



UNIVERSIDAD JOSÉ CARLOS MARIÁTEGUI

VICERRECTORADO DE INVESTIGACIÓN

**FACULTAD DE INGENIERÍA Y
ARQUITECTURA**

ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA AMBIENTAL

T E S I S

**EFFECTO DE HIERRO Y pH EN EL MÉTODO SORAS SOBRE
LA REMOCIÓN DE ARSÉNICO DEL AGUA OBTENIDA EN
LA CAPTACIÓN DEL CENTRO POBLADO
TOLAPALCA, DISTRITO DE ICHUÑA,
REGIÓN MOQUEGUA, 2019**

PRESENTADA POR

BACHILLER DENIS SAUL CHAMBILLA APAZA

ASESOR

MGR. ERIK EDWIN ALLCCA ALCA

**PARA OPTAR TÍTULO PROFESIONAL DE
INGENIERO AMBIENTAL**

MOQUEGUA – PERÚ

2022

CONTENIDO

	Pág.
Página de jurado	i
Dedicatoria	ii
Agradecimiento	iii
Contenido	iv
Contenido de tablas	viii
Contenido de figuras	x
Contenido de apéndices.....	xi
Resumen.....	xii
Abstract	xiii
Introducción	xiv

CAPÍTULO I

PLANTEAMIENTO DE LA INVESTIGACIÓN

1.1. Descripción de la realidad del problema	1
1.2. Definición del problema	3
1.2.1. Problema general.....	3
1.2.2. Problemas específicos	3

1.3. Objetivos de la investigación.....	4
1.3.1. Objetivo general	4
1.3.2. Objetivos específicos.....	4
1.4. Justificación	4
1.5. Alcances y limitaciones	6
1.5.1. Alcances	6
1.5.2. Limitaciones	6
1.6. Variables	6
1.6.1. Identificación de variables	6
1.6.2. Operacionalización de variables.....	7
1.7. Hipótesis de la investigación	7
1.7.1. Hipótesis general	7
1.7.2. Hipótesis específicas	8

CAPÍTULO II

MARCO TEÓRICO

2.1. Antecedentes de la investigación.....	9
2.2. Bases teóricas.....	11
2.2.1. Agua	11
2.2.2. Arsénico	12
2.2.3. Presencia de arsénico en el Perú.....	14
2.2.4. Tratamiento del agua con arsénico.....	15
2.2.5. Aplicaciones realizadas	21

2.3. Definición de términos	22
-----------------------------------	----

CAPÍTULO III

MÉTODO

3.1. Tipo de la investigación.....	23
3.2. Diseño de la investigación	24
3.3. Ubicación de la realización del experimento.....	26
3.4. Población y muestra.....	26
3.4.1. Población.....	26
3.4.2. Muestra.....	26
3.5. Descripción de instrumentos para recolección de datos	27
3.5.1. Equipos y materiales	27
3.5.2. Técnica para la recolección de datos	28

CAPÍTULO IV

ANÁLISIS E INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS

4.1. Presentación de resultados.....	31
4.1.1. Determinación de las propiedades fisicoquímicas del agua obtenida en la captación del centro poblado Tolapalca en el distrito de Ichuña.	31
4.1.2. Evaluación del efecto de hierro y pH utilizando el método SORAS sobre las características fisicoquímicas (pH, conductividad eléctrica, sólidos disueltos totales y turbidez) del agua obtenida en la captación del centro poblado Tolapalca.	32

4.1.3. Evaluación del efecto de hierro y pH utilizando el método SORAS sobre la remoción de arsénico del agua obtenida en la captación del centro poblado Tolapalca	43
4.2. Contraste de hipótesis	45
4.3. Discusión de resultados	46
4.3.1. Determinación de las propiedades fisicoquímicas del agua obtenida en la captación del centro poblado Tolapalca en el distrito de Ichuña.	46
4.3.2. Evaluación del efecto de hierro y pH utilizando el método SORAS sobre las características fisicoquímicas (pH, conductividad eléctrica, sólidos disueltos totales y turbidez) del agua obtenida en la captación del centro poblado Tolapalca.	47
4.3.3. Evaluación del efecto de hierro y pH utilizando el método SORAS sobre la remoción de arsénico del agua obtenida en la captación del centro poblado Tolapalca	49

CAPÍTULO V

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1. Conclusiones.....	50
5.2. Recomendaciones	52
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	53
APÉNDICE	61

CONTENIDO DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1. Operacionalización de variables	7
Tabla 2. Energías para la formación de especies arsénicas a 25 ° C.....	14
Tabla 3. Valores parámetros obtenidos en la captación del centro poblado	
Tolapalca	31
Tabla 4. Resumen del experimento con respecto al resultado de pH.....	32
Tabla 5. Análisis de varianza para los resultados de pH.....	33
Tabla 6. Prueba de significancia LSD Fisher para factor pH sobre el pH de	
resultado	34
Tabla 7. Prueba de significancia LSD Fisher para factor concentración sobre el pH	
de resultado.....	34
Tabla 8 Resumen del experimento con respecto al resultado de conductividad	
eléctrica.....	35
Tabla 9. Análisis de varianza para los resultados de conductividad eléctrica	36
Tabla 10. Prueba de significancia LSD Fisher para factor pH sobre la	
conductividad eléctrica.....	37
Tabla 11. Resumen del experimento con respecto al resultado de solidos disueltos	
totales.....	37
Tabla 12. Análisis de varianza para los resultados de solidos disueltos totales....	38
Tabla 13. Prueba de significancia LSD Fisher para factor pH sobre los sólidos	
disueltos totales	39
Tabla 14. Prueba de significancia LSD Fisher para factor pH * concentración	
sobre los sólidos disueltos totales.....	40

Tabla 15. Resumen del experimento con respecto al resultado de turbidez	40
Tabla 16. Análisis de varianza para los resultados de turbidez.....	41
Tabla 17. Prueba de significancia LSD Fisher para factor pH sobre la turbidez ..	42
Tabla 18. Prueba de significancia LSD Fisher para factor concentración sobre la turbidez	42
Tabla 19. Prueba de significancia LSD Fisher para factor pH * concentración sobre la turbidez.....	43
Tabla 20. Resumen del experimento con respecto al resultado de solidos disueltos totales.....	44
Tabla 21. Análisis de varianza para los resultados de remoción de As	44

CONTENIDO DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. Numero de coordinación para el arsénico.....	12
Figura 2. El diagrama Eh-pH para As a 25 ° C ^t	16
Figura 3. Complejos de citrato de hierro y especies oxidadas de oxígeno en reacción fotoquímica	19
Figura 4. Principio básico de Soras de un reactor oxidante con iluminación fotoquímica.....	20
Figura 5. Uso de la radiación solar en el tratamiento de agua.....	20
Figura 6. Diseño del proyecto de investigación	25
Figura 7. Ubicación de la captación en el Centro Poblado Tolapalca - Ichuña. ...	28
Figura 8. Superficie de respuesta para los resultados obtenidos de la interacción entre pH * concentración sobre el pH del tratamiento	33
Figura 9. Superficie de respuesta para los resultados obtenidos de la interacción entre pH * concentración sobre la conductividad eléctrica	35
Figura 10. Superficie de respuesta para los resultados obtenidos de la interacción entre pH * concentración sobre los sólidos disueltos totales.....	38
Figura 11. Superficie de respuesta para los resultados obtenidos de la interacción entre pH * concentración sobre la turbidez	41
Figura 12. Superficie de respuesta para los resultados obtenidos de la interacción entre pH * concentración sobre la remoción porcentual de As.	45

CONTENIDO DE APÉNDICES

	Pág.
Apéndice A. Resultados de los diferentes tratamientos	61
Apéndice B. Resultado de análisis de arsénico	62
Apéndice C. Remoción de As	66
Apéndice D. Panel fotográfico	67
Apéndice E. Matriz de consistencia	75

RESUMEN

El presente trabajo de investigación presento como objetivos: determinar la calidad agua de la captación de Tolapalca y el efecto del pH (6,5; 7 y 7,5 pH) y concentración de viruta de hierro (5, 10 y 15 g/L) utilizando el método de fotoxidación solar (SORAS) sobre los parámetros fisicoquímicos y la remoción del arsénico del agua. Las propiedades como pH, conductividad eléctrica, sólidos disueltos totales, turbidez y arsénico obtuvieron valores de 7,733 pH, 1281 $\mu\text{S}/\text{cm}$, 581.4 mg/L, 0,627 NTU y 0,067 mg/L. Del efecto del pH y concentración se obtuvo: pH entre 6,31 a 7,23 pH, conductividad eléctrica entre 1180 a 1250 $\mu\text{S}/\text{cm}$, sólidos disueltos totales entre 591,5 a 631,6 mg/L, y en el caso de la turbidez la interacción de pH 6,5 y a las diferentes concentraciones (5, 10 y 15 g/L) con 1,3 a 1,78 NTU, estos se encuentran dentro de los niveles recomendados en el Decreto Supremo N° 004-2017-MINAM, el resto de tratamientos muestra valores de 5,73 a 36,37 NTU, y a pH 7 se muestran los mayores valores de turbidez 18,5 a 36,37 NTU, por lo que para el tratamiento de agua no debe utilizarse a pH neutro o básicos. Sobre el contenido de As la concentración inicial fue de 0.067 mg/L y se redujo hasta ~ 0,0012 mg/L estos valores se encuentran dentro de los niveles recomendados en el Decreto Supremo N° 004-2017-MINAM, además que se removió ~ 82,09 % de As.

Palabras clave: Fotoxidación solar (SORAS), remoción de arsénico, tratamiento de agua.

ABSTRACT

The objectives of this research work are: to determine the water quality of the Tolapalca catchment and the effect of the pH (6.5; 7 and 7.5 pH) and iron chip concentration (5, 10 and 15 g / L) using the method of solar photooxidation (SORAS) on the properties and removal of arsenic from water. Properties such as pH, electrical conductivity, total dissolved solids, turbidity and arsenic obtained values of 7,733 pH, 1281 $\mu\text{S} / \text{cm}$, 581.4 mg/L, 0.627 NTU and 0.067 mg / L. From the effect of pH and concentration, the following was obtained: pH between 6.31 to 7.23 pH, electrical conductivity between 1180 to 1250 $\mu\text{S} / \text{cm}$, total dissolved solids between 591.5 to 631.6 mg / L, and in the case of turbidity the interaction of pH 6.5 and at the different concentrations (5, 10 and 15 g / L) with 1.3 to 1.78 NTU, these are within the levels recommended in Supreme Decree No. 004-2017 - MINAM, the rest of the treatments show values of 5.73 to 36.37 NTU, and at pH 7 the highest turbidity values are shown: 18.5 to 36.37 NTU, so for water treatment it should not be used at Neutral or basic pH. Regarding the content of As, the initial concentration was 0.067 mg / L and it was reduced to ~ 0.0012 mg / L, these values are within the levels recommended in Supreme Decree No. 004-2017-MINAM, in addition to removing $\sim 82.09\%$ of As

Key words: Solar photooxidation (SORAS), arsenic removal, water treatment.

INTRODUCCIÓN

El arsénico es un elemento considerado vigésimo metaloide natural más alto que se encuentra en la corteza terrestre (Alka et al., 2021). Las concentraciones en el aire en lugares pueden oscilar entre 1 a 3 ng/m³, pero las concentraciones en las ciudades pueden aumentar a 100 ng/m³ (Wang et al., 2017). Las concentraciones en el agua suelen ser menores a 10 µg/l, aunque suelen presentarse concentraciones más elevadas cerca de depósitos minerales o fuentes antropogénicas, en suelos usualmente se presentan en un rango de 1 a 40 mg/kg, pero aplicación de pesticidas o eliminación de desechos puede producir valores mucho más altos (Da Silva et al., 2019), la concentración promedio de arsénico en la tierra es de aproximadamente 5 mg/l (Gomez et al., 2001).

Las actividades naturales y antropogénicas conducen a la liberación de compuestos arsenicales que varían en toxicidad, movilidad y biodisponibilidad a partir de minerales que contienen arsénico (calcopirita [CuFeS₂], arsenopirita [FeAsS] y tetraedrita [(Cu,Fe)₁₂Sb₄S₁₃]), en el pasado, el trióxido de arsénico [As₂O₃] se usaba para la preservación de la madera; sin embargo, a partir de 2003 su uso en esta industria se ha detenido debido a las preocupaciones de salud pública (Long et al., 2012).

El arsénico se libera a la atmósfera durante procesos que involucran altas temperaturas, como la quema de carbón en centrales térmicas, la quema de vegetación y el volcanismo. La biometilación a baja temperatura y la reducción natural de arcina también liberan arsénico en la atmósfera. Es principalmente en forma de As₂O₃ que el arsénico se libera a la atmósfera donde se adsorbe

principalmente a partículas en suspensión. Estas partículas se dispersan por el viento y vuelven al suelo al sedimentarse o secarse (Gomez et al., 2001).

El consumo industrial mundial de arsénico ha disminuido como resultado de que las industrias agrícolas ya no usan pesticidas, herbicidas y fungicidas a base de arsénico (Nazari et al., 2017). El arsénico se usa actualmente en aditivos para la fabricación de baterías de automóviles, en agentes antifricción en rodamientos y en semiconductores de arseniuro de galio [GaAs] (Long et al., 2012).

El arsénico se encuentra de forma natural en el ambiente, su concentración genera contaminación tanto en suelo como en agua, por lo que su presencia es común en países como Argentina, Brasil, Chile, China, India, México y Taiwán, entre otros (Podgorski y Berg, 2020). El arsénico fue clasificado por la Agencia Internacional para la Investigación sobre el Cáncer International IARC), como un agente carcinogénico para humanos con base en estudios epidemiológicos que relacionan la ingestión de arsénico en el agua de bebida y cáncer en la piel (Carabantes y Fernicola, 2003), siendo un problema en la salud pública. Un estudio realizado en los distritos de Torata y Carumas de la Provincia Mariscal Nieto región Moquegua, en 86 niños comprendidos entre 6 y 12 años de mostraron que el 100 % de 60 niños de Torata y el 100% de 26 niños de Carumas presentan valores superiores a los 20 $\mu\text{g/g}$ creatinina en muestras de orina (Trujillo, 2019), en los distritos de Cairani y Camilaca ubicados en la provincia de Candarave, región Tacna, se demostró que el 100 % de 103 pobladores de Cairani y el 80,3 % de 57 pobladores de Camilaca superaron los valores de 20 $\mu\text{g/g}$ creatinina en muestras de orina, que es el límite de referencia (Ale et al., 2018).

CAPÍTULO I

PLANTEAMIENTO DE LA INVESTIGACIÓN

1.1. Descripción de la realidad del problema

La necesidad del consumo de agua por parte de la población se viene acrecentando día a día, y si bien es un elemento mas abundante en el planeta ocupando el 70 % de este (Fernández, 2012), además que se encuentra en los tres estados: solido (glaciares), gaseoso (aire) y liquido (aguas dulces y saladas), considerando que el 3% de toda el agua líquida corresponde al agua dulce solo esta no se puede utilizar debido a que mucha de ella se encuentra contaminada y solo el 0,025 % es agua que puede ser potabilizada o consumida directamente. Es por ello la necesidad de poder utilizar adecuadamente el agua.

La contaminación del agua se debe a su capacidad de disolver diferentes sustancias a su forma iónica y mantenerlas como una mezcla homogénea (siempre en cuando sean solubles en agua), por lo que, el agua es capaz de acumular una carga iónica considerable, estas le otorgan propiedades como es la dureza, y concentración de sustancias como metales (sodio y magnesio) y de metales pesados (arsénico, cadmio, plomo, mercurio, entre otros) (Brenes y Rojas, 2005).

El arsénico (As) es un metal que, puede alterar la integridad de células humanas y material genético, El arsénico inorgánico causa toxicidad a través de la reacción del arsenito con la proteína de grupos sulfhidrilo, así como la sustitución de la posición de un grupo fosfato por arseniato. Estos arsénicos inorgánicos están asociados con cánceres, efectos cardiovasculares, pulmonares, inmunológicos, y trastornos endocrinos, efectos sobre la salud reproductiva, trastornos neurológicos, enfermedad hepática, trastornos gastrointestinales, genotoxicidad, arsenicosis e infecciones dérmicas (Alka et al., 2021), es por ello por lo que el Organismo Mundial de la Salud OMS, y la normatividad peruana según el Decreto Supremo N° 003-2010-MINAM, establecen que el agua de consumo no deberá superar los 0,01 mg/l. El Perú en la actualidad cuenta con plantas de potabilización en las zonas urbanas ubicadas principalmente en las capitales de los departamentos o regiones, y solo cubren el cercado de la ciudad, los distritos que no cuentan con recursos, tampoco cuentan con plantas de potabilización, por lo que los pobladores consumen agua a partir de las captaciones, puquios u ojos de agua.

En el distrito de Ichuña se han realizado monitoreos de calidad de agua por parte del Gerencia Regional de Salud Moquegua por encargo del Gobierno Regional de Moquegua, ello según el Artículo 8 del Decreto Supremo N° 031-2010-SA, Reglamento de la calidad del agua para consumo humano. En el Monitoreo realizado el 2020, según Informe N° 0859-2020-GRM-GERESA/GR-DRSM-OSIC, muestra que el agua captada en el lugar denominado Tolapalca obtuvo un valor de 0.0188 mg de As/l, por lo que las personas se encuentran expuestas a una contaminación por As y, a corto o mediano plazo ello ira en desmedro de su salud.

El presente trabajo de investigación propone reducir el contenido de As y evaluar los cambios en las propiedades fisicoquímicas (turbidez, pH, conductividad eléctrica y solidos disueltos totales) del agua obtenida en la captación del centro poblado Tolapalca por medio del método de remoción de arsénico por oxidación solar (Solar oxidation and removal of arsenic - SORAS).

1.2. Definición del problema

1.2.1. Problema general.

¿Cuál es el efecto de hierro y pH en el método soras la remoción de arsénico del agua obtenida en la captación del centro poblado Tolapalca del distrito de Ichuña, región Moquegua 2019?

1.2.2. Problemas específicos.

¿Cuáles son los parámetros físicos, químicos y contenido de arsénico en el agua obtenida en la captación del del centro poblado Tolapalca en el distrito de Ichuña?

¿Cuál es el efecto de hierro y pH utilizando el método SORAS en los parámetros físicos, químicos (pH, turbidez, conductividad eléctrica, solidos disueltos totales) del agua obtenida en la captación del centro poblado Tolapalca en el distrito de Ichuña?

¿Cuál es el efecto de hierro y pH utilizando el método SORAS en la remoción de arsénico del agua obtenida en la captación del centro poblado Tolapalca en el distrito de Ichuña?

1.3. Objetivos de la investigación

1.3.1. Objetivo general.

Evaluar el efecto de hierro y pH en el método soras la remoción de arsénico del agua obtenida en la captación del centro poblado Tolapalca del distrito de Ichuña, región Moquegua 2019.

1.3.2. Objetivos específicos.

Determinar los parámetros físicos, químicos del agua obtenida en la captación de Tolapalca en el distrito de Ichuña.

Evaluar el efecto de hierro y pH utilizando el método SORAS sobre parámetros físicos, químicos (pH, turbidez, conductividad eléctrica y solidos disueltos totales) del agua obtenida en la captación de Tolapalca en el distrito de Ichuña.

Evaluar el efecto de hierro y pH utilizando el método SORAS sobre la remoción de arsénico del agua obtenida en la captación de Tolapalca en el distrito de Ichuña.

1.4. Justificación

La región Moquegua se encuentra en el Sur Perú, rodeado por las regiones de Arequipa, Puno y Tacna, todas ellas adicionalmente se ubican en la zona denominada cinturón de fuego del Pacífico, por lo que la actividad volcánica se desarrolla continuamente. La actividad volcánica como son: fumarolas y explosiones aportan muchos de los metales pesados que se encuentran en el suelo tanto en la superficie como en el sub suelo, a causa de las precipitaciones estas pueden ser arrastrados a partir de la filtración y contaminar aguas subterráneas, lo

las corrientes de aire pueden levantar material particulado y trasladarlos hasta fuentes de aguas superficiales, en tanto la actividad humana como son: construcción de carreteras, minería y demás, al realizar movimientos de tierra consiguen mover el material sedimentado en el suelo que luego será trasladado por las corrientes de aire.

- **Justificación social.** Proponer un método alternativo de tratamiento de agua contaminada por arsénico y que esta pueda ser utilizada por los pobladores en sus domicilios garantizando que dicho proceso reduce el contenido de arsénico.
- **Justificación económica.** El método SORAS, emplea materiales accesibles para las personas dispuestas a utilizarlo como son: botellas de plástico PET, ácido cítrico (8,00 Soles por kilogramo) y/o jugo de limón, y viruta de acero negro, estos materiales pueden ser reutilizados y se encuentra fácilmente en las viviendas, solo el ácido cítrico debe ser adquirido.
- **Justificación ambiental.** El residuo generado a partir del método SORAS, que es una sal precipitada, que puede ser deshidratada en la propia vivienda y almacenada para su posterior disposición, este no represente un riesgo tanto a de salud pública como de los pobladores.

Además, si bien la necesidad de consumo de agua es apremiante, debido a incremento de la población, en las zonas urbanas la potabilización viene siendo atendida, pero en la zonas rurales no sucede lo mismo, por lo que los pobladores buscan fuentes de agua para satisfacer su necesidad.

1.5. Alcances y limitaciones

1.5.1. Alcances.

La presente investigación es de carácter experimental, que propone un método para reducir el contenido de arsénico de agua contaminada, el método propuesto será de fácil acceso a los pobladores a fin de que en lo posterior pueda ser utilizada por los mismo.

1.5.2. Limitaciones.

El método solo propone la reducción de arsénico, pero según el (GRM, 2015), existe otros metales pesados importantes que deben ser removidos antes de consumir el agua captada en el centro poblado Tolapalca.

1.6. Variables

1.6.1. Identificación de variables.

1.6.1.1. Variable independiente.

- pH
- Concentración de hierro

1.6.1.2. Variables dependientes.

- Parámetros fisicoquímicos
- Remoción de arsénico.

1.6.1.3. Variables intervinientes.

- Irradiancia solar.
- Altitud.

- Temperatura ambiental.

1.6.2. Operacionalización de variables.

La tabla 1 muestra la operacionalización de variables del presente proyecto de investigación:

Tabla 1

Operacionalización de variables

	VARIABLE	DIMENSIÓN	INDICADORES	INSTRUMENTO
Independiente	Concentración de hierro		Concentración	Gravimetría
	Potencial de hidrogeno		pH	pH metro
Dependiente	Solidos Disueltos totales	Parámetro físico	>1000 ppm (D.S. 004-2017-MINAM)	Conductímetro
	Potencial de hidrogeno	Parámetro químico	6 a 9 pH (D.S. 004-2017-MINAM)	pH metro
	Conductividad eléctrica	Parámetro químico	> 1500 μ S/cm (D.S. 004-2017-MINAM)	Conductímetro
	Transparencia	Parámetro químico	> 5 UTN (D.S. 004-2017-MINAM)	Turbidímetro
	Contenido de arsénico	Parámetro químico	0.01 mg/l (D.S. 004-2017-MINAM)	Gravimetría
Intervinientes	Irradiación solar		mW/cm ²	Radiómetro
	Altitud		m.s.n.m.	GPS
	Temperatura ambiental		°C	Termómetro

1.7. Hipótesis de la investigación

1.7.1. Hipótesis general.

El método SORAS cambiara los parámetros físicos, químicos y el contenido de arsénico a niveles aceptables para el consumo humano del agua obtenida en la captación del centro poblado Tolopalca del distrito de Ichuña.

1.7.2. Hipótesis específicas.

El agua obtenida de la captación del centro poblado Tolapalca cumple con los estándares según la normatividad nacional.

El pH y el contenido de hierro solar utilizados en el método SORAS altera los valores iniciales de los parámetros físicos, químicos del agua obtenida en la captación de Tolapalca en el distrito de Ichuña.

El pH y el contenido de hierro solar utilizados en el método SORAS remueve arsénico a niveles aceptables del agua obtenida en la captación de Tolapalca en el distrito de Ichuña.

CAPÍTULO II

MARCO TEÓRICO

2.1. Antecedentes de la investigación

Montesinos y Guevara (2019), realiza pruebas para comparar el uso de coagulante y SORAS. En el primer método utilizó cloruro férrico y sulfato de aluminio de 20mg/L a 50mg/L, y obtuvo una remoción de 99% adicionando 50mg/L de cloruro férrico. El segundo método utilizó viruta de alambre de hierro N°16 entre 4 a 8 g y jugo de limón de 1.1 ml y 1.5ml, en la que obtuvo una remoción del 84% con una adición de 7g de viruta y 1.4 ml de jugo de limón.

Calvo et al. (2019), describe que la fotocatalisis sigue siendo una de las técnicas que produce mejores resultados con menor costos materiales y operativos, la fotooxidación de arsenito a arseniato en minutos. Usamos TiO_2 como fotocatalizador con luz UV y solar. Utilizaron una solución acuosa con concentración de As III y As V 1 mg/L. Los resultados más sobresalientes se obtuvieron con 0.1 gramos de TiO_2 en 150 ml de la solución de As III, alcanzando una fotooxidación a As V del 99% en 4 horas en el reactor con lámpara UV. La fotooxidación en la luz solar natural es algo más lento en comparación con el uso

de una lámpara UV, pero el ahorro de energía es 100%, brindando una importante sostenibilidad ambiental y valor para el proceso.

Chávez y Miglio (2011), en su investigación “Remoción de arsénico por oxidación solar en aguas para consumo humano”, removieron arsénico mediante el método de fotooxidación solar SORAS, utilizaron de viruta de hierro obtenido de alambre N° 16 y jugo de limón variedad sutil, el agua fue obtenida del río Iscahuaca-Colcabamba que contenían 0,05 mg/L de arsénico. Se utilizó 1 l de agua para cada experimento y se expuso a radiación solar por 6 horas. Con 6 g de viruta y 1,3 ml de jugo de limón se logró remover el 98,5 % de arsénico bajo una radiación de 586 W-h/m².

Lara et al. (2007). En su trabajo “Eliminación del arsénico asistida por luz solar de las aguas naturales”. Muestra las condiciones óptimas para eliminar el arsénico (III) de una solución se ajustaron utilizando un experimento factorial diseño en una reacción catalizada por luz visible (luz negra, 360 nm) y un complejo hierro-citrato. Los experimentos fueron realizados al modificar simultáneamente las dos variables que afectan la eliminación de arsénico, es decir, hierro y citrato concentraciones. La única función polinómica obtenida con la metodología de diseño factorial indica que la concentración de hierro fue el parámetro más crítico en la eliminación de arsénico por precipitación. Matemáticamente, se determinó que la relación molar óptima para arsénico, citrato y hierro fue de 1: 4,5:18,7, arsénico: citrato: hierro, respectivamente, más del 90% de arsénico eliminado después de 4 h de irradiación. La comparación entre la coprecipitación As (III) y As (V) las tasas indican que casi el 80% de As (III) se eliminó después de 1 h de

irradiación con luz negra, mientras que As (V) requirió 4 h de irradiación para alcanzar el mismo valor.

2.2. Bases teóricas

2.2.1. Agua.

El agua es un elemento esencial para el desarrollo de los diferentes seres vivos, el 97.2% del agua es salina y el 2.5% es agua fresca, del 2.5%, el 30% es subterránea, el 68% se encuentra congelada en los glaciares y solo el 1.2% es superficial y se encuentra en ríos, lagos y otras formas de agua de superficie (Gómez, 2018). El agua superficial corresponde a los pozos, humedales, ríos y lagos, este recurso está expuesto a diferentes agentes contaminantes ya sea por situaciones naturales o antropogénicas y la vulnerabilidad del suelo (Gómez, 2018). Las características químicas de la fuente de agua están determinadas por dos factores: la naturaleza geológica del acuífero y del suelo, y el funcionamiento hidrogeológico. Al interaccionar ambos proporcionan características propias al agua de una fuente natural, puede también verse influenciada por condicionantes externos, como la pluviometría, que modifica la forma temporal o permanente de la naturaleza del agua (Fernández, 2012).

Si bien es cierto el agua es un compuesto puro formado por una molécula de oxígeno y dos de hidrogeno, peros sus propiedades como disolvente, alterar sus características como es la composición. Estas alteraciones se deben a factores externos como es la antropogénica o la natural, y es entonces cuando se habla de la contaminación del agua. La determinación de las características químicas del agua

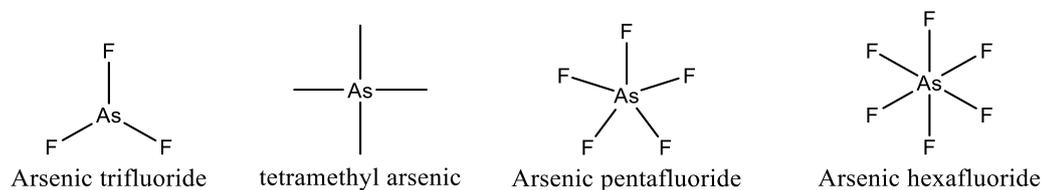
y la observación de los cambios que ocurren en ella, permite conocer la situación de la calidad del agua para su uso o consumo del mismo (Kumar et al., 2019).

2.2.2. Arsénico.

Los estados de valencia normales de arsénico son 3 y 5, como en el trifloruro de arsénico AsF_3 y pentafluoruro de arsénico AsF_5 . Números de coordinación para el arsénico cubren el rango 3 (AsF_3), 4 $\text{As}(\text{CH}_3)_4^+$, 5 (AsF_5) y 6 (AsF_6^-). El número de oxidación del arsénico en los compuestos, como para cualquier elemento, depende de un modelo de la distribución de cargas en los enlaces. La forma habitual de estimar esta distribución de carga es a través de las electronegatividades relativas de los átomos afectados (Bain et al., 2014).

Figura 1

Numero de coordinación para el arsénico



El arsénico en los sistemas acuáticos tiene una química inusualmente compleja e interesante con oxidación-reducción, intercambio de iones, precipitación y reacciones de adsorción. El arsénico es estable en cuatro estados de oxidación (+5, +3, 0, -3) bajo el potencial de reducción Redox (Eh) en condiciones que ocurren en los diferentes sistemas acuáticos. Como en estado sólido (metálico) ocurre raramente en un estado de oxidación -3 a valores extremadamente bajos de Eh. Además, el compuesto covalente, AsS (realgar), es estable en condiciones de pH bajo y Eh moderadamente bajas. (Hug et al., 2001)

Basado en termodinámica disponible datos (tabla 1), el diagrama Eh vs pH para arsénico (concentración total 10^{-5} mol l^{-1}) en un sistema que incluye oxígeno O_2 , agua H_2O y azufre S (total de S 10^{-3} mol l^{-1}) que muestra los compuestos a base de arsénico solubles predominantes y los sólidos con solubilidades lo suficientemente bajo para ocurrir en este sistema, como se muestra en la figura 2. Regiones de solubilidad menos de $10^{-5.3}$ mol l^{-1} está indicado por el área sombreada con la especie sólida encerrado entre paréntesis (Ferguson y Gavis, 1972).

Si se incluyera hierro, el arseniato férrico $FeAsO_4$ (pK 20.24), presentaría una pequeña región de estabilidad a pH por debajo de 2.3 y Eh por encima de +0.74 V. El arsénico no tiene otras interacciones significativas con iones que cambian las áreas de predominancia de las especies solubles representadas en la figura 2. (Long et al., 2012)

En los valores elevados de Eh encontrados en aguas oxigenadas, las especies de ácido arsénico (H_3AsO_4 , $H_2AsO_4^-$, $HAsO_4^{2-}$ y AsO_3^-) son estables. Las propiedades características de las especies de ácido arsenioso (H_3AsO_3 , $H_2AsO_3^-$ y $HAsO_3^{2-}$) se vuelven estables. Ninguno de los óxidos de arsénico, As_2O_3 y As_2O_5 , son lo suficientemente insolubles como para aparecer en el diagrama. En condiciones de constante -2 de azufre, el As_2S_3 , presentan bajas solubilidades y se producen como sólidos estables a valores de pH por debajo de aproximadamente 5,5 y aproximadamente 0 V. El $HAsS_2$ (aq) es la especie predominante a baja pH en presencia de sulfuro, tiene una solubilidad máxima de $10^{-6.5}$ mol l^{-1} (0.025 mg l^{-1} As). El ASS_2^- predomina a pH mayor que 3.7, y por encima de pH 5.5 su

solubilidad es 10^{-5} mol l^{-1} . A valores aún más bajos de Eh, el metal es termodinámicamente estable (Ferguson y Gavis, 1972).

Tabla 2

Energías para la formación de especies arsénicas a 25 ° C

Compuesto	Estado	ΔG_t°
H ₃ AsO ₄	acuoso	-184.0
H ₂ AsO ₄ ⁻	acuoso	-181.0
HAsO ₄ ²⁻	acuoso	-171.5
AsO ₄ ³⁻	acuoso	-155.8
H ₃ AsO ₃	acuoso	-154.4
H ₂ AsO ₃ ⁻	acuoso	-141.8
HAsO ₃ ²⁻	acuoso	-125.3
HAsS ₂	acuoso	-11.61
AsS ₂ ⁻	acuoso	-6.56
AsS	solido	-16.81
As ₂ S ₃	solido	-40.25
As	solido	0
AsH ₃	solido	23.8
AsH ₃	acuoso	16.5
As ₂ O ₃	solido	-140.8
As ₂ O ₅	solido	-186.9

Nota: Ferguson y Gavis (1972)

2.2.3. Presencia de arsénico en el Perú.

Se estima que al menos 250 000 personas en Perú en el año 2000 bebieron agua con niveles de arsénico superiores al estándar nacional (0,05 mg/l). Los más afectados son quienes viven en zonas rurales dispersas, consumen agua sin tratar y desconocen los riesgos que enfrentan. También se debe considerar que los niños de esta población son más sensibles y susceptibles a la toxicidad del arsénico que los adultos. También son víctimas de la pobreza debido a la desnutrición y las malas condiciones sanitarias en las zonas rurales y pobres. (Castro, 2006)

El contenido de arsénico en el agua se debe a dos factores: a) de origen natural o geológico, asociadas a la actividad volcánica por la presencia de la Cordillera de los Andes y, b) de origen antropogénico, debido a las diferentes actividades humanas, como la minera, la agricultura y la refinera entre otros. Según Castro (2006), menciona que, la zona sur del Perú se caracteriza por las áreas desérticas y el agua superficial presente en los ríos se originan en las zonas altas o la cordillera de los Andes. En el río Locumba se ha encontrado 0,5 mg/l, este atraviesa las regiones de Puno, Moquegua y Tacna. Siendo una potencial fuente de contaminación a los pobladores aledaños al río. En la localidad de Puno, se reportaron niveles de arsénico en pozos recientemente instalados; el 44% de los mismos sobrepasa el valor guía de la OMS (0,01 mg/l) y el 10% sobrepasa el valor de la norma nacional, llegando en un caso hasta 0,18 mg/l (Castro, 2006)

2.2.4. Tratamiento del agua con arsénico.

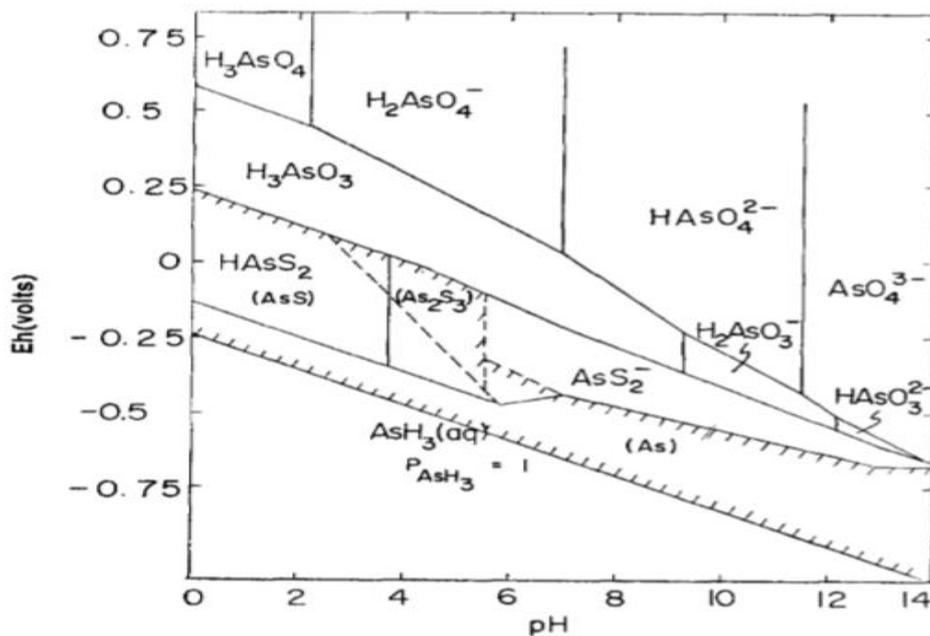
Las operaciones de tratamiento de agua ahora se agrupan en lo que se denominan procesos primarios, secundarios y terciarios. El tratamiento primario utiliza procesos físicos como la sedimentación y la filtración para eliminar los sólidos sedimentados y suspendidos presentes en el agua. El tratamiento secundario incluye procesos biológicos y químicos que eliminan la mayor parte de la materia orgánica. El procesamiento terciario utiliza una combinación adicional de procesos químicos con el fin de eliminar nitrógeno, fósforo entre otros metales, que no se reducen en el proceso secundario (Rodríguez et al., 2006).

El tipo de tratamiento a aplicar para la remoción de arsénico, depende básicamente de la concentración, del volumen y caudal de aguas contaminada.

Ciertas técnicas, como la oxidación, solo son aplicables a altas concentraciones, mientras que otras, como los procesos de adsorción y oxidación avanzada, son útiles para agua contaminada con baja concentración de contaminante. (Andreozzi et al., 1999).

Figura 2

El diagrama Eh-pH para As a 25 ° C



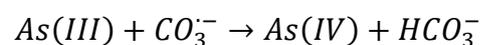
Nota: Ferguson y Gavis (1972)

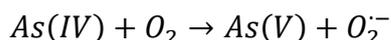
La absorción, el intercambio iónico, la oxidación y la floculación son las técnicas utilizadas para la remoción de arsénico (Rojas et al., 2015), además que se debe de considerar el estado del arsénico, si se encuentra en su forma trivalente, es adecuado pasarla a su forma pentavalente, debido a que la remoción es más efectiva, químicamente se puede oxidar utilizando hipoclorito de sodio y el permanganato de potasio (Cullen y Reimer, 1989), en presencia de hierro en el agua, se produce la precipitación de hidróxidos de hierro (III), además que el arsénico se oxida y este es retenido el arsénico pentavalente (Hug y Leupin, 2003).

El tratamiento de dureza mediante el uso de cal, más la coagulación, se utiliza en la potabilización de agua, pero este no necesariamente remueve arsénico, por lo que el uso de tecnologías emergentes deben de aplicarse, mediante el uso de arena recubierta con óxidos de hierro, hidróxido férrico granular, empaques de hierro, hierro modificado con azufre, filtración con zeolita, adición de hierro con filtración directa y remoción convencional de hierro y manganeso (Castro, 2004)

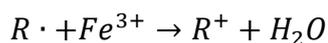
2.2.4.1. Oxidación/Reducción.

Mediante este proceso se oxida el arsenito a arsenato para mejorar su remoción en procesos complementarios. Se puede usar cloro, dióxido de cloro, ozono y permanganato de potasio. La oxidación catalítica del As^{+3} es posible en presencia de óxido de cobre, carbón activado y radiación UV. Uno de los inconvenientes de este proceso es el tiempo de reacción. También es posible su oxidación biológica (Castro, 2004). Este método tiene como antecedente el proyecto desarrollado por el Instituto Suizo EAWAG de Zurich con el objetivo de combatir el envenenamiento masivo por el consumo de aguas subterráneas con arsénico en Bangladesh; los ensayos consistieron en la incorporación de citrato (jugo de limón) en aguas depositadas en botellas transparentes, observándose, luego de un periodo de exposición solar, la formación de flóculos de hidróxido de hierro (las aguas contenían suficiente hierro), producto de las reacciones fotoquímicas en el agua (Chávez y Miglio, 2011)





Una tecnología simple y económica para reducir el arsénico en aguas para consumo humano es el método de Remoción de Arsénico por Oxidación Solar – RAOS, donde se emplea un medio para tratar el agua contaminada a partir de la reacción de Fenton con acción fotoquímica de luz solar a pH bajo (hasta 2.5). Las formas de la reacción de Fenton se muestran a continuación



Estudios demostraron que es posible proporcionar agua potable en Bangladesh con considerable éxito. Se encontró que, si un agente quelante es añadido antes de la irradiación solar, la tasa de oxidación de As(III), se incrementó por la adición de un citrato en este complejo a fin de formar compuestos intermedios con el hierro (Fe^{3+} CitOH⁻), a fin de elevar la oxidación de As(III) (Hug et al., 2001)

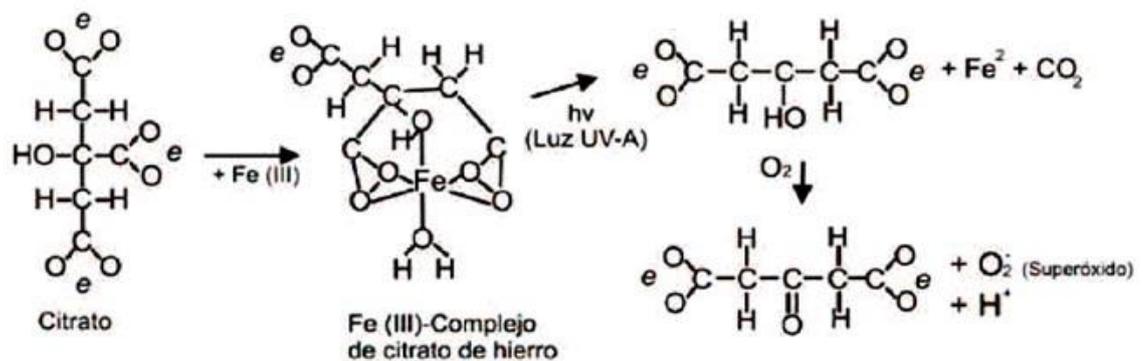
2.2.4.2. Fotoxidación.

Las reacciones fotoquímicas permiten la oxidación del arsénico y también del hierro (en cualquiera de sus estados), así como la formación simultánea de especies muy activas que aceleran este proceso como los complejos de citrato de hierro y especies oxidadas del oxígeno, como el superóxido, que se muestran en la figura 3 (Chávez y Miglio, 2011)

Este ciclo de reacción hierro – citrato, ocurre de manera cíclica durante el periodo de fotooxidación, donde el hierro se reduce y oxida, ello debido a la formación de peróxido de oxígeno H_2O_2 , hidrogenión H^+ e hidroxilo OH^- . En otras pruebas de campo usando botellas de PET transparentes, no era necesario agregar hierro al agua, ya que se produjo naturalmente en Bangladesh ($> 4 \text{ mg/l}$) y el citrato se añadió en forma de cítrico ácido, concretamente 6 a 8 gotas de zumo de limón (considerando que el ácido predominantes es el cítrico y por reacción frente a una base este generara citrato) por litro de agua (Wegelin et al., 2000). Sin presencia de citrato la fotooxidación es mucho más lenta, las reacciones presentes se muestran en la tabla 2 (Hug et al., 2001).

Figura 3

Complejos de citrato de hierro y especies oxidadas de oxígeno en reacción fotoquímica



Nota: Chávez y Miglio (2011)

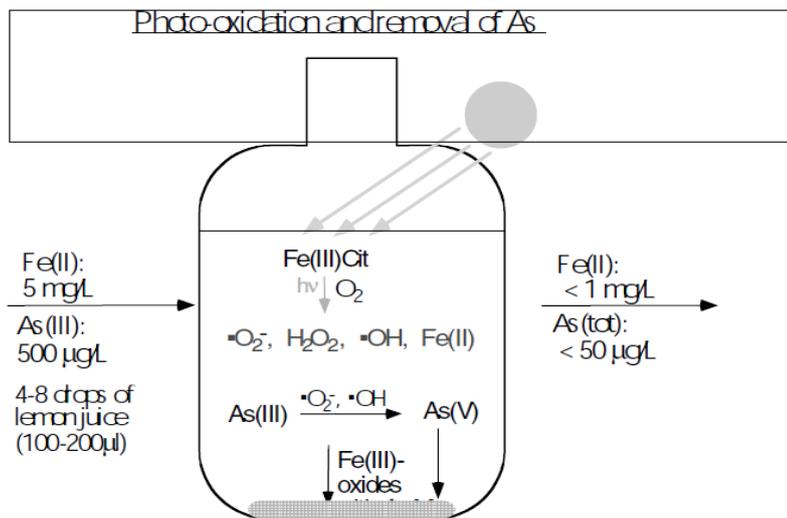
2.2.4.3. Radiación solar.

Alrededor del 4% al 6% del espectro solar que llega a la superficie de la Tierra está en el dominio UV, con un valor máximo informado de alrededor 50 W / m^2 . La radiación UV (200–400 nm) se puede clasificar como UVA (320–400 nm), UVB (280–320 nm) y UVC (200– 280 nm). UVC es absorbido por la capa de ozono junto

con un proporción de UVB; por lo tanto, los rayos UVA representan el principal fragmento de radiación solar ultravioleta que llega a la tierra superficie (Byrne et al., 2015).

Figura 4

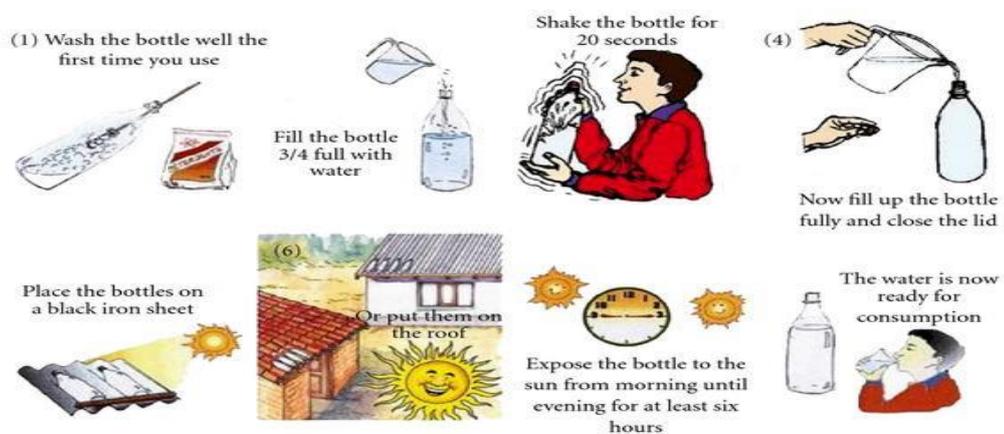
Principio básico de Soras de un reactor oxidante con iluminación fotoquímica



Nota: Wegelin et al. (2000)

Figura 5

Uso de la radiación solar en el tratamiento de agua



Nota: Byrne et al. (2015)

2.2.5. Aplicaciones realizadas.

La eficiencia de eliminación de arsénico del método SORAS se encuentra entre 45 - 78% y promedios 67%. Con respecto a Bangladesh valor de referencia de 50 mg/l de arsénico en el agua potable, SORAS puede tratar agua cruda que contiene una concentración de arsénico debajo de 100 - 150 mg/l, proporcionó suficiente hierro y La intensidad de UV-A está disponible. Como se muestra en la Fig. 4, además de permanganato de potasio (si es necesario junto con aluminio sulfato), logra una mayor eficiencia de eliminación de arsénico, aprox. 80% y 90%, respectivamente. Por lo tanto, SORAS (+) permitiría el tratamiento de agua cruda que contenga una mayor concentración de arsénico (Wegelin et al., 2000).

La fuente de agua con elevado contenido de arsénico afecta regiones grandes de América, especialmente Argentina, Chile, México y Perú. En este trabajo, la eficacia de la eliminación de arsénico por oxidación solar junto con la precipitación hierro (OH), se evaluó en diversas condiciones experimentales, tanto en muestras de aguas sintéticas y de aguas subterráneas de la provincia de Tucumán (Argentina). Los resultados demuestran que la química subyacente es muy compleja, y la eficiencia se ve afectada a menudo de manera impredecible por los cambios en el matriz química, o por cambios en las condiciones operativas. Los óxidos generados a partir de sales ferrosas son más eficientes que sólidos formados por hidrólisis de Fe (III); los contenidos de alcalinidad (bicarbonato) también son importantes para permitir la precipitación adecuada. La adición de pequeñas cantidades de ácido cítrico (jugo de limón) es beneficiosa, pero en concentraciones mayores el efecto es negativo, probablemente debido a la interferencia en la formación del sólido. El

efecto de la irradiación solar es variable, dependiendo de las otras condiciones experimentales. Aunque es posible eliminar As parcialmente sin irradiación solar. Bajo ciertas condiciones especiales, un procedimiento lo suficientemente versátil como para hacer frente a las aguas de diferentes composiciones debe ser basado en el uso de energía solar. La luz juega el papel de acelerar la oxidación de As (III) a As (V), y también afecta la naturaleza del sólido y, por lo tanto, sus propiedades de sorción. El efecto de la luz es por lo tanto apreciablemente más complejo que en el caso de la fotocatalisis heterogénea con TiO_2 (García et al., 2004). La oxidación de As (III) con H_2O_2 y Fe (II) es importante en sistemas naturales y de tratamiento a valores de pH de hasta 8, el As (III). La oxidación depende fuertemente de pH y As(III), Fe(II), O_2 , H_2O_2 , y HCO_3^- en rangos de concentración que son comunes en sistemas naturales y técnicos, una buena comprensión cuantitativa de estas reacciones es importante. La cinética propuesta modelo proporciona una base para la comprensión de la importante factores en estos sistemas y para la optimización de arsénico métodos de eliminación (Hug y Leupin, 2003).

2.3. Definición de términos

ECA. Estándar de Calidad Ambiental.

SORAS. Solar oxidati6n and removal of arsenic traducido remisi6n de arsénico por fotooxidaci6n solar.

Parámetro de calidad. Conocido también como estándar de calidad.

Nivel. Valor medido producto de la cuantificaci6n o cualificaci6n de un parámetro.

CAPÍTULO III

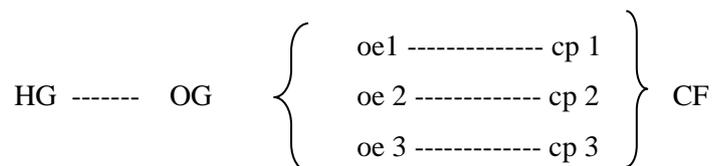
MÉTODO

3.1. Tipo de la investigación

- En cuanto a su finalidad, se distingue como aplicada; ya que los aportes están dirigidos a mejorar la comprensión referida a un aspecto de la realidad perteneciente al dominio de estudio de una disciplina científica (Rojas, 2015).
- Según el tipo de diseño de investigación es experimental, por cuanto su estudio se basa en la observación de los hechos en pleno acontecimiento proponiendo variables independientes a fin de evaluar el efecto de los mismo en la variables dependientes o conocidas como respuesta (Rojas, 2015).
- Según su prolongación en el tiempo es transversal, ya que el estudio se circunscribe a un momento puntual, un segmento de tiempo durante el año a fin de medir o caracterizar la situación en ese tiempo específico (Rojas, 2015).
- Según el énfasis en la naturaleza de los datos manejados es cuantitativa, ya que la preponderancia del estudio de los datos se basa en la cuantificación y cálculo de estos (Rojas, 2015).

3.2. Diseño de la investigación

En la presente investigación se empleará un diseño por objetivos como se observa en el siguiente esquema:



Dónde:

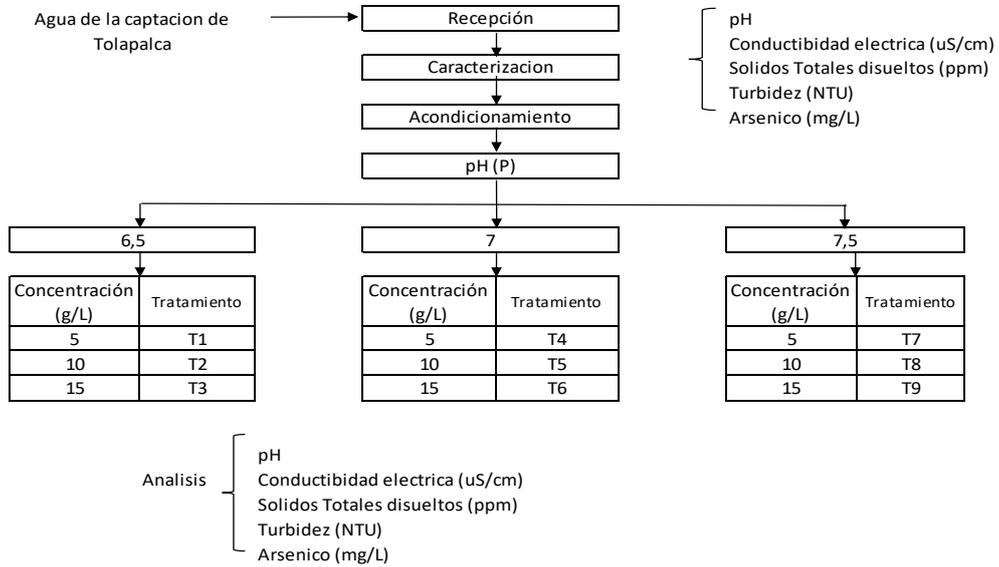
- HG = Hipótesis general.
- OG = Objetivo general.
- oe = Objetivo específico.
- cp = Conclusión parcial.
- CF = Conclusión final.

A continuación, en la figura 5 detallamos el Flujograma del proyecto de investigación.

El presente trabajo de investigación tiene la finalidad de analizar los cambios de las características fisicoquímicas (pH, turbidez, conductividad eléctrica, sólidos disueltos totales) y la reducción de arsénico a partir de la influencia del pH y la concentración de hierro, mediante un Diseño Completamente al Azar con Arreglo Factorial de 3x3, con 3 repeticiones, lo que representa 9 tratamientos y 27 unidades experimentales, de existir diferencias se evaluará los resultados mediante el análisis de la prueba LSD Fisher. El software estadístico utilizado es el INFOSTAT versión libre.

Figura 6

Diseño del proyecto de investigación



El modelo estadístico se detalla a continuación:

Modelo estadístico.

$$Y_{ij} = \mu + \tau_i + \beta_j + (\alpha\beta)_{ij} + \varepsilon_{ijk}$$

Dónde:

Y_{ij} : es la valor u observación de las características químicas en la i-esima especie de tuna y j-esima repetición

i: 1, 2, 3

j: 1, 2, 3

μ : Media general.

τ_i : Efecto de la i-esima del pH

β_j : Efecto de la i-esima concentración de hierro

$(\alpha\beta)_{ij}$: Efecto de la interacción del pH y concentración de hierro

ε_{ij} : Error residual

3.3. Ubicación de la realización del experimento

El presente trabajo de investigación se realizó de la siguiente manera: El agua fue obtenida en el centro poblado Tolapalca del distrito de Ichuña (Alto tambo), región Moquegua Perú. Los análisis de pH, conductividad eléctrica, sólidos disueltos totales, y turbidez fueron realizados en el Laboratorio de Ingeniería Ambiental de la Universidad José Carlos Mariátegui. El análisis de arsénico se realizó en el laboratorio Laboratorios Analíticos del Sur E.I.R.L., en Arequipa.

3.4. Población y muestra

3.4.1. Población.

La población es el agua utilizada por los habitantes del distrito de Ichuña, es calculada considerando la población total del distrito de Ichuña con 2 319 hab (Instituto Nacional de Estadística e Informática, 2018) y el consumo diario recomendado es entre 20 – 50 l/hab-día (Organismo Panamericano de la Salud, 2009), por lo que en un consumo de 20 l/hab-día el total de agua consumida es de 46 320 l/día.

3.4.2. Muestra.

El tamaño de muestra fue calculado mediante la metodología propuesta por (García et al., 2013), cuya ecuaciones la siguiente

$$n = \frac{N * Z_{0.05}^2 * p * (1 - p)}{(N - 1) * e^2 + Z_{0.05}^2 * p * (1 - p)}$$

Donde:

- N: población total (46320 L)
- $Z_{0.05}$: valor de Z al 95% de confianza (1.96)
- p: probabilidad de ocurrencia de evento (0.5)
- e: error de muestreo (0.05)

Remplazando datos tenemos:

$$n = \frac{46320 * 1.96^2 * 0.5 * (1 - 0.5)}{(46320 - 1) * 0.05^2 + 1.96^2 * 0.5 * (1 - 0.5)}$$

$$n = 381 L$$

De los 381 L, se utilizaron 27 L (unidades experimentales) que fueron colocados en botellas de 1 L cada una.

3.5. Descripción de instrumentos para recolección de datos

3.5.1. Equipos y materiales.

- pH metro METROHM modelo 827.
- Turbidímetro LAMOTTE modelo 2020WE.
- Multiparamétrico OAKTON modelo PCD650.
- Balanza AND modelo FX-3000i.
- Cooler Coleman de 40 L de capacidad.
- Ácido cítrico FRUTAROM.
- Papel filtro Whatman N° 40
- Probeta graduada 1L.
- Vaso de precipitado de 500 mL.

3.5.2. Técnica para la recolección de datos.

El agua utilizada para el experimento fue obtenida en la captación de Tolapalca geolocalizada en E 322545.41 y N 8229300.65 (Google, s.f.), ubicada en el distrito de Ichuña de la provincia General Sánchez Cerro de la región Moquegua, el agua fue extraída según el procedimiento establecido por la Resolución Jefatural N° 010-2016-ANA, siendo las 16:15 horas del día 10 de octubre del 2019 a una temperatura de 19,1 °C.

Figura 7

Ubicación de la captación en el Centro Poblado Tolapalca - Ichuña.



Nota: Imagen tomada 20/10/2019. Fuente: Google (s.f.)

El agua fue colocada en 27 botellas de 1 litro de capacidad, se transportó en cooler marca Coleman de 52 litros de capacidad, hacia el Laboratorio de Ingeniería Ambiental de la Universidad José Carlos Mariátegui, se midió el pH, conductividad eléctrica, sólidos disueltos totales y la turbidez.

El pH se midió de acuerdo con la norma NMX-AA-008-SCFI-2000, utilizando el pHmetro METROHM modelo 827, introduciendo el electrodo a las diferentes

muestras de agua contenidas en un vaso de precipitado de 500 mL. La conductividad eléctrica se midió de acuerdo con la norma NMX-AA-093-SCFI-2000 utilizando el Multiparamétrico OAKTON modelo PCD650, introduciendo el electrodo a las diferentes muestras de agua contenidas en un vaso de precipitado de 500 mL. Los sólidos disueltos totales se midieron de acuerdo con la norma NMX-AA-093-SCFI-2000 utilizando el Multiparamétrico OAKTON modelo PCD650, introduciendo el electrodo a las diferentes muestras de agua contenidas en un vaso de precipitado de 500 mL. La conductividad eléctrica se midió de acuerdo con la norma NMX-AA-093-SCFI-2000 utilizando el Multiparamétrico OAKTON modelo PCD650, introduciendo el electrodo a las diferentes muestras de agua contenidas en un vaso de precipitado de 500 mL.

Para el acondicionamiento de los diferentes tratamientos, se utilizó 5, 10 y 15 g de viruta de hierro fundido proveniente de un bloque de motor el cual fueron pesados en una balanza AND modelo FX-3000i, para el pH se utilizó una solución de 100 g de ácido cítrico el cual se disolvieron en 500 mL de agua, considerando que agua obtenida en la captación del centro poblado Tolapalca fue de 7,8 pH, se adicionaron 2mL de solución a 1 L de agua para obtener 7,5 pH, 4 mL de solución a 1 L de agua para obtener 7,0 pH y 8mL de solución a 1 L de agua para obtener 6,5 pH. Los envases utilizados fueron botellas PET de 1 L de capacidad, el cual fueron colocadas desde las 8:00 horas hasta las 16:00 horas expuestas a la radiación solar. Los tratamientos fueron filtrados con ayuda de papel filtro Whatman N° 40, y posteriormente se analizaron los diferentes parámetros como pH, conductividad eléctrica, sólidos disueltos totales y turbidez que fueron descritos anteriormente. La medición de arsénico fue desarrollada en Laboratorios Analíticos del Sur con

registro N° LE-050 INACAL, para la cual tanto el agua obtenida en la captación del centro poblado Tolapalca como de los 9 tratamientos en envases de 1 L, se utilizó la norma EPA 200.7 determinación de metales y elementos traza en agua y aguas residuales por ICP-OES. La cuantificación de As se realizó por el método propuesto por Tanabe et al. (2016), la medida de su hidruro volátil en medio ácido. Previamente las muestras fueron sometidas a digestión, y por el uso de ácido nítrico el As III es oxidado a As V, que es fundamental para la determinación de As total. Para la pre-reducción fueron necesarios HCl 12 mol/L y KI 20% (m/v) en relación: muestra/estándar, se utilizó HCl (1): KI (1). Primeramente, se añadió HCl a ebullición a fin de reducir el volumen un 50 %. Luego se añadió agua ultrapura para reconstituir el volumen inicial y se agregó KI, se dejó reposar por una hora a temperatura ambiente, la medición se desarrolló a una longitud de onda de 193,695 nm, con un flujo de N₂ 0,7 L/min, 30 rpm de velocidad de bomba, posición de lectura 10 y tiempo de lectura 10 segundos.

El porcentaje de remoción de As, fue determinado mediante el método propuesto por Acuña-Piedra y Araya-Obando (2016) mediante la siguiente ecuación:

$$\% \text{ remocion} = \left(\frac{C_o - C_f}{C_o} \right) * 100\%$$

Donde:

- C_o: concentración inicial de As.
- C_f: concentración final de As.

CAPÍTULO IV

ANÁLISIS E INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS

4.1. Presentación de resultados

4.1.1. Determinación de las propiedades fisicoquímicas del agua obtenida en la captación del centro poblado Tolapalca en el distrito de Ichuña.

La tabla 4 muestra los valores de los diferentes parámetros del agua obtenida en la captación del centro poblado Tolapalca, que se ubica en el distrito de Ichuña.

Tabla 3

Valores parámetros obtenidos en la captación del centro poblado Tolapalca

Parámetro	Valor
pH	7,73 ±0,115
Conductividad eléctrica (μS)	1,28 ±0,001
Solidos disueltos totales	581,4 ±102,884
Turbidez (NTU)	0,61 ±0,025
Arsénico (mg/L)	0,0067

Según los resultados mostrados en la tabla 1, estos valores se encuentran dentro de los valores permitidos según el Decreto Supremo N° 004-2017-MINAM.

4.1.2. Evaluación del efecto de hierro y pH utilizando el método SORAS sobre las características fisicoquímicas (pH, conductividad eléctrica, sólidos disueltos totales y turbidez) del agua obtenida en la captación del centro poblado Tolapalca.

Los resultados obtenidos para el pH se muestran en el Apéndice 1, las distribuciones de todos los valores obtenidos se muestran en la figura 6. Donde N representa las 27 unidades experimentales de los 9 tratamientos utilizados, se obtuvo un R^2 y R^2 ajustado de 0,99 y un coeficiente de variabilidad de 0,58, demostrándose así que el experimento fue llevado adecuadamente.

Tabla 4

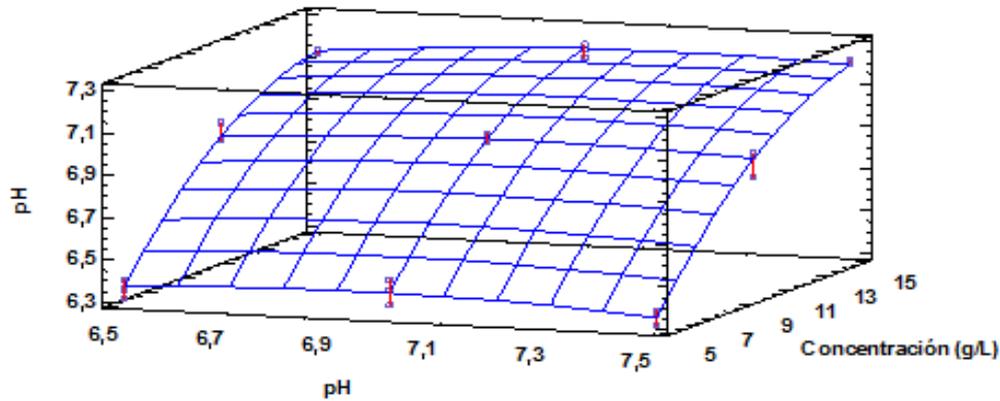
Resumen del experimento con respecto al resultado de pH.

Variable	N	R²	R² Aj	CV
pH	27	0,99	0,99	0,58

La figura 7, muestra el comportamiento que de los 9 tratamientos que se ubican en los puntos extremos y medios de la superficie de respuesta, así como la dispersión de las 3 repeticiones en cada tratamiento. Donde podemos observar que el agua obtenida en el centro poblado Tolapalca en el distrito de Ichuña presento un valor fue de $7,73 \pm 0,115$, y una vez ha realizado el experimento ha disminuido obteniéndose valores comprendidos entre 6,31 y 7,23 pH respectivamente, mostrándose así una reducción de $0,9 \pm 0,35$ pH.

Figura 8

*Superficie de respuesta para los resultados obtenidos de la interacción entre pH * concentración sobre el pH del tratamiento*



El conjunto de resultados mostrados en el Anexo 1, fueron analizados mediante un análisis de varianza, el cual se muestra en la tabla 5, donde se obtuvo que la concentración presentó diferencia significativa ($0,0364 < 0,05$ p-valor), el pH de ajuste presentó diferencia altamente significativa ($<0,0001 < 0,01$ p-valor), y la interacción de pH * concentración no presentó diferencia estadística significativa ($0,3806 > 0,05$ p valor).

Tabla 5

Análisis de varianza para los resultados de pH

Fuentes de variación	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Cuadrado medio	F	p-valor
pH	3,13	2	1,57	1004,36	<0,0001**
Concentración	0,01	2	0,01	4,01	0,0364*
pH*Concentración	0,01	4	1,70E-03	1,11	0,3806
Error	0,03	18	1,60E-03		
Total	3,18	26			

Nota: *diferencia significativa. ** diferencia altamente significativa.

La tabla 6 muestra los resultados de la prueba de significancia LSD Fisher para pH, donde los valores utilizados (7,5; 7 y 6,5 pH) son diferentes entre sí.

Además, considerando el pH inicial de 7,73 y la diferencia de los pH obtenidos, podemos decir que la reducción de pH cuando se tiene un valor de 7,5 pH es de 0,55 pH, a 7 pH es de 0,8 pH y de 6,5 pH es de 1,36 pH, donde podemos decir que existirá mayor reducción cuanto el pH sea menor (ver figura 6)

Tabla 6

Prueba de significancia LSD Fisher para factor pH sobre el pH de resultado

pH	Medias	n	Error estándar	
7,5	7,18	9	0,01	A
7	6,93	9	0,01	B
6,5	6,37	9	0,01	C

La tabla 7 muestra los resultados de la prueba de significancia LSD Fisher para concentración, donde los valores utilizados (5, 10 y 15 g/L) son iguales 10 y 15 g/L, 15 y 5 g/L, siendo diferentes entre sí 10 y 5 g/L. Además, considerando el pH inicial de 7,73 y la diferencia de los pH obtenidos, podemos decir que la menor variación de pH se dio cuando se utilizó una concentración de 10 g/L obteniéndose 0,88 pH, frente a las concentraciones 5 y 10 g/L donde se obtuvo 0,93 y 0,91 pH respectivamente, donde podemos decir que existirá una curvatura a 10 g/L (ver figura 6)

Tabla 7

Prueba de significancia LSD Fisher para factor concentración sobre el pH de resultado

Concentración (g/L)	Medias	n	Error estándar	
10	6,85	9	0,01	A
15	6,82	9	0,01	A B
5	6,8	9	0,01	B

Los resultados obtenidos para la conductividad eléctrica se muestran en el Apéndice 1, las distribuciones de todos los valores obtenidos se muestran en la figura 6, donde

N representa las 27 unidades experimentales de los 9 tratamientos utilizados, se obtuvo un R^2 de 0,9 y R^2 ajustado de 0,85 y un coeficiente de variabilidad de 0,71, demostrándose así que el experimento fue llevado adecuadamente.

Tabla 8

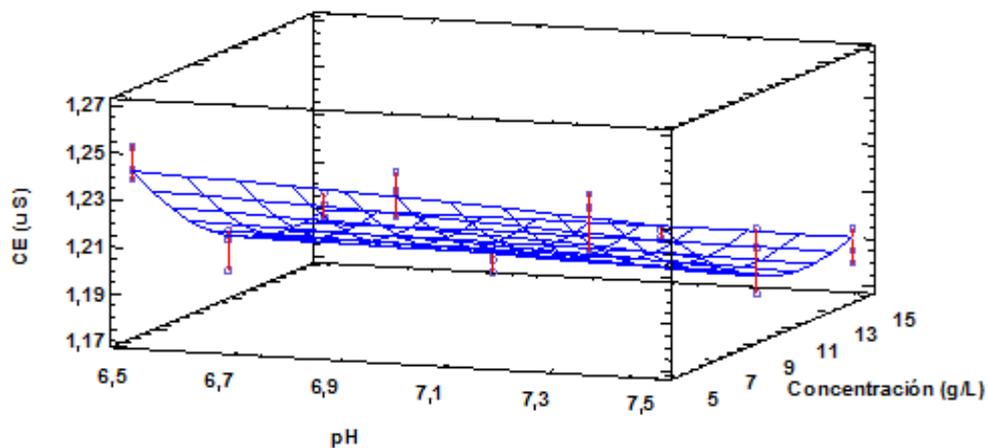
Resumen del experimento con respecto al resultado de conductividad eléctrica

Variable	N	R^2	R^2 Aj	CV
CE (mS/cm)	27	0,9	0,85	0,71

La figura 8, muestra el comportamiento que de los 9 tratamientos que se ubican en los puntos extremos y medios de la superficie de respuesta, así como la dispersión de las 3 repeticiones en cada tratamiento. Donde podemos observar que el agua obtenida en el centro poblado Tolapalca en el distrito de Ichuña presento un valor fue de $1,27 \pm 0,001$ mS/cm, y una vez ha realizado el experimento ha disminuido obteniéndose valores comprendidos entre 1,18 y 1,25 mS/cm respectivamente, mostrándose así una reducción de $0,06 \pm 0,02$ mS/cm.

Figura 9

*Superficie de respuesta para los resultados obtenidos de la interacción entre pH * concentración sobre la conductividad eléctrica*



El conjunto de resultados mostrados en el Anexo 1, fueron analizados mediante un análisis de varianza, el cual se muestra en la tabla 9, donde se obtuvo que el pH presento diferencia altamente significativa ($<0,0001 < 0,01$ p-valor), la concentración y la interacción de pH * concentración no presento diferencia estadística significativa ($0,4828$ y $0,1536 > 0,05$ p valor).

Tabla 9

Análisis de varianza para los resultados de conductividad eléctrica

Fuentes de variación	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Cuadrado medio	F	p-valor
pH	0,01	2	0,01	75,48	<0,0001**
Concentración	1,10E-04	2	5,60E-05	0,76	0,4828
pH*Concentración	5,60E-04	4	1,40E-04	1,9	0,1536
Error	1,30E-03	18	7,40E-05		
Total	0,01	26			

Nota: *diferencia significativa. ** diferencia altamente significativa.

La tabla 10 muestra los resultados de la prueba de significancia LSD Fisher para pH, donde los valores utilizados (6,5; 7 y 7,5 pH), se demuestra que a pH 7 y 7,5 son iguales entre y ambos presentan una conductividad eléctrica de 1,19 mS/cm y a pH 6,5 es diferente entre los antes mencionados con 1,24 mS/cm. Además, considerando la conductividad eléctrica inicial de 1,27 mS/cm y la diferencia de la conductividad eléctrica obtenidas, podemos decir que la reducción de la conductividad eléctrica cuando se tiene valores de 7 y 7,5 pH es de 0,08 mS/cm, y a 6 pH es de 0,03 mS/cm, donde podemos decir que existirá mayor reducción cuanto el pH sea mayor (ver figura 6).

Tabla 10*Prueba de significancia LSD Fisher para factor pH sobre la conductividad eléctrica*

pH	Medias	n	Error estándar	
6,5	1,24	9	2,90E-03	A
7	1,19	9	2,90E-03	B
7,5	1,19	9	2,90E-03	B

Los resultados obtenidos para los sólidos disueltos totales se muestran en el Apéndice 1, las distribuciones de todos los valores obtenidos se muestran en la figura 8, la tabla 11 es el resumen de experimento donde N representa las 27 unidades experimentales de los 9 tratamientos utilizados, se obtuvo un R^2 de 0,95 y R^2 ajustado de 0,93 y un coeficiente de variabilidad de 0,52, demostrándose así que el experimento fue llevado adecuadamente.

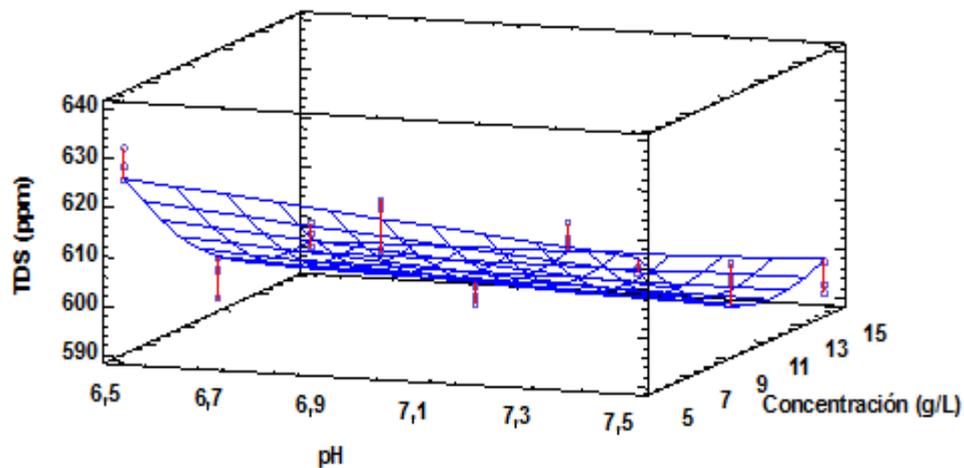
Tabla 11*Resumen del experimento con respecto al resultado de solidos disueltos totales*

Variable	N	R²	R² Aj	CV
TDS	27	0,95	0,93	0,52

La figura 9, muestra el comportamiento que de los 9 tratamientos que se ubican en los puntos extremos y medios de la superficie de respuesta, así como la dispersión de las 3 repeticiones en cada tratamiento. Donde podemos observar que el agua obtenida en el cent Tolapalca en el distrito de Ichuña presento un valor fue de $581,4 \pm 102,833$ ppm, y una vez ha realizado el experimento ha incrementado obteniéndose valores comprendidos entre 590,23 y 630,33 ppm respectivamente, mostrándose así un incremento de $23,71 \pm 11,99$ ppm.

Figura 10

*Superficie de respuesta para los resultados obtenidos de la interacción entre pH * concentración sobre los sólidos disueltos totales*



El conjunto de resultados mostrados en el Anexo 1, fueron analizados mediante un análisis de varianza, el cual se muestra en la tabla 12, donde se obtuvo que el pH y la interacción pH * concentración presenta diferencia estadística altamente significativa ($0,0001 < 0,01$ p-valor), la concentración no presenta diferencia estadística significativa (0,0606).

Tabla 12

Análisis de varianza para los resultados de solidos disueltos totales

Fuentes de variación	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Cuadrado medio	F	p-valor
pH	3076,47	2	1538,23	157,22	<0,0001**
Concentración	6,44E+01	2	3,22E+01	3,29	0,0606*
pH*Concentración	4,22E+02	4	1,05E+02	10,78	0,0001**
Error	1,76E+02	18	9,78E+00		
Total	3738,72	26			

Nota: *diferencia significativa. ** diferencia altamente significativa.

La tabla 13 muestra los resultados de la prueba de significancia LSD Fisher para pH, donde los valores utilizados (6,5; 7 y 7,5 pH), se demuestra que a pH 7 y 7,5 son iguales entre y ambos presentan sólidos disueltos totales de 599,19 y 596,96 ppm respectivamente, y a pH 6,5 es diferente entre los antes mencionados con 620,63 ppm.

Además, considerando los sólidos disueltos totales inicial de 581,4 y la diferencia de la conductividad eléctrica obtenidas, podemos decir que el menor incremento se tiene valores a 7 y 7,5 pH es de 17,79 y 15,56 ppm respectivamente, y a 6 pH es de 39,23 ppm, donde podemos decir que existirá mayor incremento cuanto el pH sea menor (ver figura 6).

Tabla 13

Prueba de significancia LSD Fisher para factor pH sobre los sólidos disueltos totales

pH	Medias	n	Error estándar	
6,5	620,63	9	1,04E+00	A
7	599,19	9	1,04E+00	B
7,5	596,96	9	1,04E+00	B

La tabla 14 muestra los resultados de la prueba de significancia LSD Fisher para la interacción pH (6,5; 7 y 7,5 pH) * concentración (5, 10 y 15 g/L), se demuestra que a 6,5 pH y concentración de 5 g/L, el contenido de sólidos disueltos totales presenta el mayor valor 628,3 ppm que es diferente al resto de interacciones, las interacciones de 7 pH * 5 g/L, 7,5 pH * 5 g/L, 7 pH * 10 g/L y 7,5 pH * 15 g/L estadísticamente son iguales y se encuentran entre los 597,3 y 596,96 ppm. Además, considerando los sólidos disueltos totales inicial de 581,4 ppm y la diferencia de los sólidos disueltos totales obtenidas, podemos decir que la mayor reducción se presenta cuando el pH se encuentra a 7 pH (ver figura 8).

Tabla 14

*Prueba de significancia LSD Fisher para factor pH * concentración sobre los sólidos disueltos totales*

pH	Concentración (g/L)	Medias	n	Error estándar	
6,5	5	628,3	3	1,81E+00	A
6,5	10	620,33	3	1,81E+00	B
6,5	15	613,27	3	1,81E+00	C
7	15	603,87	3	1,81E+00	D
7,5	10	599,73	3	1,81E+00	D E
7	5	597,3	3	1,81E+00	E F
7,5	5	597	3	1,81E+00	E F
7	10	596,4	3	1,81E+00	E F
7,5	15	594,13	3	1,81E+00	F

Los resultados obtenidos para la turbidez se muestran en el Apéndice 1, las distribuciones de todos los valores obtenidos se muestran en la figura 9, la tabla 16b muestra los resultados del experimento, donde N representa las 27 unidades experimentales de los 9 tratamientos y 3 repeticiones utilizados, se obtuvo un R^2 de 0,99 y R^2 ajustado de 0,98 y un coeficiente de variabilidad de 12,69, demostrándose así que el experimento fue llevado adecuadamente.

Tabla 15

Resumen del experimento con respecto al resultado de turbidez

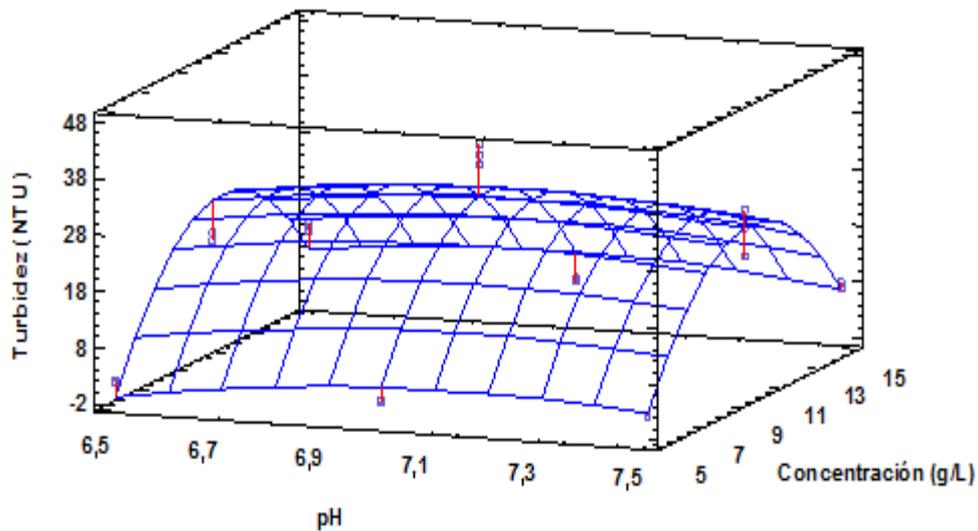
Variable	N	R^2	R^2 Aj	CV
Turbidez (NTU)	27	0,99	0,98	12,69

La figura 11, muestra el comportamiento que de los 9 tratamientos que se ubican en los puntos extremos y medios de la superficie de respuesta, así como la dispersión de las 3 repeticiones en cada tratamiento. Donde podemos observar que el agua obtenida en el centro poblado Tolapalca en el distrito de Ichuña presento un

valor fue de $12,34 \pm 11,87$ NTU, y una vez ha realizado el experimento ha incrementado, obteniéndose valores comprendidos entre 38,3 y 1,19 ppm respectivamente, mostrándose así un incremento de $11,74 \pm 11,87$ NTU.

Figura 11

*Superficie de respuesta para los resultados obtenidos de la interacción entre pH * concentración sobre la turbidez*



El conjunto de resultados mostrados en el Anexo 1, fueron analizados mediante un análisis de varianza, el cual se muestra en la tabla 17, donde se obtuvo que el pH, la concentración y la interacción pH * concentración presenta diferencia estadística altamente significativa ($<0,0001$ y $0,0003 < 0,01$ p-valor).

Tabla 16

Análisis de varianza para los resultados de turbidez

Fuentes de variación	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Cuadrado medio	F	p-valor
pH	3075,46	2	1537,73	625,76	<0,0001**
Concentración	66,72	2	33,36	13,58	0,0003**
pH*Concentración	477,22	4	119,3	48,55	<0,0001**
Error	44,23	18	2,46		
Total	3663,64	26			

*Nota: *diferencia significativa. ** diferencia altamente significativa.*

La tabla 18 muestra los resultados de la prueba de significancia LSD Fisher para pH, donde los valores utilizados (6,5; 7 y 7,5 pH), se demuestra que son diferentes entre sí, donde la menor turbidez se presentó a pH 6,5 con 1,57 NTU, y a pH 7 se presentó la mayor turbidez a 26,89 NTU, donde podemos decir que existirá mayor incremento cuanto el pH tienda a 7 (ver figura 11).

Tabla 17

Prueba de significancia LSD Fisher para factor pH sobre la turbidez

pH	Medias	n	Error estándar	
7	26,89	9	0,52	A
7,5	8,59	9	0,52	B
6,5	1,57	9	0,52	C

La tabla 19 muestra los resultados de la prueba de significancia LSD Fisher para concentración, donde los valores utilizados (5, 10, 15 g/L), se demuestra que son diferentes entre sí, donde la mayor turbidez se presenta a 10 g/L con 14,46 NTU, y a concentraciones de 5 y 15 g/L son iguales estadísticamente entre si obteniéndose 10,7 y 11,88 NTU respectivamente, donde podemos decir que existirá mayor incremento a mayor concentración (ver figura 9).

Tabla 18

Prueba de significancia LSD Fisher para factor concentración sobre la turbidez

Concentración	Medias	n	Error estándar	
10	14,46	9	0,52	A
15	11,88	9	0,52	B
5	10,7	9	0,52	B

La tabla 20 muestra los resultados de la prueba de significancia LSD Fisher para la interacción pH (6,5; 7 y 7,5 pH) * concentración (5, 10 y 15 g/L), se demuestra que a 7 pH y concentración de 10 g/L, presenta el mayor valor con 36,37 NTU y es diferente al resto de interacciones, y los menores valores se obtuvieron en las interacciones de 6,5 pH * 10 g/L, 6,5 pH * 5 g/L, y 6,5 pH * 15 g/L estadísticamente son iguales y se encuentran entre los 1,3; 1,64 y 1,78 NTU respectivamente. Además, considerando los sólidos disueltos totales inicial de 0,607 NTU y la diferencia de la turbidez obtenidas, podemos decir que la menor turbidez se presenta cuando el pH es menor (ver figura 9).

Tabla 19

*Prueba de significancia LSD Fisher para factor pH * concentración sobre la turbidez*

pH	Concentración	Medias	n	Error estándar	
7	10	36,37	3	0,91	A
7	15	25,8	3	0,91	B
7	5	18,5	3	0,91	C
7,5	5	11,96	3	0,91	D
7,5	15	8,07	3	0,91	E
7,5	10	5,73	3	0,91	E
6,5	15	1,78	3	0,91	F
6,5	5	1,64	3	0,91	F
6,5	10	1,3	3	0,91	F

4.1.3. Evaluación del efecto de hierro y pH utilizando el método SORAS sobre la remoción de arsénico del agua obtenida en la captación del centro poblado Tolapalca.

Los resultados obtenidos para la remoción de As en % se muestran en el Apéndice C, las distribuciones de todos los valores obtenidos se muestran en la figura 12, la tabla 20 es el resumen de experimento donde N representa las 27 unidades

experimentales de los 9 tratamientos utilizados, se obtuvo un R^2 de 0,31 y R^2 ajustado de 0,0 y un coeficiente de variabilidad de 0,7, demostrándose así que el experimento fue llevado adecuadamente.

Tabla 20

Resumen del experimento con respecto al resultado de solidos disueltos totales

Variable	N	R²	R² Aj	CV
Remoción de As	27	0.31	0	0.7

El conjunto de resultados mostrados en el Anexo C, fueron analizados mediante un análisis de varianza, el cual se muestra en la tabla 21, donde se obtuvo que el pH, la concentración y la interacción pH * concentración no presentan diferencia estadística.

Tabla 21

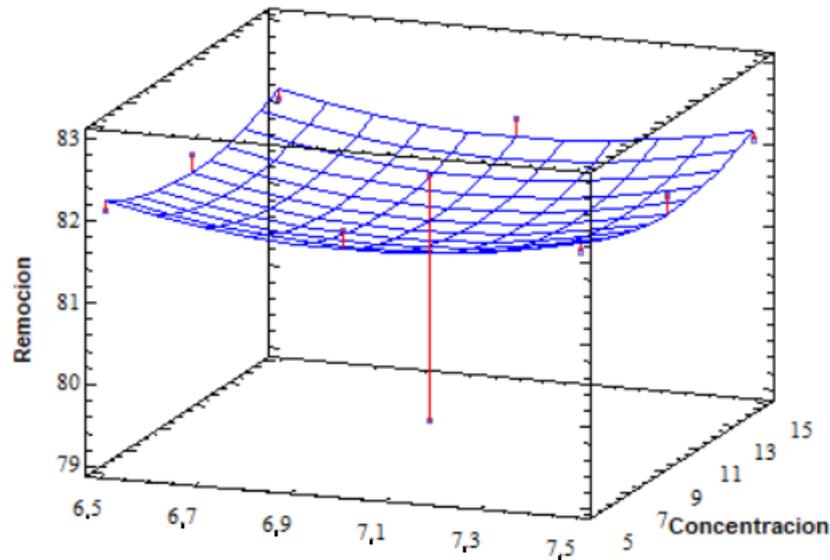
Análisis de varianza para los resultados de remoción de As

Fuentes de variación	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Cuadrado medio	F	p-valor
pH	0.67	2	0.33	1	0.3874
Concentración	0.67	2	0.33	1	0.3874
pH*Concentración	1.33	4	0.33	1	0.4332
Error	6	18	0.33		
Total	8.67	26			

La figura 12, muestra el comportamiento que de los 9 tratamientos que se ubican en los puntos extremos y medios de la superficie de respuesta, así como la dispersión de las 3 repeticiones en cada tratamiento. La concentración inicial del agua fue de 0,0067 mg/L y debido a la sensibilidad del equipo ICP-OES los valores resultantes fueron >0.0012 mg/L en la mayoría de los experimentos realizados, por lo que el valor de remoción porcentual es de ~82.09%

Figura 12

*Superficie de respuesta para los resultados obtenidos de la interacción entre pH * concentración sobre la remoción porcentual de As*



4.2. Contraste de hipótesis

Según el análisis de varianza realizado en los diferentes parámetros evaluados en el presente estudio:

La tabla 5 para el pH muestra que existe diferencia estadística significativa, donde se obtuvo que la concentración presentó diferencia significativa (0,0364 p-valor), el pH de ajuste presentó diferencia altamente significativa (<0,0001 p-valor), y la interacción de pH * concentración no presentó diferencia estadística significativa (0,3806 > 0,05 p valor).

La tabla 9 para la conductividad eléctrica muestra que existe diferencia estadística significativa, donde se obtuvo que el pH presentó diferencia altamente significativa (<0,0001 p-valor), la concentración y la interacción de pH *

concentración no presento diferencia estadística significativa (0,4828 y 0,1536 p-valor).

La tabla 12 para los sólidos disueltos totales muestra que existe diferencia estadística significativa, donde se obtuvo que el pH y la interacción pH * concentración presenta diferencia estadística altamente significativa (0,0001 y < 0,0001 p-valor), la concentración no presenta diferencia estadística significativa (0,0606).

La tabla 17 para los sólidos disueltos totales muestra que existe diferencia estadística significativa, donde se obtuvo que el pH, la concentración y la interacción pH * concentración presenta diferencia estadística altamente significativa (<0,0001 y 0,0003 < 0,01 p-valor).

La tabla 21 para la remoción de As muestra que no existe diferencia estadística significativa, tanto para pH, la concentración y la interacción pH * concentración los p-valor son > 0,05).

4.3. Discusión de resultados

4.3.1. Determinación de las propiedades fisicoquímicas del agua obtenida en la captación del centro poblado Tolapalca en el distrito de Ichuña.

Para los resultados mostrados en la tabla 3, estos valores según el Decreto Supremo N° 004-2017-MINAM para la categoría 1 “Agua poblacional y recreacional”: El pH según la subcategoría B “Aguas superficiales destinada para recreación” recomienda niveles entre 6 a 9 pH, por lo que el valor $7,733 \pm 0,115$ pH, se encuentra dentro de los niveles recomendados. La conductividad eléctrica, sólidos

disueltos totales, turbidez y arsénico según la subcategoría A “Aguas superficiales destinadas a la producción de agua potable” y clasificación A1 “Aguas que pueden ser potabilizadas con desinfección”, la conductividad eléctrica recomienda nivel de 1500 $\mu\text{S}/\text{cm}$, por lo que el valor de 1281 $\mu\text{S}/\text{cm}$ se encuentra dentro del nivel según normatividad. Los sólidos disueltos totales recomiendan un nivel de 1000 mg/L, por lo que el valor obtenido de $581.4 \pm 102,883$ mg/L se encuentra dentro del nivel según normatividad. La turbidez recomienda un nivel de 5 NTU, por lo que el valor obtenido de $0,627 \pm 0,025$ NTU se encuentra dentro del nivel según normatividad.

4.3.2. Evaluación del efecto de hierro y pH utilizando el método SORAS sobre las características fisicoquímicas (pH, conductividad eléctrica, sólidos disueltos totales y turbidez) del agua obtenida en la captación del centro poblado Tolapalca.

Para el pH los resultados del estudio presentaron valores entre 6,31 y 7,23 pH, de los cuales estos se encuentran dentro de los niveles recomendados en el Decreto Supremo N° 004-2017-MINAM sub categoría B, además de que un sistema de oxidación debe de estar comprendido entre 5,5 a 8,5 pH, considerando que en un proceso de oxidación de $\text{Fe}^{2+}/\text{Fe}^{3+}$, mientras se reduce el pH el proceso de precipitación citrato de hierro (III) [$\text{Fe}(\text{C}_6\text{H}_5\text{O}_7)$] (Katsoyiannis y Zouboulis, 2006; Pliego-Arreaga, Regalado, Amaro-Reyes, y García-Almendárez, 2013), por lo que se presentó una reducción del pH inicial de 7,73 pH.

Para la conductividad eléctrica los resultados del estudio presentaron valores entre 1180 a 1250 $\mu\text{S}/\text{cm}$, de los cuales estos se encuentran dentro de los niveles recomendados en el Decreto Supremo N° 004-2017-MINAM subcategoría

A. La conductividad la capacidad de transportar corriente eléctrica en el agua, esta medida se relaciona con la concentración de iones provenientes de sales disueltas y materia inorgánica (alcalinos, carbonatos, cloruros y sulfuros) en forma de electrolitos como: Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ , K^+ , HCO_3^- , SO_4^{2-} , considerando la oxidación del $\text{Fe}^{2+}/\text{Fe}^{3+}$ y la precipitación de $\text{Fe}(\text{C}_6\text{H}_5\text{O}_7)$ (Wegelin, et al., 2000), se arrastran iones disueltos por lo que la conductividad eléctrica es menor a la inicial de 1281 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Según estudios realizados, Cabanillas en la región Puno se tiene valores de 400 a 500 $\mu\text{S}/\text{cm}$ (Blanco, 2018), río Vizcachas ubicado en la región Moquegua valores de 115 a 147 $\mu\text{S}/\text{cm}$ (Pinto, 2018), en la represa Pasto Grande ubicada Moquegua valores de 600 a 800 $\mu\text{S}/\text{cm}$ (GRM, 2015), por lo que los valores resultantes muestran que la presencia de otros elementos incrementan la conductividad eléctrica del agua.

De los sólidos disueltos totales los resultados del estudio presentaron valores entre 591,5 a 631,6 mg/L, de los cuales estos valores se encuentran dentro de los niveles recomendados en el Decreto Supremo N° 004-2017-MINAM subcategoría A. Estos sólidos disueltos son las sales, minerales y cualquier otro compuesto orgánico menor a 1,5 μm . El valor inicial fue de 581,4 mg/L, por lo que el incremento puede ser debido a la adición de viruta de hierro adicionada a cada tratamiento.

La turbidez los resultados del estudio presentaron valores entre 1,19 a 38,3 NTU, de los cuales solo los tratamientos a pH 6,5 y a las diferentes concentraciones (5, 10 y 15 g/L) con valores comprendidos entre 1,3 a 1,78 NTU estos se encuentran dentro de los niveles recomendados en el Decreto Supremo N° 004-2017-MINAM

subcategoría A, la OMS recomienda valores menores de 2 NTU. El resto de tratamiento excede los valores de turbidez recomendada por la normatividad.

Se demuestra que los parámetros físico químicos se ven alterados por el uso de ácido cítrico como regulador de pH y la adición de viruta de hierro, obtienen resultados que se encuentran dentro del valor recomendado por el Decreto Supremo N° 004-2017-MINAM

4.3.3. Evaluación del efecto de hierro y pH utilizando el método SORAS sobre la remoción de arsénico del agua obtenida en la captación del centro poblado Tolapalca.

Los resultados en los diferentes tratamientos muestran valores menores a 0,0012 mg/L medidos por el método ICP-OES (plasma de acoplamiento inductivo - espectrofotómetro de emisión óptico). Estos valores se encuentran dentro de los niveles recomendados en el Decreto Supremo N° 004-2017-MINAM sub categoría, con un porcentaje de remoción ~ de 82,09 A. Considerando, otros estudios lograron remover el 75% por método SORAS (Chávez y Miglio, 2011) utilizando jugo de limón, por coagulación utilizando cloruro férrico un 95% y sulfato de aluminio un 80% con sulfato de aluminio (Francisca y Carro, 2014), mediante el uso de quitosano en 12.5% (Montero et al., 2010, p. 138), la efectividad de las investigaciones realizadas están sujetas a la concentración inicial, pH, presencia de otros compuestos tanto orgánicos como inorgánicos. Demostrándose que el uso del ácido cítrico y viruta de hierro puede remover As.

CAPÍTULO V

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1. Conclusiones

Primera. Los parámetros utilizados como pH, conductividad eléctrica, sólidos disueltos totales, turbidez y arsénico obtuvieron valores de 7,733 pH, 1281 $\mu\text{S}/\text{cm}$, 581.4 mg/L, 0,627 NTU y 0,067 mg/L respectivamente, del agua obtenida en la captación del centro poblado Tolapalca del distrito de Ichuña, se encuentran dentro de los niveles propuestos en el Decreto Supremo N° 004-2017-MINAM, por lo que su consumo es recomendable.

Segunda. Los factores utilizados en el presente estudio pH (6,5; 7 y 7,5 pH) y concentración de viruta de hierro (5, 10 y 15 g/L) utilizando el método de fotooxidación solar (SORAS) sobre las propiedades del agua obtenida en la captación del centro poblado Tolapalca del distrito de Ichuña, obtuvieron los siguientes resultados: pH entre 6,31 a 7,23 pH, conductividad eléctrica entre 1180 a 1250 $\mu\text{S}/\text{cm}$, sólidos disueltos totales entre 591,5 a 631,6 mg/L, y en el caso de la turbidez la

interacción de pH 6,5 y a las diferentes concentraciones (5, 10 y 15 g/L) con 1,3 a 1,78 NTU se encuentran dentro de los niveles recomendados en el Decreto Supremo N° 004-2017-MINAM, por lo que es recomendable su consumo. La interacción de pH (7 y 7,5 pH) y a las diferentes concentraciones (5, 10 y 15 g/L) muestra valores de 5,73 a 36,37 NTU, a pH 7 se muestran los mayores valores de turbidez 18,5 a 36,37 NTU, por lo que para el tratamiento de agua no debe utilizarse en pH neutro o básicos.

Tercera. Los factores utilizados en el presente estudio pH (6,5; 7 y 7,5 pH) y concentración de viruta de hierro (5, 10 y 15 g/L) utilizando el método de fotoxidación solar (SORAS) sobre la concentración final de arsénico obtuvieron valores 0,0012 mg/L (cuantificado por ICP-OES) por lo que se encuentran dentro de los niveles recomendados en el Decreto Supremo N° 004-2017-MINAM. Con respecto al porcentaje de remoción se obtuvo un ~ 82,09 %.

Cuarta. Los parámetros obtenidos del agua captada en el centro poblado Tolapalca del distrito de Ichuña, y los parámetros obtenidos a partir de los factores utilizados en el presente estudio pH (6,5; 7 y 7,5 pH) y concentración de viruta de hierro (5, 10 y 15 g/L) utilizando el método de fotoxidación solar (SORAS), se encuentran dentro de los niveles propuestos en el Decreto Supremo N° 004-2017-MINAM, además que la remoción de arsenico alcanzo un valor aproximadamente de 82,09%.

5.2. Recomendaciones

- Primera.** El agua utilizada de la captación del centro poblado Tolapalca para consumo humano debe ser monitoreada y analizada continuamente para garantizar que los diferentes parámetros se encuentren dentro de los valores recomendados por la normatividad vigente.
- Segunda.** De los valores obtenidos para la turbidez en el tratamiento por SORAS deben ser con valores menores de 6,5 pH, con respecto de otros parámetros no evaluados olor, sabor, etc., se deben realizar análisis para no alterar la aceptación para los consumidores.
- Tercera.** Con el valor de 0,06 mg/L de arsénico que presenta la captación del centro poblado Tolapalca, y el valor obtenido menor a 0,0012 mg/L luego del tratamiento por SORAS, se debe realizar estudios con concentraciones superiores de arsénico como es de 0,5 mg/L (valor encontrado en Bangladesh), no solo en sistemas estáticos sino también en sistemas dinámicos.
- Cuarta.** Si bien los parámetros y niveles se encuentran dentro Decreto Supremo N° 004-2017-MINAM, se debe evaluar el tratamiento SORAS con un nivel de arsénico superior a la que se recomienda como nivel máximo de 0,01 mg/L.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Acuña-Piedra, A., y Araya-Obando, A. (2016). Potential natural low-cost adsorbents for the removal of arsenic in drinking water in Costa Rica. Selección teórica de adsorbentes potenciales naturales de bajo costo para la remoción de arsénico en el agua de consumo humano en Costa Rica. *Tecnología En Marcha*, 506. <https://doi.org/10.18845/tm.v29i6.2899>
- Ale, D., Villa, G., y Gastañaga, M. (2018). Concentraciones de arsénico urinario en pobladores de dos distritos de la región Tacna, Perú, 2017. *Revista Peruana de Medicina Experimental y Salud Pública*, 35(2), 183. <https://doi.org/10.17843/rpmesp.2018.352.3693>
- Alka, S., Shahir, S., Ibrahim, N., Ndejiko, M., Vo, D., y Manan, F. (2021). Arsenic removal technologies and future trends: A mini review. *Journal of Cleaner Production*, 278. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.123805>
- Andreozzi, R., Caprio, V., Insola, A., y Marotta, R. (1999). Advanced oxidation processes (AOP) for water purification and recovery. *Catalysis Today*, 53(1), 51–59. [https://doi.org/10.1016/S0920-5861\(99\)00102-9](https://doi.org/10.1016/S0920-5861(99)00102-9)
- Bain, R., Cronk, R., Hossain, R., Bonjour, S., Onda, K., Wright, J., Yang, H., Slaymaker, T., Hunter, P., Prüss, A., y Bartram, J. (2014). Global assessment of exposure to faecal contamination through drinking water based on a systematic review. *Tropical Medicine and International Health*, 19(8), 917–927. <https://doi.org/10.1111/tmi.12334>
- Blanco, M. (2018). *Estudio de la calidad de agua potable para consumo humano*

en el distrito de Cabanillas, provincia de San Román, departamento de Puno. [Tesis de pregrado, Universidad Nacional del Altiplano] Repositorio Institucional - UNAP.
http://repositorio.unap.edu.pe/bitstream/handle/UNAP/10619/Blanco_Coquirira_Maritza.pdf?sequence=1&isAllowed=y

Brenes, R., y Rojas, L. (2005). El agua: sus propiedades y su importancia biológica. *Acta Académica*, 37, 167–196.
<http://revista.uaca.ac.cr/index.php/actas/article/view/407>

Byrne, J., Fernandez, P., Dunlop, P., Alrousan, D., y Hamilton, J. (2015). Photocatalytic Enhancement for Solar Disinfection of Water : A Review. *Nanotechnology and Solar Energy*. <https://doi.org/10.1155/2011/798051>

Calvo, D., Gutierrez, M., Gonzalez, M., Santos, J., Munoz, M., y Mayen, S. (2019). Photoxidation of As³⁺ to As⁵⁺ in the presence of TiO₂ under lighting conditions of a lamp and sunlight. *2019 IEEE International Conference on Applied Science and Advanced Technology, ICASAT 2019*. <https://doi.org/10.1109/iCASAT48251.2019.9069537>

Carabantes, A., y Fernicola, N. (2003). Arsénico en el agua de bebida: un problema de salud pública. *Revista Brasileira de Ciências Farmacêuticas*, 39(4), 365–372. <https://doi.org/10.1590/S1516-93322003000400003>

Castro, M. (2004). Tercer Seminario Internacional sobre Evaluación y Manejo de las Fuentes de Agua de Bebida contaminadas con Arsénico. *Remoción Del Arsénico En El Agua Para Bebida Y Biorremediación De Suelos*, 1–15.

<http://www.ingenieroambiental.com/4014/remocion-agua.pdf>

Castro, M. (2006). Presencia de arsénico en el agua de bebida en América Latina y su impacto en la Salud Pública. *Natural Arsenic in Groundwaters of Latin America*. <http://www.bvsde.ops-oms.org/bvsacd/cd51/arsenico-agua.pdf>.

Chávez, M., y Miglio, M. (2011). Remoción de arsénico por oxidación solar en aguas para consumo humano. *Soc. Quím. Perú*, 77(4), 307–314. http://www.scielo.org.pe/scielo.php?pid=S1810-634X2011000400008&script=sci_arttext

Cullen, W., y Reimer, K. (1989). Arsenic Speciation in the Environment. *Chemical Reviews*, 89(4), 713–764. <https://doi.org/10.1021/cr00094a002>

Da Silva, E., Mussoline, W., Wilkie, A., y Ma, L. (2019). Anaerobic digestion to reduce biomass and remove arsenic from As-hyperaccumulator *Pteris vittata*. *Environmental Pollution*, 250, 23–28. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2019.03.117>

Ferguson, J., y Gavis, J. (1972). A review of the arsenic cycle in natural waters. *Water Research*, 6(11), 1259–1274. [https://doi.org/10.1016/0043-1354\(72\)90052-8](https://doi.org/10.1016/0043-1354(72)90052-8)

Fernández, A. (2012). El agua: Un recurso esencial. *Red de Revistas Científicas de América Latina y El Caribe*, 11, 147–170. <http://www.redalyc.org/pdf/863/86325090002.pdf>

Francisca, F., y Carro, M. (2014). Remoción de arsénico en agua mediante procesos

de coagulación-floculación. *Revista Internacional de Contaminacion Ambiental*, 30(2), 177–190.

García, J., Reding, A., y López, J. (2013). Cálculo del tamaño de la muestra en investigación en educación médica. *Investigación En Educación Médica*, 2(8), 217–224. [https://doi.org/10.1016/S2007-5057\(13\)72715-7](https://doi.org/10.1016/S2007-5057(13)72715-7)

García, M. , D'Hiriart, J., Giullitti, J., Lin, H., Custo, G., Hidalgo, M., Litter, M., y Blesa, M. (2004). Solar light induced removal of arsenic from contaminated groundwater: The interplay of solar energy and chemical variables. *Solar Energy*, 77(5), 601–613. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2004.06.022>

Gomez, A., Howe, P., Hughes, M.,Kenyon, E., Lewis, D., y Moore, J. (2001). Arsenic and arsenic compounds. *Environmental Health Criteria* 224. 1–66. [https://doi.org/NLM Classification: QV 294](https://doi.org/NLM%20Classification%3A%20QV%20294)

Gómez, O. (2018). Contaminación del agua en países de bajos y medianos recursos, un problema de salud pública. *Revista Facultad de Medicina*, 66(1), 7–8. <https://doi.org/10.15446/revfacmed.v66n1.70775>

Google (s.f.). [Captación de Tolopalca]. Recuperado el 20 de octubre de 2019.

GRM. (2015). *Resultado del monitoreo participativo de la calidad del agua en el ámbito del sistema hidráulico Pasto Grande*. Gobierno Regional Moquegua.

Hug, S., Canonica, L., Wegelin, M., Gechter, D., y Von, U. (2001). Solar oxidation and removal of arsenic at circumneutral pH in iron containing waters.

Environmental Science and Technology, 35(10), 2114–2121.
<https://doi.org/10.1021/es001551s>

Hug, S., y Leupin, O. (2003). Iron-catalyzed oxidation of arsenic (III) by oxygen and by hydrogen peroxide: pH-dependent formation of oxidants in the Fenton reaction RN. *Environ. Sci. Technol.*, 37(12), 2734–2742.
<https://doi.org/10.1021/es026208x>

Instituto Nacional de Estadística e Informática. (2018). *Moquegua Resultados Definitivos. Población Económicamente Activa. Tomo 1.* 872.
https://www.inei.gob.pe/media/MenuRecursivo/publicaciones_digitales/Est/Lib1624/18TOMO_01.pdf

Katsoyiannis, I., y Zouboulis, A. (2006). Comparative evaluation of conventional and alternative methods for the removal of arsenic from contaminated groundwaters. *Reviews on Environmental Health*, 21(1), 25–41.
<https://doi.org/10.1515/REVEH.2006.21.1.25>

Kumar, V., Parihar, R., Sharma, A., Bakshi, P., Preet, G., Sidhu, S., Bali, A., Karaouzas, I., Bhardwaj, R., Thukral, A. K., Gyasi-agyei, Y., y Rodrigo, J. (2019). Global evaluation of heavy metal content in surface water bodies: a meta-analysis using heavy metal pollution indices and multivariate statistical analyses. *Chemosphere*, 236(2019), 0045-6535.
<https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2019.124364>

Lara, F., Mansilla, H., Freer, J., y Yáñez, J. (2007). Solar-light assisted removal of arsenic from natural waters: effect of iron and citrate concentration. *Journal*

of Chemical Technology y Biotechnology, 81(7), 1115–1121.
<https://doi.org/10.1002/jctb>

Long, G., Peng, Y., y Bradshaw, D. (2012). A review of copper-arsenic mineral removal from copper concentrates. *Minerals Engineering*, 36(38), 179–186.
<https://doi.org/10.1016/j.mineng.2012.03.032>

Montero, A., Paredes, B, y Rivera, M. (2010). Utilización de quitosana para la remoción de arsénico (As) del agua. *Superficies y Vacío*, 23, 136–139.

Montesinos, H., y Guevara, P. (2019). *Comparación entre los métodos RAOS y coagulación – floculación para la remoción de arsénico en agua de consumo humano en la ciudad de Calca.*[Tesis pregrado, Universidad Andina de Cusco]. Repositorio UAC
https://repositorio.uandina.edu.pe/bitstream/handle/20.500.12557/3484/Hardred_Patricia_Tesis_bachiller_2019_Part.1.pdf?sequence=3&isAllowed=y

Nazari, A., Radzinski, R., y Ghahreman, A. (2017). Review of arsenic metallurgy: Treatment of arsenical minerals and the immobilization of arsenic. *Hydrometallurgy*, 174, 258–281.
<https://doi.org/10.1016/j.hydromet.2016.10.011>

Organismo Panamericano de la Salud. (2009). *Saneamiento Rural y Salud*. Recuperado de <https://www3.paho.org/hq/dmdocuments/2010/Sanamiento-Con-Pro-Intro.pdf>

Pinto, E. (2018). *Evaluación de los metales pesados en los ríos vizcachas y chilota distrito de Chojota, provincia General Sanchez Cerro, región de Moquegua.*

[Tesis de maestría, Universidad Nacional de San Agustín]. Repositorio UNSA.

<https://repositorio.unsa.edu.pe/server/api/core/bitstreams/cb423a51-7669-4e9c-b2e9-b4d3b2a833cc/content>

Pliego-Arreaga, R., Regalado, C., Amaro-Reyes, A., y García-Almendárez, B. (2013). Efecto del pH sobre la oxidación electroquímica de fenol empleando un ánodo dimensionalmente estable de SnO₂-Sb₂O₅-RuO₂. *Revista Mexicana de Ingeniería Química*, 12(3), 505–511. <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=62029966013>

Podgorski, J., y Berg, M. (2020). Global threat of arsenic in groundwater. *Science*, 368(6493), 845–850. <https://doi.org/10.1126/science.aba1510>

Rodríguez, A., Letón, P., Rosal, R., Dorado, M., Villar, S., y Sanz, J. (2006). Tratamientos Avanzados De Aguas Residuales Industriales. *Citme*, 6(13), 30-34. <https://doi.org/M-30985-2006>

Rojas, P., Vargas, M., Araya, A., Valverde, J., y Romero, L. (2015). Estudio de remoción de arsénico en agua potable a nivel domiciliario mediante oxidación solar y coagulación-floculación. *Tecnología En Marcha*, 28(506), 55–64. http://revistas.tec.ac.cr/index.php/tec_marcha/article/view/2443

Rojas, M. (2015). Tipos de investigación científica: Una simplificación de la complicada incoherente nomenclatura y clasificación. *Revista Electronica de Veterinaria*, 16(1), 21–24.

Tanabe, C., Hopfer, H., Gilleland, G., Liba, A., Ebeler, S., y Nelson, J. (2016). Total

Arsenic Analysis in Californian Wines with Hydride Generation -
Microwave Plasma -Atomic Emission Spectroscopy (HG-MP-AES).
Journal of Analytical Atomic Spectrometry.
<https://doi.org/10.1039/C6JA00051G>.This

Trujillo, O. (2019). *Comparación de los niveles en orina de arsénico y cadmio y sus manifestaciones clínicas de intoxicación entre niños de 6 a 12 años del distrito de Torata y el distrito de Carumas en la provincia de Mariscal Nieto de la Región Moquegua*. [Tesis maestría, Universidad Nacional de San Agustín]. Respositorio UNSA
<http://repositorio.unsa.edu.pe/bitstream/handle/UNSA/8888/MDMtrzeoe1.pdf?sequence=4&isAllowed=y>

Wang, J., Zhang, Y., Liu, Z., Norris, P., Romero, C., Xu, H., y Pan, W. (2017). Effect of Coordinated Air Pollution Control Devices in Coal-Fired Power Plants on Arsenic Emissions. *Energy and Fuels*, 31(7), 7309–7316.
<https://doi.org/10.1021/acs.energyfuels.7b00711>

Wegelin, M., Gechter, D., Hug, S., y Mahmud, A. (2000). SORAS - a simple arsenic removal process. *Water Sanitation and Hygiene*. 2(3), 255–258.
<https://wedc-knowledge.lboro.ac.uk/resources/conference/26/wegelin-soras.pdf>

Wegelin, M., Gechter, D., Hug, S., Mahmud, A., y Motaleb, A. (2000). SORAS - A simple arsenic removal process. *Water, Sanitation and Hygiene - Challenges of the Millennium: Proceedings of the 26th WEDC Conference*.