante la reducción del ferrato(VI)



Elaboración propia

Luego de que el ferrato(VI) haya cumplido su función oxidante/coagulante, es necesario retener los flóculos formados para poder usar el agua en el riego, esta separación se realizó mediante la microfiltración.

Se investigó la remoción de la mezcla de As(V) y As(III), con una concentración inicial de arsénico total de 500 $\mu\text{g/L}$, es decir 250 $\mu\text{g/L}$ de cada especie de arsénico. El tratamiento empleado estuvo conformado de tres etapas secuenciales: la oxidación con ferrato, la coagulación con cloruro férrico y la microfiltración en 0.45 μm .

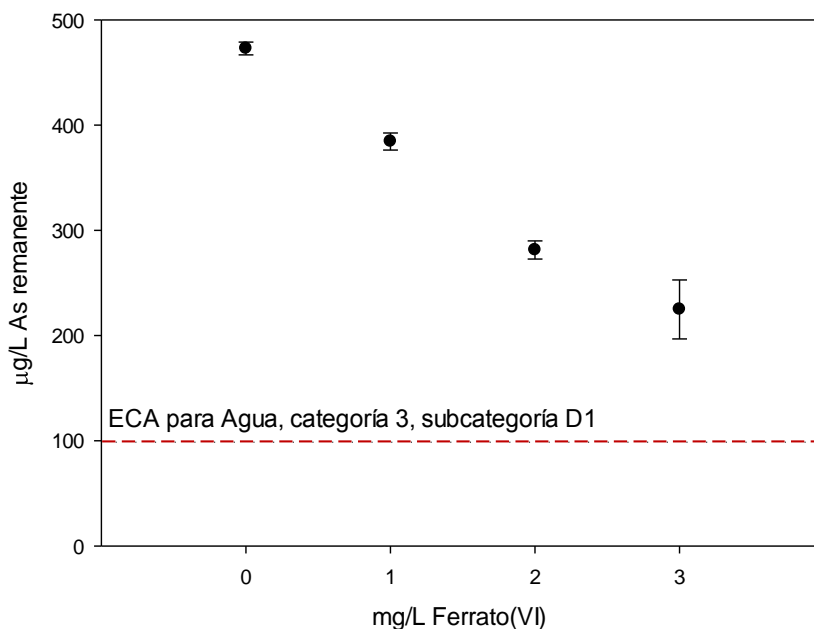
Inicialmente, solo se añadieron iones ferrato(VI) en solución a las muestras de agua a procesar en las pruebas de jarras seguidas de microfiltración. La solución de ferrato(VI) fue añadida al agua de riego en tres concentraciones distintas 1, 2 y 3 mg/L . No se evaluaron mayores concentraciones de ferrato debido al incremento del pH del agua, considerando además que el pH inicial del agua ya era alcalino (pH 8.9). Los

resultados de la remoción de arsénico empleando solamente iones ferrato(VI) en solución se muestran en la Figura 4.4. Se observa que a medida que se incrementa la concentración del ferrato(VI) añadido, se incrementa la remoción de arsénico. Sin embargo, la concentración de arsénico remanente para la mayor dosis de ferrato ($224.8 \pm 28.1 \mu\text{g/L As}$) no cumple con los estándares de calidad ambiental para agua de riego, que establece $100 \mu\text{g/L As}$.

Los resultados detallados del experimento se encuentran en el Anexo 3.

Figura 4.4

Concentración de arsénico remanente después del tratamiento con iones ferrato(VI)



Elaboración propia

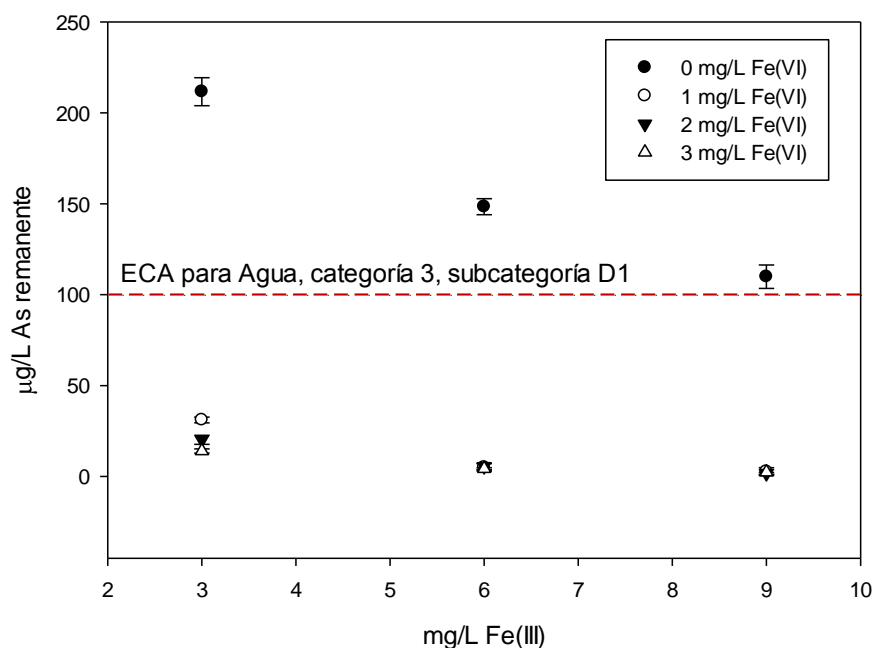
Posteriormente, con la finalidad de mejorar el proceso de coagulación, además de los iones ferrato se añadieron iones férricos en solución en diferentes concentraciones (3, 6 y 9 mg/L). Para la adición de los iones férricos, se tuvo en cuenta que Halder y otros (2018) encontraron que se logró una remoción del 90% de arsénico cuando emplearon la relación molar Fe:As de 12:1. En esta investigación, la relación molar Fe:As para la mayor dosis Fe(VI)/Fe(III) fue de 27:1, mientras que para la menor dosis fue de 9:1.

Los resultados del arsénico remanente luego de añadir Fe(VI) y Fe(III) al agua de riego se muestran en la Figura 4.5. Se encontró que cuando solamente se emplean los

iones férricos, luego de añadir la mayor dosis que corresponde a 9 mg/L Fe(III), la concentración del arsénico remanente ($109.8 \pm 6.5 \mu\text{g/L As}$) sigue siendo mayor al ECA de agua para riego. Sin embargo, cuando los iones férricos son añadidos luego de los iones ferrato, en todos los casos se consigue reducir la concentración de arsénico por debajo del ECA para la categoría 3.

Figura 4.5

Concentración de arsénico remanente empleando iones ferrato(VI) y férrico



Elaboración propia

En la Figura 4.5 se observa que el uso de ferrato seguido de cualquier dosificación de iones férricos permite alcanzar el ECA en todos los ensayos.

Se encontró que cuando solamente se añaden iones férricos en las dosis de 3, 6 y 9 mg/L Fe(III), el arsénico remanente luego de la microfiltración es de 211.6 ± 7.7 , 148.4 ± 4.4 y $109.8 \pm 6.5 \mu\text{g/L}$, respectivamente. Siendo estas concentraciones mayores a las que establece el ECA para Agua, categoría 3, subcategoría D1 (Agua para riego de vegetales).

Sin embargo, al añadir 1 mg/L de ferrato seguido de iones férricos y microfiltración se consigue reducir la concentración de arsénico a 31.1 ± 1.6 , 5 ± 2.1 y $2.7 \pm 2.2 \mu\text{g/L}$, para cada dosificación de iones férricos. Todas estas concentraciones

están dentro de lo que establece el ECA. Esta mejora en la remoción de arsénico empleando iones ferrato se debe principalmente a la oxidación del arsénico por el ferrato, lo que produce que el arsénico oxidado este presente como un anión facilitando la combinación con los cationes férricos para formar arseniato ferroso poco soluble. Asimismo, después de la reducción del ferrato a férrico; la hidrólisis de los iones férricos produce oxihidróxidos a escala nanopartícula cuya superficie actúa como adsorbente mejorado del As(V) (Prucek et al., 2013). Por otro lado, la oxidación por ferrato podría cambiar las propiedades de la superficie de los sólidos suspendidos y del arsénico, haciendo que sean fáciles de remover a través de coagulación y precipitación (Jiang, Durai, Winzenbacher, Petri, & Seitz, 2014).

Luego de comparar las combinaciones de dosis Fe(VI)/Fe(III) en las que se consigue obtener una concentración de arsénico remanente menor a 100 µg/L, se considera la adición de 1 mg/L Fe(VI) seguida de 3 mg/L Fe(III) como la dosificación más apropiada (Tabla 4.3), con la que se obtiene una concentración de arsénico remanente de 31.1 ± 1.6 µg/L.

Esta dosificación permite añadir la menor cantidad de iones de hierro al agua, mientras se añade la menor dosis de ferrato. Utilizar una menor dosificación de iones ferrato(VI) es importante debido a la naturaleza fuertemente alcalina de la solución que los contiene y que tiene como efecto no deseable el aumento excesivo del pH del agua.

Aunque es preferible remover el arsénico a concentraciones mucho menores de lo que establece el ECA, ya que el arsénico se acumula y persiste en el suelo (Khan, Cao, Zheng, Huang, & Zhu, 2008), esto requiere mayores dosificaciones Fe(VI)/Fe(III) lo que conduce a un aumento de los iones (sodio y hierro) que originalmente contenía el agua.

Asimismo, con esta dosis, la cantidad de hierro total añadido es de 3,466 mg/L. Esta dosificación permite añadir la menor cantidad iones al agua mientras se consigue una mejor remoción que con otra dosificación con hierro total comparable que no emplea el ferrato. La concentración de hierro que establece el ECA es de 5 mg/L, dato que se debe tener en cuenta si se considera añadir mayores concentraciones de ferrato y férrico, ya que posteriormente los iones añadidos han de ser retirados. Jiang et al. (2014) considera que la obtención de buenos resultados a bajas dosis debería atraer el interés de las industrias del agua, ya que esto primero reduce el consumo de químicos, en segundo lugar, reduce la producción de lodos; y finalmente, reduce los costos operativos.

Tabla 4.3

Dosificaciones con Fe(VI)/Fe(III) que remueven el arsénico a concentraciones menores a las que establece el ECA para agua de riego

Fe (VI) mg/L	Fe(III) mg/L	Promedio Arsénico remanente µg/L	mg/L Fe Total	mmol/L Fe Total	Ratio molar Fe:As	Eficiencia de remoción %
1	3	31.1 ± 1.6	3,466	0,062	9	93,9
2	3	20.1 ± 2.5	3,932	0,070	10	96,0
3	3	14 ± 1.2	4,398	0,079	12	97,2
1	6	5 ± 2.1	6,466	0,116	17	99,0
2	6	5.5 ± 1.8	6,932	0,124	18	98,9
3	6	4.2 ± 0.6	7,398	0,132	20	99,2
1	9	2.7 ± 2.2	9,466	0,170	25	99,5
2	9	1.7 ± 0.5	9,932	0,178	26	99,7
3	9	2.3 ± 1.4	10,398	0,186	27	99,5

Elaboración propia

Para verificar estadísticamente si la dosificación de iones ferrato(VI) y de iones férricos (variables independientes) explican la cantidad de arsénico remanente (variable dependiente) se empleó una regresión multivariable, cuyos coeficientes se muestran en la Tabla 4.4. Según los valores de significancia para t-test, en ambos casos, menor a 0.05, se tiene que cada variable independiente se relaciona de forma significativa con la variable dependiente. Por otro lado, de la Tabla 4.5 se observa que según el valor del indicador Durbin-Watson, hay un efecto en el hecho de que la repetición de los ensayos haya sido realizado en momentos distintos, lo que podría ser explicado por el uso de diferente material, la variación de la temperatura y el muestreo del agua.

Tabla 4.4

Coefficientes de la regresión multivariable

Modelo	Coeficientes no estandarizados		Coeficientes estandarizados	t	Sig.
	B	Desv. Error	Beta		
(Constante)	347,250	48,086		7,221	0,000
mg/L Fe(VI)	-55,200	20,053	-0,417	-2,753	0,016
mg/L Fe(III)	-32,100	6,684	-0,727	-4,802	0,000

Elaboración propia

Tabla 4.5

Resumen del modelo de regresión

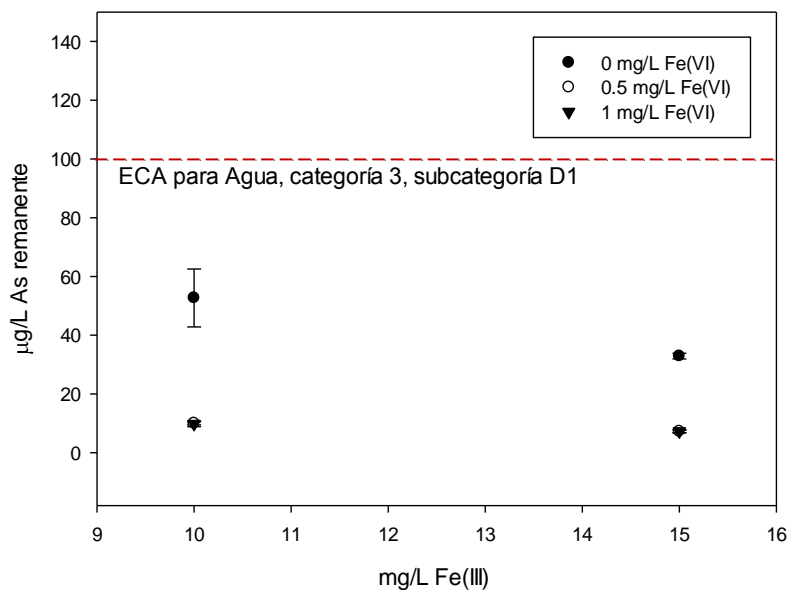
R	R cuadrado	R cuadrado ajustado	Error estándar de la estimación	Durbin-Watson
0,838	0,702	0,656	89,68123	0,558

Elaboración propia

Se realizaron pruebas adicionales para evaluar la reducción de concentración de arsénico del agua modelo para riego. Las dosis empleadas de ferrato fueron de 0.5 y 1 mg/L, mientras que las dosis evaluadas de férrico fueron 10 y 15 mg/L (Anexo 4). Los resultados se muestran en la Figura 4.6. A partir de este experimento, se demuestra que es posible alcanzar concentraciones de arsénico remanente por debajo de lo que establece el ECA de interés solamente empleando iones férricos, pero es necesario utilizar mayores concentraciones de los mismos; con lo que se confirma la importancia del uso de iones ferrato para reducir el uso de iones férricos en el proceso de coagulación. A su vez, a menor cantidad de coagulante añadido se reduciría la generación de lodos en esta etapa del tratamiento.

Figura 4.6

Concentración de arsénico remanente con otras dosis Fe(VI)/Fe(III)



Elaboración propia

4.4 Resultados de la caracterización final

Para realizar la caracterización del agua luego del tratamiento, se consideró solamente el agua de la jarra con la mejor dosis encontrada, es decir, aquella a la que se añadió 1 mg/L Fe(VI), seguido de 3 mg/L de Fe(III) y microfiltración. Los resultados de la caracterización final se muestran en la Tabla 4.6

Tabla 4.6

Resultados de la caracterización final

Parámetro	Valor	ECA - Categoría 3	Unidades
pH	7.07	6,5 – 8,5	Unid. de pH
Oxígeno disuelto	5.21	4	mg/L
Conductividad	633	2500	µS/cm
Turbidez	<0.1	No indica	NTU
Sulfatos	178.4	1000	mg/L SO ₄
Alcalinidad	22	No indica	mg/L CaCO ₃
Hierro total	0.04	5	mg/L Fe

Elaboración propia

Se observa que los valores de los parámetros se han reducido respecto a los valores medidos en la caracterización inicial. En todos los casos se cumple con el Estándar Nacional de Calidad Ambiental-ECA para Agua, categoría 3, subcategoría D1 (Riego de cultivos de vegetales). Para el oxígeno disuelto, la norma establece 4 mg/L como valor mínimo, por lo que también se estaría cumpliendo con ese parámetro.

Por otro lado, luego del tratamiento se observa que la turbidez se reduce notoriamente (Figura 4.7). Así, luego del tratamiento empleado se encontró que el valor de la turbidez es menor a 0.1 NTU. Como comparación se puede tomar en cuenta el valor aceptable para agua potable que debe ser inferior a 5 NTU.

Se ha encontrado que el pretratamiento con oxidantes puede mejorar el proceso de coagulación y específicamente la remoción de algas y otro material particulado en las subsiguientes etapas del tratamiento. Se sugiere que el mecanismo común para la remoción de algas mediante un oxidante es la destrucción de la estructura de las algas en diversas formas a través de diferentes formas de oxidación. Una investigación fue

realizada para evaluar la efectividad de la pre oxidación con ferrato(VI) en la remoción de algas, encontraron que el tratamiento previo con ferrato(VI) dio como resultado una reducción de la dosis de alumbre requerida para causar una coagulación eficiente para la eliminación de algas. Tras la oxidación con ferrato(VI), las células se inactivaron y algunos componentes intracelulares y extracelulares se liberaron en el agua, lo que puede ser útil para la coagulación mediante un efecto puente (Ma & Liu, 2002).

Figura 4.7

Remoción de algas luego del tratamiento



Elaboración propia

Jiang et al. (2014) reportaron que el ferrato(VI) se desempeñaba mejor que otros coagulantes para reducir la turbidez. Ellos demostraron que usar dosis muy bajas de ferrato (0.2 mg/L como Fe) puede tener un desempeño superior a otros coagulantes. Mencionan que solo el alto potencial redox no podría explicar el desempeño superior del ferrato(VI), y que debe haber otras razones detrás de ese fenómeno. Primero, la oxidación por ferrato(VI) puede que cambie las propiedades de la superficie de los sólidos suspendidos y contaminantes orgánicos haciendo que queden listos para ser removidos mediante coagulación y precipitación. En segundo lugar, los subproductos de la oxidación del ferrato(VI) son iones férricos o hidróxidos férricos que son recursos coagulante básicos. Por lo tanto, el ferrato(VI) también desempeña coagulación después de degradar la materia orgánica y los microorganismos (Jiang et al., 2014).

4.5 Análisis de costos

4.5.1 Costo de producción de ferrato

Electrolito

El consumo de electrolito para un ciclo de producción está determinado por el volumen de la cámara anódica de 7.5 mL. La presentación comercial para el electrolito es de Hidróxido de Sodio al 50%.

$$\text{Consumo de electrolito} = 7.5 \text{ mL NaOH} \times \frac{1.52 \text{ g}}{\text{mL}} = 11.4 \text{ g de NaOH al 50\%}$$

Placa de hierro

El consumo del ánodo de hierro durante la electrólisis del ciclo de producción fue calculado mediante la Ley de Faraday. Se calculó el consumo de hierro en gramos durante el ciclo de producción a corriente constante de 250 mA durante cuatro horas.

$$\text{Consumo de hierro} = \frac{\frac{55.845 \text{ g Fe}}{\text{mol Fe}} \times 0.250 \text{ A} \times 14400 \text{ s}}{2 \times \frac{96485 \text{ C}}{\text{mol}}} = 1.042 \text{ g Fe}$$

Energía eléctrica

El reactor de ferrato trabaja por lotes a corriente constante de 250 mA durante cuatro horas. La energía consumida que fue medida cada hora y se muestra en la Tabla 4.7. El cálculo de watts consumidos se realizó respecto al voltaje promedio.

Por otro lado, de la Figura 4.8 puede calcularse el área debajo de la curva que representa el total de energía consumida en kWh.

Tabla 4.7

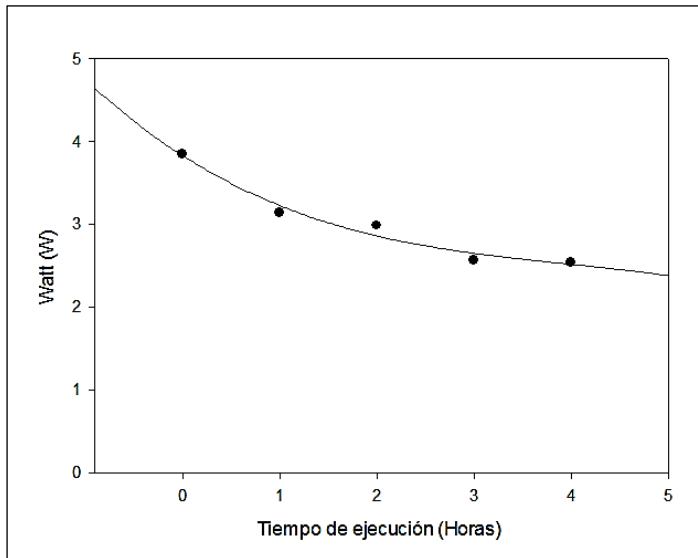
Energía consumida a corriente constante

Hora	Ciclo 1 Voltaje(V)	Ciclo 2 Voltaje(V)	Promedio Voltaje(V)	Intensidad (A)	Watt (W)
0	16.20	14.60	15,40	0,25	3,85
1	11.9	13.2	12,55	0,25	3,14
2	11	12.9	11,95	0,25	2,99
3	10.7	9.8	10,25	0,25	2,56
4	10.5	9.8	10,15	0,25	2,54

Elaboración propia

Figura 4.8

Energía consumida durante la producción de ferrato(VI)



Elaboración propia

La ecuación de la curva obtenida tiene un R^2 de 0.9715, y es como sigue:

$$y = -0,0135x^3 + 0,1598x^2 - 0,7507x + 3,8284$$

Se integra el área bajo la curva de dicha ecuación y se obtiene que se consumieron en promedio 0,0119 kWh durante las cuatro horas de producción.

Costo total de consumibles

Con la información anterior del consumo de cada consumible y la información de los precios de cada consumible que se muestran en la Tabla 4.8, se calculó el costo total de los consumibles para la producción de ferrato (Tabla 4.9).

Tabla 4.8

Precios de consumibles para cada ciclo de producción

Consumible	Precio S/.	Unidad
NaOH al 50%	2.47	S/kg NaOH
Acero A36	2,81	S/kg
Energía eléctrica	0,2705	S/kWh

Elaboración propia

Tabla 4.9

Costo total de consumibles para cada ciclo de producción

NaOH S/.	Energía S/.	Hierro S/.	Costo Total S/.
0,0282	0,0032	0,0029	0,0343

Elaboración propia

Costo por kilogramo de ferrato

Teniendo en cuenta que la concentración promedio de ferrato obtenida en la cámara anódica (7.5 mL) es de 0,384 mol/L, se calculará el costo por kilogramo de ferrato.

$$\frac{0.384 \text{ mol } FeO_4^{2-}}{L} \times 7.5 \times 10^{-3} L \times \frac{119.843 \text{ g } FeO_4^{2-}}{\text{mol } FeO_4^{2-}} = 0.3451 \text{ g } FeO_4^{2-}$$

Por lo tanto, el costo total por kilogramo es:

$$\frac{0.0343 \text{ S/.}}{0.3451 \text{ g } FeO_4^{2-}} \times \frac{1000 \text{ g}}{1 \text{ kg}} = 99.49 \frac{\text{S/.}}{\text{kg}}$$

Costo de tratamiento

Se calculó el costo de tratamiento para un metro cúbico de agua. Se empleó agua pre-tratada que fue tomada del reservorio del INIA–Centro Experimental La Molina. Las etapas de tratamiento consideradas para el análisis de costo fueron la oxidación con ferrato, la coagulación con cloruro férrico y la microfiltración, empleando para esta última operación una unidad de flujo transversal. Los cálculos se realizaron teniendo en cuenta que las mejores dosis encontradas para las condiciones de estudio son de 1 mg de ferrato(VI) seguido de 3 mg de hierro como cloruro férrico y microfiltración para un litro de agua.

Se calculó primero la cantidad requerida de los consumibles: ferrato, cloruro férrico al 40% y energía eléctrica.

Energía eléctrica

El consumo de energía eléctrica es realizado por la electrobomba que alimenta a la unidad de filtración tangencial, por lo que se calculará cuánto tiempo de funcionamiento se

requiere para tratar un metro cúbico de agua. El caudal del filtrado, según las especificaciones del filtro de membrana, su caudal es de 1.014 m³/h.

$$\text{Tiempo de funcionamiento de electrobomba} = 1 \text{ m}^3 \times \frac{h}{1.014 \text{ m}^3} = 0.986 \text{ h}$$

Será necesario que la electrobomba, que alimenta al filtro de membrana, trabaje 0.986 horas para obtener un m³ de permeado. Según las características del motor de la bomba que se muestran en la Tabla 5.3, se calculó el consumo de energía requerido.

$$0.5 \text{ HP} \times 745.9 \frac{W}{\text{HP}} \times \frac{1 \text{ kWh}}{1000 \text{ W}} \times 0.986 \text{ h} = 0.368 \text{ kWh}$$

Cálculo del costo de tratamiento para un metro cúbico de agua

El costo de los consumibles necesarios para tratar un metro cúbico de agua se muestran en la Tabla 4.10. El costo del ferrato se calculó en el punto anterior, el precio del cloruro férrico al 40% está indicado en una cotización adjunta en el Anexo 6 y el costo de la energía eléctrica proviene del tarifario adjunto en Anexo 7.

De los cálculos realizados para el balance de materia tenemos que, para tratar 1 L de agua, se requiere 1 mg de ferrato y 1.524 x 10⁻⁵ L FeCl₃ al 40%.

Tabla 4.10

Costo de consumibles para un metro cúbico de agua

Consumible	Cantidad requerida	Unidad de cantidad	Precio	Unidad de precio	Costo Total S/.
Ferrato(VI)	1	g	99,49	S/./kg	0,10
Cloruro férrico al 40%	15,24	mL	4,851	S/./L	0,07
Energía eléctrica bomba	0,368	kWh	0,2705	S/./kWh	0,10
					0,27

Elaboración propia

Se tiene que el costo total de consumibles para tratar un metro cúbico de agua es de S/0,27, el cual comprende a las etapas de oxidación con ferrato, la coagulación con cloruro férrico y la microfiltración.

CAPÍTULO V. INGENIERÍA DEL PROYECTO

5.1 Características del producto

Las características deseables que se buscan obtener con el tratamiento del agua se muestran en la Tabla 2.2 y están acorde al Estándar Nacional de Calidad Ambiental-ECA para Agua, categoría 3, subcategoría D1 (Riego de vegetales).

5.2 Tecnologías y procesos existentes

Una variedad de procesos de tratamiento para remover el arsénico del agua han sido desarrollados, de estos, las tecnologías que se muestran en la Tabla 5.1 han sido identificadas como las mejores tecnologías disponibles para remover el arsénico basado en la demostración de la eficacia bajo condiciones de campo y considerando el costo, sin embargo todas estas tecnologías son para remover As(V) (Bilici & Pala, 2009). Por esta razón, es importante señalar que en ciertos procesos se puede optimizar la remoción de arsénico mediante la pre-oxidación y el ajuste de pH. El cloro, permanganato, ozono y dióxido de manganeso son agentes oxidantes efectivos para el proceso de pre-oxidación (National Electronic Publications Information System, 2005).

Tabla 5.1

Mejores tecnologías disponibles para la remoción de arsénico de agua potable

Tecnología de tratamiento	Eficiencia máxima de remoción (%)
Alúmina activada	95
Coagulación/Filtración	95
Intercambio iónico	95
Ablandamiento con cal	90
Osmosis inversa	>95
Electrodialisis	85
Oxidación/Filtración	80

Fuente: Bilici Baskan, Meltem (2009)

A continuación, se incluye una descripción general de los diversos procesos y tecnologías de tratamiento.

5.2.1 Alúmina activada

Implica un proceso de sorción que utiliza material granular poroso con propiedades de intercambio iónico. En el tratamiento del agua potable, la adsorción en alúmina activada empacada en lechos se usa comúnmente para eliminar la materia orgánica natural y el fluoruro. La eliminación de As(V) por adsorción puede lograrse pasando agua continuamente bajo presión a través de una o más camas. La alúmina agotada puede regenerarse o eliminarse y reemplazarse por una nueva (National Electronic Publications Information System, 2005).

La eficiencia y economía del sistema dependen de factores tales como la pre-oxidación previa de As(III) a As(V), la interferencia de los iones disueltos con el proceso de adsorción y la necesidad de ajustar el pH a <6.5 (National Electronic Publications Information System, 2005).

5.2.2 Coagulación- Filtración mejorada

Este proceso puede optimizarse para eliminar el As(V) inorgánico disuelto del agua. El mecanismo implica adsorción y co-precipitación de As(V) a un precipitado de aluminio o hidróxido férrico. El As(III) no se elimina de manera efectiva debido a su carga neutral a pH natural; en consecuencia, el As(III) es más difícil de eliminar que el As(V), por lo que suele ser necesaria una etapa de pre-oxidación.

La eficiencia y la economía del sistema dependen de varios factores, incluyendo el tipo y la dosis de coagulante, velocidad de agitación y pH. Algunos sistemas optimizados de coagulación-filtración son capaces de lograr más del 90% de remoción de As(V). Aunque los coagulantes de aluminio y hierro pueden eliminar el arsénico, los coagulantes de hierro (cloruro férrico o sulfato férrico) son más efectivos (National Electronic Publications Information System, 2005). En esta investigación se verificó el uso del cloruro férrico como coagulante en los ensayos realizados.

5.2.3 Intercambio iónico

El intercambio iónico es un proceso físico-químico en el que los iones se intercambian entre una fase de solución y una fase de resina sólida. Los grupos ionizables se intercambian por iones de carga similar en solución que tienen una afinidad de intercambio más fuerte (selectividad) por la resina. En el tratamiento del agua potable,

esta tecnología se utiliza comúnmente para el ablandamiento del agua (intercambio de cationes) y la eliminación de nitratos (intercambio de aniones). Es importante tener en cuenta que el intercambio iónico no es efectivo para la eliminación de As(III) (National Electronic Publications Information System, 2005).

5.2.4 Ablandamiento con cal mejorado

El ablandamiento con cal es un proceso de precipitación comúnmente utilizado para eliminar los cationes de calcio y magnesio de la solución. Para eliminar el arsénico, se agrega cal para aumentar el pH por encima de 10.5 para formar hidróxido de magnesio. En este intervalo de pH, el hidróxido de magnesio y el As(V) se eliminan por co-precipitación (National Electronic Publications Information System, 2005).

5.2.5 Ósmosis inversa

La ósmosis inversa es un proceso de separación por membrana impulsado por presión, capaz de eliminar el arsénico del agua por medio del tamaño de partícula, características dieléctricas e hidrofiliicidad / hidrofobicidad. La ósmosis inversa también elimina eficazmente otros componentes del agua, incluidos el carbono orgánico, las sales, los minerales disueltos y el color. Este proceso de tratamiento es relativamente insensible al pH, aunque puede ser necesario ajustar el pH para proteger la membrana de incrustaciones (National Electronic Publications Information System, 2005).

5.2.6 Remoción biológica

Como alternativa a la oxidación química, la oxidación bacteriana de As(III) es aplicable para el tratamiento de agua contaminada con arsénico. La aplicación de la oxidación bacteriana de As(III) da como resultado la formación de As(V), que puede eliminarse fácilmente del agua utilizando métodos de tratamiento convencionales (Ike, Miyazaki, Yamamoto, Sei, & Soda, 2008). La oxidación biológica del hierro por dos bacterias, *Gallionella ferruginea* y *Leptothrix ochracea*, ha demostrado ser una tecnología prometedora para la eliminación efectiva del arsénico de las aguas subterráneas. Esta tecnología elimina eficazmente el arsénico del agua y una de las ventajas que ofrece frente a los procesos de tratamiento físico-químico convencionales es que evita la incorporación

de reactivos químicos para la oxidación del arsénico trivalente (Shankar, Shanker, & Shikha, 2014).

5.2.7 Selección de la tecnología

Como criterios para la selección de la tecnología se tendrá en cuenta el bajo costo, la durabilidad y el mínimo impacto ambiental.

Al ser un proyecto nuevo se utilizará la tecnología semiautomática, ya que la tecnología automatizada requiere de una gran inversión económica y volúmenes de producción muy altos para justificar la inversión.

De esta manera, procesos como la producción de ferrato será realizado empleando una tecnología automatizada, es decir, las operaciones contarán con máquinas que no requieren la supervisión permanente de un operario. Mientras que proceso como la oxidación/coagulación y la microfiltración serán realizados empleando una tecnología semi-automatizada. Por otra parte, la operación de ensamblaje del reactor de ferrato se realizará de forma manual.

5.3 Proceso de producción

5.3.1 Proceso de producción del ferrato

El proceso de producción de ferrato inicia con el ensamble del reactor electroquímico. Para armar el reactor se procede a colocar una pieza de grafito en el espacio central de la placa gruesa de polimetilmetacrilato (PMMA). Verificar que tenga conductividad y se repite este paso con la pieza de acero. Luego, encima de la plancha gruesa de PMMA con grafito se coloca una pieza de nitrilo, seguida de una plancha delgada de PMMA y una lámina adicional de nitrilo, encima se coloca la membrana, verificando el sentido de intercambio. Se vuelve a colocar una lámina de nitrilo, una pieza de PMMA delgada y otra lámina de nitrilo. Finalmente, se pone la pieza de PMMA gruesa que tiene en su centro la pieza de acero. Para unir las piezas del reactor, se hacen pasar los pernos, arandelas y tuercas por los 7 orificios. El diagrama de operaciones y procesos que detalla las actividades correspondientes al ensamble se muestra en la Figura 5.1.

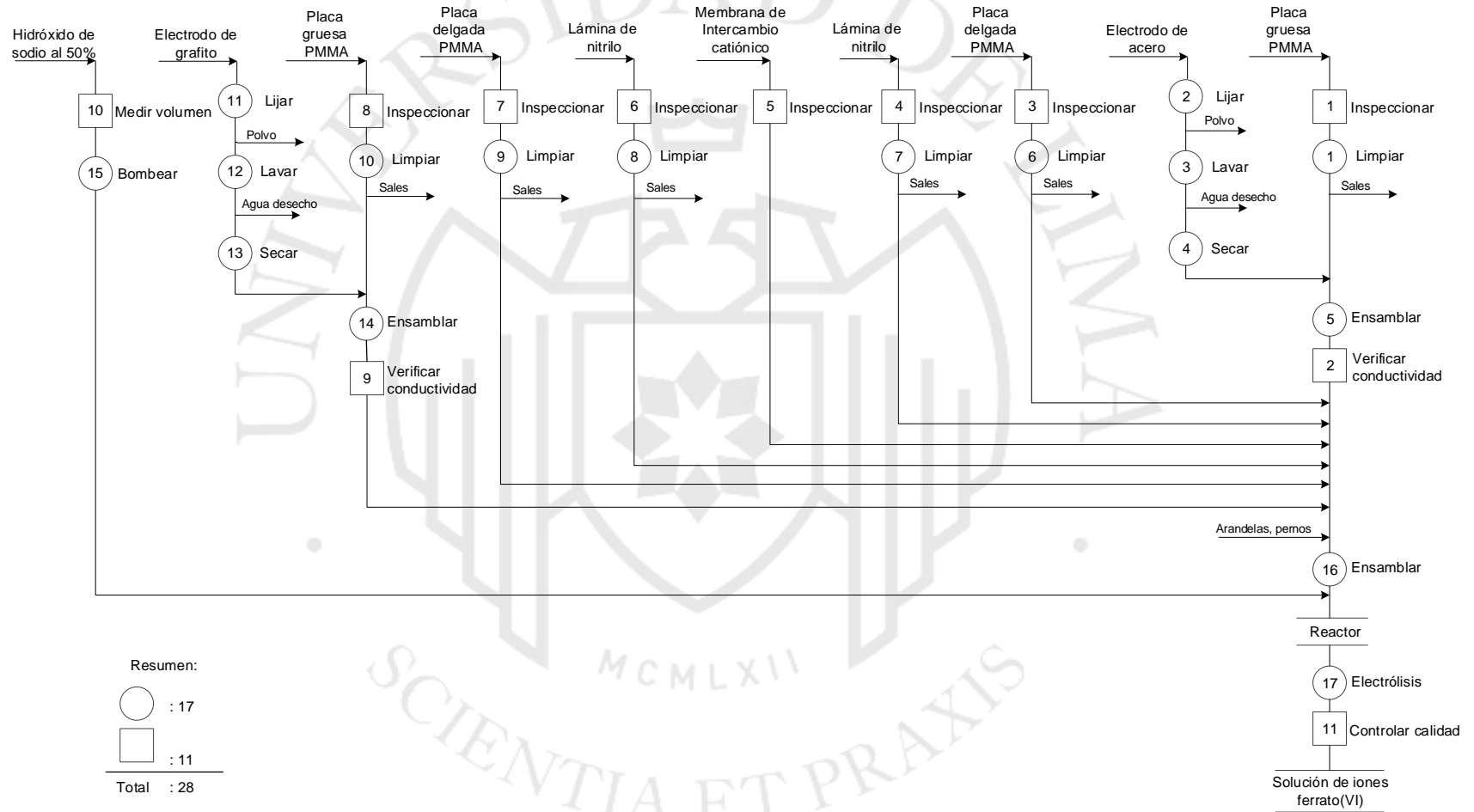
Luego se bombea la solución hidróxido de sodio al 50% desde un dispensador hacia el reactor. La solución de hidróxido de sodio al 50% será usada como electrolito para el proceso de electrólisis. Primero se llena la cámara catódica (120 mL) y en seguida

la cámara anódica (120 mL). El ferrato será producido en la cámara anódica por descomposición del electrodo de hierro (Barişçi, Ulu, Särkkä, Dimoglo, & Sillanpää, 2014). Cuando ambas cámaras estén llenas, se conecta la fuente de poder al reactor y se fija la corriente a usar (250 mA). Luego la fuente de poder es encendida y da inicio la electrólisis. Al término de cuatro horas, la solución de ferrato que se ha formado en la cámara anódica es bombeada a un dispensador a la espera de ser utilizado en el tratamiento de agua. Para dar inicio al siguiente ciclo de producción, el hidróxido de sodio que se encuentra en la cámara catódica (catolito) es bombeado a la cámara anódica para ser usado como anolito, mientras otra bomba alimenta la cámara catódica con nuevo hidróxido de sodio al 50% desde el dispensador.



Figura 5.1

Diagrama de operaciones y procesos para el armado del reactor electroquímico productor de ferrato(VI)



5.3.2 Sistema de control

El sistema de control está conformado por un controlador lógico programable (PLC, por sus siglas en inglés) el cual será programado para controlar a las fuentes de poder que energizan los reactores de ferrato, las bombas peristálticas y las electrobombas. Sus entradas serán la lectura de pH del sensor ubicado en el separador de fases y las lecturas de los sensores de nivel de los tanques.

5.3.3 Proceso propuesto de tratamiento de agua para riego

El agua que ingresa al proceso es agua del río Rímac que ha tenido un pre-tratamiento. Actualmente, el Instituto Nacional de Innovación Agraria - Centro Experimental La Molina cuenta con la infraestructura para el pre-tratamiento conformado por un filtro de rejillas, dos sedimentadores y un reservorio. Al ingresar el agua por la bocatoma (Figura 5.2), se inunda una canaleta que colinda con un filtro de rejillas (Figura 5.3), en el que se retiran los materiales flotantes que pueden ser ramas, botellas, bolsas, etc. En el filtro de rejillas se separa el 0.5% en masa (sólidos grandes). Luego, se utiliza un sedimentador de tipo abierto y flujo por lote para retener la arena que arrastra el agua, en el que se separa un 3% de la masa que ingresa. Un segundo sedimentador es empleado para retener partículas finas y separarlas por decantación (Figura 5.4). En esta operación se separa los lodos y arcillas que confieren color marrón al agua, y que constituyen el 2%.

Figura 5.2

Bocatoma



Elaboración propia

Figura 5.3

Filtro de rejas y sistema de inundación



Elaboración propia

Figura 5.4

Sedimentadores



Elaboración propia

Luego de pasar por los sedimentadores, el agua es almacenada en un reservorio abierto. La carga de nutrientes que trae el agua de río y la recepción de energía solar mientras está en el reservorio favorecen el crecimiento de algas.

A partir de este punto, se considera el sistema de tratamiento propuesto, que comprende el uso del ferrato, los iones férricos y la microfiltración. El agua que es bombeada del reservorio ingresa a un mezclador estático, con la finalidad de generar turbulencia que permita una mezcla rápida del agua con el oxidante (ferrato) y el coagulante (cloruro férrico). La solución de ferrato de sodio es bombeada desde el dispensador hacia el mezclador estático con una bomba peristáltica. Del mismo modo, el cloruro férrico es bombeado desde el dispensador hacia el mezclador estático. Si el controlador recibe la señal de que el pH es mayor a 8, mandará la señal a la bomba

peristáltica del cloruro férrico para seguir dosificando la sal hasta llegar a un pH de $7 \pm 0,5$.

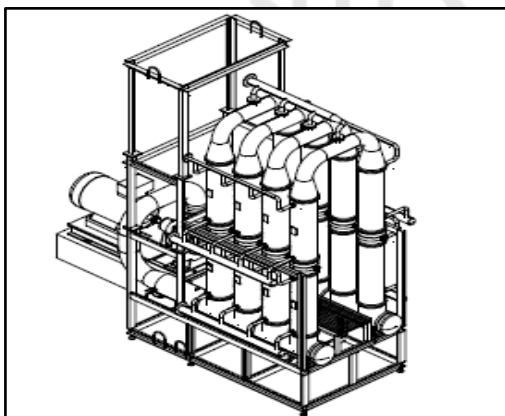
Luego de pasar por el mezclador estático, el agua llega a un separador de fases, que es el punto donde recircula el agua que alimenta a la unidad de filtración tangencial. En el separador de fases, se separa el lodo retenido luego de la recirculación. Según ensayos realizados en laboratorio se determinó que el volumen de lodos húmedos generados es de 1.9% de la masa total que sale del mezclador estático.

En seguida, el agua es bombeada desde el separador de lodos hasta la unidad de filtración tangencial que emplea filtros de $0.45 \mu\text{m}$. En la unidad de filtración tangencial, la presión es monitoreada con dos manómetros, uno ubicado en la línea de alimentación de la membrana y el otro en la línea del retenido. El valor promedio de la diferencia de las lecturas de estos dos manómetros se toma como la presión aplicada sobre la membrana. A través de los manómetros se registran los cambios en la presión a través de la membrana (TMP, por sus siglas en inglés).

La membrana de microfiltración es instalada verticalmente en la unidad de filtración tangencial como se muestra en la Figura 5.5.

Figura 5.5

Disposición de filtros en la unidad de filtración tangencial



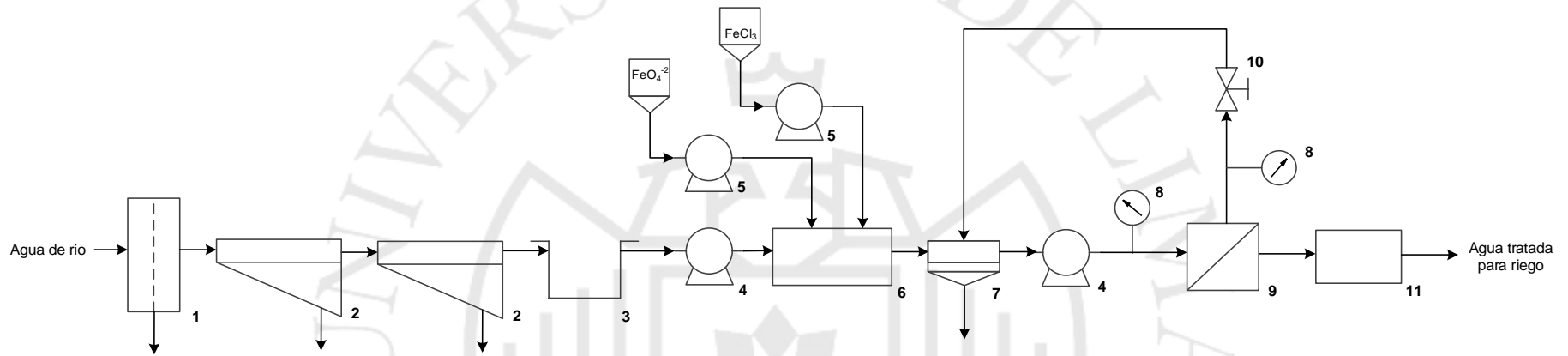
Fuente: Novasep (s.f)

El producto retenido que sale del módulo de membrana se recicla al separador de fases, mientras que el flujo de permeado se colecta en otro tanque, de donde será bombeado para ser usado como agua tratada para riego.

El diagrama de flujo para el proceso descrito se muestra en la Figura 5.6.

Figura 5.6

Diagrama de flujo del proceso de tratamiento de agua para riego



Leyenda:

- | | | |
|--------------------|-----------------------|------------------------------------|
| 1. Filtro de rejas | 5. Bomba peristáltica | 9. Unidad de filtración tangencial |
| 2. Desarenador | 6. Mezclador estático | 10. Válvula tipo aguja |
| 3. Reservorio | 7. Separador de fase | 11. Tanque |
| 4. Electrobomba | 8. Manómetro | |

Elaboración propia

5.4 Balance de materia

El balance de materia para el proceso de tratamiento de agua será realizado en base a la cantidad de agua tratada requerida en un año. El Instituto Nacional de Innovación Agraria - Centro Experimental La Molina emplea 5,500 m³ de agua por campaña y cada campaña dura 15 semanas (Rojas Meza, 2016). Se realizan dos campañas por año.

$$\text{Volumen de agua requerido} = \frac{5500 \text{ m}^3}{\text{campaña}} \times \frac{2 \text{ campañas}}{\text{año}} = 11000 \frac{\text{m}^3}{\text{año}}$$

De acuerdo a los ensayos de laboratorio realizados, se tiene que, para las condiciones de estudio, las mejores dosis para reducir la concentración de arsénico a los estándares de calidad para Agua, categoría 3- subcategoría D1, son de 1 mg de ferrato(VI) seguido de 3 mg de hierro como cloruro férrico y microfiltración.

Para añadir 1 mg de ferrato(VI) a un litro de agua, se debe tener en cuenta que los iones ferrato se encuentran en la forma Na₂FeO₄ en una solución concentrada de NaOH. De acuerdo a los ensayos realizados, para dosificar 1 mg de ferrato(VI) a un litro de agua a partir de una solución de concentración 0.384 M, es necesario añadir 0.0217 mL. Se midió experimentalmente la densidad del ferrato y se obtuvo un valor de 1.2007 g/mL.

$$1 \times 10^{-3} \text{ g FeO}_4^{2-} \times \frac{1 \text{ mol FeO}_4^{2-}}{119.843 \text{ g FeO}_4^{2-}} \times \frac{1 \text{ L solución}}{0.384 \text{ mol FeO}_4^{2-}} \times \frac{10^3 \text{ mL}}{1 \text{ L}} = 0.0217 \text{ mL}_{\text{solución}}$$

$$0.0217 \times 10^{-3} \text{ L solución} \times \frac{1.2007 \text{ g}}{10^{-3} \text{ L}} = 0.0261 \text{ g de solución de ferrato}$$

De forma análoga, se calculó, para un litro, el volumen a añadir de una solución de cloruro férrico (FeCl₃) al 40% (presentación comercial), el cual tiene una densidad de 1.43 g/mL.

$$3 \times 10^{-3} \text{ g Fe} \times \frac{1 \text{ mol Fe}}{55.845 \text{ g Fe}} \times \frac{162.24 \text{ g FeCl}_3}{1 \text{ mol FeCl}_3} \times \frac{10^{-3} \text{ L}}{1.43 \text{ g}} \times \frac{100}{40} = 1.524 \times 10^{-5} \text{ L FeCl}_3 \text{ al } 40\%$$

$$1.524 \times 10^{-5} \text{ L FeCl}_3 \text{ al } 40\% \times \frac{1.43 \text{ g}}{10^{-3} \text{ L}} = 0.0218 \text{ g FeCl}_3 \text{ al } 40\%$$

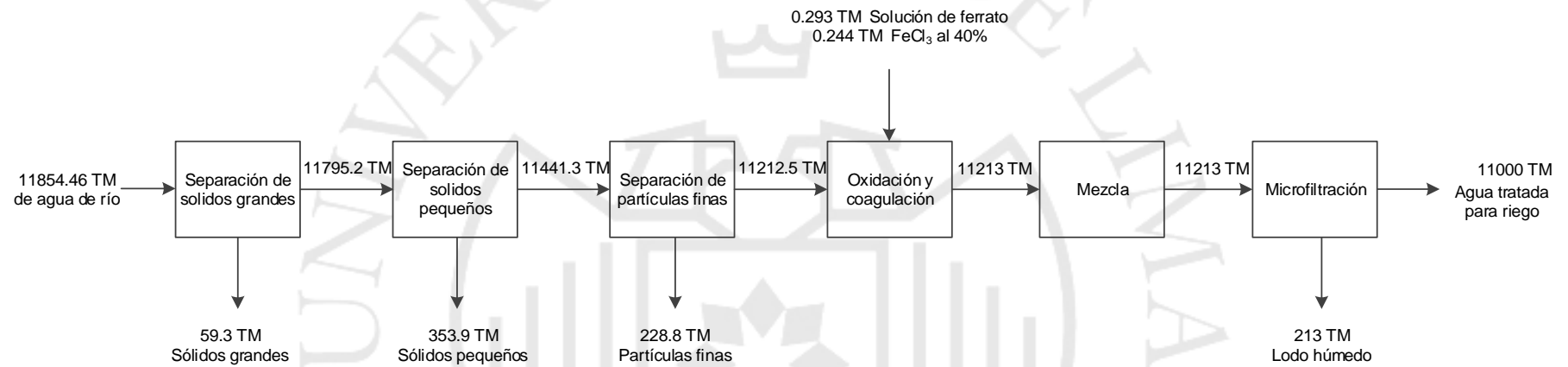
Con esta información se calcularán las cantidades requeridas de solución de ferrato y cloruro férrico para abastecer con 11000 m³ de agua tratada. El balance de materia del proceso de tratamiento de agua se muestra en la Figura 5.7.

A partir del balance de materia para el tratamiento de agua se calcula la cantidad de solución de ferrato requerida en un año. El balance de materia del proceso de producción de ferrato se muestra en la Figura 5.8.



Figura 5.7

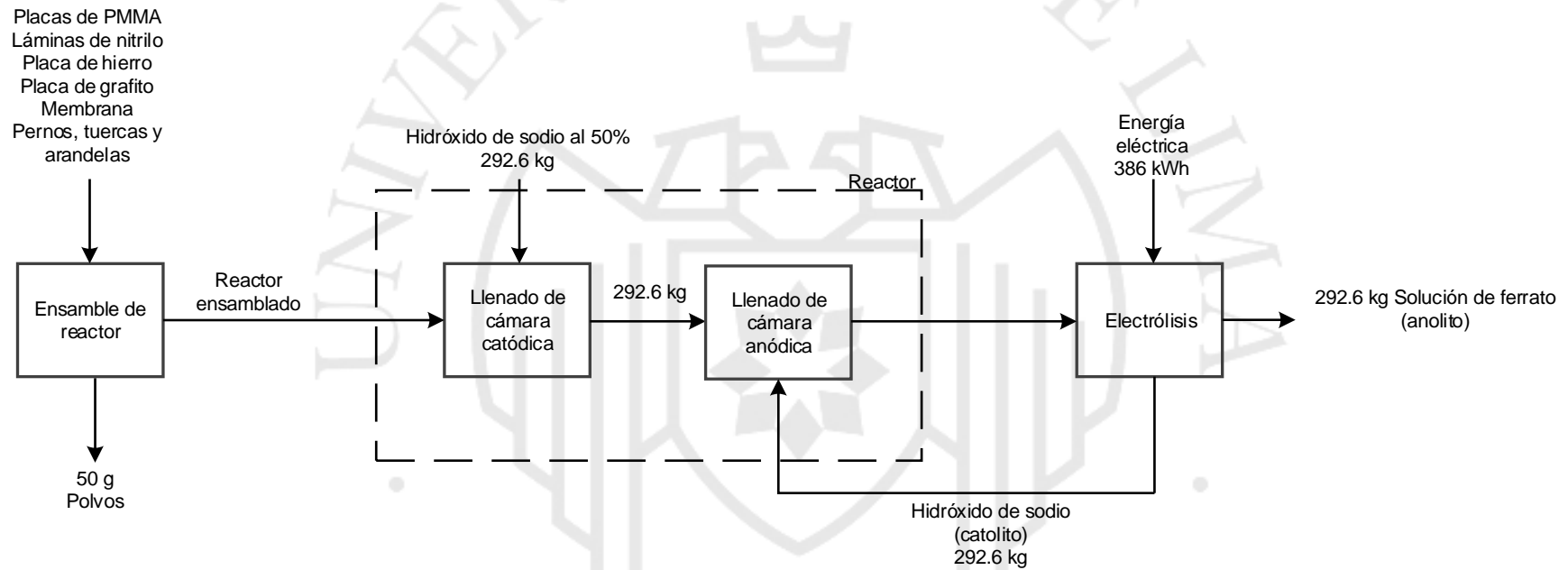
Balance de materia del proceso de tratamiento de agua para riego



Elaboración propia

Figura 5.8

Balance de materia del proceso de producción de ferrato



Elaboración propia

5.5 Características de los equipos

De acuerdo al proceso descrito en el punto anterior, se muestran las especificaciones de equipos e instrumentos a usar en el proceso de producción de ferrato (Tabla 5.2) y en el proceso de tratamiento de agua (Tabla 5.3).

Tabla 5.2

Especificaciones de los equipos y dispositivos para la producción de ferrato

Equipo/Instrumento	Especificaciones técnicas
	<p>Bomba peristáltica</p> <p>Proceso: Llenado con electrito, dosificación de ferrato, dosificación de clouro férrico</p> <p>Marca: Chuangrui</p> <p>Modelo: BT100M</p> <p>Potencia: <22W</p> <p>Capacidad: 0.007-380ml/min</p> <p>Capacidad máx.: 0.0228 m³/h</p> <p>Dimensiones: 27.6 x 18.4 x 17.5 cm</p> <p>Peso: 3.98 kg</p> <p>Costo: \$300</p> <p>Fuente: Alibaba (s.f)</p>
	<p>Fuente de poder</p> <p>Proceso(s): Producción de ferrato</p> <p>Dimensiones: 38.1 x 26.7 x 14.5 cm</p> <p>Peso: 9.5 kg</p> <p>Marca: BK Precision</p> <p>Modelo: 1761</p> <p>Potencia: 350 W</p> <p>Costo: \$590</p> <p>Fuente: Amazon (s.f)</p>
	<p>Multímetro digital</p> <p>Proceso(s): Producción de ferrato</p> <p>Marca: SANWA</p> <p>Modelo: CD772</p> <p>Frecuencia de muestreo: 3 veces/s</p> <p>Ancho de banda de frecuencia AC: 45~500Hz (rango de 4V), 45~1KHz (rango de 40V a mas)</p> <p>Costo: \$118</p> <p>Fuente: Amazon (s.f)</p>

Elaboración propia

Tabla 5.3

Especificaciones de los equipos e instrumentos para el tratamiento de agua para riego

Equipo/Instrumento	Especificaciones técnicas
	<p>Electrodo de pH</p> <p>Proceso: Dosificación de cloruro férrico Marca: Rex Modelo: E-201 Material: Policarbonato Rango de pH: 1-14 Precisión: 0.01 pH Costo: \$6.76 Fuente: Alibaba (s.f)</p>
	<p>Electrobomba centrífuga</p> <p>Proceso: Mezclado Marca: Pedrollo Modelo: Cpm-600 Capacidad: 9.6 m³/h Potencia: 0.5 HP Dimensiones: 25.3 x 16.5 x 20.5 cm Peso: 7.1 kg Costo: S/. 460 Fuente: Mercadolibre (s.f)</p>
	<p>Mezclador estático</p> <p>Proceso: Mezclado Marca: Kelopure Modelo: KL-SM-02 Material: PVC Capacidad: 30 m³/h Longitud: 10” Costo: \$50 Fuente: Alibaba (s.f)</p>

(continúa)

(continuación)

	<p>Filtro de membrana</p> <p>Proceso: Filtración Marca: Frotec Material: Polipropileno Tamaño de poro: 0.45 μm Diámetro de salida: 69 mm Diámetro de entrada: 28 mm Longitud: 25,4 cm Área de filtrado: 0.65 m² Caudal de agua: > 2.6 mL/min.cm² Capacidad: 1.014 m³/h Presión de trabajo: 4.2 bar a 25°C Presión de retrolavado: 2.1 bar a 25 °C Rango de pH: 1-14 Costo: \$28 Fuente: Alibaba (s.f)</p>
	<p>Tanque para almacenamiento</p> <p>Marca: Rotoplas Capacidad: 25000 L Altura: 3.9 m Diámetro: 2.9 m Material: Polietileno Precio: S/.22600 Fuente: Sodimac (s.f)</p>
	<p>Controlador PLC</p> <p>Marca: Sinovo Modelo: T32S2R Entradas: 16 DI Salidas: 16 DO Dimensiones: 131 x 95 x 82 mm Precio: \$300 Fuente: Alibaba (s.f)</p>

(continúa)

(continuación)

	<p>Sensor de nivel</p> <p>Marca: DMiotech Modelo: EP2508 Potencia: 10 W Tamaño de la Bola de flotador 18 x 8mm Precio: S/.11 Fuente: Mercadolibre (s.f)</p>
---	--

Elaboración propia

5.6 Capacidad instalada

5.6.1 Cálculo del número de equipos y operarios requeridos

El cálculo para determinar la cantidad de equipos necesarios está en base al requerimiento anual de agua en metros cúbicos. Se calcula el número de equipos para cada proceso, con este fin se emplea la información de la Figura 5.7 y Figura 5.8 y que detallan las cantidades entrantes y salientes en cada etapa de la producción de ferrato y tratamiento de agua, respectivamente.

Para el cálculo de la capacidad instalada es necesario señalar que los equipos no necesitan ser supervisados permanentemente durante su funcionamiento, por lo tanto, el factor de utilización será igual a 1.

La Tabla 5.4, muestra el número de equipos para el tratamiento de agua, mientras que la Tabla 5.5 muestra el número de equipos para la producción de ferrato.

Tabla 5.4

Número de equipos requeridos para el tratamiento de agua

Etapas	Procesa (TM/año)	Tiempo por unidad (h/ TM)	Factor de Utilización	Factor de Eficiencia	Tiempo del periodo (h/año)	# Equipos
Dosificación de Na_2FeO_4	0.2	43.86	1	0.7	2080	1
Dosificación de FeCl_3	0.2	43.86	1	0.7	2080	1

(continúa)

(continuación)

Alimentación de mezclador	11,212.5	0.10	1	0.7	2080	1
Mezclado	11,213.0	0.03	1	0.7	2080	1
Microfiltrado	11,213.0	0.99	1	0.7	2080	8

Elaboración propia

Se tiene que serán necesarios 8 filtros de 0.45 μm . Estos filtros conformarán la unidad de filtración tangencial.

Tabla 5.5

Número de equipos requeridos para la producción de ferrato

Etapa	Procesa (kg/año)	Tiempo por unidad (h/kg)	Factor de Utilización	Factor de Eficiencia	Tiempo del periodo (h/año)	#Equipos
Bombeo de catolito	292.6	0.04	1	0.7	6240	1
Electrólisis (anolito)	292.6	33.33	1	0.8	6240	2

Elaboración propia

De la Tabla 5.5 se tiene que serán necesarios dos reactores electroquímicos de 120 mL de volumen de cámara anódica con la finalidad de suministrar la cantidad requerida de ferrato para el tratamiento del agua.

Cálculo de número de operarios para el ensamblaje del reactor

El tiempo estándar para el armado del reactor electroquímico es 30 minutos. Por lo que para el armado de los dos reactores necesarios para el proceso de electrólisis solo es necesario un operario.

El operario que realiza la actividad de ensamblado será el mismo que supervisa el funcionamiento del sistema de producción.

5.6.2 Cálculo de la capacidad instalada

Para el cálculo de la capacidad instalada, es necesario conocer la cantidad de horas que se trabajan al año, para ello se considera el horario de trabajo en el Instituto Nacional de Innovación Agraria - Centro Experimental La Molina que es de lunes a viernes de 8:00 a 17:00 horas, que incluye una hora de refrigerio.

Capacidad instalada para la producción de ferrato

Para calcular el tiempo del periodo en horas por año para la producción de ferrato, se tiene en cuenta que, al ser un proceso automático, este puede funcionar las 24 horas del día. El cálculo es como sigue:

$$\frac{24 \text{ h}}{\text{día}} \times \frac{5 \text{ días}}{\text{semana}} \times \frac{52 \text{ semanas}}{\text{año}} = 6240 \frac{\text{h}}{\text{año}}$$

La Tabla 5.6 muestra la capacidad de producción del ferrato, en kilogramos por año.

Tabla 5.6
Capacidad instalada para la producción de ferrato

Operación	Capacidad de producción kg/hora	N° de equipos	Factor de Utilización	Factor de Eficiencia	Tiempo del periodo (h/año)	Capacidad de producción kg/año
Electrólisis (anolito)	0.03	2	1	0.8	6240	299.52

Elaboración propia

Capacidad instalada para el tratamiento de agua

Para calcular el tiempo del periodo en horas por año para el tratamiento de agua, se tiene en cuenta que se requieren de operaciones automáticas con la supervisión de un operario, por lo que se calcula como sigue:

$$\frac{8 \text{ h}}{\text{día}} \times \frac{5 \text{ días}}{\text{semana}} \times \frac{52 \text{ semanas}}{\text{año}} = 2080 \frac{\text{h}}{\text{año}}$$

La Tabla 5.7 muestra la capacidad de producción de agua para riego tratada, en toneladas métricas (TM) por año.

Tabla 5.7

Capacidad instalada para el tratamiento de agua

Operación	Capacidad de producción TM/hora	Nº de equipos / operarios	Factor de Utilización	Factor de Eficiencia	Tiempo del periodo (h/año)	Capacidad de producción TM/año
Alimentación de mezclador	9.6	1	1	0.7	2080	13,977.60
Mezclado	30	1	1	0.7	2080	43,680.00
Microfiltrado	1.014	8	1	0.7	2080	11,811.07

Elaboración propia

Se observa que la estación cuello de botella es la unidad de filtración tangencial, sin embargo, sí se produce la cantidad requerida por el INIA.

5.7 Identificación de los aspectos e impactos en el proceso

La matriz de caracterización fue empleada para identificar los aspectos e impactos de los procesos. Así, la Tabla 5.8 muestra los aspectos e impactos identificados en la producción de ferrato, mientras que la Tabla 5.9 muestra la información análoga para el tratamiento de agua.

Tabla 5.8

Matriz de caracterización para la producción de ferrato

ENTRADAS	ACTIVIDAD	SALIDAS	ASPECTOS AMBIENTALES	IMPACTOS AMBIENTALES	COMPONENTE AFECTADO
Placas de PMMA Placa de hierro Placa de grafito Membrana Pernos, tuercas y arandelas Hidróxido de sodio al 50%	<div style="border: 1px solid black; padding: 5px; width: fit-content; margin: 0 auto;">Ensamble de reactor</div> <div style="text-align: center;">↓</div>	Virutas, polvos	Generación de residuos sólidos	Contaminación de suelo	Suelo
Energía eléctrica	<div style="border: 1px solid black; padding: 5px; width: fit-content; margin: 0 auto;">Electrólisis</div>	Ferrato (anolito) Catolito	Consumo de energía eléctrica	Agotamiento de recursos naturales	Recursos naturales

Elaboración propia

Tabla 5.9

Matriz de caracterización para el proceso de tratamiento de agua

ENTRADAS	ACTIVIDAD	SALIDAS	ASPECTOS AMBIENTALES	IMPACTOS AMBIENTALES	COMPONENTE AFECTADO
Agua de río	Separación de sólidos grandes	Materiales flotantes (ramas, botellas, bolsas, etc.)	Generación de residuos sólidos	Contaminación de suelo	Suelo
Agua con partículas pequeñas y finas	Separación de sólidos pequeños	Arena	Generación de residuos sólidos	Contaminación de suelo	Suelo
Agua con partículas finas	Separación de partículas finas	Arcilla, lodos	Generación de residuos sólidos	Contaminación de suelo	Suelo
Agua de reservorio Energía eléctrica Ferrato Cloruro férrico	Oxidación y coagulación	Agua con flocs	Consumo de energía eléctrica	Agotamiento de recursos naturales	Recursos naturales
Agua con flocs Energía eléctrica	Microfiltración	Lodos	Generación de residuos sólidos Consumo de energía eléctrica	Contaminación de suelo Agotamiento de recursos naturales	Suelo Recursos naturales

Elaboración propia

5.8 Disposición de planta

5.8.1 Características físicas del proyecto

Como se mencionó previamente, el Instituto Nacional de Innovación Agraria - Centro Experimental La Molina dispone de infraestructura que comprende un filtro de rejillas, dos sedimentadores y un reservorio. A esta infraestructura se le añadirá los equipos necesarios para el tratamiento que propone esta investigación, y para estos equipos adicionales se realizará el cálculo de requerimiento de áreas correspondiente.

5.8.2 Determinación de las zonas físicas requeridas

Para el cálculo de las zonas físicas requeridas se empleará el método Guerchet. Es importante señalar que el método Guerchet a desarrollar permite calcular los requerimientos mínimos aproximados del área de producción (Díaz Garay, Jarufe, & Noriega, 2014). Las zonas requeridas son el área de ensamble, el área de producción de ferrato y el área de tratamiento de agua.

Para la producción de ferrato se requieren varios equipos y una mesa de trabajo que constituirán elementos estáticos, pues requieren de un área fija. Como elemento móvil, solamente el operario ha sido considerado.

El tratamiento de agua, también cuenta con elementos estáticos. Además, todo el proceso requiere un transporte a través de bombas.

5.8.3 Cálculo de áreas para cada zona

Luego de haber identificado los elementos estáticos y móviles que se muestran en la Tabla 5.10 y haber definido el número de lados (N) a partir de los cuales el mueble o la máquina deben ser utilizados se calculó la superficie estática (S_s), la superficie de gravitación (S_g) y superficie de evolución (S_e). Mediante el producto de las tres superficies se obtiene la superficie total (S_t) requerida para cada elemento.

Según el método aplicado, el valor del coeficiente de evolución (K) permite establecer una relación entre los elementos estáticos y móviles; y permite calcular la superficie de evolución. Para su cálculo es necesario hallar la altura ponderada de los elementos móviles y la de los elementos estáticos (Díaz et al., 2014).

Tabla 5.10

Método de Guerchet

Etapa	Elementos	L (m)	A (m)	D (m)	H (m)	n	N	Ss	Sg	Se	St
	ESTÁTICOS										
Ensamble	Mesa de trabajo	1,20	0,60		0,90	1	1,00	0,72	0,72	0,35	1,79
Almacenado	Dosificador	0,20	0,15		0,20	1	1,00	0,03	0,03	0,01	0,07
	Bomba peristáltica	0,28	0,18		0,18	1		0,05	-	0,01	0,06
	Fuente de poder	0,38	0,27		0,15	1	1,00	0,10	0,10	0,05	0,25
Electrólisis	Reactor electroquímico	0,19	0,08		0,19	2	1,00	0,01	0,01	0,01	0,07
	Bomba peristáltica	0,28	0,18		0,18	1		0,05	-	0,01	0,06
Almacenado	Dosificador	0,20	0,15		0,20	1		0,03	-	0,01	0,04
	Bomba peristáltica	0,28	0,18		0,18	1		0,05	-	0,01	0,06
Almacenado	Dosificador	0,20	0,15		0,20	1	1,00	0,03	0,03	0,01	0,07
	Bomba peristáltica	0,28	0,18		0,18	1		0,05	-	0,01	0,06
	Electrobomba	0,25	0,17		0,21	1		0,04	-	0,01	0,05
Mezclado	Mezclador estático	0,25	0,10		0,10	1		0,03	-	0,01	0,03
	Separador de fase	1,50	1,50	1,50	1,50	1		2,25	-	0,55	2,80
	Electrobomba	0,25	0,17		0,21	1		0,04	-	0,01	0,05
Filtración	Unidad de filtración tangencial	0,69	0,37		0,65	1		0,25	-	0,06	0,31
Almacenado	Tanque	2,90	2,90	2,90	3,90	2		8,41	-	2,05	20,91
	Electrobomba	0,25	0,17		0,21	1		0,04	-	0,01	0,05
	MÓVILES										
	Operario				1,65	1		0,50			
	Área mínima requerida (m ²)										26,77

Elaboración propia

Para el cálculo del coeficiente de evolución (K) se tiene que:

$$\text{Altura ponderada de los elementos móviles} = 1.65$$

$$\text{Altura ponderada de los elementos estáticos} = 3.389$$

$$K = \frac{1.65}{2 * 3.389} = 0.2434$$

Asimismo, de la Tabla 5.10 se tiene que la superficie total mínima para el área de producción es de 26.8 m², repartidos en las siguientes proporciones:

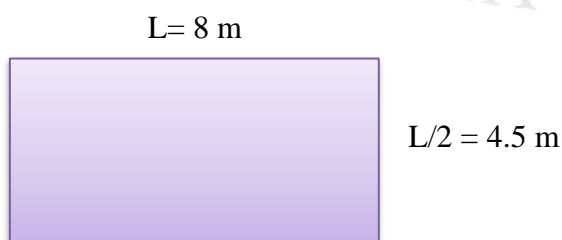
- Área de ensamble: 1.8 m²
- Área de producción de ferrato: 0.52 m²
- Área de tratamiento de agua: 24.45 m²

Adicionalmente, debido a que se emplean insumos concentrados, es pertinente implementar un área que sea exclusiva para el almacenamiento de insumos. En este punto se considera un área de 2.25 m².

Finalmente, el área total requerida sería de 29 m². En la Figura 5.9 se muestra cómo sería la forma del terreno a utilizar, siendo L el valor de 76 ≈ 8 metros y L/2 el valor 3.8 ≈ 4 metros.

Figura 5.9

Área total de terreno requerido



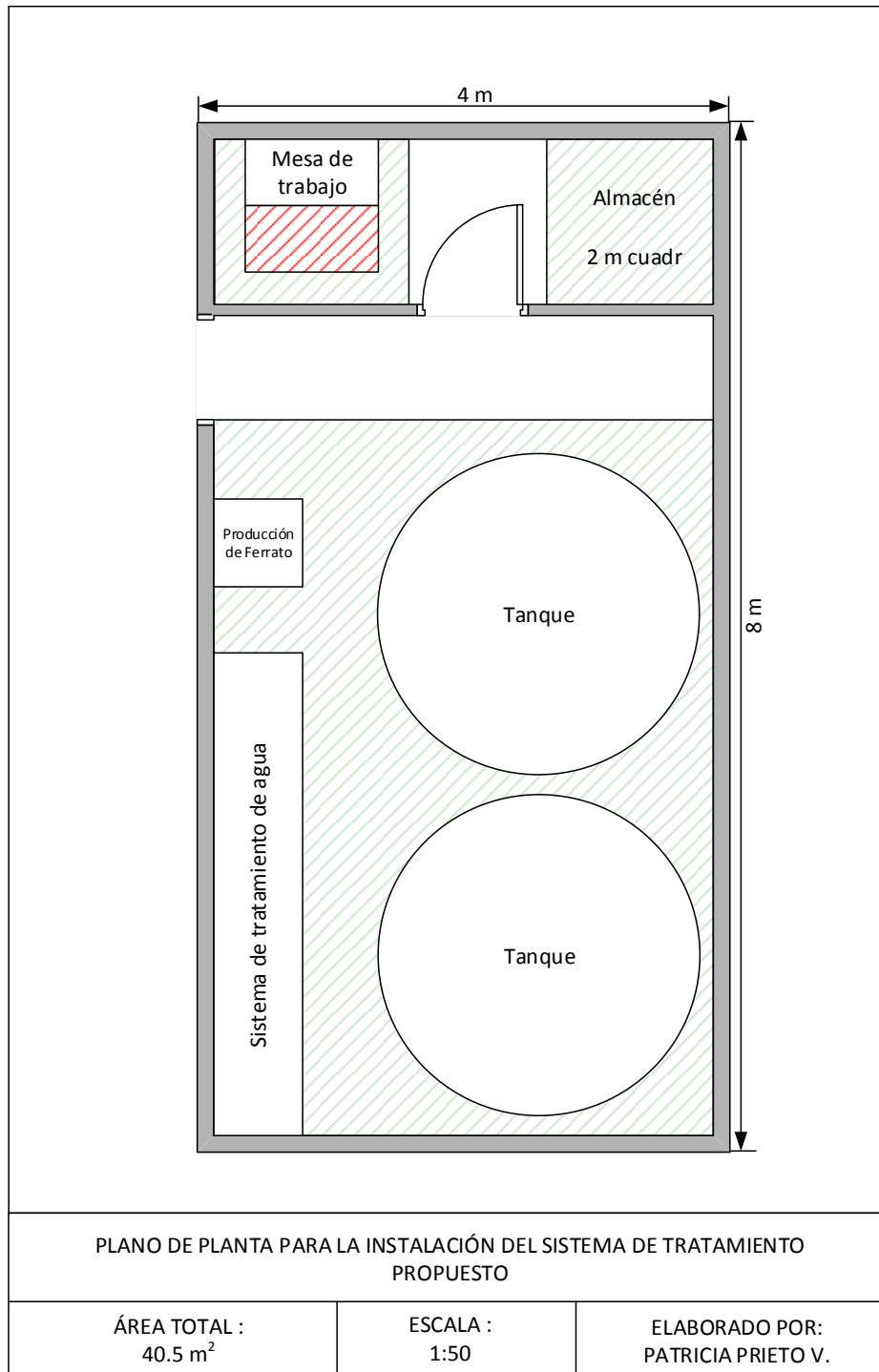
Elaboración propia

5.8.4 Disposición general

Luego de definir las zonas requeridas y su área respectiva, una propuesta de plano ha sido elaborada, y se muestra en la Figura 5.10.

Figura 5.10.

Plano de planta propuesto



Elaboración propia

CONCLUSIONES

- La producción electroquímica del ferrato(VI), con la configuración empleada, no permite obtener una concentración mayor a 0.5 mol/L, pues la solución que se obtiene es muy viscosa, lo que dificulta su dosificación.
- Al realizar los experimentos empleando diferentes concentraciones de iones ferrato(VI), no se logró reducir la concentración de arsénico por debajo de los 100 µg/L que establece el Estándar Nacional de Calidad Ambiental-ECA para Agua, categoría 3, subcategoría D1. Sin embargo, se tiene evidencia de que existe una mayor remoción de arsénico a medida que se incrementa la concentración de iones ferrato(VI), aunque, en la práctica no es posible incrementar indefinidamente la concentración de iones ferrato(VI) en el agua que se quiere tratar, pues se podría incrementar demasiado el pH del agua tratada; ya que el ferrato(VI) se encuentra en una solución alcalina. Por otro lado, se evidenció que el empleo de los iones ferrato(VI) permite reducir la cantidad de iones férricos (Fe^{3+}) y alcanzar una concentración de arsénico que cumple con el Estándar de Calidad Ambiental para agua de riego. Esta reducción de la cantidad de iones férricos requeridos implica reducir la cantidad de iones totales que se añaden al agua durante el tratamiento.
- El empleo de una concentración de iones ferrato(VI) igual a 1 mg/L, seguido de una solución de FeCl_3 (coagulante) de concentración igual a 3 mg/L y posterior microfiltración, en las condiciones de estudio evaluadas, permite reducir la concentración del arsénico desde 500 µg/L hasta 31.1 ± 1.6 µg/L. Esta concentración de arsénico remanente cumple con el ECA para agua de riego.
- Considerando las concentraciones de cloruro férrico y ferrato(VI) mencionadas en el punto anterior, se podría ahorrar un valor económico de S/.2199 al año. Este ahorro se debe a que la suma del costo de los consumibles cloruro férrico y ferrato asciende a S/.1944 por año. Mientras que, cuando solamente se emplean iones férricos seguidos de microfiltración, es necesario

emplear 15 mg/L de Fe como cloruro férrico para obtener una concentración de arsénico remanente comparable (32 $\mu\text{g/L}$ As); en este caso, el costo del consumible cloruro férrico ascendería a S/.4143 por año. En consecuencia, no solo se consigue reducir la cantidad de iones que se añaden al agua, sino que también se reduce el costo de los consumibles aproximadamente en un 53%.



RECOMENDACIONES

A continuación, se indican las recomendaciones:

- Mayores concentraciones de la solución de ferrato(VI) no fueron evaluadas debido al incremento del pH del agua; considerando además que el pH inicial del agua ya era alcalino (pH 8.9). Se recomendaría realizar ensayos a este valor de pH para evaluar el desempeño del ferrato(VI).
- Evaluar la remoción de otros contaminantes inorgánicos del agua, tales como sulfatos, fosfatos, nitratos y nitritos.
- Evaluar la efectividad del ferrato en la remoción de algas, ya que se encontró que el crecimiento de algas es un problema recurrente cuando se trata de agua almacenada en reservorios.

REFERENCIAS

- Al-Mashharawi, S. (2011). *King Abdullah University of Science and Technology*. Recuperado el 01 de Julio de 2018, de Evaluating the Efficiency of Different Microfiltration and Ultrafiltration Membranes: <http://repository.kaust.edu.sa/kaust/bitstream/10754/209401/1/SamerMashharawiThesis.pdf>
- Alsheyab, M., Jiang, J.-Q., y Stanford, C. (2010). Electrochemical generation of ferrate (VI): determination of optimum conditions. *Desalination*, 254(2010) 175-178 DOI: 10.1016/j.desal.2009.11.035.
- American Public Health Association. (1998). *Standard methods for the examination of water and wastewater*. Washington: American Public Health Association.
- American Society for Testing and Materials (2013). *Standard Practice for Coagulation-Flocculation Jar Test of Water*. Recuperado de ASTM D2035-13: <http://www.astm.org/cgi-bin/resolver.cgi?D2035>
- American Water Works Association. (2011). *Operational control of coagulation and filtration processes. AWWA manual M37*. Denver: American Water Works Association.
- Arora, M., Kiran, B., Rani, S., Rani, A., Kaur, B., y Mittal, N. (2008). Heavy metal accumulation in vegetables irrigated with water from different sources. *Food Chemistry* 111(4), 811-815.
- Arroyo, V. (2012). Recuperado de Nutrientes y gases: Oxígeno disuelto: <http://repositorio.imta.mx/bitstream/handle/20.500.12013/1499/HC-1209.1.pdf>
- Autoridad Nacional del Agua (2009). Recuperado el 02 de 08 de 2017, de Informe País del V Foro Mundial del Agua: <http://www.ana.gob.pe/media/442806/informe%20pais%20v%20foro%20mundial%20del%20agua.pdf>
- Barişçi, S., Ulu, F., Särkkä, H., Dimoglo, A., y Sillanpää, M. (2014). Electrosynthesis of Ferrate (VI) ion Using High Purity Iron Electrodes: Optimization of Influencing Parameters on the Process and Investigating Its Stability. *International Journal of Electrochemical Science*, 9(2014) 3099 - 3117.
- Bauder, T., Waskom, R., y Davis, J. (2007). *University of Wyoming*. Recuperado de <http://www.uwyo.edu/soilfert/pubs/irrigation%20water%20quality%20csu.pdf>
- Bernex, N. (2015). *Aguas y Arsénico natural en Perú*. Lima.
- Bilici Baskan, M., y Pala, A. (2009). Determination of arsenic removal efficiency by ferric ions using response surface methodology. *Journal of Hazardous Materials*, 166 (2009) 796–801. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2008.11.131.

- Cabezas, C. (2014). Enfermedades asociadas al agua en el Perú. *La Salud Ambiental en el Perú: Impacto de la Contaminación del Agua, del Aire y del Cambio Climático*.
- Castro de Esparza, M. (2006). Presencia de arsénico en el agua de bebida en América Latina y su efecto en la salud pública. *International Congress: Natural arsenic in groundwaters of Latin America*. Ciudad de Mexico.
- Castro de Esparza, M. L. (2015). El arsénico en los recursos hídricos del Perú. En *Aguas y arsénico natural en Perú*. Lima.
- Chávez, P. D. (2015). La información y su gestión como herramienta para enfrentar la contaminación del agua con arsénico. En *Aguas y Arsénico natural en Perú* (págs. 27-34). Lima.
- Chavez, M. (2009). Evaluación de dos técnicas analíticas para la especiación de arsénico en aguas superficiales del sur del Perú. *Revista Peruana de Medicina Experimental y Salud Pública*, 26(1):20-26. Recuperado el 10 de 02 de 17, de <http://www.scielo.org.pe/pdf/rins/v26n1/a05v26n1>
- Department of Water. (2009). *Government of Western Australia*. Recuperado de www.water.wa.gov.au
- Diaz Garay, B., Jarufe, B., y Noriega, M. T. (2014). *Disposición de planta*. Lima: Fondo Editorial de la Universidad de Lima.
- DPI Agriculture Water and Irrigation Unit. (2016). Recuperado de Interpreting water quality test results: www.dpi.nsw.gov.au
- Driscoll, D., Carter, J., Williamson, J., y Putnam, L. (2002). *U.S. Geological Survey*. Recuperado de U.S. Geological Survey Web site: <https://pubs.usgs.gov/wri/wri024094/pdf/mainbodyofreport-3.pdf>
- Duan, J., y Gregory, J. (2003). Coagulation by hydrolysis of metal salts. *Advances in colloid and interface science*, 100-102 (2003) 475 - 502.
- Grasshoff, K., Kremling, K., Ehrhardt, M., y Wiley, J. (2009). *Methods of seawater analysis*. Pag. 278.
- Grupo de hidrología subterránea. (2018). *Grupo de hidrología subterránea*. Recuperado de www.h2ogeo.upc.edu/es/salinizacion
- Hach Company. (2013). Recuperado de DR/890 Colorimeter Procedures Manual: <https://www.hach.com/asset-get.download.jsa?id=7639982259>
- Hach Company. (2013). *Digital Titrator, model 16900*.
- Halder, D., Lin, J., Essilfie-Dughan, J., Das, S., y Robertson, J. (2018). Implications of the iron(II/III)-arsenic ratio on the precipitation of iron-arsenic minerals from pH 2.5 to 10.5. *Applied Geochemistry*.

- Han, Q., Wang, H., Dong, W., Liu, T., y Yin, Y. (2013). Formation and inhibition of bromate during ferrate(VI) - Ozone oxidation process. *Separation and Purification Technology*, 118(2013) 653-658
DOI:10.1016/j.seppur.2013.07.042.
- Henke, K. (2009). *Arsenic. Environmental chemistry, health threats and waste treatment*. Wiley.
- Howe, K., Hand, D., Crittenden, J., Trussell, R., y Tchobanoglous, G. (2016). *Principios de tratamiento de aguas*. México: Cengage Learning.
- Ike, M., Miyazaki, T., Yamamoto, N., Sei, K., y Soda, S. (2008). Removal of arsenic from groundwater by arsenite-oxidizing bacteria. *Water Science & Technology-WST*, 1095-1100.
- Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (2 de Agosto de 2007). *Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales - IDEAM*. Recuperado de <http://www.ideam.gov.co/documents/14691/38155/S%C3%B3lidos+Suspendidos+Totales+en+aguas.pdf/f02b4c7f-5b8b-4b0a-803a-1958aac1179c>
- Instituto Nacional de Estadística e Informática. (2015). *Perú: anuario de estadísticas ambientales 2014*. Recuperado de www.inei.gob.pe/media/MenuRecursivo/publicaciones_digitales/Est/Lib1197/libro.pdf
- Jian, J.-Q., y Lloyd, B. (2002). Progress in the development and use of ferrate(VI) salt as an oxidant and coagulant for water and wastewater treatment. *Water Research*, 36(2002) 1397 - 1408.
- Jiang, J.-Q., Durai, H., Winzenbacher, M., Petri, M., y Seitz, W. (2014). Drinking water treatment by in situ generated ferrate(VI). *Desalination and Water Treatment*, 1-9.
- Khan, S., Cao, Q., Zheng, Y., Huang, Y., y Zhu, Y. (2008). Health risks of heavy metals in contaminated soils and food crops irrigated with wastewater in Beijing, China. *Environmental pollution (Barking, Essex: 1987)*, 152(3): 686-92.
- Konieczny, K., Szałol, D., Płonka, J., Rajca, M., y Bodzek, M. (2009). Coagulation-ultrafiltration system for river water treatment. *Desalination*, 240 (2009) 151-159, DOI: 10.1016/j.desal.2007.11.072.
- Lee, Y., Um, I.-H., y Yoon, J. (2003). Arsenic(III) Oxidation by Iron(VI) (Ferrate) and Subsequent Removal of Arsenic(V) by Iron(III) Coagulation. *Environmental Science & Technology*, 37, 5750-5756.
- Light, S., y Yu, X. (2005). Electrochemical Alkaline Fe(VI) Water Purification and Remediation. *Environmental Science and Technology*, 39(2005), 8071 - 8076
DOI: 10.1021/es051084k.

- Lillo, J. (Enero de 2008). *Peligros geoquímicos: arsénico de origen natural en las aguas*. Recuperado el 07 de Julio de 2018, de Universidad Complutense de Madrid: <https://www.ucm.es/data/cont/media/www/pag-15564/Peligros%20geoqu%C3%ADmicos%20del%20ars%C3%A9nico%20-%20Javier%20Lillo.pdf>
- Liviac, D., Creus, A., y Marcos, R. (2009). Genotoxicity analysis of two halonitromethanes, a novel group of disinfection by-products (DBPs), in human cells treated in vitro. *Environmental Research*, 109(2009) 232-238 DOI: 10.1016/j.envres.2008.12.009.
- Ma, J., y Liu, W. (2002). Effectiveness and mechanism of potassium ferrate(VI) preoxidation for algae removal by coagulation. *Water Research*, 36 (2002) 871-878.
- Máková, Z., Bouzek, K., y Sharma, V. (2009). The influence of electrolyte composition on electrochemical ferrate(VI) synthesis. Part I: anodic dissolution kinetics of pure iron. *Journal of Applied Electrochemistry*, 40(5) 1019-1028 DOI: 10.1007/s10800-009-0051-8.
- Máková, Z., Bouzek, K., Híves, J., Sharma, V., Terryn, R., y Baum, C. (2009). Research progress in the electrochemical synthesis of ferrate(VI). *Electrochimica Acta*, 54(2009) 2673 - 2683.
- McClintock, T., Chen, Y., Bundschuh, J., Oliver, J., Navoni, J., Olmos, V., Parvez, F. (2012). Review Arsenic exposure in Latin America: Biomarkers, risk assessments and related effects. *Science of the Total Environment* 429, 76-91 DOI: 10.1016/j.scitotenv.2011.08.051.
- Ministerio de Economía y Finanzas. (2011). *Análisis funcional: Inversión pública en agricultura - riego*. Recuperado el 28 de Abril de 2016, de www.snip.gob.pe/contenidos/politicas/difusion/boletin/boletin4/analisis_funcional.pdf
- Ministerio del Ambiente (2017). DS N° 004-2017-MINAM : Aprueban Estándares de Calidad Ambiental (ECA) para Agua y establecen Disposiciones Complementarias.
- Moreno, P. M. (2009). Arsénico en aguas subterráneas y su transferencia al suelo y a la planta. *Tesis doctoral*. Universidad de Valladolid.
- National Electronic Publications Information System (2005). *Treatment Technologies For Arsenic Removal* . Recuperado de National Service Center for Environmental Publications (NSCEP): <https://nepis.epa.gov/Exe/ZyPURL.cgi?Dockkey=20017IDW.txt>
- Organización de las Naciones Unidas para la agricultura y la alimentación. (2002). *Alimentos inocuos y nutritivos para los consumidores*. Recuperado de Fao.org: <http://www.fao.org/worldfoodsummit/sideevents/papers/y6656s.htm>
- Organización Mundial de la Salud (2011). *Arsenic in drinking water*. Recuperado el 14 de Julio de 2018, de World Health Organization:

http://www.who.int/water_sanitation_health/water-quality/guidelines/chemicals/arsenic.pdf

- Prucek, R., Tuček, J., Kolařík, J., Filip, J., Marušák, Z., Sharma, V., y Zbořil, R. (2013). Ferrate(VI)-Induced Arsenite and Arsenate Removal by In Situ Structural Incorporation into Magnetic Iron(III) Oxide Nanoparticles. *Environmental Science and Technology*, 47(7) 3283–3292 DOI: 10.1021/es3042719.
- Quino-Favero, J., Eyzaguirre, R., Mogrovejo, P., Prieto, P., y Del Pino, L. F. (2018). Electrochemical synthesis of ferrate(VI): Optimization of parameters and evaluation of their impact in production cost. *Desalination and Water Treatment*, 113, 179-186. DOI:10.5004/dwt.2018.22262.
- Rojas Meza, M. E. (2016). Los experimentos demostrativos como metodología de transferencia de tecnología agronómica en un marco de investigación participativa. Perú.
- Seimer, R., Reinhart, D., Sharma, V., y Austin, G. (2007). The application of the Green oxidant ferrate for Wastewater disinfection and reuse to be utilized for wetland restoration, irrigation and groundwater recharge. *Desinfection*.
- Serrano, M., Montesinos, I., Cardador, M., Silva, M., y Gallego, M. (2015). Seasonal evaluation of the presence of 46 disinfection by-products throughout a drinking water treatment plant. *Science of the Total Environment*, 517(2015) 246 - 258 DOI: 10.1016/j.scitotenv.2015.02.070.
- Shankar, S., Shanker, U., y Shikha. (2014). Arsenic Contamination of Groundwater: A Review of Sources, Prevalence, Health Risks, and Strategies for Mitigation - Review Article. *The Scientific World Journal*, DOI: 10.1155/2014/304524.
- Sharma, V. K., Chen, L., y Zboril, R. (2016). Review on High Valent FeVI (Ferrate): A Sustainable Green Oxidant in Organic Chemistry and Transformation of Pharmaceuticals. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*, 4 (1), 18-34.
- Sharma, V., Anquandah, G., Kim, H., Jiang, J.-Q., y Zboril, R. (2013). Ferrate(VI): A Green Chemistry Oxidant for Removal of Antibiotics in Water. *Novel Solutions to Water Pollution*, 31–44 DOI: 10.1021/bk-2013-1123.ch003.
- Stanford, C., Jiang, J., y Alsheyab, M. (2009). Electrochemical Production of Ferrate (Iron VI): Application to the Wastewater Treatment on a Laboratory Scale and Comparison with Iron (III) Coagulant. *Water, Air, & Soil Pollution*, 209(1-4), 483–488.
- Sterlitech Corporation. (2018). *GE JX MICROFILTRATION (MF) MEMBRANE*. Recuperado el 06 de Agosto de 2018, de Sterlitech Corporation: <https://www.sterlitech.com/microfiltration-mf-membrane-ymjxsp3001.html>
- The National Institute of Environmental Health Sciences. (2005). Report on carcinogens 11 ed.

- Tiwari, D., y Lee, S.-M. (2011). Ferrate(VI) in the Treatment of Wastewaters: A New Generation Green Chemical. *Waste Water - Treatment And Reutilization*, DOI: 10.5772/15500.
- Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura - UNESCO. (2003). *La inercia política exacerba la crisis del agua, según el informe mundial sobre recursos hídricos*. Recuperado el 28 de Abril de 2016, de Portal.unesco.org: http://portal.unesco.org/es/ev.php-url_id=10064&url_do=do_topic&url_section=201.html
- World Health Organization. (2001). United Nations synthesis report on arsenic in drinking water. Geneva.
- Yates, B., Zboril, R., y Sharma, V. (2014). Engineering aspects of ferrate in water and wastewater treatment - a review. *Journal of Environmental Science and Health, Part A*(2014)49, 1603-1614 DOI: 10.1080/10934529.2014.950924.
- Yoon, S.-H. (2015). *Membrane Bioreactor Processes: Processes and Applications*. Taylor & Francis Group. Recuperado el 27 de Julio de 2018, de <http://onlinembr.info/membrane-process/classification-of-membranes-according-to-pore-size/>
- Yunho Lee, M. C. (2004). Chemistry of Ferrate (Fe(VI)) in aqueous solution and its applications as a green chemical. *J. Ind. Eng. Chem. Vol. 10, No 1*, 161-171.

BIBLIOGRAFÍA

Amy, G. (2000). *Arsenic treatability options and evaluation of residuals management issues*. Denver, Colo.: AWWA Research Foundation and American Water Works Association.

Boerschke, R. (2002). *Evaluation of Arsenic Mitigation Technologies for Use in Bangladesh*. Recuperado de <http://archive.unu.edu/env/Arsenic/Boerschke.pdf>

Diaz Garay, B., Jarufe, B., y Noriega, M. T. (2014). *Disposición de planta*. Lima: Fondo Editorial de la Universidad de Lima.

Eaton, A., Hsaio, C., y Northington, J. (1998). *Analytical chemistry of arsenic in drinking water*. Denver, CO: AWWA Research Foundation.

Henke, K. (2009). *Arsenic. Environmental chemistry, health threats and waste treatment*. Wiley.

Howe, K., Hand, D., Crittenden, J., Trussell, R., y Tchobanoglous, G. (2016). *Principios de tratamiento de aguas*. México: Cengage Learning.

Hwang, S. (2002). *Point-of-use arsenic removal from drinking water in Nepal using coagulation and filtration*. Massachusetts Institute of Technology.



Anexo 1: Decreto supremo N° 004-2017-MINAM Estándares de calidad ambiental (ECA) para agua

Tabla N° 1: Estándar de calidad de Amoníaco Total en función de pH y temperatura para la protección de la vida acuática en agua dulce (mg/L de NH₃)

Temperatura (°C)	pH							
	6	6,5	7,0	7,5	8,0	8,5	9,0	10,0
0	231	73,0	23,1	7,32	2,33	0,749	0,250	0,042
5	153	48,3	15,3	4,84	1,54	0,502	0,172	0,034
10	102	32,4	10,3	3,26	1,04	0,343	0,121	0,029
15	69,7	22,0	6,98	2,22	0,715	0,239	0,089	0,026
20	48,0	15,2	4,82	1,54	0,499	0,171	0,067	0,024
25	33,5	10,6	3,37	1,08	0,354	0,125	0,053	0,022
30	23,7	7,50	2,39	0,767	0,256	0,094	0,043	0,021

Nota:

(*)El estándar de calidad de Amoníaco total en función de pH y temperatura para la protección de la vida acuática en agua dulce, presentan una tabla de valores para rangos de pH de 6 a 10 y Temperatura de 0 a 30°C. Para comparar la temperatura y pH de las muestras de agua superficial, se deben tomar la temperatura y pH próximo superior al valor obtenido en campo, ya que la condición más extrema se da a mayor temperatura y pH. En tal sentido, no es necesario establecer rangos.

(**)En caso las técnicas analíticas determinen la concentración en unidades de Amoníaco-N (NH₃-N), multiplicar el resultado por el factor 1,22 para expresarlo en las unidades de Amoníaco (NH₃).

Categoría 3: Riego de vegetales y bebida de animales

Parámetros	Unidad de medida	D1: Riego de vegetales		D2: Bebida de animales
		Agua para riego no restringido (c)	Agua para riego restringido	Bebida de animales
FÍSICOS- QUÍMICOS				
Aceites y Grasas	mg/L		5	10
Bicarbonatos	mg/L		518	**
Cianuro Wad	mg/L		0,1	0,1
Cloruros	mg/L		500	**
Color (b)	Color verdadero Escala Pt/Co		100 (a)	100 (a)
Conductividad	(µS/cm)		2 500	5 000
Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO ₅)	mg/L		15	15
Demanda Química de Oxígeno (DQO)	mg/L		40	40
Detergentes (SAAM)	mg/L		0,2	0,5
Fenoles	mg/L		0,002	0,01
Fluoruros	mg/L		1	**
Nitratos (NO ₃ -N) + Nitritos (NO ₂ -N)	mg/L		100	100
Nitritos (NO ₂ -N)	mg/L		10	10
Oxígeno Disuelto (valor mínimo)	mg/L		≥ 4	≥ 5
Potencial de Hidrógeno (pH)	Unidad de pH		6,5 – 8,5	6,5 – 8,4
Sulfatos	mg/L		1 000	1 000
Temperatura	°C		Δ 3	Δ 3
INORGÁNICOS				
Aluminio	mg/L		5	5

Parámetros	Unidad de medida	D1: Riego de vegetales		D2: Bebida de animales
		Agua para riego no restringido (c)	Agua para riego restringido	Bebida de animales
Arsénico	mg/L		0,1	0,2
Bario	mg/L		0,7	**
Berilio	mg/L		0,1	0,1
Boro	mg/L		1	5
Cadmio	mg/L		0,01	0,05
Cobre	mg/L		0,2	0,5
Cobalto	mg/L		0,05	1
Cromo Total	mg/L		0,1	1
Hierro	mg/L		5	**
Litio	mg/L		2,5	2,5
Magnesio	mg/L		**	250
Manganeso	mg/L		0,2	0,2
Mercurio	mg/L		0,001	0,01
Níquel	mg/L		0,2	1
Plomo	mg/L		0,05	0,05
Selenio	mg/L		0,02	0,05
Zinc	mg/L		2	24
ORGÁNICO				
Bifenilos Policlorados				
Bifenilos Policlorados (PCB)	µg/L		0,04	0,045
PLAGUICIDAS				
Paratión	µg/L		35	35
Organoclorados				
Aldrin	µg/L		0,004	0,7
Clordano	µg/L		0,006	7
Dicloro Difenil Tricloroetano (DDT)	µg/L		0,001	30
Dieldrin	µg/L		0,5	0,5
Endosulfán	µg/L		0,01	0,01
Endrin	µg/L		0,004	0,2
Heptacloro y Heptacloro Epóxido	µg/L		0,01	0,03
Lindano	µg/L		4	4
Carbamato				
Aldicarb	µg/L		1	11
MICROBIOLÓGICOS Y PARASITOLÓGICO				
Coiliformes Termotolerantes	NMP/100 ml	1 000	2 000	1 000
<i>Escherichia coli</i>	NMP/100 ml	1 000	**	**
Huevos de Helmintos	Huevo/L	1	1	**

(a): Para aguas claras. Sin cambio anormal (para aguas que presentan coloración natural).

(b): Después de filtración simple.

(c): Para el riego de parques públicos, campos deportivos, áreas verdes y plantas ornamentales, sólo aplican los parámetros microbiológicos y parasitológicos del tipo de riego no restringido.

Δ 3: significa variación de 3 grados Celsius respecto al promedio mensual multianual del área evaluada.

Nota 4:

- El símbolo ** dentro de la tabla significa que el parámetro no aplica para esta Subcategoría.

- Los valores de los parámetros se encuentran en concentraciones totales, salvo que se indique lo contrario.

Anexo 2: Instrumentos, equipos materiales y reactivos

Especificaciones de instrumentos/equipos

Instrumento/Equipo	Especificaciones
 A white laboratory instrument with four digital displays and four glass beakers, used for water testing.	<p>Test de Jarras</p> <p>Dimensiones: 710x380x200 mm Peso: 12 kg Marca: Platypus Modelo: 4GJT1L Potencia: 37.5 W</p>
 A white analytical balance with a stainless steel weighing pan and a digital display showing 0.0000.	<p>Balanza Analítica</p> <p>Dimensiones: 11.9" x 13" x 9.1" Marca : SARTORIUS Modelo: ENTIX 224-1S Capacidad: 120 g División: 0,1 mg Potencia: 120 VAC</p>
 Two Eppendorf micropipettes, one with a blue tip and one with a yellow tip.	<p>Micropipetas</p> <p>Marca : Eppendorf Modelo: Research PLUS Capacidad: De 100 a 1000 μL De 10 a 100 μL De 500 a 5000 μL</p>

(continúa)

(continuación)

	<p>Multímetro digital</p> <p>Marca : SANWA Modelo: CD772 Frecuencia de muestreo: 3 veces/s Ancho de banda de frecuencia AC: 45~500Hz (rango de 4V), 45~1KHz (rango de 40V a mas)</p>
	<p>Turbidímetro</p> <p>Dimensiones: 190 x 110 x 55 mm Peso: 0.4 kg Marca: Lovibond Modelo: TB 210 IR Rango: 0.01 a 1100 NTU Precisión: $\pm 2,5$ % of reading or ± 0.01 NTU (0 - 500 NTU) ± 5 % (500 - 1100 NTU) Fuente de alimentación: Batería de 9 V</p>
	<p>Titulador digital</p> <p>Marca: HACH Modelo: 16900 Entrega: 800 dígitos/mL o 0.00125 mL/dígitos Precisión ± 1% para lecturas de más de 100 dígitos. Peso: 132 g (4.7 oz.)</p>
	<p>Colorímetro</p> <p>Marca: HACH Modelo: DR 890 Rango de longitud de onda: 420, 520, 560, 610 nm Selección de longitud de onda: Automático, basado en la prueba seleccionada Tamaño de la pantalla: 38 mm x 64 mm</p>

(continúa)

(continuación)

	<p>Agitador magnético</p> <p>Marca: IKA Modelo: Lab disc Número de puestos de agitación: 1 Max. cantidad a agitar (H₂O): 0.8 L Potencia del suministro del motor: 3 W Rango de velocidad: 15 - 1500 rpm Dimensiones: 117 x 12 x 180 mm Peso: 0.3 kg</p>
	<p>Bomba de vacío</p> <p>Marca: TRIVAC Tipo: D1.6B Modelo: Leybold Heraeus Potencia: 230V, 50/60Hz Velocidad de bombeo: 16,5 m³/h Ultima Presión: $\leq 2 \times 10^{-3}$ mbar Aceite estándar: LEYBONOL LVO 100, Cantidad de aceite necesario: 1L</p>
	<p>Espectrofotómetro UV/Vis</p> <p>Marca: Perkin-Elmer Modelo: Lambda 40 Rango de longitud de onda (nm): 190 - 1100 Precisión de la longitud de onda (\pm nm) : 0.1 Velocidad máxima de escaneo (nm / min): 2800</p>
	<p>Medidor multiparámetro portátil</p> <p>Marca: HACH Modelo: HQ40d Rango de medición de conductividad: 0.01 μS / cm - 200.0 mS / cm Rango de medición DO: 0.1 - 20.0 mg / L (ppm) 1 - 200% de saturación Entradas: 2 Rango de medición mV: -1500 - 1500 mV Rango de medición de pH: 0 - 14 pH Rango de medición de salinidad: 0 - 42 (ppt) (‰) Rango de medición TDS: 0.00 mg / L - 50.0 g / L NaCl</p>

Elaboración propia

Anexo 3: Datos de ensayos de prueba de jarras

Remoción de arsénico empleando 1, 2 y 3 mg/L de ferrato(VI) con 3, 6 y 9 mg/L de Fe(III), seguido de microfiltración en 0.45 µm.

Fe (VI) mg/L	Fe(III) mg/L	Arsénico remanente (mg/L)				As Total µg/L	pH
		R1	R2	R3	R4		
Blanco		493.6	499.3	518.4	520.8	508 ± 13.6	
0	0	472.1	472.8	480.7	465.8	472.8 ± 6.1	7.1 ± 0.1
1	0	392.9	389.9	377.2	377.8	384.4 ± 8.2	7 ± 0
2	0	286.2	290.1	278.4	270.6	281.3 ± 8.6	7.1 ± 0.3
3	0	201.1	199.9	248.4	249.8	224.8 ± 28.1	7 ± 0.3
0	3	219.6	216.8	204.3	205.7	211.6 ± 7.7	7 ± 0.1
1	3	31.3	33.1	29.3	30.6	31.1 ± 1.6	6.9 ± 0
2	3	18.2	17.7	22.3	22.3	20.1 ± 2.5	6.9 ± 0.1
3	3	12.6	13.6	14.4	15.4	14 ± 1.2	7 ± 0.2
0	6	146.3	143.7	153.9	149.5	148.4 ± 4.4	7 ± 0
1	6	6.6	6.9	2.6	4.0	5 ± 2.1	6.8 ± 0.2
2	6	3.6	4.4	7.3	6.9	5.5 ± 1.8	6.9 ± 0.1
3	6	3.9	3.6	4.7	4.7	4.2 ± 0.6	7 ± 0
0	9	116.5	114.0	106.1	102.8	109.8 ± 6.5	6.8 ± 0.1
1	9	4.6	4.5	1.2	0.4	2.7 ± 2.2	6.8 ± 0.4
2	9	2.1	2.1	1.3	1.2	1.7 ± 0.5	6.7 ± 0.3
3	9	3.5	3.6	0.9	1.4	2.3 ± 1.4	6.8 ± 0.5

Elaboración propia

Anexo 4: Datos de ensayos con otras dosis Fe(VI)/Fe(III)

Remoción de arsénico empleando 0.5 y 1 mg/L de ferrato(VI) con 10 y 15 mg/L de Fe(III), seguido de microfiltración en 0.45 μm .

Fe (VI)	Fe(III)	As Total remanente	pH
mg/L	mg/L	mg/L	
Blanco		0,512	7,55
0	10	0,044	6,81
0	10	0,061	6,80
0,5	10	0,010	7,06
0,5	10	0,010	7,07
1	10	0,009	7,58
1	10	0,010	7,62
0	15	0,032	6,66
0	15	0,033	6,70
0,5	15	0,008	6,89
0,5	15	0,007	6,83
1	15	0,007	7,17
1	15	0,008	7,16

Elaboración propia

Anexo 5: Cotización para el Hidróxido de sodio al 50%

Abastecimientos Químicos CIATEX SAC

"Al servicio de la industria peruana desde 1988"

RUC: 20504178243

PROFORMA

Lima, 04 de mayo de 2016

Señores: JUAN CARLOS VILCHEZ MELO

Atención:

Ref:

Estimado Señor:

A continuación detallamos cotización, según su solicitud

PRECIOS SUJETOS A VARIACIÓN
CONFORME A LA ESCALA CORRESPONDIENTE Y
A LA CANTIDAD SOLICITADA POR PRODUCTO

Cantidad	Und	Descripción	Lote	Ubicac.	Codigo	Precio	Total	
							US\$	US\$
192.400	Kg	SODA CAUSTICA 50% soluc. aq.	LT61103151	D1U4A	HXS0101	0.600 A	109.44	
1.000	Un	CILINDRO PR. 200 Lt 2gu tapa rosca 1a	S/N		EPL5401	24.050 B	24.05	
							V. VENTA	133.49
							I.G.V. 18%	24.03
							TOTAL US\$	157.52

" BUEN CONTRIBUYENTE SEGÚN RES-INT-SUNAT N° 0230050129993 "

Proforma válida por 03 días o hasta agotar stock

LUGAR DE ENTREGA: NUESTROS ALMACENES

FORMA DE PAGO: CONTADO EFECTIVO

Esperando sus gratas órdenes, quedamos de Usted.

Atentamente,



Christian Osorio Farfán
Asesor de Ventas

ABASTECIMIENTOS QUÍMICOS CIATEX SAC
www.aqciatex.com

Ventas: 3320164 - 332 5895 - 332 6252 - 4232641

RPC: 989-001-691

Jr. Don Bosco 353 - Breña

Horario: L - V : 8:10 am - 12:30 pm / 2:00 pm - 5:30 pm // Sab: 8:20 am - 12:30 pm



Anexo 6: Cotización para el cloruro férrico al 40%

QUIMICOS GOICOCHEA S.A.C.

qgventas@quimicosgoicochea.com

Av. Nestor Gambetta 150 - Callao
 VENTAS TEL.: 614-4400
 FAX.: 614-4401
 NEXTEL: 101*4338 - 833*8757
 RPM: #525791

CLIENTE	COTIZACION N°: 000174898
PROGRAMA NACIONAL DE INNOVACION AGRARIA	TELEFONO : (511) 344 4109
	FAX :

FECHA 13/09/2018	Banco Continental : S/.0362-01-0000-6188	Banco Scotiabank : S/.0004551966	FORMA DE PAGO Depósito en cuenta adelantado	MONEDA NUEVOS SOLES
	Cta. Cte.: \$ 0362-01-0000-5513	Cta. Cte.: \$ 0002797331		
	Banco de Credito : S/.194-1057-807-0-17	Banco Interbank : S/.041-3000302546		
	Cta. Cte.: \$ 192-1147717-1-09	Cta. Cte.: \$ 041-3000302553		

N°	UND.	DESCRIPCIÓN	CANT.	PRECIO UNIT. SIN IG.V.	PREC. TOT. SIN IG.V	PREC. TOT. INC. IG.V
1	UND	CLORURO FERRICO EN SOLUCION AL 40% (BIDON 40KG)	1	115.000000	115.00	135.70



Anexo 7: Tarifario de energía eléctrica

EMPRESA DE DISTRIBUCION ELECTRICA LUZ DEL SUR S.A.A.

PRECIOS PARA LA VENTA DE ENERGIA ELECTRICA (incluye IGV)

PLIEGO TARIFARIO RETROACTIVO : 04 NOVIEMBRE 2018 (/1)

LDS2018-11

		Sistema Lima Sur	
	Unidad	MT2	BT2
MEDICION DOBLE DE ENERGIA Y CONTRATACION O MEDICION DE DOS POTE			
Cargo Fijo mensual	S./Usuario	6,34	6,34
Cargo por Energía en punta	cent S./kW.h	28,39	30,87
Cargo por Energía fuera de punta	cent S./kW.h	23,85	25,92
Cargo por potencia activa de generación en horas punta	S./kW-mes	64,96	68,51
Cargo por potencia activa por uso redes de distribución en horas punta	S./kW-mes	10,29	51,35
Cargo por exceso de potencia por uso redes de distribución en horas fuera de punta	S./kW-mes	11,15	42,59
Cargo por energía reactiva que exceda del 30% del total de la energía activa	cent S./kvarh	5,44	5,44
MEDICION DOBLE DE ENERGIA Y UNA POTENCIA CONTRATADA (2E1P)			
	Unidad	MT3	BT3
Cargo Fijo mensual	S./Usuario	6,32	6,32
Cargo por Energía en punta	cent S./kW.h	28,39	30,87
Cargo por Energía fuera de punta	cent S./kW.h	23,85	25,92
Cargo por potencia activa de generación para calificación "Presentes punta"	S./kW-mes	56,73	60,60
Cargo por potencia activa de generación para calificación "Fuera punta"	S./kW-mes	37,22	40,06
Cargo por potencia activa por uso redes de distribución para calificación "Pres	S./kW-mes	11,20	53,30
Cargo por potencia activa por uso redes de distribución para calificación "Fuer	S./kW-mes	11,17	49,11
Cargo por energía reactiva que exceda del 30% del total de la energía activa	cent S./kvarh	5,44	5,44
SIMPLE MEDICION DE ENERGIA Y UNA POTENCIA CONTRATADA (1E1P)			
	Unidad	MT4	BT4
Cargo Fijo mensual	S./Usuario	6,32	6,32
Cargo por Energía	cent S./kW.h	24,87	27,05
Cargo por potencia activa de generación para calificación "Presentes punta"	S./kW-mes	56,73	60,60
Cargo por potencia activa de generación para calificación "Fuera punta"	S./kW-mes	37,22	40,06
Cargo por potencia activa por uso redes de distribución para calificación "Pres	S./kW-mes	11,20	53,30
Cargo por potencia activa por uso redes de distribución para calificación "Fuer	S./kW-mes	11,17	49,11
Cargo por Energía Reactiva que exceda el 30% del total de la Energía Activa	cent S./kvarh	5,44	5,44
DOBLE MEDICION DE ENERGIA (2E)			
	Unidad		BT5A
Cargo Fijo mensual	S./Usuario		6,32
Cargo por Energía en punta para demandas hasta 20 kW en horas punta y fuer	cent S./kW.h		213,04
Cargo por Energía en punta para demandas hasta 20 kW en hor.punta y 50 kW	cent S./kW.h		184,39
Cargo por Energía fuera de punta	cent S./kW.h		25,92
Cargo por exceso de potencia en horas fuera de punta	S./kW-mes		46,16
Cargo por exceso de potencia en horas de punta	S./kW-mes		46,16
SIMPLE MEDICION DE ENERGIA (1E)			
	Unidad		BT5C-AP
Cargo Fijo mensual	S./Usuario		3,50
Cargo por Energía	cent S./kW.h		62,61
CLIENTES A PENSION FIJA			
	Unidad		BT6
Cargo Fijo mensual	S./Usuario		3,27
Cargo mensual por Potencia	cent S./Watt		25,20

MCMLXII
SCIENTIA ET PRAXIS