

Evaluation of Heterogeneous Photocatalysis for the Elimination of Microbiological Contaminants in Groundwater: Case of La Horca Sector, Chucarapi - Arequipa

D.Y. Cabrera-Choccata, MSc¹ and L.A. Calisaya-Machaca¹

¹Universidad Tecnológica del Perú, Arequipa, Perú, c20101@utp.edu.pe (D.Y.C.-CH), 1213470@utp.edu.pe (L.A.C.-M),

Abstract– *Microbiological contamination in groundwater represents a risk to public health, especially in rural areas such as La Horca, Anexo Chucarapi, Islay. This study evaluated the efficacy of heterogeneous photocatalysis using titanium dioxide (TiO_2) as a catalyst to remove total and fecal coliforms in well water. A hybrid photocatalytic reactor was designed, and 400 ml samples were treated at temperatures between 21 °C and 23 °C, with exposure times from 30 to 120 min. Contamination was measured by most probable count (MPN/100 ml) of total and fecal coliforms, following DIGESA protocols. The results indicated a maximum reduction of 93.27% for total coliforms and 92.27% for fecal coliforms, reaching levels close to the regulatory limits for fecal coliforms (≤ 1.8 MPN/100 ml). However, total coliforms did not always meet the established standards, showing the need for optimization. Increasing time and temperature showed positive effects on removal, confirming the progressive efficacy of the treatment. These findings are consistent with previous research on the ability of heterogeneous photocatalysis to improve microbiological water quality. It is recommended that full-scale pilot studies be implemented and that this technology be combined with other treatments to fully meet sanitary standards. This work provides a promising alternative for water treatment in rural areas affected by microbiological contamination.*

Keywords-- *Heterogeneous photocatalysis, titanium dioxide, microbiological contamination, well water, and coliform removal.*

Evaluación de la Fotocatálisis Heterogénea para la Eliminación de Contaminantes Microbiológicos en Aguas Subterráneas: Caso Sector La Horca, Chucarapi – Arequipa

D.Y. Cabrera-Choccata, MSc¹ y L.A. Calisaya-Machaca¹

¹Universidad Tecnológica del Perú, Arequipa, Perú, c20101@utp.edu.pe (D.Y.C.-CH), 1213470@utp.edu.pe (L.A.C.-M),

Resumen– La contaminación microbiológica en aguas subterráneas representa un riesgo para la salud pública, especialmente en zonas rurales como el sector La Horca, Anexo Chucarapi, Islay. Este estudio evaluó la eficacia de la fotocatálisis heterogénea utilizando dióxido de titanio (TiO_2) como catalizador para eliminar coliformes totales y fecales en agua de pozo. Se diseñó un reactor fotocatalítico híbrido y se trataron muestras de 400 ml a temperaturas entre 21 °C y 23 °C, con tiempos de exposición de 30 a 120 minutos. La contaminación fue medida mediante recuento mas probable (NMP/100 ml) de coliformes totales y fecales, siguiendo protocolos DIGESA. Los resultados indicaron una reducción máxima del 93.27% para coliformes totales y 92.27% para fecales, alcanzando niveles cercanos a los límites normativos para coliformes fecales (≤ 1.8 NMP/100 ml). Sin embargo, los coliformes totales no siempre cumplieron los estándares establecidos, evidenciando la necesidad de optimizaciones. El aumento en tiempo y temperatura mostró efectos positivos en la remoción, confirmando la eficacia progresiva del tratamiento. Estos hallazgos coinciden con investigaciones previas sobre la capacidad de la fotocatálisis heterogénea para mejorar la calidad microbiológica del agua. Se recomienda implementar estudios piloto a escala real y combinar esta tecnología con otros tratamientos para cumplir completamente con los estándares sanitarios. Este trabajo aporta una alternativa prometedora para el tratamiento de aguas en zonas rurales afectadas por contaminación microbiológica.

Palabras clave-- Fotocatálisis heterogénea, dióxido de titanio, contaminación microbiológica, agua de pozo, remoción de coliformes.

I. INTRODUCCIÓN

La pureza del agua que está dirigida al consumo se ve afectada en consecuencia de la presencia de agentes patógenos y perjudiciales, así como también por la exposición a radiaciones. [1]. La OMS estableció que alrededor de 4 200 millones de individuos están expuestos a agua cuyo tratamiento de saneamiento es cuestionable; dentro de este grupo, 144 millones consumieron agua superficial que no fue potabilizada [1]. Esta falta de saneamiento básico genera infecciones como la parasitosis intestinal [2], o infecciones por bacterias como la Escherichia Coli que son responsables de alrededor de 630 millones de pacientes con casos de diarrea en el mundo y aproximadamente 6 millones de fallecimientos

estimados en un año, siendo los más afectados la población infantil de países subdesarrollados [3].

La contaminación microbiológica del agua subterránea constituye un grave problema para la salud pública, siendo fuente frecuente de enfermedades gastrointestinales, diarreas y otras infecciones transmitidas por consumo de agua contaminada por coliformes fecales, totales y otros patógenos [4], [5]. En zonas rurales como el sector La Horca del Anexo Chucarapi (Cocachacra, Islay, Arequipa), la calidad microbiológica del agua de pozo es especialmente vulnerable debido a filtraciones desde fuentes de contaminación cercanas, evidenciando niveles elevados de coliformes que superan los estándares sanitarios [4], [6].

La fotocatálisis heterogénea emplea un catalizador semiconductor, típicamente dióxido de titanio (TiO_2), que al ser irradiado con luz ultravioleta genera especies reactivas de oxígeno, principalmente radicales hidroxilos ($\cdot OH$), responsables de la oxidación y destrucción de microorganismos presentes en el agua [7], [8]. Este proceso es reconocido por su eficiencia, no toxicidad y capacidad para tratar simultáneamente múltiples contaminantes microbiológicos, mediante mecanismos de daño oxidativo a membranas celulares y material genético microbiano [9].

Diversos estudios han reportado la aplicación exitosa de fotocatálisis con TiO_2 para desinfectar aguas de fuentes superficiales y subterráneas, alcanzando remociones superiores al 90% de coliformes fecales y totales tras tratamientos entre 60 y 120 minutos bajo condiciones controladas de irradiación y temperatura [8], [10], [11]. Esta tecnología representa una alternativa sostenible y prometedora frente a métodos convencionales.

En el presente estudio, se evaluó un sistema de fotocatálisis heterogénea (FH) en el sector La Horca, ubicado en el anexo de Chucarapi, distrito de Cocachacra, provincia de Islay, en la región de Arequipa. Los habitantes de esta zona enfrentan dificultades relacionadas con el suministro de agua, ya que dependen de un pozo artesiano que se abastece mediante filtraciones del río Tambo. Lamentablemente, esta agua presenta un alto nivel de contaminantes microbiológicos (CM), por ello se empleó un reactor híbrido con TiO_2 , logrando una reducción máxima de 93.27% en coliformes totales y 92.27% en coliformes fecales a 23 °C y 120 minutos

de tratamiento. Sin embargo, en algunos casos no se alcanzaron los límites regulatorios para coliformes totales, indicando desafíos en la optimización del proceso.

El estudio aporta evidencia científica y técnica relevante para la región, donde la contaminación microbiológica del agua subterránea afecta la salud comunitaria y se requieren tecnologías efectivas para garantizar agua potable segura. La evaluación sistemática del proceso fotocatalítico y su adaptación a las condiciones locales contribuye a fortalecer las estrategias regionales de tratamiento de agua de pozo, promoviendo su aplicación sostenible en comunidades rurales.

II. MATERIALES Y MÉTODOS

A. Zona de estudio

1) *Descripción de la ubicación de agua de pozo:* Arequipa posee nueve cuencas hidrográficas (Figura1) dentro de ellas se encuentra la cuenca Tambo proveniente del río Majes [12], aunque esta es una de las zonas mejor articuladas, la migración hacia ella ha ocasionado la adición de la contaminación urbana e industrial de la ciudad de Arequipa a la ya existente contaminación agrícola y minera de la cuenca [13]. Esta cuenca abastece al distrito de Cocachacra y se encuentra en vulnerabilidad extrema [14].

Cocachacra es un distrito de la provincia y región de Arequipa, el cual se localiza al sur de Perú. Es un distrito que ha experimentado múltiples divisiones políticas a lo largo del tiempo, está compuesto por 33 Anexos en la actualidad. Entre ellos, se destacan Chucarapi, El Toro, El Fiscal y el Asentamiento San Camilo, que forma parte de un proyecto de irrigación por aspersión. Su clima es desértico y su temperatura fluctúa de 15° C (julio al mes de agosto) a 28° C (enero al mes de marzo), con una altitud promedio de 84 m.s.m.n. El distrito de Cocachacra es el de mayor extensión (39.55% del área provincial).



Fig. 1 Mapa de cuencas hidrográficas de la región Arequipa [14].

2) *Ubicación del Anexo Chucarapi:* El Centro poblado de Chucarapi está ubicado dentro del distrito de Cocachacra, provincia de Islay, en la región de Arequipa. Se encuentra en ubicación en las coordenadas 17° 4' 13.6" S 71° 43' 28.8" W a

una altitud de 107 m s. n. m., cuenta con una población aproximada de 3058 pobladores.

El abastecimiento de agua en Chucarapi proviene principalmente de fuentes subterráneas como pozos y manantiales. La Municipalidad Distrital de Chucarapi es la encargada de la gestión del agua potable en la zona y ha implementado sistemas de captación y tratamiento de agua para garantizar el acceso a agua segura y de calidad a la población. Además, existen acueductos y redes de distribución de agua que permiten llevar el agua potable a los hogares y establecimientos del distrito.

3) *Pozo del Sector la Horca:* En algunos casos, especialmente en zonas rurales como el Sector la Horca, la población puede obtener agua de ríos, arroyos, pozos y lagunas cercanas. Uno de los ríos del cual es proveniente el agua de estos pozos la cual se le considera una agua subterránea, es el río de Tambo, el cual es uno de los principales ríos de la costa sur del Perú, el caudal del río Tambo varía a lo largo del año y puede ser influenciado por factores como las precipitaciones, el caudal promedio del río Tambo en la estación hidrológica de Cocachacra, ubicada en la provincia de Islay, presenta un patrón de flujo impredecible y con una tendencia a ser repentino y violento, evidenciándose notables variaciones entre sus valores máximos y mínimos. En tiempos de crecida, se ha registrado una descarga promedio diaria máxima de 1,500 (m³/s), mientras que, en la temporada de sequía, la descarga promedio diaria mínima ha sido de 1.5 (m³/s). La descarga media diaria anual aproximada es de 34.75 (m³/s) [15].

Sin embargo, este valor puede variar significativamente a lo largo del año debido a la variabilidad en las precipitaciones y otros factores. Es importante tener en cuenta que la medición del caudal del río Tambo puede ser crítica para la gestión del agua en la región, especialmente en la época de estiaje o sequía, cuando el suministro de agua puede ser limitado. El pozo que se presenta en la Fig. 2 del cual se realizó el estudio tiene coordenadas 17.062755, -71.71742 y una profundidad de 60 m.



Fig. 2 Pozo sector la Horca, Chucarapi.

En la Tabla I, está el resumen sobre los datos característicos del pozo del cual se tomó la muestra para esta investigación.

B. Aplicación de Fotocatálisis Heterogénea (F.H)

Se aplicó el método de F.H. utilizando como catalizador el dióxido de titanio (TiO_2), así mismo se tomó el tiempo requerido para poder llevar a cabo el proceso y la temperatura a la cual se tuvo que realizar el proceso fotocatalítico.

1) Desarrollo del sistema fotocalizador:

Para el desarrollo del sistema fotocalizador se siguieron los pasos generales que se muestran a continuación: a) Selección de materiales: Implicó la elección de materiales adecuados para que puedan ser utilizados en el diseño del reactor y en el medio reactivo. b) Diseño del sistema fotocalizador con dióxido de titanio: Una vez que se ha seleccionado el fotocalizador adecuado, se diseñó el reactor en el que se llevó a cabo la reacción. c) Armado del sistema de F.H.: Implicó la construcción de un reactor que permitió la interacción del fotocalizador con la fuente de luz y el medio reactivo.

TABLA I

CARACTERÍSTICAS DEL POZO EN EL SECTOR LA HORCA

| Datos | Pozo sector la Horca |
|----------------|----------------------|
| Latitud | 17.062755 |
| Longitud | -71.717420 |
| Descarga Media | 34.75 (m^3/s) |
| Turbiedad | 0.6 NTU |
| Altura | 60 m |

2) Diseño del sistema fotocalizador con dióxido de titanio: Para el diseño del reactor de fotocalización se toma en cuenta los siguientes puntos: a) Descripción de reactor fotocalítico utilizado, Se tomó en cuenta las características los reactores tipo CPC y CPI durante el diseño con el fin de maximizar la captura de la radiación solar difusa y aprovechar los cambios de radiación solar que ocurren durante el día, se eligió este modelo híbrido por el clima de la zona en investigación como se puede observar en la Fig. 3 Temperatura máxima y mínima promedio en Cocachacra [16] y en la Fig. 4 Categorías de nubosidad en Cocachacra.

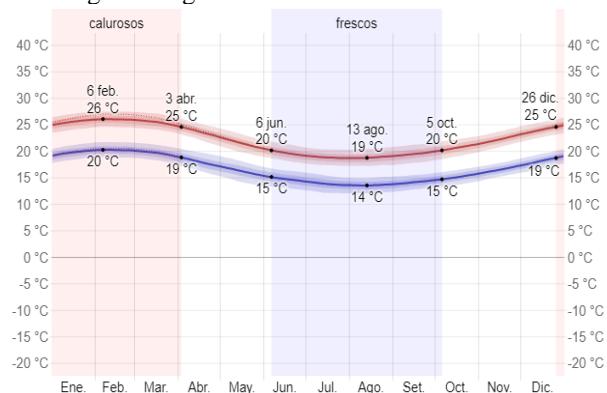


Fig. 3 Temperatura máxima y mínima promedio en Cocachacra [16].

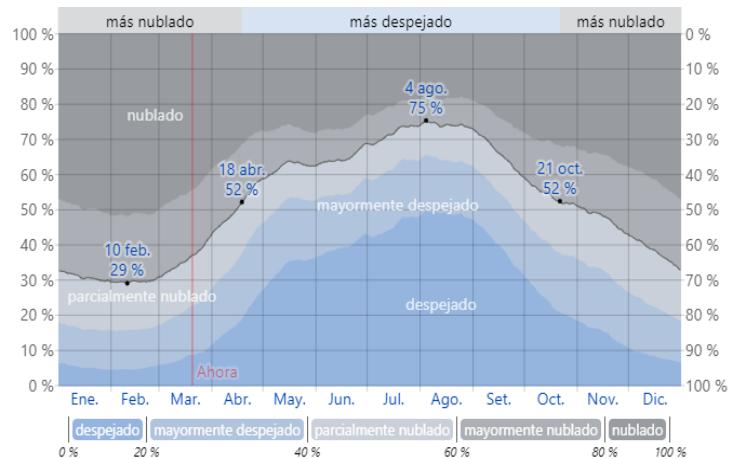


Fig. 4 Categorías de nubosidad en Cocachacra [16].

De igual manera se evaluó la transmitancia y reflectancia de diferentes materiales considerando las referencias de Blanco et al [17], ver Fig. 5 y Fig. 6, siendo el Pírex el que presenta mejores características ver Tabla II.

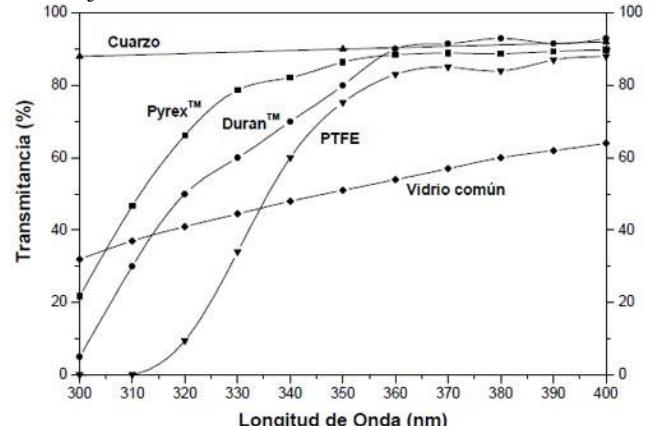


Fig. 5 Transmitancia de diferentes materiales válidos para reactores fotocalítico [17].

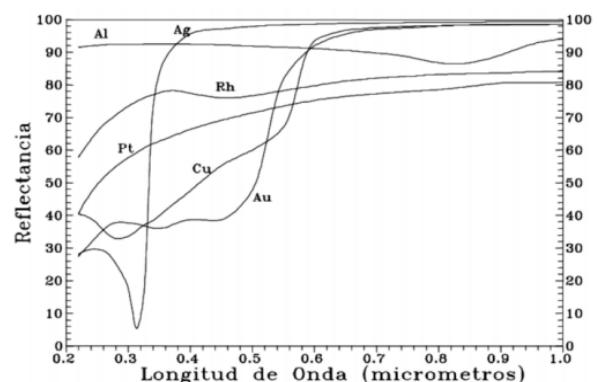


Fig. 6 Reflectancia de distintos metales [17].

TABLA II
ESPECIFICACIONES TÉCNICAS DE TUBO DE VIDRIO BOROSILICATO DE PÍREX

| Especificaciones | Tipo |
|----------------------------|--------------|
| Material de tubo de vidrio | Borosilicato |
| Tipo de Tubo | Pírex |
| Diámetro externo | 5.8 cm |
| Diámetro Interno | 5.4 cm |
| Espesor | 0.4 cm |
| Longitud | 80 cm |

3) *La dimensión del reactor fotocatalítico*, Se adaptó al volumen de fluido que se desea tratar y al caudal de operación. Se tuvo una dimensión de 95cm de alto y 65 cm de ancho. La dirección y el ángulo geométrico para reflejar la radiación solar. Depende de la ubicación geográfica y de la estación del año en la que se esté operando el reactor, y se suele recomendar un ángulo de inclinación igual a la latitud del lugar donde se encuentra el reactor. Se seleccionó un ángulo óptimo para los tubos de vidrio con el fin de maximizar la exposición a la radiación solar y lograr un mayor contacto con el fluido que circula a través del reactor. Esto resultó ser un ángulo de inclinación de 30°, -60°. Se tomó como dirección norte ya que el Anexo Chucarapi se encuentra en el hemisferio sur.

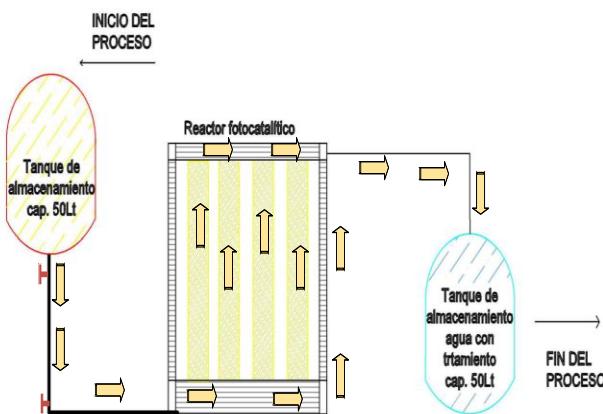


Fig. 7 Partes del reactor fotocatalítico

Los materiales de superficie reflectante y de los tubos: Pueden variar según la aplicación y el ambiente del reactor. Se usó aluminio que es un material resistente a la corrosión, a la radiación solar y de fácil acceso. El método de fijación del catalizador: Varía según el tipo de catalizador y el sustrato utilizado, la bibliografía revisada recomienda utilizar métodos que permitan una buena adhesión del catalizador al sustrato. Se utilizó madera como soporte del catalizador, y se pintó con pintura epoxi para evitar la absorción de humedad y fijar el catalizador evitando la fuga de líquido en el mismo, luego se pulverizó Dióxido de Titanio en toda la superficie de las

varillas de madera, buscando uniformidad en la superficie en contacto con el fluido de tratamiento, y por último se dejó reposar la madera durante 48 horas para completar la segmentación.

4) *Diseño del sistema fotocatalítico en AutoCAD*: Se crearon los planos y dibujos técnicos necesarios para representar el sistema en detalle. Estos incluyeron la disposición de los componentes, las dimensiones y las especificaciones técnicas relevantes. El software AutoCAD permitió realizar un diseño preciso y detallado del sistema fotocatalítico, facilitando su comprensión y visualización (Ver Fig. 7) y (Fig. 8 Nota. a) Vista lateral derecho b) Vista lateral izquierdo c) Vista frontal d) Vista isométrica.)

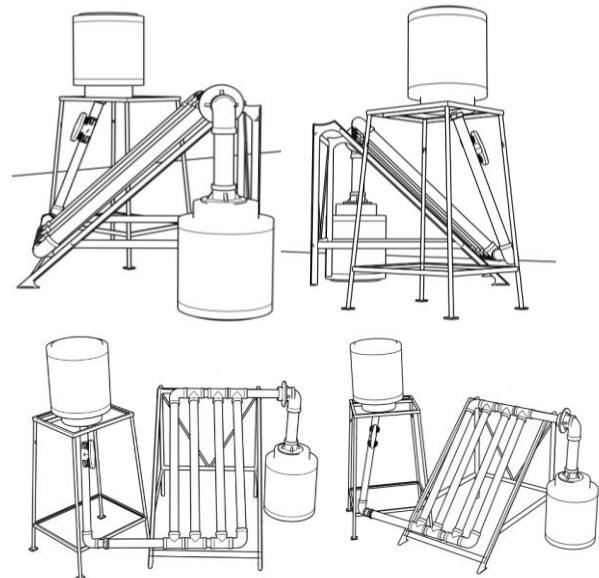


Fig. 8 Diseño 3D del reactor fotocatalítico



Fig. 9 Sistema en proceso de desinfección de F.H.

5) *Armado del sistema de fotocatálisis heterogénea*: Para este armado se tuvo en cuenta los componentes específicos del sistema, la aplicación y las condiciones de operación. Se consideraron todos los aspectos del diseño para

asegurar un funcionamiento eficiente y seguro del sistema. Se consideró el uso también de un soporte para el envase de almacenamiento del agua sin tratamiento. En la Fig. 9 se muestra el sistema y proceso de desinfección de F.H.

Se puede revisar el diagrama de bloques detallado del proceso de desinfección de F.H que se realizó en la Fig. 10.

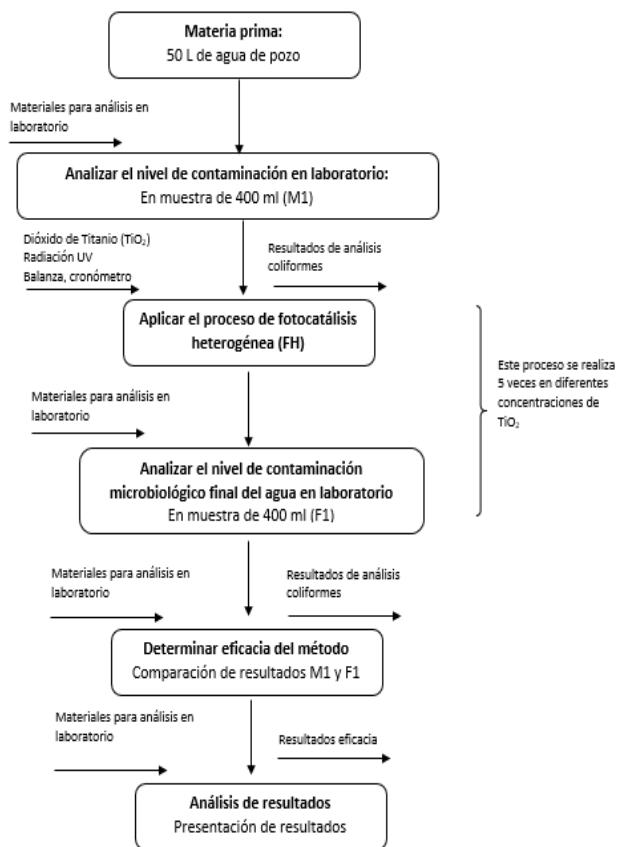


Fig. 10 Diagrama de Bloques detallado del proceso de tratamiento con fotocatálisis heterogénea.

En la Tabla III, se detallan las especificaciones técnicas para establecer claramente sus características y propiedades.

TABLA III

ESPECIFICACIONES TÉCNICAS DEL SISTEMA FOTOCATALÍTICO.

| Especificación técnica | Tipo |
|--|----------------|
| Configuración básica | Tipo CPC y CPI |
| Material de superficie | Aluminio |
| Angulo de inclinación del reactor fotocatalítico | 38° |
| Tipo de tubería | PVC Tipo IPS |
| Volumen total | 7.18 L |
| Dimensiones del reactor fotocatalítico | 95cmx60cm |

C. Procesamiento de muestras

Se midió el nivel de Contaminación Microbiológica (C.M) inicial y final de una muestra extraída de del pozo por medio del método de los tubos múltiples o colorimetría, para compararlos con los parámetros de calidad propuestos por el D.S. N°031-2010-SA, en un laboratorio acreditado de acuerdo con NTP ISO/IEC 17025: 2017 – INACAL. Se analizaron los niveles finales de C.M. de 5 muestras, las cuales fueron recolectadas en diferentes tiempos del proceso.

D. Medición de la eficacia del método

Con el fin de determinar la eficacia del método aplicado, se utilizó la siguiente fórmula:

$$\text{Eficacia} = \frac{C.\text{microbiologico final} - C.\text{microbiologico inicial}}{C.\text{microbiologico inicial}} * 100 \quad (1)$$

E. Análisis de datos

Teniendo en cuenta los informes de ensayo iniciales y finales de los niveles de C.M. del agua brindado por el laboratorio y la eficacia del método se describió toda la información recopilada en la interpretación de los resultados.

III. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

A. Calidad del Agua antes del tratamiento con Fotocatálisis heterogénea (F.H)

Los resultados del análisis microbiológico de las muestras de agua pretest son importantes para analizar la condición del agua de pozo en el sector La Horca del Anexo de Chucarapi - Cocachacra - Islay. Los resultados fueron comparados con el DS 031-2010 SA DIGESA, el cual menciona que el valor máximo en caso de analizar por la técnica del NMP por tubos múltiples es igual a ≤ 1.8 ml. En la Tabla IV, se muestran los resultados de la Concentración inicial de los contaminantes microbiológicos, de acuerdo con el Informe de ensayo LAS01-AG-AC-23-00072 [18]

TABLA IV
RESULTADOS DEL ANÁLISIS MICROBIOLÓGICO DEL LABORATORIO
COMPARADOS CON EL DS 031-2010 SA DIGESA.

| | | DS 031-2010 SA DIGESA. | | |
|--------------------------|------------|------------------------|----------------|-------------|
| Características | Unidad | Valor de prueba | Valor máximo | Condición |
| Coliformes fecales (C.F) | NMP/100 ml | 22 | 0 u ≤ 1.8 | Inaceptable |
| Coliformes Totales (C.T) | NMP/100 ml | 49×10^2 | 0 u ≤ 1.8 | Inaceptable |

B. Calidad del Agua después del tratamiento con Fotocatálisis heterogénea (F.H)

Los resultados del análisis microbiológico postest son importantes para analizar la condición del agua de pozo en el sector La Horca del Anexo de Chucarapi - Cocachacra – Islay y se presenta en la Tabla V.

TABLA V
RESULTADOS MICROBIOLÓGICOS OBTENIDOS DESPUÉS DE LA F.H

| Muestra Post test | | | | | |
|-------------------|---------------|------------|--------------|------|----------------------|
| Unidad De Muestra | Cantidad (ml) | Temp. (°C) | Tiempo (min) | C.F. | C.T x10 ² |
| Muestra 2 | 400 | 21 | 30 | 13 | 39 |
| Muestra 3 | 400 | 22 | 45 | 13 | 33 |
| Muestra 4 | 400 | 22 | 60 | 12 | 33 |
| Muestra 5 | 400 | 23 | 90 | 3 | 18 |
| Muestra 6 | 400 | 23 | 120 | 1.7 | 3.3 |

En la Fig. 11, se presenta los resultados de Coliformes totales comparando con la normativa nacional. En la muestra 2, se encontraron 39×10^2 NMP/100 ml de C.T. en el agua analizada. Esta concentración supera el límite máximo permitido de 1.8 NMP/100 ml establecido por la normativa. Estos resultados indican una alta presencia de C.T. en el agua, lo que sugiere una C.M. significativa. Es importante destacar que esta muestra se analizó a una temperatura de 21 °C durante 30 minutos. En la muestra 3, se registraron 33×10^2 NMP/100 ml de C.T., superando el límite máximo permitido. Estos resultados confirman la presencia de una cantidad significativa de C.T. en el agua, lo que indica una C.M. preocupante. Esta muestra se analizó a una temperatura ligeramente más alta, 22 °C, durante 45 minutos. En la muestra 4, se encontraron 33×10^2 NMP/100 ml de C.T., superando el límite establecido. Esto evidencia una presencia sustancial de C.T. en el agua y confirma una C.M. significativa en el suministro. En este caso, la muestra se recolecto a los 60 minutos, a una temperatura de 23 °C.

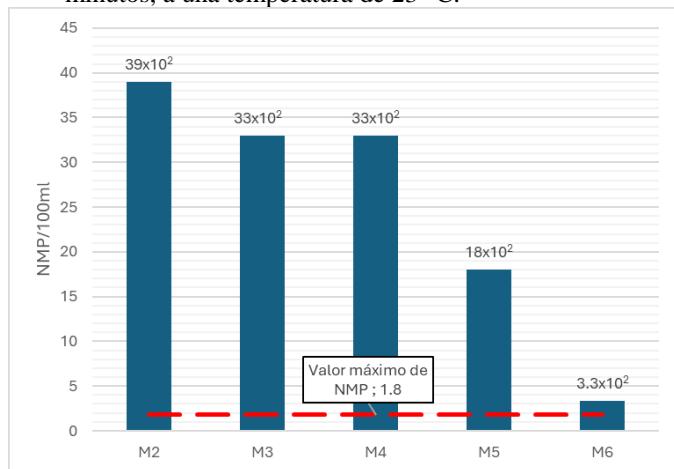


Fig. 11 Resultados de NMP/100ml de Coliformes Totales después de la fotocatálisis

En la muestra 5, se detectaron 18×10^2 NMP/100 ml de C.T. en el agua analizada. Cabe destacar que esta muestra se analizó a una temperatura de 23 °C durante 90 minutos. En la muestra 6, se encontraron 3.3×10^2

NMP/100 ml de C.T. Aunque La concentración es menor que en las muestras anteriores, aún supera el límite permitido. Esto indica una presencia de C.T. en el agua, lo cual plantea preocupaciones sobre su calidad y seguridad para el consumo humano. A pesar de aplicar la F.H. durante 120 minutos a una temperatura de 23 °C, no se alcanzó una completa remoción de los C.T. en esta muestra específica. Los resultados de las muestras 2, 3, 4 y 5 muestran concentraciones de C.T. que superan el límite máximo permitido de 1.8 NMP/100 ml. Se indicó una alta presencia de C.T. en el agua, lo que denota una C.M. significativa. A pesar de aplicar la F.H. durante diferentes tiempos y temperaturas, no se logró una reducción satisfactoria de los C.T. en estas muestras.

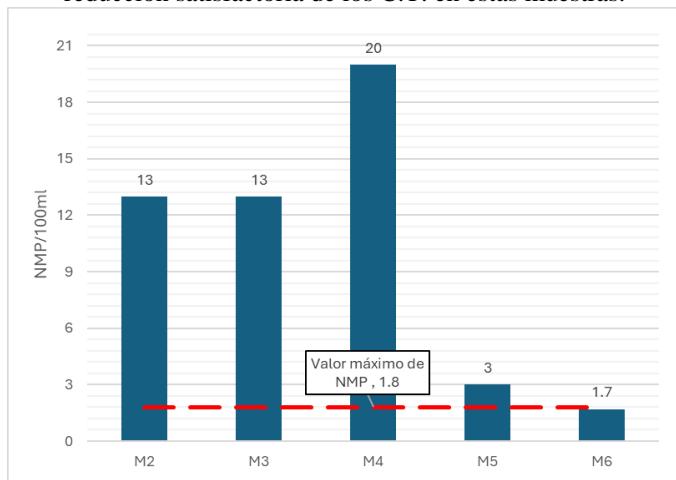


Fig. 12 Resultados de NMP/100ml de Coliformes Fecales después de la fotocatálisis

En la Fig. 12, se presenta los resultados de Coliformes fecales comparando con la normativa nacional. En la muestra 2, se encontraron 13 NMP/100 ml de C.F. en el agua analizada. Aunque esta concentración está por encima del límite máximo permitido de 1.8 NMP/100 ml, su presencia denota la existencia de C.F. y plantea preocupaciones sobre la calidad microbiológica del agua para el consumo humano. Esta muestra se analizó a una temperatura de 21 °C durante 30 minutos. En la muestra 3, se detectaron 13 NMP/100 ml de C.F. Al igual que en la muestra anterior, esta concentración se halla por encima del límite máximo permitido. Esta muestra se analizó a una temperatura de 22 °C durante 45 minutos. En la muestra 4, se registraron 20 NMP/100 ml de C.F. Esta muestra se analizó a una duración de 60 min a una temperatura de 23°C. En la muestra 5, se encontraron 3 NMP/100 ml de C.F. en el agua analizada. Aunque La concentración es relativamente baja, aún está por encima del límite permitido. Esta muestra se analizó a una temperatura de 23 °C durante 90 minutos. En la muestra 6, se detectó una concentración de 1.7 NMP/100 ml de C.F. en el agua analizada. Esta concentración está por debajo del límite máximo

permitido de 1.8 NMP/100 ml establecido por la normativa. Esto indica que el proceso de F.H. aplicado durante 120 minutos a una temperatura de 23 °C ha sido exitoso en la eliminación de los C.F. en esta muestra. De acuerdo con los resultados mostrados se puede notar que el empleo de la F.H. ha logrado reducir La concentración de C.F. en las muestras analizadas. Sin embargo, se requiere un mayor tiempo de tratamiento y posiblemente ajustes en las condiciones para asegurar la remoción completa de los C.M. y cumplir con los estándares de condición del agua para el consumo humano. La aplicación de la F.H. como método de tratamiento muestra resultados variables en la remoción de los C.F. y C.T. en diferentes condiciones de tiempo y temperatura. Esto sugiere que la eficacia de la F.H. puede verse afectada por factores ambientales y operativos, y puede requerir ajustes para lograr una remoción más efectiva de los C.M.

C. Eficacia de nivel de remoción de contaminantes microbiológicos

Se determinó el nivel de eficacia de la remoción de los C.M., evaluando la medición inicial con cada una de las muestras utilizando la fórmula de medición de eficacia. El resumen de los resultados se exhibe en la Tabla VI.

TABLA VI
RESULTADOS MICROBIOLÓGICOS OBTENIDOS DESPUÉS DE LA F.H

| Nº | Temp. (°C) | Tiempo (min) | Muestra | | Muestra | | Eficacia (%) | |
|----|---------------|-----------------|---------|----------------------|----------|-----------|-----------------|----|
| | | | C.F | C.T $\times 10^2$ | Pre test | Post test | | |
| M2 | 21 | 30 | 22 | 49 | 13 | 39 | 41 | 20 |
| M3 | 22 | 45 | | | 13 | 33 | 41 | 33 |
| M4 | 22 | 60 | | | 12 | 33 | 9 | 33 |
| M5 | 23 | 90 | | | 3 | 18 | 86 | 63 |
| M6 | 23 | 120 | | | 1.7 | 3.3 | 92 | 93 |

Se puede observar que el proceso fotocatalítico fue más efectivo con duraciones de tratamiento más largas y temperaturas más altas. La mayor eficacia se alcanzó con la Muestra 6, donde los recuentos de coliformes se redujeron significativamente a niveles más cercanos a los límites permitidos establecidos por las regulaciones existentes, esto demostró que a medida que se aumenta la duración del tratamiento y la temperatura, la eficacia de la remoción de coliformes mejoras gradualmente. Sin embargo, incluso con los mejores resultados obtenidos en la Muestra 6, no se lograron alcanzar los límites permitidos para los coliformes totales establecidos por las regulaciones. Por lo tanto, es

possible que se requieran otros tratamientos adicionales en el para cumplir plenamente con los estándares establecidos.

D. Discusión de resultados

Esta investigación obtuvo una eficacia de remoción de C.T. del 93.27% y C.F. del 92.27% en 120 minutos, con investigaciones previas que utilizaron la F.H. como método de tratamiento, se encontraron similitudes que respaldan la efectividad de esta técnica. Por ejemplo, el estudio realizado por Soto [19], en el Agua de Pozo del AA. HH Márquez Ubicado en la Provincia Callao donde la fotocatálisis logró una eficacia de erradicación de los C.T. del 72.6% en 60 minutos y del 93.2% en 120 minutos. Estos resultados demuestran la capacidad de la F.H. para reducir significativamente la C.M. en el agua de pozo.

Se observó que La concentración inicial de C.T. en el agua de pozo del sector la Horca fue de 49×10^2 NMP/100 ml, mientras que La concentración de C.F. fue de 22 NMP/100 ml. Estas concentraciones superan los límites establecidos por el D.S. N°031-2010-SA, que establece un límite máximo de 1.8 NMP /100 mL para ambos contaminantes que coinciden con indagaciones previas realizadas por Álvarez [20] en Juliaca, quien encontró 11 UFC/100 ml de C.T., y Soto [19] en Callao, quien encontró 146 UFC/100 ml de C.F. en fuentes de agua; Vidal [21] encontró niveles de 49×10^2 g/L de C.T. y 17×10^2 g/L de C.F. en fuentes de agua subterránea cerca de una empresa agroindustrial en Lima. de implementar medidas de tratamiento adicionales para mejorar la calidad del agua en áreas como La Horca, que concuerdan con los antecedentes señalados por Cabañas [22] que obtuvo un contenido inicial de 620 UFC/ml de C.T. y 580 UFC/ml de C.F., C.M. en fuentes de abastecimiento de agua de pozo. Estas investigaciones respaldan la viabilidad de implementar medidas de tratamiento en nuestro contexto y mejorar la condición del agua.

Se implementó el proceso de F.H. a los contaminantes microbiológicos presentes en el agua de pozo del sector la Horca, para lo cual se realizó un análisis comparativo de los diferentes materiales disponibles y se eligieron aquellos que presentaban un buen rendimiento a un costo razonable. Este enfoque se ha utilizado en investigaciones anteriores, como el estudio de Álvarez [20], que evalúo diferentes materiales para el sistema de fotocatálisis y encontró que ciertos materiales como el Aluminio, utilizado como reflectante; Pírex, utilizado el vidrio, que utilizó para su sistema presentaba una alta eficiencia y bajo costo, lo cual los hacía ideales para su implementación en procesos de tratamiento de agua en zonas rurales. En el caso del diseño del proceso de F.H. se realizó utilizando software de modelado como AutoCAD y SketchUp. Estas herramientas permitieron crear modelos precisos y detallados que ayudaron en la planificación y visualización del sistema de tratamiento. Este enfoque ha sido utilizado en investigaciones previas, como el estudio de Álvarez [20], donde empleó AutoCAD para diseñar su sistema de fotocatálisis heterogénea.

IV. CONCLUSIONES

La investigación sobre la fotocatálisis heterogénea aplicada a la eliminación de contaminantes microbiológicos en aguas subterráneas en el sector La Horca, Chucarapi, Cocachacra – Islay – Arequipa, permite afirmar que esta tecnología representa una alternativa robusta y eficiente para el tratamiento de agua de pozo en contextos rurales y vulnerables. Los resultados obtenidos evidenciaron una reducción significativa en los niveles de coliformes totales y fecales mediante el empleo de dióxido de titanio (TiO_2) como fotocatalizador bajo radiación UV, logrando remociónes que, en el mejor de los casos, superan el 90% en tiempos de tratamiento de hasta 120 minutos. Este desempeño corrobora la potencialidad de la fotocatálisis heterogénea reportada por investigaciones recientes en el ámbito internacional, consolidando sus ventajas en términos de eficiencia, sostenibilidad y bajo impacto ambiental. No obstante, la investigación identificó que, si bien se alcanzaron valores cercanos a los límites normativos para coliformes fecales, en ocasiones los coliformes totales excedieron los parámetros regulatorios, lo cual señala la necesidad de optimizar variables operacionales y considerar la integración de procesos complementarios para alcanzar la completa potabilización. Esta limitación resalta la complejidad inherente al tratamiento de aguas subterráneas contaminadas y la importancia de adaptar las tecnologías a condiciones locales específicas. En síntesis, la fotocatálisis heterogénea se perfila como una solución promisoria y adaptable en la gestión de calidad microbiológica de aguas subterráneas en regiones rurales. Se recomienda profundizar el estudio de su escalabilidad, evaluar su sostenibilidad económica y operacional a largo plazo, y explorar sinergias con otros métodos de desinfección. Esta contribución refuerza la relevancia de innovar en el campo del tratamiento de agua potable y la protección de la salud pública en contextos de acceso limitado a tecnologías convencionales.

AGRADECIMIENTO

Se agradece la colaboración y participación de la Municipalidad Distrital de Chucarapi, que contribuyeron con el desarrollo de la investigación.

REFERENCIAS

- [1] UNICEF, “1 de cada 3 personas en el mundo no tiene acceso a agua potable,” *Comunicado de Prensa*, 2020..
- [2] J. Pacheco Paco, Determinacion del Enteroparasitismo y su relacion con el estado nutricional en niños de 1 a 12 años que acuden al laboratorio de analisis clinicos facultad de medicina UNSA-AREQUIPA. Setiembre 2015-Enero 2016. 2016.
- [3] J. A. Larrea-Murrell, M. M. Rojas-Badia, B. Romeu-Álvarez, N. mercedes Rojas-Hernandez, and M. Heydrich-pérez, “Bacterias indicadoras de contaminación fecal en la evaluación de calidad de las aguas,” *Ciencias Biológicas*, vol. 44, no. Contaminación fecal, pp. 24–34, 2015, [Online]. Available: <https://bit.ly/3adVgIc>.
- [4] J. M. Piguave-Reyes et al., “Calidad microbiológica del agua subterránea como riesgo epidemiológico en la producción de enfermedad diarreica infantil. Revisión Sistemática,” *Kasmera*, vol. 47, no. 2, pp. 153–173, 2019.
- [5] M. Martín, “Calidad microbiológica y usos del agua subterránea,” *Revista Mexicana de Ingeniería Química*, vol. 18, no. 1, pp. 134–145, 2019.
- [6] World Health Organization, “Drinking-water,” 2023. [Online]. Available: <https://www.who.int/es/news-room/fact-sheets/detail/drinking-water>
- [7] L. F. Campos, “Ftool: Un programa interactivo y educativo sobre el análisis estructural,” Universidad de Lima, 2021.
- [8] M. A. Moure, F. I. Rojas, and D. M. González, “Advanced Heterogeneous Photocatalytic Disinfection of Groundwater Contaminated with Microorganisms,” *Journal of Environmental Chemical Engineering*, vol. 8, no. 3, pp. 103620, 2020.
- [9] A. D. Zyada, W. A. El-Ghazaly, and M. A. El-Sherbiny, “Photocatalytic Inactivation of Microbial Contaminants in Water by TiO_2 : Mechanisms and Efficacy,” *Environmental Nanotechnology, Monitoring & Management*, vol. 15, pp. 100463, 2021.
- [10] Anesvad, “Contaminación de las aguas subterráneas: impacto y soluciones”, Fundación Anesvad, 20.206.2024. [Online]. Available: <https://www.anesvad.org/estapasando/contaminacion-aguas-subterraneas/>
- [11] A. J. Fernández, M. R. Vega, and S. T. Gómez, “Application of TiO_2 Photocatalysis for Removal of Coliforms in Drinking Water Treatment,” *Water Science and Technology*, vol. 78, no. 5, pp. 1089–1098, 2018.
- [12] G. Poma Luque and M. Seminario Rosado, “Zonas Críticas por Peligros Geológicos Región Arequipa,” 2014. [Online]. Available: <http://sigrid.cenepred.gob.pe/sigridv3/documento/9351>.
- [13] A. Sabogal, “Distribución del agua en el Peru desde una perspectiva de cuenca,” no. 1, 2009.
- [14] J. Carpio and F. Laureano., Hidrogeología de la Cuenca del Rio Tambo, vol. 53, no. 9, 2020.
- [15] ANA, “Estudio hidrológico de la unidad Hidrográfica de Tambo,” Aut. Nac. del Agua, 2019, [Online]. Available: <http://repositorio.ana.gob.pe/handle/20.500.12543/4703>.
- [16] E. Guanabara, K. Ltda, E. Guanabara, and K. Ltda, “El clima y el tiempo promedio en todo el año en Cocachacra,” 2019. <https://es.weatherspark.com/y/25828/Clima-promedio-en-Cocachacra-Perú-durante-todo-el-año/#Figures-Temperature>.
- [17] J. Blanco, S. Malato, J. Peral, B. Sánchez, and A. I. Cardona, “Diseño de reactores para fotocatálisis: evaluación comparativa de las distintas opciones,” in *Eliminacion de Contaminantes por Fotocatálisis Heterogénea*, no. February 2015, Posibilidades para la Provisión de Agua Segura Usando Nuevas Tecnologías / Plataforma Solar de Almería, Ed. 2001, p. 24.
- [18] L. Alfredo, C. Machaca, L. Alfredo, and C. Machaca, “Por la dirección de acreditación del inacal con registro n ° le-050 informe de ensayo las 01-ag-ac-23-00072 por la dirección de acreditación del inacal con registro N ° LE-050 INFORME DE ENSAYO LAS01-AG-AC-23-00072,” no. 054, 2023
- [19] L. M. Soto López, Eficiencia de la Fotocatálisis con Plata (Ag) para la Inactivación de Coliformes Totales Presente en Agua de Pozo del AA.HH Márquez Ubicado en la Provincia Callao-2018. {Tesis de pregrado , Universidad César Vallejo}, 2018
- [20] D. Alvarez, Desinfección foto catalítica con TiO_2 para aguas de consumo humano en reactor de flujo continuo. [Tesis de Pregrado ;Universidad Peruana Union], 2019.
- [21] D. Vidal, “Fotocatálisis del dióxido de titanio en la reducción de parámetros físicos, químicos y microbiológicos en aguas residuales de una empresa agroindustrial, Lima 2020,” 2021.
- [22] D. Cabañas, V. Mota, and E. Ruiz, “Luz solar y TiO_2 para eliminar patógenos contenidos en agua de pozo: comportamiento de la fotocatálisis,” *Rev. Académica la Fac. Ing.*, vol. 23, no. 1, 2019, [Online]. Available: <https://www.revista.ingenieria.uday.mx/ojs/index.php/ingenieria/article/view/133>.