

UNIVERSIDAD NACIONAL JORGE BASADRE GROHMANN

Escuela de Posgrado

DOCTORADO EN CIENCIAS AMBIENTALES

**APLICACIÓN DE CARBÓN ACTIVADO Y OXIDACIÓN AVANZADA
USANDO EL REACTIVO FENTON ($\text{Fe}^{2+}/\text{H}_2\text{O}_2$), PARA EL
TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES
DEL PROCESO ALCALINO PARA
ACEITUNAS VERDES EN EL
DISTRITO DE LA YARADA
LOS PALOS, REGIÓN
TACNA, 2022**

TESIS

PRESENTADA POR:

M.Sc. JUNIOR SOVIET MIRANDA GUTIERREZ

Para optar el Grado Académico de:

DOCTOR EN CIENCIAS AMBIENTALES

TACNA-PERÚ

2024

UNIVERSIDAD NACIONAL JORGE BASADRE GROHMANN**Escuela de Posgrado**

DOCTORADO EN CIENCIAS AMBIENTALES

**APLICACIÓN DE CARBON ACTIVADO Y OXIDACIÓN AVANZADA
USANDO EL REACTIVO FENTON ($\text{Fe}^{2+}/\text{H}_2\text{O}_2$) PARA EL
TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES DEL
PROCESO ALCALINO PARA ACEITUNAS
VERDES EN EL DISTRITO DE LA
YARADA LOS PALOS, REGIÓN
TACNA, 2022**

Tesis sustentada y aprobada el 26 de setiembre del 2024; estando el jurado calificador integrado por:

PRESIDENTE

:

.....
Dr. Eleocadio Dionisio Tirado Paz

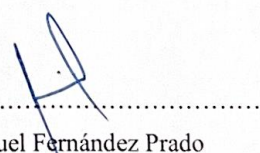
SECRETARIO

:

.....
Dr. Daladier Miguel Castillo Cotrina

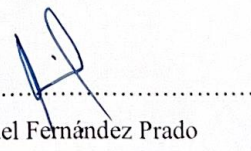
MIEMBRO

:

.....
Dr. Julio Miguel Fernández Prado

ASESOR

:

.....
Dr. Julio Miguel Fernández Prado

CERTIFICADO DE SIMILITUD

Yo, Dr. Julio Miguel Fernández Prado, en mi condición de asesor acreditado con RESOLUCION ESCUELA DE POSGRADO No 12075-2022-ESPG/UNJBG del 16 de diciembre del 2022, de tesis titulado: "APLICACIÓN DE CARBÓN ACTIVADO Y OXIDACIÓN AVANZADA USANDO EL REACTIVO FENTON ($\text{Fe}^{2+}/\text{H}_2\text{O}_2$), PARA EL TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES DEL PROCESO ALCALINO PARA ACEITUNAS VERDES EN EL DISTRITO DE LA YARADA LOS PALOS, REGIÓN, TACNA, 2022" , presentado por el Sr. Junior Soviet Miranda Gutierrez, para optar el Grado Académico de Doctor en Ciencias de Ambientales.

Habiendo cumplido con lo establecido en el reglamento de originalidad y de similitud de trabajo de investigación y producción intelectual, considerando que según la revisión, evaluación y análisis realizado a través del software de similitud textual TURNITIN, cuenta con el nivel de similitud permitido cuyo porcentaje es 9%.

Por lo que CERTIFICO LA SIMILARIDAD de la tesis y está de acuerdo al nivel PERMITIDO, para continuar con los trámites correspondientes y para su publicación en el repositorio institucional.

Se emite el presente certificado a solicitud del interesado con fines de continuar con los trámites respectivos para la obtención del Grado Académico de Doctor en Ciencias de Ambientales.

Tacna, 11 junio 2024

FIRMA ASESOR
Nombres y apellidos


.....
Dr. Julio Miguel Fernández Prado
DNI N° 29400045



FIRMA TESISISTA
Nombres y apellidos


.....
Sr. Junior Soviet Miranda Gutierrez
DNI N° 41175246



DEDICATORIA

A Dios, por su sabiduría para estudiar cada día. A Zadith, por su amor y apoyo incondicional, a Fabrizio y Cayetana, mis hijos y mi motivación; a mis padres Wilfredo y Bertha, que me educaron con principios y valores, a seguir por mis sueños, y jamás me rinda; a mis hermanos, mis suegros y a todas las personas que siempre estuvieron a mi lado, apoyándome y aconsejando. A mis profesores e investigadores que me ayudaron ver desde otra perspectiva este estudio de investigación.

ÍNDICE GENERAL

RESUMEN	xiii
ABSTRACT.....	xiv
RESUMO.....	xv
INTRODUCCIÓN	1
CAPÍTULO I: PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	3
1.1 Descripción del problema	3
1.2 Formulación del problema.....	4
1.2.1 Pproblema general	4
1.2.2 Problema específico.....	4
1.3 Justificación e importancia	5
1.3.1 Justificación	5
1.3.2 Importancia.....	5
1.4.1 Alcances.....	6
1.4.2 Limitaciones	6
1.6.2 Hipótesis secundarias	7
CAPÍTULO II: MARCO TEÓRICO	8
2.1 Antecedentes de la investigación.....	8
2.1.1 Antecedentes de la investigación a nivel internacional	8
2.1.2 Antecedentes a nivel nacional	12
2.2 Bases teóricas	13
2.2.1 Materia prima y proceso alcalino	13
2.2.2 Contaminación ambiental	19
2.2.2. Idefinición.....	19
2.2.3 Producción de aceituna nacional	22
2.2.4. Aguas residuales	23
2.2.4.1 Parámetros de calidad	23
2.2.4.2 Características físicas, y químicas del agua residual	36
2.2.5 Tratamiento de oxidación	40
2.2.5.1 Oxidación química.....	40

2.2.5.1	Procesos oxidación avanzada (aop)	44
2.2.5.2	Aplicaciones de los métodos de oxidación directa	62
CAPÍTULO III: MARCO METODOLÓGICO		69
3.1	Tipo y diseño de investigación	69
3.1.1	Tipo de investigación	69
3.1.2	Diseño de investigación	69
3.2	Población y muestra de estudio	70
3.2.1	Población	70
3.2.2	Muestra	70
3.3	Operacionalización de variables	70
3.3.1	Identificación de las variables	70
3.3.2	caracterización de las variables	71
3.4	Técnicas e instrumentos para la recolección de datos	73
3.4.1	Técnicas de recolección de datos	73
3.4.2	Instrumentos de recolección de datos	73
3.4.3	Descripción de trabajo en el campo y laboratorio	73
3.5	Procesamiento y análisis de datos	83
CAPÍTULO IV: MARCO FILOSÓFICO		86
CAPÍTULO IV: RESULTADOS		87
5.1	Análisis de variables	87
5.1.1	Análisis por objetivos	87
DISCUSIÓN		118
CONCLUSIONES		125
RECOMENDACIONES		128
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS		130
ANEXO		136

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 Composición de la Aceituna	13
Tabla 2 Composición Nutricional de la Aceituna.....	13
Tabla 3 Composición Química de la Pulpa de Aceituna	14
Tabla 4 Características Fisicoquímicas de la Aceituna Sevillana.....	15
Tabla 5 Composición Química de la Aceituna Sevillana	15
Tabla 6 Valores de Eliminación de Lejía por Lavados.....	18
Tabla 7 Cantidad de Aguas Residuales Producida por kg de Frutos, Según los Diferentes Tipos de Elaboración	20
Tabla 8 Algunas Características de las Aguas Residuales del Proceso Tradicional de Aceitunas Verdes Estilo Sevillana.....	21
Tabla 9 Producción de Aceituna a Nivel Nacional y por Regiones.....	22
Tabla 10 Producción de Aceituna en Tacna	23
Tabla 11 Variación del pH con las Concentraciones de H ⁺ y OH ⁻	34
Tabla 12 Características Físicas y Químicas del Agua Residual	37
Tabla 13 Contaminantes de Importancia en el Tratamiento del Agua Residual	38
Tabla 14 Unidades Empleadas para los Resultados de los Análisis	40
Tabla 15 Condiciones y Limitaciones de los Procesos de Oxidación Directa.....	44
Tabla 16 Procesos Avanzados de Oxidación.....	45
Tabla 17 Ventajas y Desventajas de los Procesos Avanzados de Oxidación.	60

Tabla 18 Procesos Comerciales de Oxidación Directa.....	65
Tabla 19 Algunos Procesos Comerciales de Oxidación Avanzada.....	66
Tabla 20 Algunas de las Líneas más Importantes que Marcan las Investigaciones	67
Tabla 21 Concentraciones para los Distintos Tratamiento	69
Tabla 22 Determinación de la Población: Registro Agua Residual.....	70
Tabla 23 Indicadores de la Mejora de la Biodegradabilidad en Aguas Residuales	74
Tabla 24 VMA para Descargas Industriales al Alcantarillado	84
Tabla 25 Comparación de los LMP para Efluentes de PTAR Y ECA-Agua	84
Tabla 26 Valores de DBO ₅ Aplicando el Carbón Activado que Intervienen a las Aguas Residuales del Proceso Alcalino para Aceitunas Verdes	87
Tabla 27 Valores De DBO ₅ Aplicando el Carbón Activado en Zona 01 en las Aguas Residuales del Proceso Alcalino para Aceitunas Verdes	89
Tabla 28 Valores de DBO ₅ Aplicando el Carbón Activado en Zona 02 en las Aguas Residuales del Proceso Alcalino para Aceitunas Verdes	91
Tabla 29 Valores de DBO ₅ Aplicando el Carbón Activado en la Zona 03 a las Aguas Residuales Proveniente del Proceso Alcalino de Aceitunas	94
Tabla 30 Valores de DQO Aplicando el Carbón Activado que Intervienen en las Aguas Residuales del Proceso Alcalino para Aceitunas Verdes	96
Tabla 31 Valores de DQO Aplicando el Carbón Activado en la Zona 01 en las Aguas Residuales del Proceso Alcalino para Aceitunas Verdes	97
Tabla 32 Valores de DQO Aplicando el Carbón Activado en la Zona 02 en las Aguas Residuales del Proceso Alcalino para Aceitunas Verdes	98

Tabla 33 Valores de DQO Aplicando el Carbón Activado en la Zona 03 en las Aguas Residuales del Proceso Alcalino para Aceitunas Verdes	99
Tabla 34 Valores de DBO ₅ Aplicando el Reactivo de Fenton que Intervienen a las Aguas Residuales Proveniente del Proceso de Alcalino de Aceitunas Verdes	101
Tabla 35 Valores de DBO ₅ Aplicando el Reactivo de Fenton en la Zona 01 en las Aguas Residuales Proveniente del Proceso de Alcalino de Aceitunas Verdes	102
Tabla 36 Valores de DBO ₅ Aplicando el Reactivo de Fenton en la Zona 02 en las Aguas Residuales Proveniente del Proceso de Alcalino de Aceitunas Verdes	104
Tabla 37 Valores de DBO ₅ Aplicando el Reactivo de Fenton en la Zona 03 en las Aguas Residuales Proveniente del Proceso de Alcalino de Aceitunas Verdes	107
Tabla 38 Valores de DQO Aplicando el Reactivo de Fenton que Intervienen en las Aguas Residuales Proveniente del Proceso Alcalino para las Aceitunas Verde.	109
Tabla 39 Valores de DQO Aplicando el Reactivo de Fenton en la Zona 01 en las Aguas Residuales Proveniente del Proceso Alcalino para las Aceitunas Verde.	110
Tabla 40 Valores de DQO Aplicando el Reactivo de Fenton en la Zona 02 en las Aguas Residuales Proveniente del Proceso Alcalino para las Aceitunas Verde.	111
Tabla 41 Valores de DQO Aplicando el Reactivo de Fenton en la Zona 03 en las Aguas Residuales Proveniente del Proceso Alcalino para las Aceitunas Verde.	112
Tabla 42 Factor: DBO ₅ entre la Aplicación del Carbón Activado y la Oxidación Avanzada Usando el Reactivo de FENTON en las Aguas Residuales del Proceso Alcalino para Aceitunas Verdes.....	114
Tabla 43 Factor: DQO entre la Aplicación del Carbón Activado y la Oxidación Avanzada Usando el Reactivo de FENTON en las Aguas Residuales del Proceso Alcalino para Aceitunas Verdes.....	116

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 Diagrama de Bloques del Proceso Alcalino de la Aceituna Verde Estilo Sevillano	17
Figura 2 Balance de Masa del Proceso Alcalino de las Aceitunas Verdes Estilo Sevillana	19
Figura 3 Esquema de Defici3n de las Demandas Bioqu3mica de Ox3geno Carbonosa y Nitrogenada Ejercida por una Muestra de Agua Residual	29
Figura 4 Clasificaci3n de los S3lidos en las Aguas Residuales.....	32
Figura 5 Variaci3n del Nitr3geno Org3nico en Condiciones Aerobias	35
Figura 6 Proceso General Utilizado en el Tratamiento de Aguas con Ozono	47
Figura 7 Configuraci3n del Sistema UV/O ₃ de WEDECO para Agua Residual Contaminada con COV Clorados	49
Figura 8 Configuraci3n de un Sistema UV/H ₂ O ₂	56
Figura 9 Tecnolog3a ZIMPRO	63
Figura 10 Proceso LOPROX	64
Figura 11 Tipo de Aguas Residuales y Medici3n pe pH	74
Figura 12 Estabilizaci3n del pH.....	75
Figura 13 Reactivo de Fenton con pH Neutro(izquierda) y 3cido(derecha).....	75
Figura 14 Prueba de Tratamiento de Aguas en el Equipo de Test de Jarras.....	76
Figura 15 Prueba de Test de Jarras con Carb3n Activado	76

Figura 16 Prueba de Test de Jarras con el Reactivo de Fenton	77
Figura 17 Separación de Lodos (sólidos) – Bomba de Vacío.....	77
Figura 18 Separación de Lodos (sólidos) - Filtro	78
Figura 19 Diluciones en Relación 1:4 y 1:6 Volumen.....	79
Figura 20 Medición del DBO ₅	80
Figura 21 Medición del DQO	81
Figura 22 Valores de DBO ₅ Aplicando el Carbón Activado en Zona 01 en las Aguas Residuales del Proceso Alcalino para Aceitunas Verdes	91
Figura 23 Valores de DBO ₅ Aplicando el Carbón Activado en Zona 02 en las Aguas Residuales del Proceso Alcalino para Aceitunas Verdes	93
Figura 24 Valores de DBO ₅ Aplicando el Carbón Activado en Zona 03 en las Aguas Residuales del Proceso Alcalino para Aceitunas Verdes	96
Figura 25 Valores de DQO Aplicando el Carbón Activado en la Zona 01 en las Aguas Residuales del Proceso Alcalino para Aceitunas Verdes	98
Figura 26 Valores de DQO Aplicando el Carbón Activado en la Zona 02 en las Aguas Residuales del Proceso Alcalino para Aceitunas Verdes	99
Figura 27 Valores de DQO Aplicando el Carbón Activado en la Zona 03 en las Aguas Residuales del Proceso Alcalino para Aceitunas Verdes	100
Figura 28 Valores de DBO ₅ Aplicando el Reactivo de Fenton en la Zona 01 en las Aguas Residuales Proveniente del Proceso de Alcalino de Aceitunas Verdes	104
Figura 29 Valores de DBO ₅ Aplicando el Reactivo de Fenton en la Zona 02 en las Aguas Residuales Proveniente del Proceso de Alcalino de Aceitunas Verdes	106

- Figura 30 Valores de DBO₅ Aplicando el Reactivo de Fenton en la Zona 02 en las Aguas Residuales Proveniente del Proceso de Alcalino de Aceitunas Verdes 109
- Figura 31 Valores de DQO Aplicando el Reactivo de Fenton en la Zona 01 en las Aguas Residuales Proveniente del Proceso Alcalino para las Aceitunas Verde 111
- Figura 32 Valores de DQO Aplicando el Reactivo de Fenton en la Zona 02 en las Aguas Residuales Proveniente del Proceso Alcalino para las Aceitunas Verde 112
- Figura 33 Valores de DQO Aplicando el Reactivo de Fenton en la Zona 03 en las Aguas Residuales Proveniente del Proceso Alcalino para las Aceitunas Verde 113
- Figura 34 Factor: DBO₅ entre la Aplicación del Carbón Activado y la Oxidación Avanzada Usando el Reactivo de FENTON en las Aguas Residuales del Proceso Alcalino para Aceitunas Verdes 115
- Figura 35 Factor: DQO entre la Aplicación del Carbón Activado y la Oxidación Avanzada Usando el Reactivo de FENTON en las Aguas Residuales del Proceso Alcalino para Aceitunas Verdes..... 117

RESUMEN

Esta investigación busca entender cómo se puede aplicar el carbón activado y la oxidación avanzada utilizando el reactivo Fenton ($\text{Fe}^{2+}/\text{H}_2\text{O}_2$) para tratar las aguas residuales del proceso alcalino de aceitunas verdes. El objetivo principal fue reducir la DBO_5 y la DQO en estas aguas residuales. Se emplearon distintas concentraciones de carbón activado, sulfato de hierro y peróxido de hidrógeno, en tres tipos de muestras de aguas residuales, utilizando el equipo de Test de Jarras de la marca PHIPPS & BIRD. Las pruebas analíticas se realizaron con respirometría para el ensayo de DBO_5 y fotometría para determinar la DQO, utilizando equipos de la marca LOVIBOND. Los resultados mostraron que la concentración inicial promedio de DBO_5 era de 3 984 y 3 106 $\text{mg O}_2/\text{mL}$, que se redujo a 1 068 y 541 $\text{mg O}_2/\text{mL}$ respectivamente, después de aplicar carbón activado y el reactivo de Fenton. Para la DQO, la concentración inicial promedio era de 7 553 y 10 880 $\text{mg O}_2/\text{mL}$, que disminuyó a 3 536 y 2 358 $\text{mg O}_2/\text{mL}$ con los tratamientos aplicados. Se concluyó que el reactivo de Fenton fue más efectivo que el carbón activado en la reducción de la DBO_5 y DQO dentro de un rango de pH de 2,5 a 3,5. Aunque no se lograron los resultados exigidos por la normativa, se sugiere que es posible una mayor reducción de la materia orgánica en las aguas residuales, lo que ayudaría a separar los lodos y optimizar el tratamiento de estas aguas agroindustriales, subproducto del proceso alcalino de aceitunas verdes estilo sevillano que contribuyen a la contaminación en el distrito de Yarada Los Palos.

Palabras clave: aguas residuales, reactivo de Fenton, carbón activado, potencial de hidrogeniones (pH), alcalino, , demanda química de oxígeno (DQO), demanda biológica de oxígeno (DBO_5), materia orgánica.

ABSTRACT

This research seeks to understand how activated carbon and advanced oxidation using the Fenton reagent ($\text{Fe}^{2+}/\text{H}_2\text{O}_2$) can be applied to treat wastewater from the alkaline process of green olives. The main objective was to reduce BOD_5 and COD in these wastewaters. Different concentrations of activated carbon, iron sulfate and hydrogen peroxide were used in three types of wastewater samples, using the PHIPPS & BIRD brand Jar Test equipment. The analytical tests were carried out with costometry for the BOD_5 test and photometry to determine the COD, using LOVIBOND brand equipment. The results showed that the average initial BOD_5 concentration was 3 984 and 3 106 $\text{mg O}_2/\text{mL}$, which was reduced to 1 068 and 541 $\text{mg O}_2/\text{mL}$, respectively, after applying activated carbon and Fenton's reagent. For COD, the average initial concentration was 7 553 and 10 880 $\text{mg O}_2/\text{mL}$, which decreased to 3 536 and 2 358 $\text{mg O}_2/\text{mL}$ with the applied treatments. It was concluded that Fenton's reagent was more effective than activated carbon in reducing BOD_5 and COD within a pH range of 2,5 to 3,5. Although the results required by the regulations were not achieved, it is suggested that a greater reduction of organic matter in the wastewater is possible, which would help separate the sludge and optimize the treatment of these agroindustrial waters, a byproduct of the alkaline process of olives. Sevillian style greens that contribute to pollution in the Yarada Los Palos district.

Keywords: wastewater, Fenton's reagent, activated carbon, hydrogen ion potential (pH), alkaline, chemical oxygen demand (COD), biological oxygen demand (BOD_5), organic matter

RESUMO

Esta pesquisa busca entender como o carvão ativado e a oxidação avançada utilizando o reagente de Fenton ($\text{Fe}^{2+}/\text{H}_2\text{O}_2$) podem ser aplicados no tratamento de águas residuais provenientes do processo alcalino de azeitonas verdes. O principal objetivo era reduzir a DBO_5 e a DQO nessas águas residuais. Diferentes concentrações de carvão ativado, sulfato de ferro e peróxido de hidrogênio foram utilizadas em três tipos de amostras de águas residuais, utilizando o equipamento Jar Test da marca PHIPPS & BIRD. Os testes analíticos foram realizados com costometria para teste de DBO_5 e fotometria para determinação de DQO, utilizando equipamento da marca LOVIBOND. Os resultados mostraram que a concentração inicial média de DBO_5 foi de 3 984 e 3 106 $\text{mg O}_2/\text{mL}$, que foi reduzida para 1 068 e 541 $\text{mg O}_2/\text{mL}$, respectivamente, após aplicação de carvão ativado e reagente de Fenton. Para DQO, a concentração inicial média foi de 7 553 e 10 880 $\text{mg O}_2/\text{mL}$, diminuindo para 3 536 e 2 358 $\text{mg O}_2/\text{mL}$ com os tratamentos aplicados. Concluiu-se que o reagente de Fenton foi mais eficaz que o carvão ativado na redução de DBO_5 e DQO dentro de uma faixa de pH de 2,5 a 3,5. Embora os resultados exigidos pela regulamentação não tenham sido alcançados, sugere-se que seja possível uma maior redução de matéria orgânica nas águas residuais, o que ajudaria a separar as lamas e a otimizar o tratamento destas águas agroindustriais, subproduto do processo alcalino da azeitona. Verdes de estilo sevilhano que contribuem para a poluição no bairro Yarada Los Palos.

Palavras-chave: águas residuárias, reagente de Fenton, carvão ativado, potencial iônico de hidrogênio (pH), alcalino, demanda química de oxigênio (DQO), demanda biológica de oxigênio (DBO_5), matéria orgânica.

INTRODUCCIÓN

A nivel mundial, la producción de aceituna es importante para toda la industria agroalimentaria, pero muchos agricultores la procesan de forma artesanal o tradicional, lo que provoca contaminación del agua y, si se trata como agua residual, difiere del proceso de fermentación de la aceituna. La producción oleícola se concentra principalmente en Tacna, que representa más del 60 % de la producción del país, y sus áreas de plantación se están ampliando debido al aumento de las ventas en el mercado internacional.

Por tanto, es primordial el presente estudio, cuyo objetivo es: Disminuir los valores de DBO₅ y DQO aplicando el carbón activado y la oxidación avanzada usando el reactivo de Fenton en las aguas residuales del proceso alcalino para aceitunas verdes en el distrito de la Yarada Los Palos, región Tacna, 2022. Por lo antes referido, el presente estudio considera los siguientes objetivos: Disminuir los valores de DBO₅ y DQO aplicando el carbón activado. Disminuir los valores de DBO₅ y DQO aplicando la oxidación avanzada usando el reactivo de FENTON. Establecer la diferencia de la disminución de los valores de DBO₅ y DQO entre la aplicación del carbón activado y la oxidación avanzada usando el reactivo de FENTON; por lo que el presente estudio considera lo siguiente:

El capítulo I, Planteamiento del Problema, que considera la descripción, formulación del problema, la justificación e importancia, los alcances y limitaciones, objetivos y las hipótesis.

El capítulo II, Marco Teórico, que considera los antecedentes del estudio, las bases teóricas y la definición de términos.

El Capítulo III, Marco Metodológico, que considera el tipo y diseño de investigación, la población y muestra, la operacionalización de variables, las técnicas e instrumentos para recolección de datos, procesamiento y análisis de datos.

El capítulo IV, Marco Filosófico, que resalta el paradigma de investigación, orientado al enfoque epistemológico.

El capítulo V considera los Resultados de acuerdo a las variables de estudio.

El capítulo VI puntualiza la Discusión de los Resultados, considerando los antecedentes y bases teóricas de la investigación.

Finalmente, las Conclusiones, Recomendaciones, Referencias Bibliográficas y Anexos.

CAPÍTULO I

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

1.1 Descripción del problema

Es crucial señalar que toda actividad productiva puede ser contaminante, y parece que los agricultores no están conscientes o no han reflexionado sobre lo establecido en el numeral 22 del artículo 2° de la Constitución Política del Perú, que garantiza el derecho de toda persona a un ambiente equilibrado y adecuado para su desarrollo. Además, el artículo I del Título Preliminar de la Ley N° 28611, Ley General del Ambiente, establece que cada persona tiene el derecho inalienable a vivir en un entorno saludable y equilibrado, y la responsabilidad de contribuir a la gestión eficaz del medio ambiente, la protección del medio ambiente y sus componentes, la protección de la salud humana, la protección de la diversidad biológica y el uso sostenible de los recursos naturales y el desarrollo sostenible del país. Para 2024, esta normativa sigue siendo fundamental para la aplicación de los ECA (Estándares de Calidad Ambiental) del suelo en cualquier proyecto o actividad que pueda generar riesgos de contaminación en su ubicación y áreas de influencia.

En el Perú, el Ministerio del Medio Ambiente ha emitido bastantes normas relacionadas a la contaminación del agua, suelo y aire, a través de diferentes sectores; sin embargo, hasta la actualidad no ha emitido normas que determinen normas relacionadas a la contaminación del suelo causadas por aguas residuales provenientes del proceso de aceitunas de mesa en sus diferentes variantes, que proviene de los caldos del tratamiento de la aceituna: soluciones alcalinas, agua de lavado, agua de procesos de oxidación con pH básico, salmuera de fermentación, agua de otros procesos como por ejemplo la deshuesada y rellena. Estas aguas residuales se producen en grandes cantidades y contienen gran cantidad de pequeñas cantidades de materia orgánica biodegradable y una alta proporción de sólidos en suspensión y grasas, alta DQO, DBO₅, pH ácido o alcalino. El volumen de las aguas residuales proveniente de la elaboración de aceitunas de mesa se estima en función del peso en kilogramos de la aceituna. Las aguas residuales

provenientes del tratamiento de aceitunas por el proceso alcalino se generan en volúmenes de 2 400 litros por 1 000 kilogramos de aceitunas verdes. Estas aguas tienen alta carga de DQO y DBO₅.

Existen estudios enfocados al tratamiento de aguas residuales proveniente del tratamiento de aceitunas verdes, que se generan en grandes volúmenes y contienen un alto contenido en materia orgánica poco biodegradable, así como un elevado porcentaje de sólidos en suspensión y grasas, una elevada DQO, pH ácido o alcalino; uno de los tratamientos que se conocen es el uso del reactivo de Fenton que ha permitido que estas aguas residuales puedan ser utilizadas en diferentes usos, por ejemplo para el riego agrícola. Además, todos estos residuos líquidos tienen una alta conductividad eléctrica debido a su alto contenido en sal y de polifenoles que contiene el fruto. De manera similar, el carbón activado se usa para tratar las aguas residuales utilizando distintas concentraciones para reducir la DQO y la DBO₅.

Estos graves problemas plantean preocupaciones sobre los daños ambientales causados por el impacto ambiental de la producción olivícola; Si esto continúa, toda la tierra en el área de La Yarada da Los Palos quedará degradada y no será apta para ningún cultivo.

Por lo antes referido, cabe preguntar:

1.2 Formulación del problema

1.2.1 Problema general

¿En qué medida la aplicación del carbón activado y de la oxidación avanzada usando el reactivo de Fenton disminuye los valores de DBO₅ y DQO en las aguas residuales del proceso alcalino para aceitunas verdes en el distrito de la Yarada Los Palos, región Tacna, 2022?

1.2.2 Problema específico

- a) ¿En qué medida la aplicación del carbón activado disminuye los valores de DBO₅ y DQO?

- b) ¿En qué medida la aplicación de la oxidación avanzada usando el reactivo de Fenton disminuye los valores de DBO₅ y DQO?
- c) ¿En qué medida la aplicación del carbón activado y de la oxidación avanzada usando el reactivo de Fenton se diferencian en la disminución los valores de DBO₅ y DQO?

1.3 Justificación e importancia

1.3.1 Justificación

El presente estudio permitirá comprender cómo la aplicación de carbón activado y oxidación avanzada usando el reactivo Fenton ($\text{Fe}^{2+}/\text{H}_2\text{O}_2$), para el tratamiento de aguas residuales del proceso alcalino para aceitunas verdes en el distrito de la yarada los palos, región Tacna, 2022; en la agroindustria de la aceituna de mesa, y que tiene impactos medioambientales, uno de ellos es a través de los residuos líquidos que se generan en el distrito de la Yarada Los Palos, región de Tacna. Esta actividad productiva no emite gases, pero si requiere insumos para su elaboración, que provocan destrucción del medio ambiente natural, así también ocasiona otro tipo de problemas con los recursos naturales.

1.3.2 Importancia

En este estudio se obtendrán resultados que permitirán hacer recomendaciones a las autoridades del sector agroindustrial en Tacna y a los agricultores del distrito de la Yarada Los Palos, quienes utilizan en sus parcelas agrícolas pozas con aguas residuales alcalinas provenientes del procesamiento de aceitunas verdes de mesa. Además, este trabajo contribuirá al cumplimiento del numeral 22 del artículo 2° de la Constitución Política del Perú, que establece el derecho de toda persona a un ambiente equilibrado y adecuado para su desarrollo. Asimismo, apoyará lo expresado en el artículo I del Título Preliminar de la Ley N° 28611, Ley General del Ambiente, que garantiza el derecho irrenunciable de toda persona a vivir en un entorno saludable y equilibrado, y subraya el deber de contribuir a una gestión ambiental efectiva, protegiendo el ambiente y sus componentes, y asegurando la salud individual y colectiva de las personas.

1.4 Alcances y limitaciones

1.4.1 Alcances

El presente estudio solo considera los factores asociados del DBO₅ y DQO en las aguas residuales provenientes del proceso de fermentación de aceitunas verdes estilo sevillana, así como el nivel de disminución de la concentración (DBO₅ y DQO) por la aplicación de tratamiento por oxidación avanzada de aguas residuales en el distrito de la Yarada Los Palos, región de Tacna, 2022.

1.4.2 Limitaciones

En el presente estudio se tuvo como limitaciones los insuficientes antecedentes de la investigación y obtención de equipos para la medición de la concentración del DBO₅ y DQO; también fue afectado por el cambio climático como el Niño y la Niña, sufriendo el impacto grave en la producción de aceitunas en el distrito de la Yarada Los Palos, región de Tacna.

1.5 Objetivos

1.5.1 Objetivo general

Disminuir los valores de DBO₅ y DQO aplicando el carbón activado y la oxidación avanzada usando el reactivo de Fenton en las aguas residuales del proceso alcalino para aceitunas verdes en el distrito de la Yarada Los Palos, región Tacna, 2022.

1.5.2 Objetivos específicos

- a) Disminuir los valores de DBO₅ y DQO aplicando el carbón activado.
- b) Disminuir los valores de DBO₅ y DQO aplicando la oxidación avanzada usando el reactivo de Fenton.

- c) Establecer la diferencia de la disminución de los valores de DBO₅ y DQO entre la aplicación del carbón activado y la oxidación avanzada usando el reactivo de Fenton.

1.6 Hipótesis

1.6.1 Hipótesis general

La aplicación del carbón activado y de la oxidación avanzada usando el reactivo de Fenton disminuyen significativamente los valores de DBO₅ y DQO en las aguas residuales del proceso alcalino para aceitunas verdes en el distrito de la Yarada Los Palos, región Tacna, 2022.

1.6.2 Hipótesis secundarias

- a) La aplicación del carbón activado disminuye significativamente los valores de DBO₅ y DQO.
- a) La aplicación de la oxidación avanzada usando el reactivo de Fenton disminuye significativamente los valores de DBO₅ y DQO.
- b) La aplicación del carbón activado y de la oxidación avanzada usando el reactivo de Fenton se diferencian significativamente en la disminución los valores de DBO₅ y DQO.

CAPÍTULO II

MARCO TEÓRICO

2.1 Antecedentes de la investigación

2.1.1 Antecedentes de la investigación a nivel internacional

Zhang, Dong, Wang, y Meng (2019) en su revisión del proceso de Fenton para el tratamiento de aguas residuales orgánicas basado en la perspectiva de optimización, reporta que el proceso de oxidación del Fenton es uno de los métodos más eficaces y adecuados para la reducción de contaminantes orgánicos. Sin embargo, el proceso tiene tres deficiencias obvias: el estrecho rango de pH de trabajo, los altos costos y riesgos asociados con la manipulación, el transporte y el almacenamiento de reactivos (H_2O_2 y catalizador) y la significativa segunda contaminación relacionada con lodos de hierro. Para superar estas deficiencias, se han estudiado ampliamente varios procesos optimizados de Fenton. Además, se estudió el efecto de algunos parámetros de operación importantes (pH y catalizador, H_2O_2 , concentración de contaminantes orgánicos) en la eficiencia de degradación de los contaminantes orgánicos para proporcionar orientación para la optimización de los parámetros de operación.

Cristina Agabo García (2018), en la aplicación de tecnologías avanzadas de oxidación en el tratamiento de las aguas residuales de la industria oleícola, sostiene que la producción del aceite de oliva genera un elevado volumen de aguas residuales en las almazaras (ARAs). Dichas aguas residuales, se caracterizan por su alta carga contaminante que varía en función del proceso utilizado en la elaboración del aceite de oliva. Concretamente, en este proceso las ARAs se generan durante las operaciones del lavado de las aceitunas (aguas de lavado de aceitunas) y durante el lavado del aceite de oliva en las centrifugas verticales (aguas de lavado de aceite). Una de estas tecnologías, la reacción de Fenton ha sido utilizada previamente por nuestro grupo de investigación para el tratamiento de las aguas de lavado de aceite y aceitunas con resultados satisfactorios. En este caso, se ha podido producir aguas para el riego a partir de ARA con una carga orgánica inicial de 3 g DQO/L, empleando un proceso formado por un reactor de oxidación, tanque de neutralización, decantador para la floculación-

sedimentación y un sistema de filtración formado por tres filtros en serie con rellenos de arena, arena y hueso de aceitunas. El tiempo de retención hidráulica en el reactor de oxidación fue de 3 a 4 horas.

Sánchez y García (2018) sostienen que en América Latina los tratamientos de agua residuales se basan en tecnologías convencionales como las fosas sépticas. Estos tratamientos no soportan índices de biodegradabilidad menores a 0,4 medidos en forma de DBO₅/DQO. La aplicación del proceso de oxidación avanzada de Fenton modificado, incrementa el índice de biodegradabilidad y evita reducir el pH, en grandes volúmenes es muy costoso.

Ocampo-Gaspar et al. (2017), la reacción de Fenton, en condiciones de oscuridad o iluminación, se considera un proceso homogéneo. La característica más importante del reactivo de Fenton está relacionada con su preparación, ya que es un catalizador eficaz que solo utiliza iones de hierro (II), específicamente de sal de sulfato de hierro (II) (FeSO₄) y peróxido de hidrógeno (H₂O₂). Este trabajo se detectaron Nanopartículas (NPs) de óxido de hierro (Fe₂O₃) en la mezcla acuosa de FeSO₄ y H₂O₂ a pH 2,5 y pH 3. También se detectaron NPs de Fe₂O₃ mezclando Fe₂(SO₄)₃, FeCl₂ y FeCl₃ con H₂O₂. La distribución del tamaño de las NPs de Fe₂O₃ se midió mediante analizadores de partículas de Dispersión Dinámica de Luz (DLS). Microscopía electrónica de transmisión de alta resolución (HR-TEM) y los análisis de difracción de Rayos-X (DRX) confirmaron la presencia de diferentes fases de óxido de hierro en la mezcla de FeSO₄/H₂O₂ y corroboró su tamaño de nanopartículas. En el sistema acuoso FeSO₄/H₂O₂, a pH 3, la concentración de iones de hierro libres se midió mediante análisis de Espectroscopia de Emisión Óptica de Plasma Acoplado Inductivamente (ICP-OES) que muestra una concentración de $3,1 \times 10^{-6}$ M y mediante voltamperometría cíclica (CV) la concentración de iones libres. La concentración de iones de hierro detectada fue de $4,4 \times 10^{-6}$ M. En las condiciones de Fenton, pH 2,5 y pH 3, estos NPs de Fe₂O₃ degradaron y fotodegradaron dos pesticidas, tres tintes textiles y un compuesto fenólico derivado. Los análisis de espectroscopía UV-Vis y demanda química de oxígeno (DQO) determinaron el nivel de degradación de los contaminantes. Los resultados obtenidos sugieren que la reacción de Fenton debe considerarse como un proceso catalítico heterogéneo.

Los procesos de oxidación avanzada (AOP) se propusieron por primera vez en la década de 1980 para el tratamiento de agua potable y luego se estudiaron ampliamente para el tratamiento de diferentes aguas residuales. Durante el tratamiento AOP de aguas residuales, se generan radicales hidroxilos ($\text{OH}\cdot$) o radicales sulfato ($\text{SO}_4\cdot^-$) en cantidad suficiente para eliminar materias orgánicas refractarias, contaminantes orgánicos trazables y ciertos contaminantes inorgánicos, para aumentar la biodegradabilidad de las aguas residuales. Como tratamiento previo antes de un tratamiento biológico subsiguiente. Generalmente, las eficiencias del tratamiento dependen en gran medida del tipo de AOP seleccionado, las propiedades físicas y químicas de los contaminantes objetivos y las condiciones de operación. Cabe señalar que otros mecanismos, además de la oxidación basada en radicales hidroxilo o sulfato, pueden ocurrir durante el tratamiento AOP y contribuir a la reducción de contaminantes objetivos (Deng y Zhao, 2015).

Grueso (2009), En los últimos años se vienen desarrollando y aplicando técnicas de oxidación avanzadas con objeto de depurar vertidos industriales. Estos vertidos se deben, entre otras, a la industria alimentaria en general y a los sectores del aceite y sus derivados en particular, con más de 800 almazaras censadas en Andalucía. De los distintos procesos químicos de oxidación avanzada, uno de los más efectivos es el proceso pseudo-Fenton. Este consiste en la adición de sales de Fe^{3+} (como catalizador) en el medio para promover la descomposición catalítica del H_2O_2 (agente oxidante) en radicales OH^* . Entre las ventajas que presenta se encuentra la baja toxicidad del hierro, la facilidad de manejo del H_2O_2 y su descomposición en productos inocuos para el medio ambiente. La instalación necesaria es sencilla, requiere de un reactor tipo tanque agitado, y no es preciso emplear equipos adicionales para la generación de los reactivos, como ocurre en el caso de otros procesos de oxidación avanzada como con el empleo de ozono o la radiación ultravioleta, lo que le convierte en una de las alternativas más económicas. En el presente trabajo se ha estudiado y desarrollado un proceso de depuración de aguas residuales procedentes de almazaras mediante oxidación avanzada, pseudo-Fenton. Se han estudiado las distintas etapas que componen el proceso de depuración de forma individual, en discontinuo y, una vez se han optimizado, se ha realizado un desarrollo del proceso en continuo. El proceso está formado por un pretratamiento, una etapa de reacción, seguido de una unidad para neutralizar y flocular, terminando con una

sedimentación. El proceso estudiado ha conducido a la determinación de las condiciones óptimas para su utilización en mezclas de agua de lavado de aceituna y aceite con una demanda química de oxígeno de entrada del orden de 4 000 mg de O₂/L, cuando se agrega una relación en peso de 0,058 [FeCl₃]/[H₂O₂], a temperatura ambiente y con un tiempo de residencia de aproximadamente 3 horas en el proceso continuo. No superando nunca la cantidad de 400 mg de O₂/L en las aguas que abandonan la instalación. Las aguas que abandonan la instalación de planta piloto (tipo bancada), en donde se desarrollan los experimentos en continuo, cumple con las exigencias marcadas por la última Resolución de la Comisaría de Aguas de la Confederación Hidrográfica del Guadalquivir, para recibir la autorización de esparcimiento de dichas aguas.

Hodaifa Martínez (2007); Las plantas industriales de obtención de aceite de oliva (almazaras) producen elevadas y variables cantidades de aguas residuales de lavado de aceite y aceitunas, que tienen un gran impacto en el medio ambiente. Estas aguas normalmente se almacenan en grandes balsas de acumulación para su evaporación durante el verano. Esta solución, entre otras hasta el momento, no representa una solución definitiva para este problema, especialmente porque las administraciones se manifiestan cada vez más exigentes en cuanto al acondicionamiento de este vertido y la calidad constructiva de las balsas. En este trabajo presenta el proceso de oxidación química utilizando como catalizador para la activación de H₂O₂ cloruro férrico, como referencia de la reacción de Fenton. En trabajos anteriores, los autores han descrito los resultados experimentales a escala de laboratorio. Estos resultados han sido llevados a escala piloto industrial, realizando la oxidación química bajo las mejores condiciones de operación obtenidas: concentración del peróxido de hidrógeno del 5 % p/v (16 v), utilizando un catalizador de cloruro férrico con una relación de [FeCl₃, g]/[H₂O₂, g de 100 %] = 0,25, pH próximo a 3 y temperatura ambiental. La DQO final media obtenida está próxima a 661,1 ppm (reducción en DQO = 76 %, DQO_{inicial} = 2763,0 ppm), y el agua obtenida puede ser destinada a riego.

2.1.2 Antecedentes a nivel nacional

Medina et al.(2018), aplicación del proceso Fenton para degradar aguas residuales del camal de Chota; el objetivo fue optimizar la aplicación del proceso Fenton para degradar las aguas residuales del camal municipal de Chota - Perú, que contienen alta carga orgánica y son un peligro constante de contaminación de cuerpos de agua y suelo. Los parámetros evaluados fueron: DBO₅, DQO, alcalinidad, dureza, pH, conductividad, sólidos totales, turbidez, temperatura, potencial óxido-reducción, oxígeno disuelto y análisis microbiológicos para la presencia de Salmonella y E. Coli. Se utilizó un sistema de jarras con agitación a 30 rpm para tratar las muestras y diferentes concentraciones de FeSO₄ y H₂O₂ y pH de acuerdo al diseño Box – Behnken y optimización mediante la metodología de superficies de respuesta con el software Statgraphics 5.1 plus. Se encontró un tiempo óptimo de reacción de 18 minutos y la concentración óptima de FeSO₄, H₂O₂ y pH fueron de 2 110,55 mg/L, 1 092,67 mg/L y 3,22 respectivamente. Se observó una mejora del indicador de biodegradabilidad a un valor de 0.5 y una remoción de la DQO alrededor del 80 %. El proceso Fenton resulta ser una alternativa eficaz para el tratamiento de aguas residuales de camales y puede ser aplicado como pre-tratamiento.

Raffo & Ruiz (2014), la caracterización de las aguas residuales y la demanda bioquímica de oxígeno; El agua es la sustancia más importante para los seres vivos, después del oxígeno. Es parte constituyente de la mayoría de los animales y los vegetales y está presente en cantidad de minerales.

La Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO) es uno de los indicadores más importantes en la medición de la contaminación en aguas residuales, como también en el control del agua potable. Para los procesos avanzados de oxidación (AOX) se enfocan en su capacidad de generación de radicales hidroxilo (OH^{*}), especie con un elevado potencial de oxidación mediante la reacción con un agente oxidante (H₂O₂) y con un catalizador (Fe²⁺). Esta propiedad aprovecha para conseguir la mineralización (CO₂ y ácidos minerales) de los contaminantes o su degradación en sustancias más biodegradables, donde desarrolla una alternativa eficaz para la eliminación de materia orgánica de efluentes residuales mediante la aplicación de AOX aplicando el proceso de Fenton al agua residual de una textil después del tratamiento físico-químico (Salas, 2010).

Para el tratamiento de las aguas residuales en una refinería de petróleo por el proceso de oxidación avanzada, aplicando el reactivo Fenton ($\text{H}_2\text{O}_2/\text{Fe}^{2+}$), se evaluó la factibilidad técnica del proceso de oxidación avanzada usando el reactivo Fenton ($\text{H}_2\text{O}_2/\text{Fe}^{2+}$) en el tratamiento de las aguas residuales generadas por el lavado cáustico de una refinería de petróleo. Estas aguas contienen una demanda química de oxígeno (DQO), de 20 160 mg/L y fenoles totales 1 800 mg/L. El proceso aplicado para descontaminar este tipo de agua produjo una eficiencia de remoción del 90 % de DQO, y 99 % de fenoles totales a pH de 4 (Salas & Ale, 2008).

2.2 Bases teóricas

La aceituna, fruto del olivo, es una drupa carnosa de aproximadamente 18-20 mm de longitud por 10 mm de ancho, dependiendo de la variedad. Inicialmente de color verde, su tonalidad se torna morado oscuro al madurar. Por lo general, su peso varía entre 1,5 y 12 gramos.. El porcentaje de pulpa, intensamente alargada cuando está verde, varía del 70-80 %, el de hueso 12-30 % y la semilla alrededor del 10 % del hueso. (Fernández, et al,1985).

2.2.1 Materia prima y proceso alcalino

Tabla 1

Composición de la Aceituna

Composición de la aceituna					
% Sobre materia seca					
Parte	Materia nitrogenada	Materia grasa	Celulosa bruta	Extracto no nitrogenado	Materia mineral
Epicarpio	9,8	3,4	2,4	82,8	1,6
Mesocarpio	9,6	51,8	12,0	24,2	2,3
Endocarpio	1,2	0,8	74,1	22,7	1,2

Nota: Adaptado de “Biotecnología de la aceituna de mesa”. Instituto de la Grasa y sus Derivados. C.S.I.C. Sevilla - España.

Tabla 2*Composición Nutricional de la Aceituna*

Componentes nutricionales de la aceituna										
Variedad	Proteínas (g)	Lípidos (g)	Calorías (cal)	Ca (mg)	Fe (mg)	Vit. (mg)	A (mg)	Vit. B1 (mg)	Vit. B2 (mg)	
Verde	1	11	106	72	16	240	0,02	0,06		
Negra	1,5	24	244	58,4	2,6	150	0,02	0,18		

Nota: Adaptado de "Biotecnología de la aceituna de mesa". Instituto de la Grasa y sus Derivados. C.S.I.C. Sevilla - España.

La composición química de la aceituna, así como sus características físicas, depende de un cierto número de factores, como son épocas de recolección, variedad, suelo, condiciones climatológicas, etc. (Fernández, et al,1985). A continuación, se presenta en la tabla 3, la composición química de la pulpa de aceituna:

Tabla 3*Composición Química de la Pulpa de Aceituna*

Variedad	Tipo	Relación pulpa:hueso	Humedad (%)	Grasa (%)	Azúcares reductores (%)	Azúcares no reductores (%)	Proteínas (%)	Fibra bruta (%)	Cenizas (%)
Sevillana	Verde	5,36	73,73	6,25	5,96	0,27	1,31	3,40	0,68
Sevillana	Negra	5,46	68,10	18,60	3,66	0,03	-	2,05	0,84

Nota: Adaptado de "Biotecnología de la aceituna de mesa". Instituto de la Grasa y sus Derivados. C.S.I.C. Sevilla - España.

Los hidratos de carbono, especialmente los oligosacáridos y monosacáridos libres presentes en la pulpa, son componentes cualitativamente significativos en la composición de la aceituna. Estos se consideran esenciales, ya que sirven como materia prima para el proceso de fermentación. Entre los monosacáridos y disacáridos más comunes se encuentran la glucosa, fructosa, manitol y sacarosa. Además de estos carbohidratos, se evalúa la fibra bruta, compuesta principalmente por polisacáridos junto con una

proporción de lignina. La fibra mayoritariamente contiene celulosa, seguida de lignina y hemicelulosas. Las sustancias pécticas representan entre el 0,3 % y el 0,6 % de la pulpa fresca, siendo los principales componentes el ácido anhidro galacturónico, grupos carboxilos esterificados y acetilos. A continuación, se muestra la Tabla 4, que detalla las propiedades fisicoquímicas de la aceituna sevillana (Miranda, 2018):

Tabla 4

Características Fisicoquímicas de la Aceituna Sevillana

Características fisicoquímicas de la aceituna sevillana		
	Aceituna verde(g)	Aceituna madura(g)
Densidad (kg/L)	1,14	1,07
pH	4,80	5,00
Relación pulpa/hueso	6,00	8,00

Nota: Adaptado de “Biotecnología de la aceituna de mesa”. Instituto de la Grasa y sus Derivados. C.S.I.C. Sevilla - España.

Tabla 5

Composición Química de la Aceituna Sevillana

Composición química de las aceitunas variedad sevillana		
Contenido en 100g de pulpa de aceituna fresca		
	Aceituna verde(g)	Aceituna madura(g)
Humedad	71,83	67,54
Grasa	15,64	20,97
Proteínas	1,50	1,57
Ceniza	2,28	2,36
Fibra	1,81	1,64
Carbohidratos	8,60	7,36
Acidez	0,74	1,08
Azúcares reductores	4,80	4,10
Taninos	2,11	1,64
Oleuropeína	2,25	1,98

Nota: Adaptado de “Biotecnología de la aceituna de mesa”. Instituto de la Grasa y sus Derivados. C.S.I.C. Sevilla - España

- **Verdes**

Son las obtenidas de frutos recogidos durante el ciclo de maduración, antes del envero.

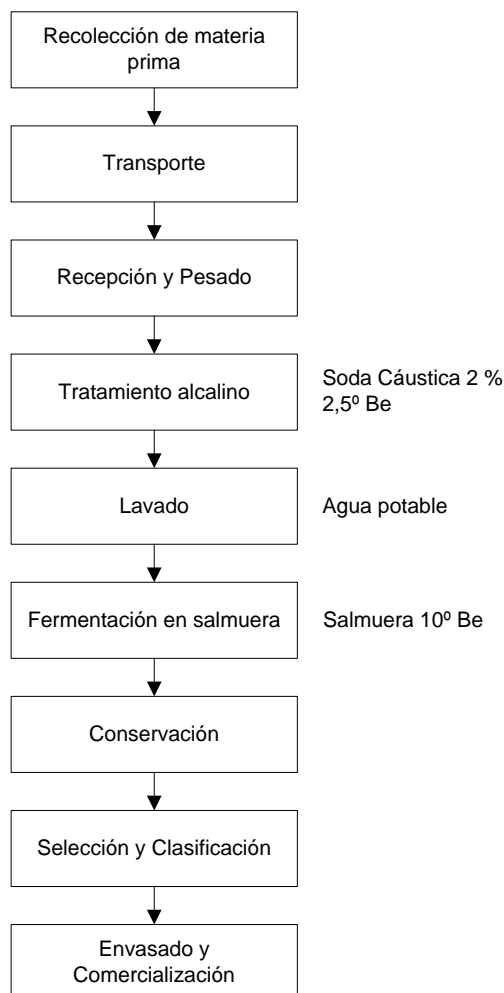
La coloración del fruto podrá variar del verde al amarillo paja. Estas aceitunas serán firmes, sanas y resistentes a una suave presión entre los dedos y no tendrán manchas distintas de su pigmentación natural, con las tolerancias que más adelante se determinen. (Norma Técnica Peruana, 2006).

Tratamiento Alcalino.

El proceso conocido como "cocido" de las aceitunas verdes implica sumergirlas en una solución diluida de soda cáustica, con el objetivo de eliminar el compuesto amargo llamado oleuropeína que les confiere su sabor característico. Este tratamiento prepara las aceitunas para una fermentación láctica adecuada, creando un entorno propicio para su desarrollo posterior. Es crucial que la penetración de la solución sea de aproximadamente $\frac{1}{2}$ a $\frac{3}{4}$ del grosor del pericarpio, de modo que retenga cierta amargura y una cantidad suficiente de carbohidratos para la fermentación. La velocidad de penetración aumenta con la concentración de la solución y la temperatura, lo que resulta en una acción más enérgica y una mayor permeabilidad de la piel del fruto. Una penetración insuficiente conduce a aceitunas amargas y una fermentación deficiente, mientras que un exceso de penetración dificulta obtener las características químicas ideales para su conservación a largo plazo, lo que resulta en una textura deficiente y un alto porcentaje de unidades rotas durante el deshuesado (Miranda, 2018).

Figura 1

*Diagrama de Bloques del Proceso Alcalino
de la Aceituna Verde Estilo Sevillano*



Nota: Elaboración propia

Lavados

Tiene como propósito eliminar la soda que permanece adherida a los frutos y parte de aquella que penetró, entonces se bombea agua a las aceitunas se colocan en un fermentador, cubriéndolas por completo, lo que permite que la soda utilizada sea drenada al agua de lavado a través de un proceso de ósmosis. Este ciclo se repite aproximadamente cada 6 horas, tres veces en total. En cuanto a la eliminación de la soda impregnada en las aceitunas, su reducción depende de la duración y la cantidad de lavados realizados. Por lo tanto, cuanto mayor sea la concentración de soda en el proceso de cocido, mayor será

el nivel de acidez combinada en las aceitunas (Miranda, 2018). En la tabla siguiente pueden verse los porcentajes de lejía total eliminada y los respectivos valores de acidez combinada resultantes después de cada lavado. (Borbolla y Rejano, 1978).

Tabla 6

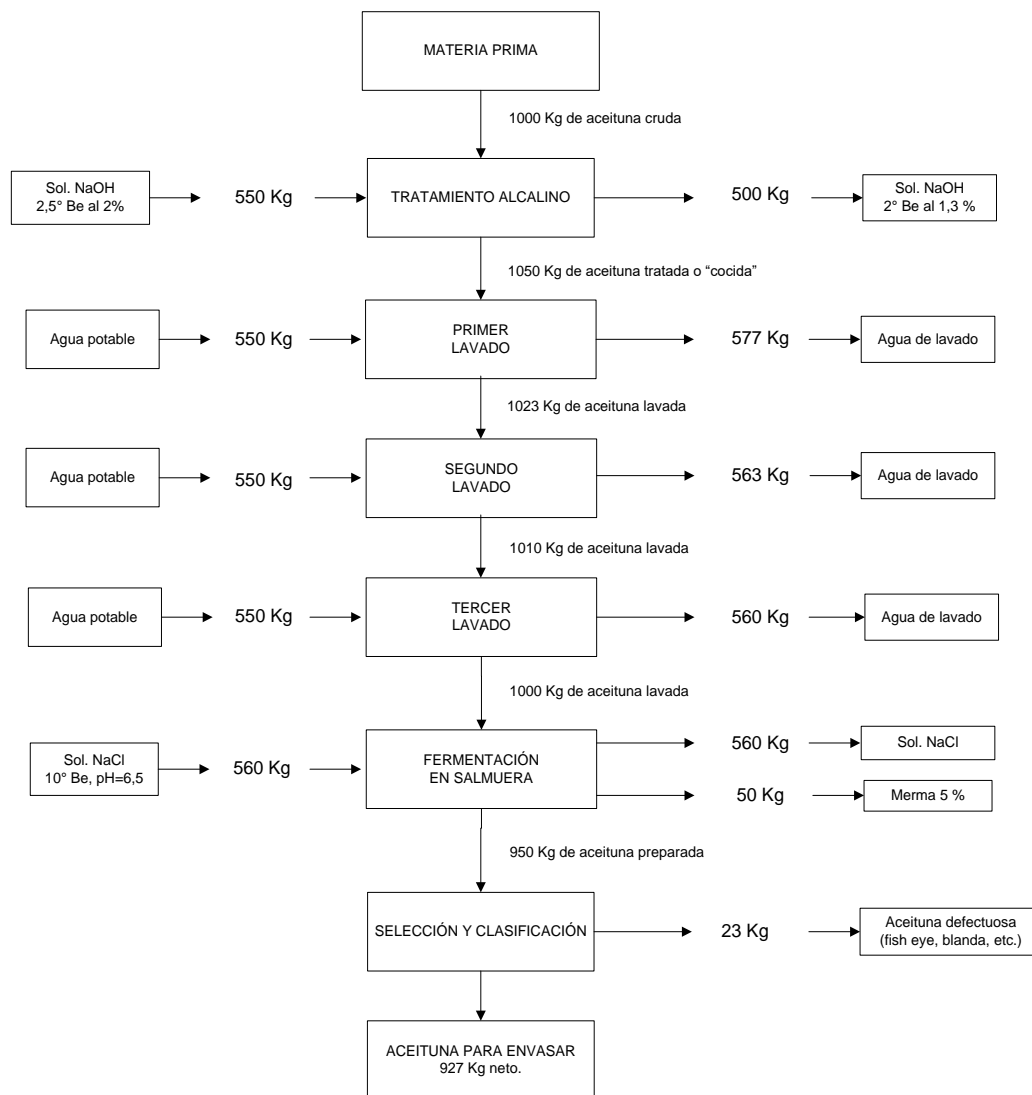
Valores de Eliminación de Lejía por Lavados

Lavados (horas)	Eliminación de lejía en los lavados			
	Eq. de NaOH eliminado del total		Acidez combinada resultante en el equilibrio (normalidad)	
	Lejía 3,67%	Lejía 1,92%	Lejía 3,67%	Lejía 1,92%
Enjuagado	7,0	6,2	0,275	0,157
1.	25,5	33,0	0,225	0,112
2.	44,0	53,5	0,171	0,078
3.	64,0	70,5	0,106	0,045
4.	83,5	86,5	0,049	0,022
5.	91,5	93,0	0,024	0,012
6.	100,0	100,0	0,000	0,000

Fuente: Borbolla y Rejano (1978).

Figura 2

Balace de Masa del Proceso Alcalino de las Aceitunas Verdes Estilo Sevillana



Nota: Elaboración propia

2.2.2 Contaminación Ambiental

2.2.2.1 Definición

En la preparación comercial de los diferentes tipos de aceitunas de mesa se producen una serie de vertidos líquidos. El volumen de los mismos depende de la elaboración, dándose en la Tabla 8 una estimación por kg de frutos. En ella se han distinguido procesos tradicionales y con reúsos, ya que, entre unos y otros, el

volumen oscila considerablemente. Como se aprecia en la misma, el tratamiento de aceitunas negras aderezadas (por oxidación) es el que da lugar a una cantidad mayor de aguas residuales, aún aplicando ciertas reutilizaciones de lejías y suprimiendo algunas aguas de lavado. En el caso de aceitunas verdes estilo español o sevillano, se generan menos, aún pudiendo llegarse solo a 11/kg aproximadamente, cuando se aplican las medidas especificadas en dicha tabla. Por último, en la fermentación de negras naturales y de color cambiante en salmuera se obtienen los residuos líquidos menos importantes, con solo 0,5 a 1/kg (Miranda, 2018).

Tabla 7

Cantidad de Aguas Residuales Producida por kg de Frutos, Según los Diferentes Tipos de Elaboración

Tipo de Preparación	Litros de aguas residuales por kg de frutos			
	Lejías	Aguas de Lavados	Salmuera	TOTAL
Proceso tradicional aceitunas verdes estilo español o sevillano	0,50	1,00	0,50	2,00
Proceso anterior con reúso lejías y supresión segunda agua lavado (1).	0,05	0,50	0,50	1,15
Elaboración del tipo negras (por oxidación) (2)	1,50	2,00	0,50	4,00
Elaboración del tipo negras, con reúsos lejías v salmueras equilibrio (3)	0,15	1,50	0,50	2,65
Elaboración de aceitunas negras al natural	-	-	0,50	0,50

(1) Suponiendo una reutilización media de diez veces y la supresión del segundo lavado.

(2) Proceso de tres tratamientos con lejía.

(3) Suponiendo, también, un reúso de diez veces, para la lejía.

Nota: Adaptado de “Biotecnología de la aceituna de mesa”. Instituto de la Grasa y sus Derivados. C.S.I.C. Sevilla - España.

Las principales características (Garrido,1982) de los líquidos de desecho de esta elaboración se dan en la Tabla 7. En ellos se pueden hacer dos grandes grupos: *a)* de tipo alcalino, lejías y aguas de lavado, y *b)* de carácter ácido, salmueras de fermentación.

Tabla 8

Algunas Características de las Aguas Residuales del Proceso Tradicional de Aceitunas Verdes Estilo Sevillana

Características	Lejía	Primer Lavado	Segundo Lavado	Salmuera de Fermentación
pH	12,2	11,2	9,8	3,9
NaOH libre (g/L)	11,0	1,5	-	-
NaCl (g/L)	-	-	-	97,0
Acidez Libre (g láctico/L)	-	-	-	6,0
Azúcares reductores (g/L)	8,6	8,0	7,1	-
Polifenoles (g/L)	4,1	4,0	6,3	6,3
DQO (g/L)	23,0	24,6	28,4	10,7
DBO ₅ (g/L)	15,0	12,3	15,6	9,5
Sólidos en disolución (g/L)				
Volátiles	30,2	35,1	39,7	17,8
Fijos	18,0	11,4	9,9	100,7
Totales	48,2	46,5	49,6	118,5

Nota: Adaptado de “Biotecnología de la aceituna de mesa”. Instituto de la Grasa y sus Derivados. C.S.I.C. Sevilla - España.

Los primeros se distinguen por el pH elevado, aunque decreciente en el orden antes mencionado. Las denominadas lejías de «cocido» contienen una proporción bastante alta del hidróxido sódico original, que ya es, aproximadamente, la décima parte para la primera agua de lavado, e inapreciable para la segunda. El porcentaje de azúcares reductores que se pierden en estos líquidos es similar para todos ellos, llegando a ser, en conjunto, alrededor del 2,4 por 100, que representa una cantidad muy importante del total de los frutos. Los polifenoles también constituyen unos compuestos que se eliminan en proporciones apreciables, entre 4 y 6 g por litro. La DQO llega a ser entre 20 y 30 g/L con una DBO₅: en torno a los 15 g/L. La concentración de materia orgánica disuelta varía entre 30 y 40 g/L y tiende a aumentar con el tiempo que los frutos permanecen en el líquido. Por otro lado, las sales inorgánicas, especialmente el NaOH presente en la lejía, son altas al principio del proceso y disminuyen a medida que se llevan a cabo los lavados.

En cuanto a la salmuera de fermentación, se caracteriza por ser un efluente altamente ácido, con un pH entre 3,5 y 4,0, una notable acidez láctica de 0,545 por 100, y un contenido elevado de NaCl, entre 6-10 por 100. Además, los valores de DQO y DBO₅ son más bajos que en los líquidos alcalinos, y la cantidad de materia orgánica disuelta también es menor. La carga inorgánica, no obstante, es elevada debido a la sal presente (Miranda, 2018).

2.2.3 Producción de aceituna nacional

En el Perú se sitúa en la zona sur costera de los departamentos de Tacna, Moquegua, Arequipa, Ica y Sur de Lima, y del total de producción más del 50 % se concentra en el departamento de Tacna, en el valle de Magollo y las irrigaciones de La Yarada y Los Palos.

Tabla 9

Producción de Aceituna a Nivel Nacional y por Regiones

Región	Hectáreas	Producción	Rendimiento
	Cosechadas	(Toneladas)	(kg/ha)
Arequipa	3 126	13 859	4,43
Ica	457	1 113	2,44
La Libertad	82	114	1,39
Lima	200	984	4,92
Moquegua	334	527	1,58
Tacna	5 465	35 526	6,50
Nacional	9 664	52 123	5,39

Nota: SENASA (2006).

Tabla 10*Producción de Aceituna en Tacna*

Año	Hectáreas Cosechadas	Producción (Toneladas)	Rendimiento (kg/ha)
2000	2 864	16 730	5 841
2001	3 179	17 244	5 424
2002	3 226	17 459	3 374
2003	3 647	23 462	4 218
2004	4 103	26 728	5 925
2005	4 730	33 365	4 535
2006	5 465	35 526	4 755
2007	5 479	35 404	6 460
2008	6 338	73 602	12 545
2009	5 867	4 619	729
Nacional	32 784	20 7734	6,34

Fuente: SENASA (2010).

2.2.4. Aguas Residuales**2.2.4.1 Parámetros de calidad****a) Materia Orgánica**

La Materia Orgánica (MO), representa la parte más importante de la contaminación, aquella que agota el Oxígeno Disuelto (OD), en las masas de agua, ríos, lagos, bahías, etc. En Agua Residual (AR), de composición típica, cerca del 70n % de los Sólidos Suspendedos, SS, y el 45-50 % de los Sólidos Fijos o filtrados (SF), son MO. La materia orgánica está compuesta de Carbono, Hidrógeno y Oxígeno, elementos comunes a todos los compuestos orgánicos, junto con el Nitrógeno en algunos casos. También están presentes a menudo otros compuestos como el Fósforo, Azufre, Hierro, etc (Orozco, 2014).

- **Proteínas:** componen del 40 al 60 % de las AR. Son el principal constituyente de los organismos animales. Las plantas también contienen proteínas en menor medida. Las proteínas son sustancias complejas e inestables, y su química está asociado a los Aminoácidos, que se componen del grupo ácido, -COOH, y el grupo básico, -NH₂. En los Aminoácidos siempre está presente el Nitrógeno en una proporción relativamente constante, 16 %. El Peso Molecular de las proteínas es muy alto, de 20 000 a 20 millones. La Urea, CO(NH₂)₂, y las Proteínas son la principal fuente de Nitrógeno de las AR. Cuando están presentes en grandes cantidades, la producción de malos olores es probable (Orozco, 2014).

- **Carbohidratos:** constituyen del 25 al 50 % de las AR. Proviene de la materia vegetal principalmente. Están ampliamente distribuidos en la Naturaleza e incluyen Azúcares, Almidones, Celulosa y Fibra de Madera. La Celulosa y la Fibra de Madera, se conocen genéricamente como Fibra. Las Fibras insolubles se componen de Celulosa, Hemi-celulosa, Lignina y ciertos Almidones. Los Carbohidratos se componen de C, H₂ y O₂. Los Azúcares, solubles en agua, descomponen fácilmente. Los Almidones son más estables, pero pueden ser convertidos a Azúcares por actividad microbiana. Las Fibras son insolubles (principalmente la Celulosa) y son muy resistentes a la descomposición en AR. Sin embargo, en el suelo se descomponen fácilmente gracias a la acción de Hongos en condiciones ácidas.

- **Aceites y Grasas:** este grupo es el tercer componente en importancia en la comida. Los Aceites y Grasas (AG), son compuestos de alcohol y glicerol. Los Glicéridos de los Ácidos Grasos Volátiles (AGV), son los aceites, líquidos a temperaturas ordinarias. Los AG reaccionan con los álcalis (Vg. Hidróxido de Sodio) para formar jabones, que también son muy estables. En las AR, las AG, provienen de la mantequilla y los aceites vegetales. Son elementos muy estables y difíciles de descomponer por las bacterias en las aguas residuales. Por lo tanto, deben ser removidos antes del tratamiento o traerán problemas en la descomposición de la MO (Orozco, 2014).

- **Surfactantes:** son moléculas grandes, ligeramente solubles en agua, y que causan espuma. Conocidos como Detergentes, se usan en limpieza. Pueden causar grandes problemas en la aireación de las AR. Anteriormente, los Detergentes se

componían de Alkil-Benceno-Sulfonato (ABS), no biodegradables, pero hoy han sido mayormente cambiados por detergentes lineales, Lineal-Alkil-Sulfonato (LAS), que son biodegradables (Orozco, 2014).

b) Oxígeno Disuelto (OD)

El oxígeno disuelto (OD) es uno de los principales parámetros en tratamiento de aguas residuales, pues muchos de los organismos dependen de él para mantener los procesos metabólicos, para obtener energía y efectuar su reproducción. Además, el OD es el principal indicador del estado de contaminación de una masa de agua, pues la materia orgánica contenida en ella tiene como efecto directo el consumo del Oxígeno Disuelto. El Oxígeno es un gas poco soluble en el agua, no reacciona con ella, y su solubilidad depende de la presión parcial. Su concentración de saturación varía entre 7 mg/L a 35 °C y 14,7 mg/L a 0°C, a una atmósfera de presión. Como indicador de la calidad de las aguas residuales, el oxígeno disuelto debe tener un máximo del 110 % de la concentración de saturación, pues con aguas sobre-saturadas de Oxígeno los peces pueden sufrir la enfermedad de la “burbuja de gas”. Esto puede ocurrir en aguas eutrofizadas que contengan una excesiva población de algas y en ciertos momentos del día, cuando la producción algal de Oxígeno es máxima, el agua se puede sobresaturar. Sin embargo, son más frecuente las bajas concentraciones de oxígeno disuelto debido a la demanda de Oxígeno causada por la materia orgánica presente. En estas circunstancias, por encima de 7 mg/L existe una población diversificada de peces, con presencia de caracoles, insectos, etc. En general, el oxígeno disuelto debe estar por encima de 5 mg/L, concentración mínima necesaria para sustentar la vida de peces salmónidos. La mayoría de los peces, por otra parte, pueden sobrevivir con concentraciones de 4 mg/L, y algunos, como la mojarra o tilapia, alcanzan a resistir concentraciones de 3 mg/L. Concentraciones menores a 3mg/L causarán la desaparición de la vida acuática superior. Por debajo de un 1 mg/L promedio medido en las masas de agua, se encontrarán con seguridad zonas anaerobias (que no contienen Oxígeno) y por consiguiente habrá presencia de malos olores. Cuando la concentración llega a cero, la descomposición anaerobia es generalizada, y la presencia de malos olores también. La presencia de bacterias será

generalizada. La medición del oxígeno disuelto en el agua se efectúa por medio de la sonda del Medidor de Oxígeno, o por titulación con el método Winkler(Orozco, 2014).

c) **Demanda Bioquímica de Oxígeno**

La Demanda Bioquímica de Oxígeno, DBO, es causada por la Materia Orgánica arrojada a las masas y corrientes de agua, la cual se constituye en el alimento para las bacterias que se reproducirán rápidamente. Estas bacterias, en condiciones aerobias, consumirán Oxígeno, causando la disminución del OD con los efectos que se explican en el numeral anterior. La DBO se define como la cantidad de Oxígeno necesaria para descomponer la MO presente en el Agua Residual mediante la acción de bacterias en condiciones aerobias. La DBO es causada por la respiración de las bacterias y cesará al agotarse totalmente la MO. Como se mencionó en otro numeral, la DBO se propuso en el año de 1912 como un método indirecto para medir la MO. Hoy día, la DBO se efectúa a 5 días y a 20°C, y se denota con el símbolo DBO_5 . Sin embargo, pueden realizarse a diferentes tiempos, por ejemplo, la DBO_7 es la demanda medida a los 7 días, y la DBO_u (DBO última o total) es la medida hasta el agotamiento total de la MO, lo que usualmente toma de 20 a 30 días. En las Aguas Residuales Domésticas, $DBO_5 \approx 0,70 DBO_u$ o la $DBO_u \approx 1,5 DBO_5$.

El ensayo de la DBO es de tipo biológico, razón por la cual se debe simular en forma aproximada las condiciones en que la demanda ocurre en los medios naturales. Estas condiciones implican la presencia de Oxígeno y nutrientes (P y N_2), la ausencia de tóxicos, pH y temperatura adecuados, presencia de bacterias en cantidad suficiente, etc. El ensayo de la DBO se efectúa midiendo el OD antes y después de los cinco días. Como el OD en el laboratorio alcanza concentraciones de solo 7 u 8 mg/L, y como la DBO_5 fluctúa entre 200 y 20 000 mg/L o más, es necesario diluir la muestra de AR. Para realizar el ensayo de la DBO se toma la muestra y se diluye en una alícuota definida (Vg. la alícuota 1:50 quiere decir que las aguas residuales está diluida 50 veces, es decir, se mezcla una parte de aguas residuales en 49 partes de agua destilada), dependiendo del valor esperado de la DBO. Si no se conoce la concentración aproximada, se deben preparar diferentes diluciones, en los rangos en que se crea posible la DBO. El agua de dilución empleada para preparar la alícuota se prepara con agua destilada, sales de

potasio, sodio, calcio y magnesio que dan buena capacidad amortiguadora (buffer, es decir mantiene el pH aproximadamente constante en un valor cercano a 7,0), y se satura de Oxígeno en las condiciones del laboratorio. Una vez preparadas las alícuotas con las diluciones convenientes, es decir, cuya demanda no sea mayor a 2 a 3 mg/L (que es la demanda posible sin problemas con un OD de 6 mg/L) se vierte la muestra en un frasco Winkler (de boca ancha). Si es necesario (como en el caso de aguas residuales que no tengan bacterias presentes) se inocula el agua de dilución con bacterias. Como se supone que el agua de dilución que contiene el inóculo tendrá materia orgánica que, al adicionarse a la muestra, incrementará el contenido de materia orgánica a oxidar, es necesario también medir la DBO al agua de dilución, y para ello se prepara un frasco con exactamente las mismas condiciones de la muestra, pero sin las aguas residuales, que se conoce como el blanco. Se toman, pues, los OD de la muestra preparada y del blanco a la hora cero, denominados OD inicial (OD_i) y OD blanco (OD_{bi}) respectivamente, se ponen en una incubadora a 20°C, sin luz (para evitar posible oxigenación con la presencia de algas) y se mide al cabo cinco días el OD final, OD_f y OD_{bf} . El blanco corregirá la DBO_5 de la muestra, así:

$$DBO_5 = \frac{(OD_i - OD_f) - (OD_{bi} - OD_{bf})\left(\frac{V_m}{V_b}\right)}{D}$$

Donde,

OD_i : OD inicial en la muestra diluida

OD_f : OD final en la muestra diluida

OD_{bi} : OD inicial en el blanco

OD_{bf} : OD final en el blanco

D : dilución, en decimales (Vg. 2 %, $D = 0,02$)

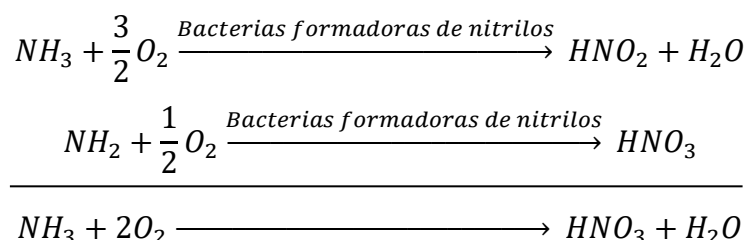
V_m : Volumen de blanco menos el volumen de inóculo

V_b : Volumen de blanco.

Como se vio en un aparte anterior, la MO puede ser proteínica o nitrogenada, la cual causa una DBO nitrogenada o DBON y de carbohidratos o carbonácea, la cual produce una DBO carbonácea o DBO_C. Las G&A y las fibras son muy estables, según se vio, y prácticamente no producen ninguna DBO en las AR. La DBON se puede calcular estequiométricamente del Nitrógeno Orgánico Total o Nitrógeno Total Kjeldahl, (NTK = N-Orgánico + N-Amoniacal), por lo cual conviene inhibirlo en la medición de la DBO, para que solo se ejerza la DBO_C. Esto se hace con compuestos inhibidores de la nitrificación, como la alitio-urea. Otros compuestos, como el H₂S también pueden producir demanda de Oxígeno, DBO_S, la cual también se puede calcular estequiométricamente (Orozco, 2014).

Nitrificación en el ensayo de la DBO.

Según Orozco, 2014, durante el proceso de hidrólisis de proteínas se produce materia no carbonosa, como el amoníaco, por ejemplo. Hay dos grupos de bacterias autótrofas capaces de oxidar el amoníaco a nitrito y, a continuación, a nitrato. Las reacciones generalizadas son las siguientes:

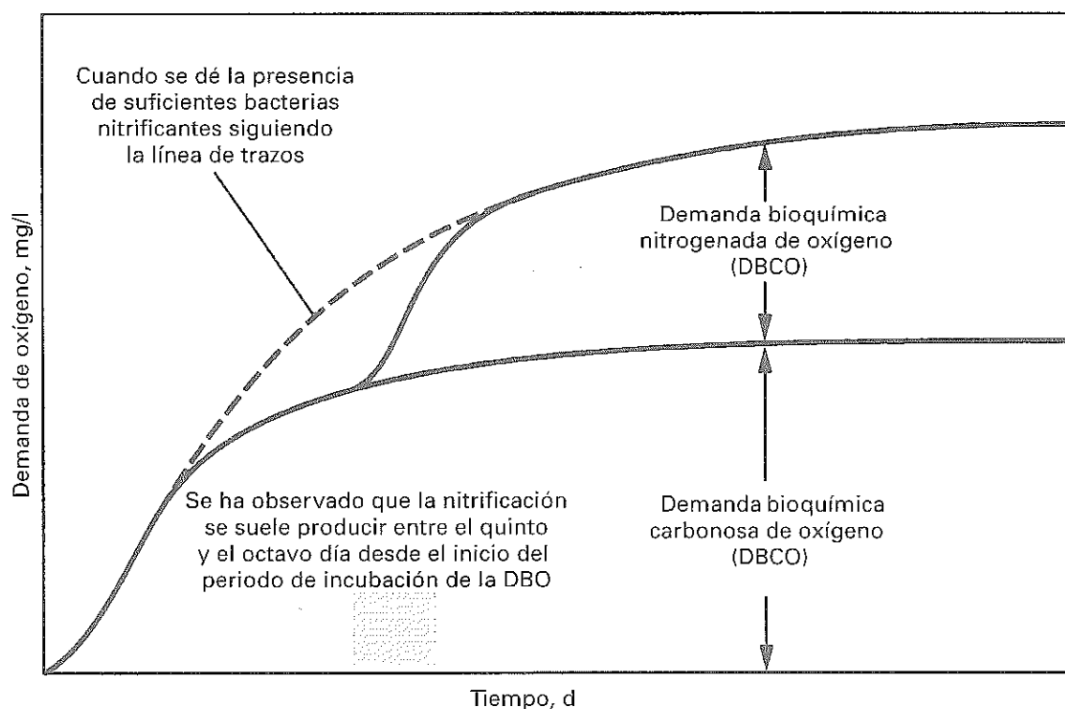


Se conoce con el nombre de demanda bioquímica de oxígeno nitrogenada (DBO_N), la demanda de oxígeno asociada al proceso de oxidación de amoníaco a nitrato. En la Figura 3 se muestra la evolución y origen de la demanda de oxígeno normal en un ensayo de DBO con aguas residuales domésticas. Normalmente, es necesario un periodo de entre 6 y 10 días para que las bacterias nitrificantes ejerzan una demanda de oxígeno medible, debido a la lentitud del proceso de reproducción de las mismas y al tiempo necesario para alcanzar una población suficiente. Sin embargo, si la población es suficientemente grande desde el principio, las interferencias con los procesos que se dan durante los 5 días de duración del ensayo de la DBO pueden ser significativas. Ello

conduce a la posibilidad de interpretaciones erróneas de los datos de funcionamiento de las instalaciones de tratamiento en aquellos casos en los que la nitrificación se produce durante el periodo de ejecución de los ensayos de DBO. Supongamos que la DBO registrada en el efluente de un tratamiento biológico toma los valores 20 mg/L sin nitrificación, y 40 mg/L con nitrificación. Si la DBO del afluente es de 200 mg/L, las eficacias en la eliminación de la DBO serían, respectivamente, el 90 y el 80 por 100. Por lo tanto, a la hora de estudiar los resultados, si el cálculo se realiza suponiendo que no se produce una nitrificación que sí está teniendo lugar en la realidad, se puede cometer el error de creer que la eficacia del proceso de tratamiento no es buena, cuando en realidad es bastante efectivo (Orozco, 2014).

Figura 3

Esquema de Deficiencia de las Demandas Bioquímica de Oxígeno Carbonosa y Nitrogenada Ejercida por una Muestra de Agua Residual

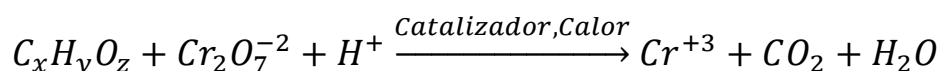


Nota: Adaptado "Bioningeniería de aguas residuales" por Orozco, 2014.

d) Demanda Química de Oxígeno

Para Orozco, 2014; la Demanda Química de Oxígeno, DQO, surgió como una necesidad de medir la demanda de Oxígeno de manera rápida y confiable.

Esta es otra manera de medir la MO indirectamente, a través de la demanda de Oxígeno de los compuestos orgánicos. Como se verá en otro capítulo, la DQO es un modo de medir la energía contenida en los compuestos, pero inicialmente se pensó como un sustituto más rápido y preciso que la DBO. En lugar de descomponer la MO mediante el metabolismo bacterial, que utiliza la respiración como medio para obtener el Oxígeno, en la DQO se utiliza un fuerte agente oxidante en un medio ácido. El agente oxidante más utilizado es el dicromato de Potasio, en presencia del sulfato de Plata como catalizador a alta temperatura. La reacción de la MO con el dicromato es como sigue:



Donde $C_xH_yO_z$ representa en forma genérica la MO carbonácea. La DQO de un compuesto es generalmente mayor que la DBO debido a que muchos compuestos que pueden ser oxidados químicamente no pueden serlo biológicamente, a través de la biodegradación bacteriana. Los compuestos no-biodegradables son a menudo sustancias moleculares artificiales de gran Peso Molecular. Con frecuencia, para un AR determinada, se puede correlacionar muy bien la DBO con la DQO lo que es un gran beneficio debido a que la DQO toma solo dos o tres horas para hacerlo, mientras la DBO requiere de cinco días. La relación DQO/DBO determina también la cantidad de materia orgánica no-biodegradable presente en el agua residual (Orozco, 2014).

Además, aunque no siempre es necesario, sí es posible determinar la DQO por medios estequiométricos, obteniéndose el peso de oxígeno requerido por unidad de volumen de líquido para la completa oxidación de la materia orgánica. Un ejemplo de cómo calcular estequiométricamente la DQO de un compuesto conocido, en este caso glucosa, sería el siguiente:



Peso

molecular 180g/mol 6x32g/mol 6x44g/mol 6x18g/mol

De esta relación se desprende que se requieren $(6 \times 32) / 180 = 1,066$ g O₂/g Glucosa. La DQO de una solución acuosa que contenga 1 g/L de glucosa tendría entonces una DQO = 1 066 mg/L. Una de las ventajas de la DQO es el poco tiempo que tarda su realización: un análisis de DBO tarda 5 días, mientras la DQO puede realizarse en 2 horas y menos. Es por ello que cada vez se utiliza más la DQO en el análisis del tratamiento de las aguas residuales, pero es necesario efectuar una diferenciación entre las diferentes fracciones de la DQO para poder aplicarlas a la cinética bioquímica (Orozco, 2014).

- **Fraccionamiento de la DQO**

La DQO, como la DBO, puede ser soluble (sDQO), es decir, filtrada y particulada (pDQO). Cada una de estas fracciones a su vez puede ser biodegradable (bDQO) y no-biodegradable (nbDQO). La DQO soluble y biodegradable (sbDQO) es fácilmente biodegradable, mientras que la DQO particulada biodegradable (pbDQO) es difícilmente biodegradable. La DQO no biodegradable no se puede eliminar con el tratamiento biológico y por lo tanto es un remanente del tratamiento, y estará presente en el efluente como sDQOe (si está en el efluente es que NO es biodegradable) y es equivalente al snbDQO del afluente. Las fracciones entonces son: (i) s: soluble; (ii) p: particulado; (iii) b: biodegradable; (iv) nb: no-biodegradable; (v) sb: soluble biodegradable; (vi) snb: soluble no- biodegradable; (vii) pb: particulado biodegradable; y (viii) pnb: particulado no biodegradable(Orozco, 2014).

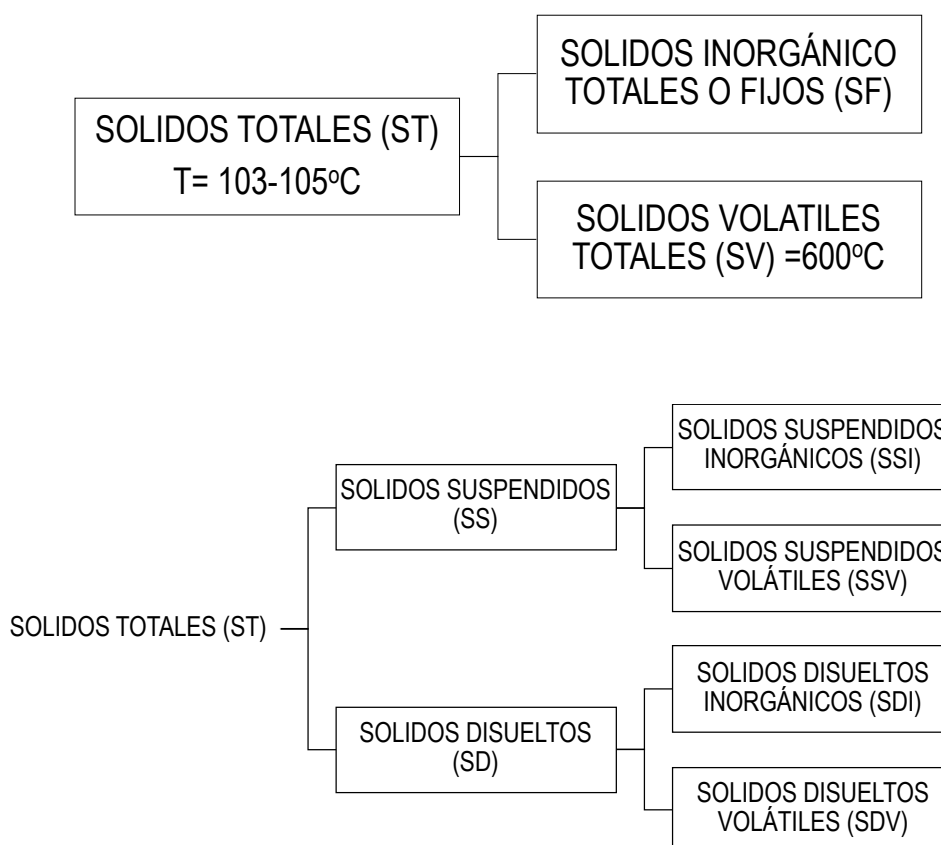
e) Sólidos

Los sólidos es otro parámetro de gran importancia en el tratamiento de aguas residuales. La materia orgánica a menudo está en forma de partículas en suspensión, por lo que es necesario diferenciar entre los Sólidos Suspendidos, (SS), y los Sólidos Disueltos (SD). Además, los sólidos pueden ser volátiles (SV), que indican procedencia orgánica o fijos, que se presumen como sólidos inorgánicos. La clasificación de los sólidos en general se

presenta en la Figura 1.5. Los Sólidos Totales (ST), se componen de los SS + SD. A su vez, estos se subdividen en SSV y SSF, y en SDV y SDF. Los más importantes en AR son los SS, especialmente los SSV que son la MO orgánica presente en el AR en forma de partículas. La medición de los sólidos se hace gravimétricamente, es decir, por peso, y consiste en filtrar la muestra con un filtro seco de peso conocido. Después de secarlos en un horno a 105 °C se vuelve a pesar el conjunto filtro y sólidos filtrados, y por diferencia se conoce el peso de los sólidos filtrados de un volumen determinado de muestra, y así su concentración en mg/L. Los sólidos volátiles se determinan por su evaporación a más de 550o C en una muffle (mientras los sólidos inorgánicos o fijos no evaporan hasta una temperatura mucho mayor) (Orozco, 2014).

Figura 4

Clasificación de los Sólidos en las Aguas Residuales

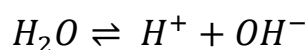


Nota: Adaptado “Bioningeniería de aguas residuales”(p.27), por Orozco, 2014.

Otro tipo de sólido importante en aguas residuales son los Sólidos Sedimentables, SSed, que se determinan por el volumen (mL) de sólidos que asienta en 30 minutos en un recipiente cónico conocido como el Cono de Imhoff. Sirven para determinar la cantidad y asentabilidad de los lodos presentes en las aguas residuales o el Licor Mixto. (Orozco, 2014)

f) pH

El agua se disuelve en si misma de la siguiente manera:



En este equilibrio, el agua actúa como ácido y como base, propiedad que se conoce como anfoterismo. Las concentraciones de $[H^+]$ y $[OH^-]$ son muy pequeñas, y a 25 °C cuando el agua es neutra es de 1×10^{-7} . El producto de las concentraciones de ambos iones es constante, y se conoce como la constante del producto de iones: $K_w = [H^+][OH^-] = 1 \times 10^{-14}$. De modo que cuando aumenta un ión disminuye el otro. Cuando la solución es ácida, aumenta la concentración de $[H^+]$ y cuando es básica, la concentración que aumenta es la de $[OH^-]$ (Orozco, 2014).

En lugar de expresar la $[H^+]$ con números tan pequeños, se puede expresar con logaritmos, definiendo el potencial de Hidrógeno, pH. El pH se define como el logaritmo del inverso de la concentración de iones Hidronio, $[H^+]$:

$$pH = \log_{10} \frac{1}{[H^+]} = -\log_{10}[H^+]$$

Por ejemplo, una solución neutra a 25°C contiene concentraciones iguales de iones $[H^+]$ y iones $[OH^-]$ con $[H^+] = 10^{-7}$.

Entonces el pH de las soluciones : $pH = -\log 10^{-7} = 7$ a 25°C:

- $pH < 7$: solución ácida
- $pH = 7$: solución neutra
- $pH > 7$: solución básica

La escala que define el potencial sirve para medir otras concentraciones diminutas, como el pOH. De este modo:

$$pH + pOH = -\log KW = 14$$

$$pH + pOH = -\log Kw = 14$$

Las concentraciones relativas de los iones $[H^+]$ y $[OH^-]$ se presentan en la Tabla 11. El pH es una medida relativa de la acidez o alcalinidad del agua. La acidez natural es producida principalmente por el CO_2 y ocurre cuando el pH está entre 8,5 y 4,5. Valores de pH más bajos de 4,5 son debido a la acidez mineral producida por ácidos fuertes como el H_2SO_4 , el HCl o el HNO_3 . Por otro lado, la alcalinidad natural es producida por carbonatos y bicarbonatos, y puede llevar el pH hasta valores de 8,3. Valores más altos requieren de alcalinidad de OH^- que es producida por bases fuertes como el NaOH o el $Ca(OH)_2$.

Tabla 11

Variación del pH con las Concentraciones de H^+ y OH^-

pH	pOH	$[H^+]$ mol/L	$[OH^-]$ mol/L
0	14	1	10^{-14}
2	12	0,01	10^{-12}
4	10	0,0001	10^{-10}
6	8	10^{-6}	10^{-8}
8	6	10^{-8}	10^{-6}
10	4	10^{-10}	0,0001
12	2	10^{-12}	0,01
14	0	10^{-14}	1

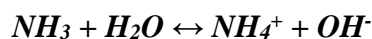
Nota: Adaptado "Bioningeniería de aguas residuales"(p.29), por Orozco, 2014.

g) Nitrógeno

El Nitrógeno es el componente principal de las Proteínas. Además, conjuntamente con el Fósforo, es un nutriente esencial para el crecimiento de plantas y protistas, específicamente de algas y bacterias necesarias para el TAR. Cantidades insuficientes de Nitrógeno afectan el tratamiento de las AR. El Nitrógeno Total comprende varias formas: (i) Nitrógeno Orgánico que se determina como NTK; (ii) Amoníaco, que es el producto de la digestión del Nitrógeno Orgánico, por lo que el Nitrógeno Total Kjeldhal comprende

también el NH_3 ; (iii) Los Nitritos y Nitratos, que son producto de la oxidación del NTK (Orozco, 2014).

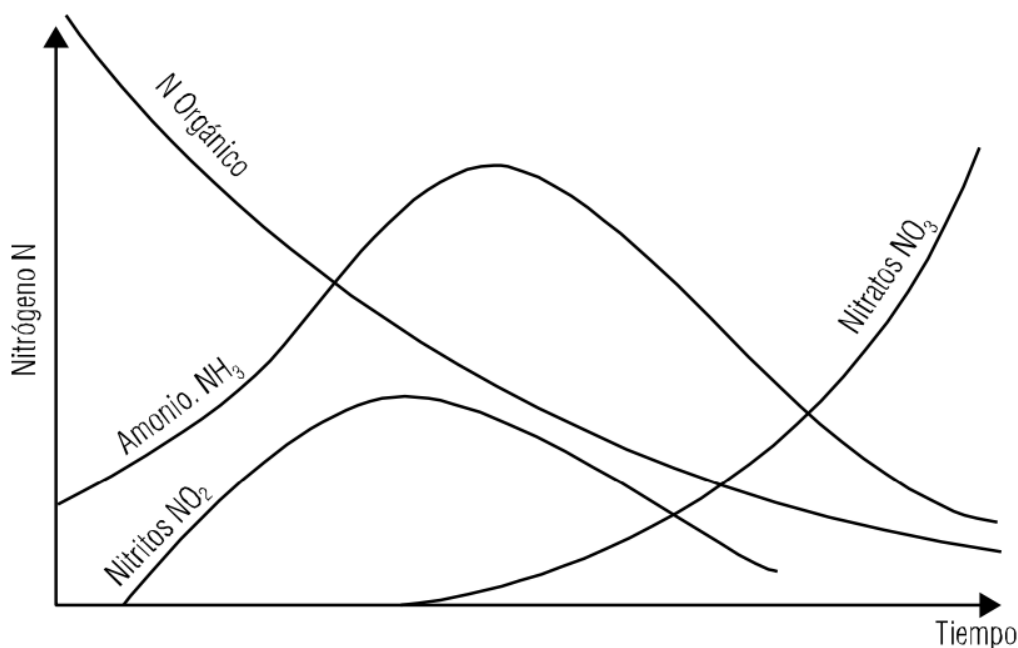
El Nitrógeno Amoniacal existe en solución acuosa como NH_4^+ o NH_3 dependiendo del pH:



A pH mayores de 7 el ión NH_4^+ es predominante y viceversa. El Amoníaco se oxida a Nitrito y luego a Nitrato muy fácilmente. Cuando un AR descarga en un río, el Nitrógeno está principalmente en forma orgánica, y luego se descomponen a Amoníaco, Nitrito y Nitratos sucesivamente, como se ve en la figura.

Figura 5

Variación del Nitrógeno Orgánico en Condiciones Aerobias



Nota: Adaptado “Bioningeniería de aguas residuales”(p.31), por Orozco, 2014.

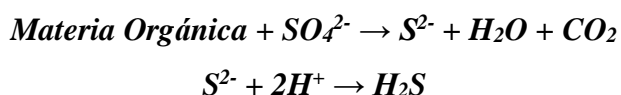
h) Fósforo

El Fósforo, P, es otro nutriente esencial para el crecimiento de algas y bacterias. Es determinante en el proceso de Eutrofización, pues algunas algas pueden suplir la ausencia de N en el agua fijándolo de la atmósfera. En ARD el P puede estar en

concentraciones de 4 a 15 mg/L de modo que la descarga de ARD puede causar la eutrofización de lagos y bahías si no se remueve previamente. El P se encuentra en forma de: (i) Ortofosfatos (PO_4^{3-} , HPO_4^{2-} , $H_2PO_4^-$, H_3PO_4) especies que están disponibles para el metabolismo biológico sin ninguna transformación adicional; (ii) los Polifosfatos, que incluyen moléculas que tienen dos o más átomos de P, pueden sufrir hidrólisis a Ortofosfatos en soluciones acuosas, pero de forma muy lenta; (iii) el Fósforo Orgánico que es de poca importancia en ARD, pero puede ser importante en ARI. El Ortofosfato se mide por colorimetría. Los Polifosfatos y el Fósforo Orgánico deben convertirse a Ortofosfatos para ser medidos. Los Ortofosfatos son la forma más perjudicial para producir eutrofización (Orozco, 2014).

i) Azufre

El ión sulfato está presente en la mayoría de las AR. El S se requiere para la síntesis de las proteínas y se libera con su degradación. El sulfato se reduce a sulfuro de la siguiente manera:



El gas Sulfhídrico, que tiene mal olor, se puede convertir a Ácido Sulfúrico que es corrosivo para las tuberías. El gas Sulfhídrico es producido también en la descomposición anaerobia, conjuntamente con el Metano(Orozco, 2014)..

2.2.4.2 Características físicas, y químicas del agua residual

- Contituyentes de las aguas residuales

Para Metcalf & Eddy, 2013; las principales propiedades físicas de agua residual, así como sus principales constituyentes químicos y su procedencia. Es conveniente observar que muchos de los parámetros que aparecen en la tabla están relacionados entre ellos. Por ejemplo, una propiedad física como la temperatura afecta tanto a la actividad biológica como a la cantidad de gases disueltos en el agua residual.

Tabla 12*Características Físicas y Químicas del Agua Residual*

Características	Procedencia
Físicas:	
Color	Aguas residuales domesticas e industriales, degradación natural de materia orgánica.
Olor	Agua residual en descomposición, residuos industriales.
Sólidos	Agua de suministro, aguas residuales domésticas e industriales, erosión del suelo, infiltración y conexiones incontroladas.
Temperatura	Aguas residuales domésticas e industriales .
Químicos Orgánicos	
Carbohidratos	Aguas residuales domésticas, industriales y comerciales.
Grasas animales, aceites y grasas	Aguas residuales domésticas, industriales y comerciales.
Pesticidas	Residuos agrícolas.
Fenoles	Vertidos industriales.
Proteínas	Aguas residuales domésticas, industriales y comerciales.
Contaminantes prioritarios	Aguas residuales domésticas, industriales y comerciales
Agentes tensoactivos	Aguas residuales domésticas, industriales y comerciales.
Compuestos orgánicos volátiles	Aguas residuales domésticas, industriales y comerciales.
Otros	Degradación natural de materia orgánica.
Químicos Inorgánicos	
Alcalinidad	Aguas residuales domésticas, agua de suministro, infiltración de agua subterránea.
Cloruros	Aguas residuales domésticas, agua de suministro, infiltración de agua subterránea.
Metales pesados	Vertidos industriales.
Nitrógeno	Residuos agrícolas y aguas residuales domésticas
pH	Aguas residuales domésticas, industriales y comerciales.
Fósforo	Aguas residuales domésticas, industriales y comerciales; aguas de escorrentía.
Contaminantes prioritarios	Aguas residuales domésticas, industriales y comerciales
Azufre	Agua de suministro; aguas residuales domésticas, comerciales e industriales.
Gases:	
Sulfuro de hidrógeno	Descomposición de residuos domésticos.
Metano	Descomposición de residuos domésticos.
Oxígeno	Agua de suministro; infiltración de agua superficial.

Nota: Adaptado “Ingeniería de aguas residuales”(p.55),por Metcalf & Eddy, 2013.

- Contaminantes de importancia en el tratamiento del agua residual

Las normas que regulan los tratamientos secundarios están basadas en las tasas de eliminación de la materia orgánica, sólidos en suspensión y patógenos presentes en el agua residual. Cuando se pretende reutilizar el agua residual, las exigencias normativas incluyen también la eliminación de compuestos orgánicos refractarios, metales pesados y, en algunos casos, sólidos inorgánicos disueltos.

Para la caracterización del agua residual se emplean tanto métodos de análisis cuantitativos, para la determinación precisa de la composición química del agua residual, como análisis cualitativos para el conocimiento de las características físicas y biológicas. Los métodos cuantitativos pueden ser gravimétricos, volumétricos o fisicoquímicos. Estos últimos se utilizan para determinar parámetros no relacionados con las propiedades máxicas o volumétricas del agua, e incluyen métodos instrumentales como la turbidimetría, colorimetría, potenciometría, polarografía, espectrometría de adsorción, fluorometría, espectroscopía y radiación nuclear (*Standard Methods, 2023*).

Tabla 13

Contaminantes de Importancia en el Tratamiento del Agua Residual

Contaminantes	Razón de la importancia
Sólidos en suspensión	Los sólidos en suspensión pueden dar lugar al desarrollo de depósitos de fango y de condiciones anaerobias cuando se vierte agua residual sin tratar al entorno acuático.
Materia orgánica biodegradable	Compuesta principalmente por proteínas, carbohidratos, grasas animales, la materia orgánica biodegradable se mide, en la mayoría de las ocasiones, en función de la DBO (demanda bioquímica de oxígeno) y de la DQO (demanda química de oxígeno). Si se descargan al entorno sin tratar su estabilización biológica puede llevar al agotamiento de los recursos naturales de oxígeno y al desarrollo de condiciones sépticas.
Patógenos	Pueden transmitirse enfermedades contagiosas por medio de los organismos patógenos presentes en el agua residual.
Nutrientes	Tanto el nitrógeno como el fósforo, junto con el carbono, son nutrientes esenciales para el crecimiento. Cuando se vierten al entorno acuático, estos nutrientes pueden favorecer el crecimiento de una vida acuática no deseada. Cuando se vierten al terreno en cantidades excesivas, también pueden provocar la contaminación del agua subterránea.

Contaminantes prioritarios	Son compuestos orgánicos o inorgánicos determinados en base a su carcinogenicidad, mutagenicidad, teratogenicidad o toxicidad aguda, conocida o sospechada. Muchos de estos compuestos se hallan presentes en el agua residual.
Materia orgánica refractaria	Esta materia orgánica tiende a resistir los métodos convencionales de tratamiento. Ejemplos típicos son los agentes tensoactivos, los fenoles y los pesticidas agrícolas.
Metales pesados	Los metales pesados son, frecuentemente, añadidos al agua residual en el curso de ciertas actividades comerciales e industriales, y puede ser necesario eliminarlos si se pretende reutilizar el agua residual.
Sólidos inorgánicos disueltos	Los constituyentes inorgánicos tales como el calcio, sodio y los sulfatos se añaden al agua de suministro como consecuencia del uso del agua, y es posible que se deban eliminar si se va a reutilizar el agua residual.

Nota: Adaptado “Ingeniería de aguas residuales”(p.56),por Metcalf & Eddy, 2013.

- Unidades de medida de los parámetros físicos y químicos

Según Metcalf & Eddy, 2013; los resultados de los análisis de muestras de agua residual se expresan en unidades de medida tanto físicas como químicas. En la Tabla 13 se indican las unidades de medida más frecuentes. Las mediciones de parámetros químicos suelen expresarse en unidades físicas, miligramo por litro (mg/L) o gramo por metro cúbico (g/m³). Las concentraciones de trazadores se expresan normalmente en microgramos por litro (g/L). Para los sistemas diluidos en los que un litro pesa aproximadamente un kilogramo, como es el caso tanto de aguas naturales como aguas residuales, se pueden sustituir las unidades mg/L o g/m³ por la unidad partes por millón (ppm), que representa la relación en peso. Los gases disueltos se consideran como constituyentes químicos, y se miden en mg/L o g/m³. Los gases desprendidos como subproducto del tratamiento de las aguas residuales, tales como el metano y el nitrógeno (descomposición anaerobia), se miden en litros o metros cúbicos. Los resultados de los ensayos, y los parámetros como temperatura, olor, ion hidrógeno y organismos biológicos, se expresan en unidades diferentes.

Tabla 14*Unidades Empleadas para los Resultados de los Análisis*

Magnitud	Determinación	Unidades
Análisis Físicos		
Densidad	$\frac{\text{Masa de la disolución}}{\text{Unidad de Volumen}}$	kg/m ³
Porcentaje en volumen	$\frac{\text{Volumen de soluto} \times 100}{\text{Volumen total de disolución}}$	% v/v
Porcentaje en masa	$\frac{\text{Masa de soluto} \times 100}{\text{Masa total de disolución}}$	% m/m
Relación de volumen	$\frac{\text{Mililitro}}{\text{Litro}}$	mL/L
Masa por unidad de volumen	$\frac{\text{Microgramos}}{\text{Litro de disolución}}$	µg/L
	$\frac{\text{Miligramos}}{\text{Litro de disolución}}$	mg/L
Relación de masa	$\frac{\text{Gramos}}{\text{Metro cúbico de disolución}}$	g/m ³
	$\frac{\text{Miligramos}}{10^6 \text{ miligramo}}$	ppm
Análisis químico		
Molalidad	$\frac{\text{Moles de soluto}}{\text{kilogramo de disolvente}}$	mol/kg
Molaridad	$\frac{\text{Moles de soluto}}{\text{Litro de disolución}}$	mol/L
Normalidad	$\frac{\text{Equivalentes de soluto}}{\text{Litro de disolución}}$	equiv/L
	$\frac{\text{Miliequivalentes de soluto}}{\text{Litro de disolución}}$	meq/L

Nota: Adaptado “Ingeniería de aguas residuales”(p.57),por Metcalf & Eddy, 2013.

2.2.5 Tratamiento de Oxidación

2.2.5.1 Oxidación Química

a) Incineración: Consiste en la oxidación térmica completa del residuo en fase gas y a temperatura elevada. Es un método útil únicamente cuando se trata de pequeñas cantidades de aguas con una concentración elevada de contaminantes oxidables. En caso

contrario, los costes de operación asociados a la necesidad de utilizar un combustible auxiliar, se vuelven excesivos. Aunque los costes de inmovilizado son elevados, la tecnología está bien establecida. Puede ser una buena elección tecnológica cuando se utiliza en combinación con una operación de separación previa que concentre el contaminante, por ejemplo, una ultrafiltración (Rodríguez et al.2006).

• **Oxidación húmeda no catalítica (WAO):** La oxidación húmeda es un proceso clásico de tratamiento que se ha venido aplicando desde hace más de cincuenta años y en el cual la materia orgánica, soluble o en suspensión, se oxida con oxígeno disuelto procedente de aire o corrientes gaseosas enriquecidas en oxígeno. La química del proceso transcurre por vía radicalaria, de forma que son los radicales formados a partir del oxígeno, los que reaccionan con la materia orgánica. Por este motivo, la oxidación húmeda, tanto catalítica como no catalítica, se incluye a veces entre los procesos avanzados de oxidación, cuya característica definitoria es la implicación de radicales hidroxilo como agentes oxidantes indirectos. Aquí se ha reservado, sin embargo, la denominación de avanzados para los procesos basados específicamente en la promoción de radicales hidroxilo. Los demás, que pueden incluir hidroxilos entre las especies oxidantes, pero cuyo diseño no está determinado por su generación, se han clasificado como procesos de oxidación directa. Una característica esencial de los procesos de oxidación húmeda no catalítica es la formación de ácidos carboxílicos como productos finales no mineralizables y que esencialmente corresponden a los ácidos fórmico, acético y oxálico. La proporción de estos compuestos es variable en función de los parámetros de diseño del proceso, pero típicamente representan el 5-10 % del carbono orgánico total (Total Organic Carbon = TOC) del efluente de partida. Puesto que se trata de compuestos biodegradables, es posible limitar la extensión de la oxidación teniendo en cuenta que se trata de compuestos que no presentan problemas de toxicidad en depuradoras. Si, por el contrario, las concentraciones de contaminante son bajas y no es posible utilizar la oxidación como pretratamiento antes de un sistema de depuración biológica, es necesario utilizar catalizadores con el fin de evitar temperaturas de proceso prohibitivas. La temperatura de tratamiento de los procesos de oxidación húmeda es función de la naturaleza de los compuestos que se deben degradar, pero en general oscila entre 150 y 350°C con una presión de operación entre 20 y 200 bar dependiendo esencialmente de la temperatura. El

rendimiento de la oxidación, medido como porcentaje de demanda química de oxígeno, oscila entre el 75 y el 90 % (Rodríguez et al.2006).

La oxidación húmeda se puede aplicar en corrientes cuyo contenido en materia oxidable oscile entre 500 y 15000 mg/L de demanda química de oxígeno y se vuelve autotérmica para valores de demanda química de oxígeno superiores a 20 g/L (Rodríguez et al.2006).

b) Oxidación húmeda catalítica (CWAO): En situaciones donde se necesite lograr una alta tasa de mineralización, el proceso de oxidación húmeda puede ser realizado en presencia de catalizadores para acelerar la degradación de compuestos orgánicos. La oxidación húmeda catalítica (CWAO) es capaz de mineralizar casi todos los contaminantes orgánicos, así como compuestos inorgánicos como cianuros y amoníaco. Al igual que la oxidación húmeda, puede utilizar aire u oxígeno como agente oxidante. El uso de catalizadores permite operar a temperaturas y presiones más moderadas que en la oxidación húmeda no catalítica, mejorando así el balance económico del proceso. Los catalizadores típicamente son metales u óxidos metálicos soportados, aunque también se han investigado otras sustancias en sistemas homogéneos y heterogéneos. La CWAO permite la oxidación de compuestos orgánicos en agua a presiones moderadas (generalmente entre 15 y 50 bar) y temperaturas entre 120°C y 250°C, dependiendo del catalizador utilizado. La eficacia del proceso en la reducción de DQO puede variar entre el 75 % y el 99 %, permitiendo altos grados de oxidación o menores tiempos de residencia a eficacias reducidas, dependiendo del contaminante a eliminar. La CWAO es especialmente adecuada para efluentes concentrados (demandas químicas de oxígeno superiores a 10 000 mg/L, donde el proceso no requiere aporte externo de energía) o que contengan compuestos no biodegradables o tóxicos para los sistemas biológicos de tratamiento. (Rodríguez et al.2006).

El proceso no es eficaz económicamente frente a los procesos avanzados de oxidación, en el caso de efluentes con baja carga orgánica (demandas químicas de oxígeno menores que 5 000 mg/L) (Rodríguez et al.2006).

c) Oxidación húmeda supercrítica (SWAO): En los procesos de oxidación húmeda mencionados hasta ahora, el oxidante primario debe atravesar la interfase gas-líquido.

Esto impone limitaciones al diseño de reactores, puesto que debe de tenerse en cuenta una posible limitación a la velocidad de transferencia de materia. Si se rebasa el punto crítico del agua (647,096K, y 22,064 MPa), desaparece la diferencia entre fases a la vez que los coeficientes de transporte alcanzan valores elevados, lo que permite operar con velocidades de oxidación elevadas. De esta forma, los compuestos orgánicos tóxicos y refractarios a la oxidación pueden degradarse con gran eficacia a temperaturas comprendidas entre 400 y 650°C con tiempos de residencia muy pequeños (30-90s). Además, el proceso permite tratar efluentes con contaminantes muy diversos, incluyendo metales, que son transformados en sus óxidos. Por otro lado, la presión que requiere la oxidación supercrítica es muy elevada y en las condiciones de presión y temperatura de la operación existe una fuerte incidencia de la corrosión debida a la oxidación de halógenos, fósforo y azufre, factores ambos que fuerzan a utilizar materiales costosos. Finalmente, en agua supercrítica la solubilidad de muchos compuestos inorgánicos es pequeña, por lo que las sales tienden a depositarse en el reactor y en las conducciones, ocasionando problemas de erosión y taponamiento (Rodríguez et al.2006).

En la Tabla 14, Rodríguez et al.2006, resume alguna de las características más importantes de los procesos de oxidación directa con énfasis especial en sus limitaciones. De nuevo es conveniente indicar, que la diferencia entre procesos de oxidación directa y procesos avanzados de oxidación es bastante arbitraria y que se ha reservado la denominación de “avanzados” para los procesos basados en la generación de radicales hidroxilo en su versión más restrictiva.

Tabla 15*Condiciones y Limitaciones de los Procesos de Oxidación Directa*

Tratamiento	Condiciones	Rendimientos
Incineración	>800°C	>99 %
Limitaciones :Si el poder calorífico es inferior a 3000 kJ/kg (>200 g/L DQO) es necesario utilizar un combustible adicional		
Oxidación húmeda no catalítica	150-350°C, 20-200 bar	75-90 %
Limitaciones: DQO inicial 500 -15 000 mg/L Condiciones muy enérgicas No se alcanza mineralización completa.		
Oxidación húmeda catalítica	120-250°C, 5-25 bar	75-99%
Limitaciones: DQO inicial > 10 000 mg/L . El proceso es muy dependiente del tipo de catalizador. La estabilidad de algunos catalizadores no es satisfactoria.		
Oxidación húmeda supercrítica	400-650°C, > 250 bar	> 99,9 %
Limitaciones: DQO inicial: > 50 g/L DQO. El medio de reacción es corrosivo. La deposición de sales puede bloquear los equipos. Los compuestos que contienen nitrógeno mineralizan con dificultad.		

Nota: Adaptado “Tratamientos avanzados de aguas residuales industriales”(p.49), por Rodríguez et al., 2006.

2.2.5.1 Procesos Oxidación Avanzada (AOP)

Para Rodríguez et al.2006; los procesos de oxidación avanzada (POA) se definen como procesos de oxidación que implican la generación de un número suficiente de grupos hidroxilo para interactuar con compuestos orgánicos del medio ambiente. Este es un grupo de métodos que utilizan el alto poder oxidante de los radicales HO* y que es producido de diferentes maneras. Las combinaciones más comunes son ozono (O₃), peróxido de hidrógeno (H₂O₂), radiación UV y fotocátalisis. La relación completa se muestra en la Tabla 15. Aunque esto puede ser una desventaja durante la producción, es un medio deseable para eliminar contaminantes de las aguas residuales.

Tabla 16*Procesos Avanzados de Oxidación*

Procesos homogéneos:

Sin aporte externo de energía:

- Ozonización en medio alcalino (O_3/OH^-)
- Ozonización con peróxido de hidrógeno (O_3/H_2O_2) y ($O_3/H_2O_2/OH^-$)
- Peróxido de hidrógeno y catalizador (H_2O_2/Fe^{2+})

Con aporte externo de energía:

- Energía procedente de radiación ultravioleta (UV)
 - Ozonización y radiación ultravioleta (O_3/UV)
 - Peróxido de hidrógeno y radiación ultravioleta (H_2O_2/UV)
 - Ozono, peróxido de hidrógeno y radiación ultravioleta ($O_3/H_2O_2/UV$) Foto-Fenton ($Fe^{2+}/H_2O_2/UV$)
- Energía procedente de ultrasonidos (US)
 - Ozonización y ultrasonidos (O_3/US)
 - Peróxido de hidrógeno y ultrasonidos (H_2O_2/US)
- Electroquímica
 - Oxidación electroquímica
 - Oxidación anódica
 - Electro-Fenton

Procesos heterogéneos:

- Ozonización catalítica ($O_3/Cat.$)
- Ozonización fotocatalítica ($O_3/TiO_2/UV$)
- Fotocatálisis heterogénea ($H_2O_2/TiO_2/UV$)

Nota: Adaptado “Tratamientos avanzados de aguas residuales industriales”(p.50), por Rodríguez et al., 2006.

Por otro lado, Rodríguez et al.2006; explica de que se trata de procesos que utilizan reactivos costosos tales como el agua oxigenada o el ozono, por lo que su utilización debe restringirse a situaciones en las que otros procesos más baratos, como los biológicos, no sean posibles. Su máximo potencial se explota cuando se consiguen integrar con otros tratamientos, como la adsorción o los tratamientos biológicos, a fin de

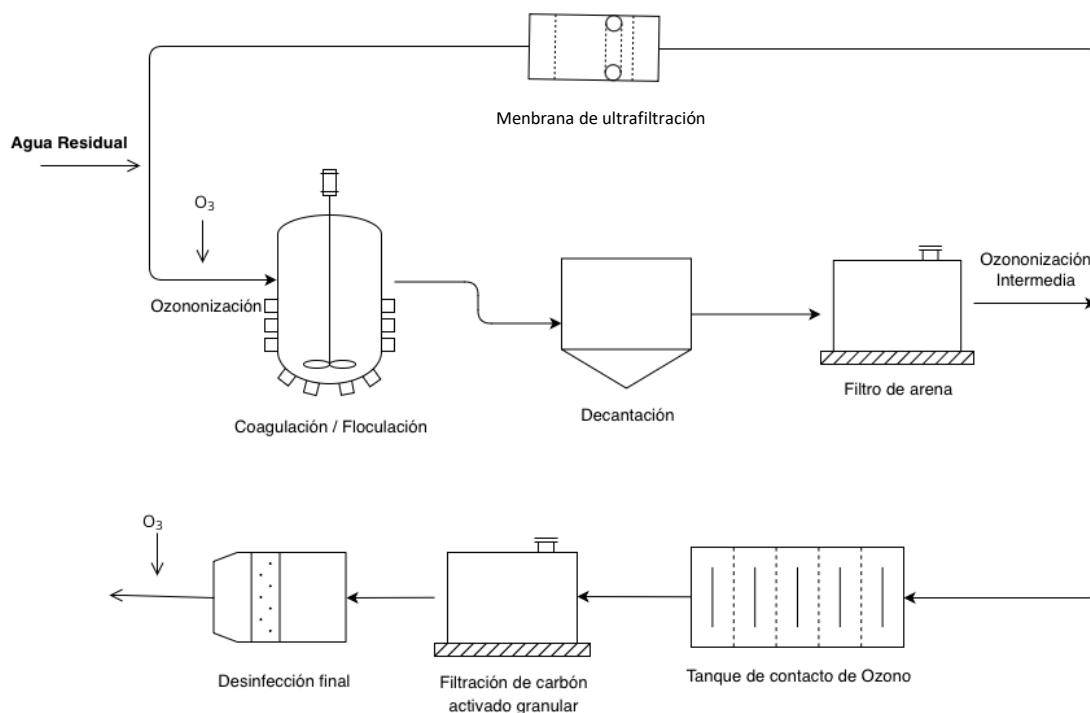
conseguir la máxima economía de oxidante. Una característica común a todos los procesos avanzados de oxidación es su capacidad para tratar efluentes con concentraciones menores que 5 g/L de demanda química de oxígeno.

Para mayores concentraciones, el elevado consumo de agente oxidante y la mejora en el balance energético del proceso, hacen preferibles las técnicas de oxidación directa, tales como la oxidación húmeda (Rodríguez et al.2006).

a) **Ozonización en medio alcalino:** El ozono es inestable en agua y tiende a descomponerse mediante una serie de reacciones que generan radicales, incluyendo el radical hidroxilo. A pH elevados, la velocidad de autodescomposición del ozono en agua aumenta, así como la velocidad de generación de estos radicales. En estas condiciones, la oxidación de los compuestos orgánicos en el efluente ocurre a través de dos mecanismos: una vía directa, en la que el ozono disuelto reacciona con la molécula orgánica, y una vía indirecta, en la que los radicales hidroxilo actúan como oxidantes. La vía indirecta se beneficia de la alta velocidad de reacción entre moléculas orgánicas y radicales hidroxilos, que es típicamente entre 10^6 y 10^9 veces mayor que la reacción directa con ozono molecular. La principal desventaja de este proceso, como con todos los que utilizan ozono, es el costo de su generación mediante descarga eléctrica. La energía necesaria para sintetizar ozono a partir del aire varía entre 22 y 33 kWh/kg de O_3 , mientras que a partir de oxígeno se reduce a 12-18 kWh/kg de O_3 , sin incluir el costo del oxígeno. Otra desventaja es que los aniones carbonato y bicarbonato, comunes en muchas aguas residuales y naturales, neutralizan los radicales al reaccionar con los hidroxilos del medio para formar radicales carbonato o bicarbonato, que no participan en la mineralización de materia orgánica (Rodríguez et al.2006).

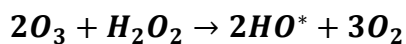
Figura 6

Proceso General Utilizado en el Tratamiento de Aguas con Ozono



Nota: Adaptado de Deininger, R. 1998.

b) Ozonización con peróxido de hidrógeno (O_3/H_2O_2) y ($O_3/H_2O_2/OH^\cdot$): La adición de peróxido de hidrógeno combinado con el ozono provoca la iniciación de un ciclo de descomposición que resulta en la formación de un mol de radicales hidroxilo por cada mol de ozono que se descompone (Hoigné, 1982):



La ozonización con peróxido de hidrógeno, al igual que la ozonización alcalina, se basan principalmente en la degradación indirecta por vía radicalaria. Los resultados indican que el óptimo de operación en la degradación de la materia orgánica tiene lugar para una dosis de peróxido de hidrógeno de entre un tercio y la mitad en peso respecto al ozono y debe ser precisada mediante datos experimentales para cada aplicación en concreto (Rodríguez et al.2006).

c) **Métodos ozono-ultravioleta: O₃/UV, H₂O₂/UV y O₃/H₂O₂/UV:** Rodríguez et al.2006; concluye que la foto-oxidación directa con radiación UV constituye una tecnología para degradar contaminantes orgánicos, siempre y cuando estos absorban la radiación UV con una especificidad razonable en comparación con otros compuestos presentes en el medio. Sin embargo, la mayoría de los contaminantes orgánicos tienen una baja absorbancia y las reacciones fotoquímicas resultantes suelen producir mezclas complejas de productos intermedios en lugar de mineralizar completamente el contaminante. La velocidad de las reacciones fotoquímicas con materia orgánica puede aumentarse añadiendo ozono, peróxido de hidrógeno o una combinación de ambos al medio, ya que estos compuestos absorben la luz ultravioleta y se descomponen, generando radicales. Tanto la fotólisis de ozono (por intermedio del singlete oxígeno) como del peróxido de hidrógeno originan radicales hidroxilos (Rodríguez et al.2006):

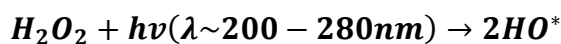
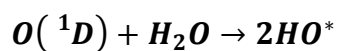
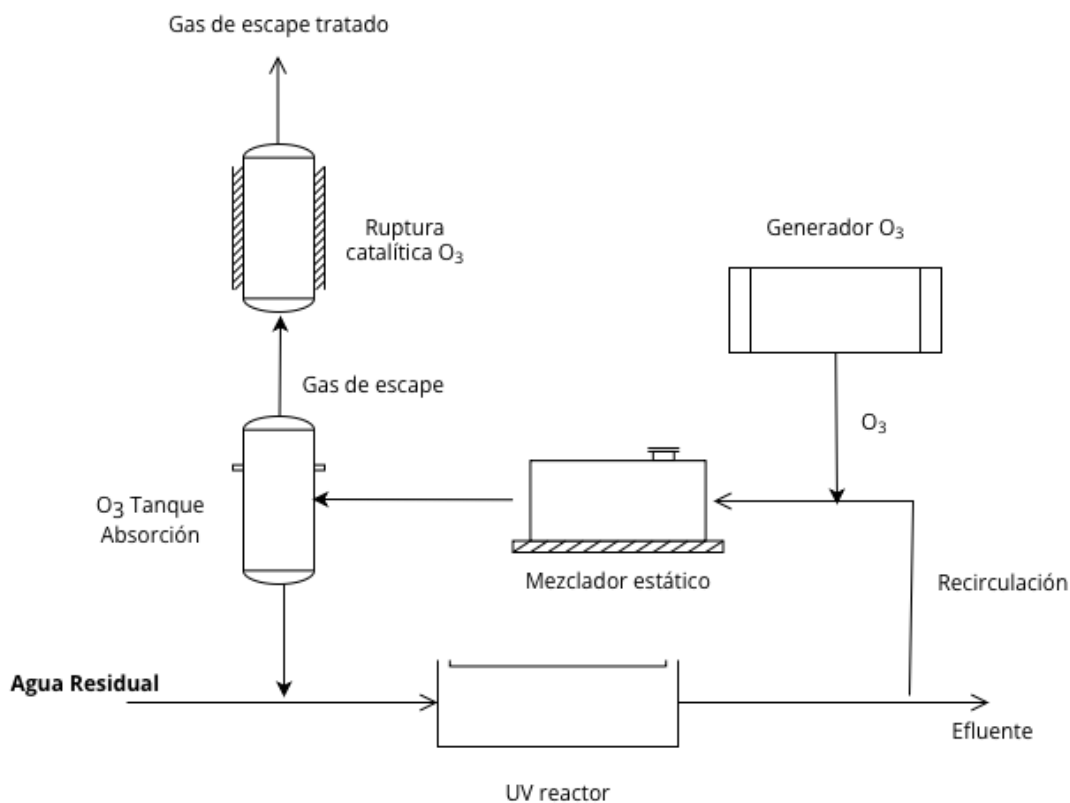


Figura 7

Configuración del Sistema UV/O₃ de WEDECO para Agua Residual Contaminada con COV Clorados



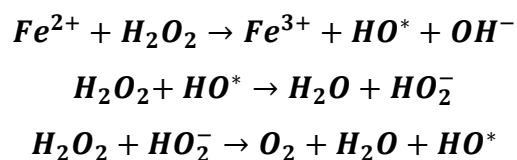
Nota: Adaptada de US EPA 1998.

Asimismo, Rodríguez et al.2006; define si el proceso es eficiente solo cuando el compuesto orgánico que se desea degradar también absorbe radiación ultravioleta, con velocidades de degradación significativamente menores en caso contrario. Al usar conjuntamente ozono y peróxido de hidrógeno, la radiación debe tener una longitud de onda de alrededor de 250 nm: para la radiación UV de 253,7 nm, el coeficiente de extinción molar del ozono es $3\,300\text{ L mol}^{-1}\text{ cm}^{-1}$, mucho mayor que el del peróxido de hidrógeno, que es $18.6\text{ L mol}^{-1}\text{ cm}^{-1}$. Por lo tanto, el proceso de oxidación en presencia de ozono y radiación UV comienza con la fotólisis del ozono, mientras que el peróxido de hidrógeno genera hidroxilos mediante reacción directa con el ozono disuelto, acelerando su descomposición. La combinación de peróxido de hidrógeno y ozono con radiación UV resulta en una mayor velocidad de degradación de ciertos compuestos orgánicos

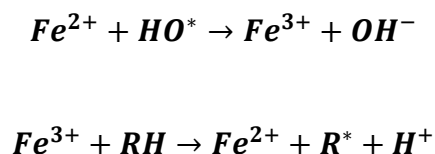
refractarios, aunque los costos de producción de radiación y reactivos son elevados, y es necesario establecer un dosaje óptimo de peróxido de hidrógeno para cada caso, como en el sistema O_3/H_2O_2 .

d) **Peróxido de hidrógeno y catalizador (H_2O_2/Fe^{2+}):** La interacción entre el peróxido de hidrógeno y las sales de hierro se conoce desde el descubrimiento del reactivo de Fenton por H.J.H. Fenton en 1894. Se trata de un sistema catalítico homogéneo en el cual una sal de hierro, habitualmente $FeSO_4$, genera radicales gracias a la interacción del peróxido de hidrógeno con la forma reducida, Fe(II) (Rodríguez et al.2006).

El mecanismo es el siguiente:



La interacción con la forma reducida del hierro produce finalmente radicales hidroxilos, aunque estos también pueden participar en la oxidación directa del hierro. La regeneración de la forma reducida del hierro generalmente ocurre a través de la interacción con un compuesto orgánico presente en el medio (Rodríguez et al.2006):



La velocidad de generación de radicales en el proceso está determinada por la reacción del Fe (II) con el peróxido de hidrógeno, por lo que la concentración de hierro limita la velocidad de oxidación. Las proporciones típicas de $Fe:H_2O_2$ se encuentran en el rango de 1-10 %, ya que concentraciones menores de catalizador resultan en una velocidad de reacción demasiado baja. Además, los productos de reacción, como los ácidos orgánicos, pueden secuestrar el hierro y sacarlo del ciclo catalítico. La técnica también está limitada por el pH del medio, con un pH óptimo de 3 a 6. En medios básicos,

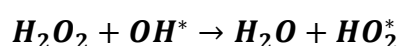
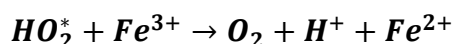
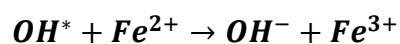
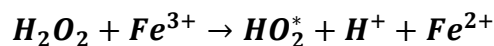
la eficacia disminuye debido a la transición del hierro de su forma ferrosa hidratada a especies férricas coloidales, las cuales descomponen el peróxido de hidrógeno en oxígeno y agua sin formar radicales. Aunque se están investigando formas de extender el rango de pH, no existen aplicaciones comerciales para medios básicos. A pH inferior a 3, la eficacia es menor, pero la economía del proceso se ve afectada, y en corrientes concentradas es necesario controlar el pH constantemente, lo que incrementa el costo de los reactivos, ya que el medio tiende a acidificarse con el tiempo. (Rodríguez et al.2006).

El reactivo de Fenton es eficaz esencialmente como pretratamiento cuando la carga orgánica del agua es superior a 500 mg/L de demanda química de oxígeno. (En corrientes más diluidas, la selectividad disminuye.) En el efluente pretratado, los compuestos orgánicos se transforman en fragmentos ácidos particularmente adecuados para un biotratamiento. La presencia de hierro permite la floculación con cal: Utilizando una combinación de Fenton y floculación con dosis entre 50-75 de la estequiométrica de H_2O_2 es posible reducir la demanda química de oxígeno hasta en un 80 % de la inicial (Rodríguez et al.2006).

Proceso electrocinético de Fenton

El proceso electrocinético Fenton es una tecnología integrada que incorpora la oxidación química mediante el proceso Fenton con el tratamiento electrocinético de suelo. La aplicabilidad del H_2O_2 catalizado por hierro como agente oxidante fue reportada por primera vez por H. J. H. Fenton (Bonini et al.,2005). Se han documentado varios trabajos sobre el uso del proceso de Fenton para la oxidación de compuestos orgánicos, incluidos contaminantes recalcitrantes (Laurichesse y Avérous, 2014 - Serrano-Ruiz et al.2011). El uso del proceso de Fenton también se ve favorecido por el hecho de que los productos de la reacción final son ambientalmente benignos.

Las reacciones principales en el proceso de Fenton son las siguientes:



En presencia de sustrato orgánico, las reacciones incluyen las siguientes:



Por tanto, la oxidación de Fenton es un mecanismo eficaz para la descomposición de compuestos orgánicos tóxicos (Kamm, 2007; Geboers et al., 2011). Sin embargo, cuando se aplica solo, el proceso de Fenton no logra tratar suelos poco permeables. Esto se debe a que el contacto efectivo entre el oxidante y el contaminante es un requisito principal para un tratamiento exitoso, lo cual no es posible en matrices de baja permeabilidad. Este inconveniente puede superarse integrando la electrocinética con el proceso de Fenton. En el proceso electrocinético Fenton, el peróxido de hidrógeno pasa a través de un suelo poco permeable desde el ánodo al cátodo mediante electroósmosis y descomponen los contaminantes del suelo en presencia de hierro presente en el suelo. El atractivo de esta tecnología acoplada es que aborda una de las principales deficiencias de la remediación electrocinética al eliminar, así como destruir/degradar los contaminantes, evitando así un tratamiento o eliminación adicional del flujo de residuos.

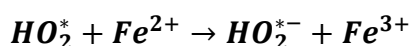
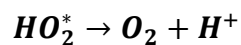
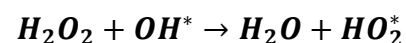
La aplicación de la tecnología electrocinética Fenton para la remediación de suelos contaminados fue reportada por primera vez por Yang y Long. En su estudio, una marga arenosa saturada que contenía fenol como contaminante fue tratada por Fenton electrocinético incorporando un lecho reactivo permeable que contenía polvo de chatarra

en el lecho del suelo y se extrajo H_2O_2 del depósito de ánodo. A esto le siguió un estudio más elaborado sobre el rendimiento de los sistemas electrocinéticos.

Tecnología Fenton para la oxidación de TCE en dos tipos de suelo (Rosatella et al.2011). Los resultados se interpretaron para dos tipos diferentes de electrodos y la forma y tipo de catalizador de hierro utilizados. Estos estudios formaron la base de varias investigaciones sucesivas basadas en el proceso electrocinético de Fenton para la remediación de suelos por parte de diferentes grupos de investigación.

Los radicales hidroxilos generados en la reacción de Fenton se generan en soluciones acuosas y son capaces de oxidar los contaminantes en solución acuosa (Van Putten et al.2013). Por lo tanto, no pueden atacar los contaminantes absorbidos por el suelo. Sin embargo, se ha documentado que la oxidación de los contaminantes absorbidos en el subsuelo en realidad puede promoverse mediante el uso de una alta concentración de H_2O_2 (>2 %) [58,67].

Esto se debe a que el uso de altas concentraciones de H_2O_2 favorece la generación de especies altamente reactivas distintas del radical hidroxilo como el hidropéroxido radicales (HO_2^*), aniones superóxido (O_2^*) y aniones hidropéroxido (HO_2^{*-}) que son capaces de degradar incluso los compuestos más recalcitrantes. Libras en forma sorbida (Ferrarese et al. 2008 y Rivas 2006).



Los estudios de Ferrarese et al. 2008 y Rivas, 2006; sugieren que la generación de radicales no hidroxilo como los radicales hidropéroxido (HO_2^*), aniones superóxido (O_2^*) y aniones hidropéroxido (HO_2^{*-}) es responsable de las reacciones químicas agresivas que finalmente conducen a la oxidación de los contaminantes absorbidos.

Otra explicación es que una alta concentración de H_2O_2 primero desorbe los contaminantes de la superficie del suelo y luego los oxida. Kawahara et al.1995;

propusieron que una alta concentración de H_2O_2 tiene la capacidad de extraer *hidrocarburos aromáticos policíclicos (PAHs)* de las arcillas. El mecanismo que han explicado es que el intercambio de electrones por el hierro estructural en el mineral arcilloso da como resultado el hinchamiento de las capas de arcilla, y este hinchamiento aumenta el espacio entre las capas y libera los contaminantes absorbidos. Todos estos estudios han establecido la eficacia de altas concentraciones de H_2O_2 en la remediación de suelos contaminados con contaminantes absorbidos. Además, estos estudios revelan que los contaminantes hidrofóbicos absorbidos pueden tratarse sin ningún agente potenciador si se utilizan altas concentraciones de H_2O_2 .

La mayoría de los estudios sobre tratamientos electrocinéticos Fenton se centraron en la remediación de compuestos orgánicos solubles y mezclas de HAP relativamente insolubles. Los estudios sobre la remediación de suelos contaminados con OCP como el HCB mediante tratamiento de oxidación electrocinética son limitados.

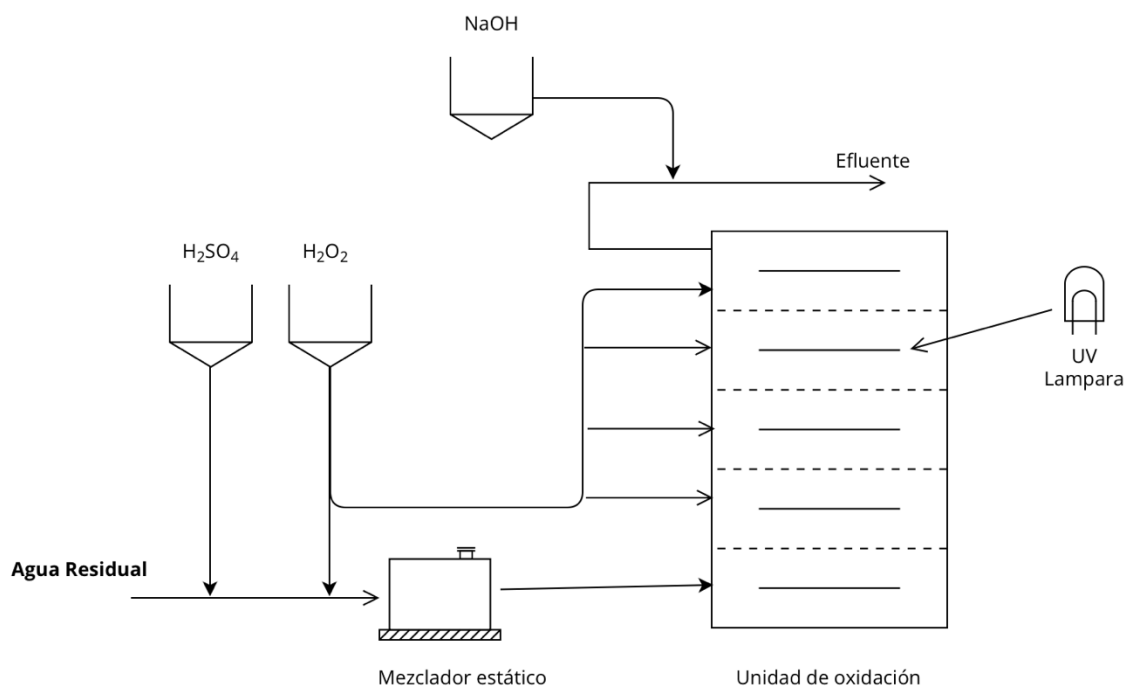
El éxito y el rendimiento de dichos procesos in situ dependen de ciertos factores clave que incluyen la selección de oxidantes, la carga de oxidantes y la entrega de oxidantes. Se han realizado numerosos estudios sobre la carga de oxidante o, en otros términos, la dosificación del reactivo de Fenton para la oxidación de una variedad de contaminantes del suelo como fenantreno, pireno, criseno, etc. (Rivas, 2006). Por otro lado, se ha prestado poca atención a los estudios sobre el suministro de oxidantes, especialmente durante el tratamiento electrocinético del suelo. La entrega de oxidante es importante porque determina el grado en que el suelo contaminado entra en contacto con el oxidante. Por lo tanto, el oxidante debe entregarse al suelo de tal manera que facilite la interacción eficaz entre el suelo y el oxidante. También fue señalado por Isosaari et al. 2007, que se observaron tasas de oxidación más altas cerca de los puntos de inyección de oxidación en sus experimentos. Esto enfatiza la importancia de la entrega de oxidante durante estos procesos.

Los impactos ambientales del tratamiento Fenton, según lo discutido por Yap et al. 2011; muestran lo importante que es restaurar las propiedades del suelo en el suelo posttratado para sostener las actividades microbianas y la vegetación del suelo. Esto se debe a que los suelos tratados electrocinéticamente en la mayoría de los casos dan como

resultado un suelo ácido que puede provocar la disolución del metal y también la falta de disponibilidad de nutrientes para las plantas a un pH bajo (Sirguy et al.2008). Se ha estudiado la electrocinética no uniforme inducida por la inversión de la polaridad del electrodo para mantener el pH del suelo y también para mejorar la movilidad de los contaminantes orgánicos (Luo et al.2005). Por lo tanto, se puede adoptar dicha inversión de polaridad para mejorar el proceso electrocinético de Fenton al propagar el oxidante a través de la matriz del suelo de una mejor manera y también dar como resultado un pH más uniforme en toda la sección del suelo.

e) **Foto-Fenton ($\text{Fe}^{2+}/\text{H}_2\text{O}_2/\text{UV}$):** El proceso Foto-Fenton es un tratamiento fotocatalítico homogéneo que genera radicales hidroxilos utilizando el reactivo de Fenton (H_2O_2 y Fe^{2+}). La irradiación con luz ultravioleta-visible (longitudes de onda superiores a 300 nm) acelera significativamente la velocidad de degradación de los contaminantes orgánicos en sistemas Fenton. (Rodríguez et al., 2006).

En estas condiciones, la fotólisis de complejos Fe(III), permite la regeneración de la forma reducida del catalizador, favoreciendo el ciclo catalítico que se indicó en el epígrafe anterior (Rodríguez et al., 2006).

Figura 8*Configuración de un Sistema UV/H₂O₂*

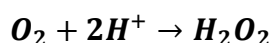
Nota: Adaptado de Deininger, R. 1998.

f) **Oxidación avanzada con ultrasonidos (O₃/US y H₂O₂/US):** Recientemente, se ha descrito el uso de ultrasonidos como fuente de energía para la degradación de compuestos orgánicos en medio acuoso. Los ultrasonidos generan burbujas de cavitación que crecen durante los ciclos de compresión-descompresión hasta alcanzar un tamaño crítico desde el cual implotan transformando la energía en calor. En el interior de las burbujas de cavitación, las condiciones de temperatura y presión pueden alcanzar los 5 000°C y 1 000 bar, condiciones en las cuales incluso las moléculas de agua se descomponen homolíticamente generando radicales HO* y H*. Los radicales formados pueden recombinarse de la misma forma o reaccionar con sustancias presentes en el medio de reacción, originando su degradación en el caso de tratarse de moléculas orgánicas complejas. La eficacia de los ultrasonidos es mayor cuanto más elevada sea su frecuencia. En cualquier caso, los radicales pueden escapar de las burbujas de cavitación, difundiendo hacia el seno de la fase y favoreciendo la extensión de la oxidación. Obviamente, la generación de radicales se facilita si en el medio existen moléculas que se rompan con

facilidad, tales como ozono o peróxido de hidrógeno, que, por otro lado, son los precursores habituales de radicales hidroxilos en los procesos avanzados de oxidación. Sin embargo, la generación de ultrasonidos es costosa y el método está aún en sus primeras fases de desarrollo, lejos de una posible aplicación comercial (Rodríguez et al. 2006).

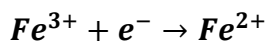
g) **Métodos electroquímicos:** Los procesos electroquímicos para la oxidación de contaminantes orgánicos se basan en la utilización de energía eléctrica para romper los enlaces de las moléculas. Se clasifican como procesos avanzados de oxidación porque los electrones se transfieren al compuesto orgánico en último extremo mediante la intervención de radicales hidroxilo. (Aunque la oxidación electroquímica de compuestos orgánicos está favorecida termodinámicamente con respecto a la oxidación del agua, esta es mucho más rápida debido a su mayor concentración.) La principal ventaja de este tipo de procesos es evitar la introducción de reactivos en disolución. En la oxidación anódica, los compuestos orgánicos se oxidan mediante los radicales hidroxilo generados en un ánodo a partir de la oxidación de moléculas de agua (Rodríguez et al. 2006).

En la oxidación electroquímica, los compuestos orgánicos reaccionan con oxidantes moleculares generados electroquímicamente, como el peróxido de hidrógeno, que se produce en cátodos, por ejemplo de grafito, a partir del oxígeno disuelto en el medio (Rodríguez et al., 2006):



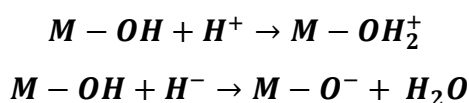
La capacidad oxidativa del peróxido de hidrógeno puede incrementarse en medio ácido con la introducción de una sal de Fe (II) de una forma similar a la que se describió al tratar el reactivo de Fenton. En este caso, además de las vías ya descritas para la regeneración del catalizador a partir del Fe(III), se incluye la reducción catódica directa. Este proceso se conoce como Electro-Fenton y, cuando se combina con radiación ultravioleta, se denomina Foto-Electro-Fenton. El ánodo utilizado generalmente es de

Pb/PbO₂ o de platino. Una desventaja principal de estos procesos es su alto costo en comparación con otros métodos de oxidación avanzada. (Rodríguez et al. 2006).



h) Ozonización catalítica (O₃/Cat.): La catálisis heterogénea, utilizada como un método de oxidación avanzada, presenta la ventaja de facilitar la separación del producto en comparación con los sistemas catalíticos homogéneos, como el proceso Fenton. Los principales catalizadores que se utilizan en ozonización son los óxidos de metales de transición (MnO₂, TiO₂, Al₂O₃), metales u óxidos soportados (Cu/Al₂O₃, TiO₂/Al₂O₃), carbón activado granular (GAC) y sistemas mesoporosos, como los silicatos MCM o SBA. La actividad catalítica está estrechamente ligada a la capacidad de disociación del ozono disuelto y la consiguiente formación de radicales hidroxilo. No obstante, el papel de los catalizadores sólidos es multifacético, y los resultados experimentales indican la coexistencia de diversos mecanismos de ozonización. La eficacia de la ozonización depende principalmente de las propiedades físicas y químicas de la superficie del catalizador y de su interacción con las especies presentes en la solución, las cuales están influenciadas en gran medida por el pH del medio. Las propiedades físicas clave incluyen la superficie específica, la distribución del tamaño de poro y las propiedades mecánicas, generalmente determinadas por el soporte del catalizador. Por otro lado, las propiedades químicas se derivan de la existencia de centros activos en la superficie, que son principalmente sitios ácidos de Lewis o Brönsted. La mayoría de los catalizadores de ozonización actúan como sustancias anfóteras en entornos acuosos, lo que les permite intercambiar cationes o aniones (Rodríguez et al. 2006).

Por ejemplo, un centro activo Brönsted puede encontrarse cargado positiva o negativamente en función del pH del medio (Rodríguez et al. 2006):



La superficie, por tanto, se encontrará cargada positiva o negativamente en función del pH, lo que afecta a sus propiedades químicas en aspectos fundamentales como la posibilidad de inhibición de la reacción por competencia con especies cargadas presentes en el medio. Cuando se aplica ozonización con carbón activado o catalizadores respaldados en carbón activado, la conexión física entre el contaminante y la superficie potencia la eficiencia de la ozonización en sistemas que contienen contaminantes complejos y diluidos, como los pesticidas. Los resultados indican que la reducción de la demanda química de oxígeno utilizando ozono en presencia de catalizadores es más eficaz que la que tiene lugar mediante ozono alcalino, permitiendo incluso la completa mineralización de los ácidos orgánicos y otros compuestos resistentes a los tratamientos $O_3/H_2O_2/OH^-$ (Rodríguez et al. 2006).

i) **Procesos fotocatalíticos ($O_3/TiO_2/UV$ y $H_2O_2/TiO_2/UV$):** La oxidación fotocatalítica se fundamenta en la excitación fotoquímica de un semiconductor sólido debido a la absorción de radiación electromagnética, generalmente en el rango del ultravioleta cercano. Esta radiación genera la excitación de electrones en la banda de valencia del sólido, creando huecos con un potencial de oxidación muy alto. Estos huecos no solo oxidan los compuestos orgánicos adsorbidos, sino que también pueden descomponer el agua para formar radicales hidroxilos, que a su vez participan en la degradación de la materia orgánica. El fotocatalizador principal es el dióxido de titanio, en sus formas de rutilo y anatasa. El dióxido de titanio puede activarse con radiación ultravioleta hasta 380 nm, lo que permite su uso como fotocatalizador solar, ya que la radiación solar comienza en longitudes de onda de alrededor de 300 nm. Aproximadamente el 5 % de la radiación solar total podría aprovecharse de esta manera. La mayoría de los compuestos orgánicos contaminantes pueden tratarse mediante fotocatalisis, incluso moléculas cloradas como clorofenoles y dioxinas, que se mineralizan hasta CO_2 y HCl. El pH afecta la reacción de fotooxidación de compuestos orgánicos, ya que influye tanto en el estado de la superficie como en la adsorción de los contaminantes (Rodríguez et al. 2006).

Los mejores resultados se obtienen para pH ligeramente ácidos y en combinación con otros generadores de hidroxilos, como el ozono o el peróxido de hidrógeno (Rodríguez et al. 2006).

Tabla 17*Ventajas y Desventajas de los Procesos Avanzados de Oxidación.*

Método	Ventaja	Desventaja
<i>Ozonización en medio alcalino</i>	Tecnología de reactores gas-líquido bien conocida Flexibilidad para tratar distintos caudales y concentraciones Fácilmente automatizable	Baja solubilidad del ozono en agua Posible formación de bromatos Coste de generación de ozono Presencia de carbonatos, bicarbonatos y otros neutralizantes de radicales
<i>Ozonización con peróxido de hidrógeno (O_3/H_2O_2) y ($O_3/H_2O_2/OH^-$)</i>	Eficacia y velocidad de degradación elevadas Puede utilizarse para degradar la práctica totalidad de los compuestos Tecnología conocida y fácil de automatizar	A las del ozono alcalino se añade el coste del peróxido de hidrógeno
<i>ozono-ultravioleta: O_3/UV, H_2O_2/UV y $O_3/H_2O_2/UV$</i>	La velocidad de oxidación puede ser muy alta Reduce el coste de los reactivos	El coste de la generación de radiación UV es elevado La eficacia de la radiación es baja La economía del proceso requiere que el compuesto a degradar absorba en el UV
<i>Peróxido de hidrógeno y catalizador (H_2O_2/Fe^{2+})</i>	Método probado y con amplio desarrollo industrial Eficaz como pretratamiento	Utiliza un catalizador homogéneo Se generan lodos de hidróxido de hierro El pH del medio debe ser controlado en un intervalo estrecho Los ácidos

		orgánicos pueden secuestrar el hierro
<i>Foto-Fenton</i> <i>(Fe²⁺/H₂O₂/UV)</i>	Reduce la generación de lodos respecto al Fenton clásico 56 La velocidad de reacción es alta, lo que reduce el tamaño del reactor	Baja eficacia de la radiación Necesidad de controlar estrechamente el pH
<i>Oxidación avanzada con ultrasonidos (O₃/US y H₂O₂/US)</i>	No requiere radiación y reduce el coste de reactivos Puede combinarse con otros procesos de oxidación	Proceso intensivo en energía Tecnología en sus primeras fases de desarrollo
<i>Electroquímicos (Oxidación anódica, Electro-Fenton)</i>	Mejoran la eficacia de los procesos Evitan o reducen la necesidad de reactivos	Duración de los electrodos Coste elevado debido a la energía
<i>Ozonización catalítica (O₃/Cat.)</i>	Facilidad de separación de los productos Diseño de reactores bien conocido Mejora de la economía del ozono respecto de los sistemas homogéneos Nuevos materiales catalíticos en desarrollo	Baja solubilidad del ozono, que debe transferirse desde el gas 57 Limitaciones a la transferencia de materia en un sistema trifásico
<i>Fotocatalíticos (O₃/TiO₂/UV y H₂O₂/TiO₂/UV)</i>	Posibilidad de utilización de una fuente de energía limpia Se puede combinar con otros procedimientos de oxidación	Eficacia reducida si no se utilizan otros reactivos Bajo rendimiento de la radiación Limitación en la disponibilidad de fotocatalizadores Limitaciones a la transferencia de materia

Nota: Adaptado “Tratamientos avanzados de aguas residuales industriales”(p.55), por Rodríguez et al. 2006.

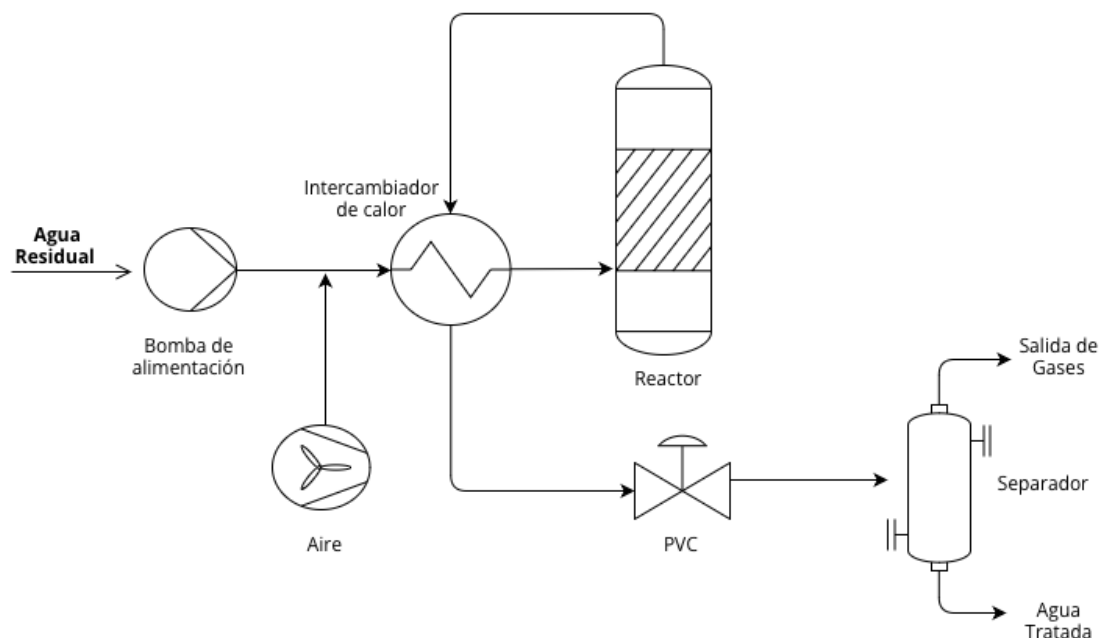
2.2.5.2 Aplicaciones de los métodos de oxidación directa

La tecnología de oxidación húmeda está establecida comercialmente desde hace más de sesenta años, con cientos de unidades que operan bajo diferentes condiciones en muy diversas aplicaciones. El primer desarrollo comercial fue el tratamiento y recuperación de materias primas de los efluentes de plantas papeleras utilizando la tecnología Zimpro (Figura 9). En los años sesenta, se comenzó a aplicar para el acondicionamiento térmico de lodos biológicos, de depuradora y también, para la regeneración del carbón activado utilizado como adsorbente de compuestos orgánicos.

A partir de los años setenta, la aplicación de la oxidación húmeda se centró en efluentes industriales. En la zona de baja temperatura (100-200°C) se produce la oxidación de cianuros y pesticidas no clorados. A media temperatura (200-220°C) se utiliza para la oxidación de las soluciones alcalinas utilizadas como absorbente de gases ácidos (H₂S) en la producción de etileno y en la operación de acondicionamiento térmico de lodos en condiciones autotérmicas (220-260°C). A mayor temperatura se tratan los efluentes industriales con fenoles o cresoles (240- 280°C). En el rango 260-320°C, la oxidación húmeda se utiliza para tratamiento de absorbentes de refinería saturados en diversos compuestos orgánicos y para la mayoría de las aplicaciones para tratamiento de efluentes industriales con disolventes y otros compuestos orgánicos. A 280-320°C, la técnica se utiliza para la destrucción de lodos industriales y municipales. En la actualidad, existen en el mundo un centenar de plantas en operación, la mayoría de las cuales tratan bien efluentes de las industrias química, petroquímica y farmacéutica, bien lodos procedentes del tratamiento biológico de aguas residuales (Rodríguez et al. 2006).

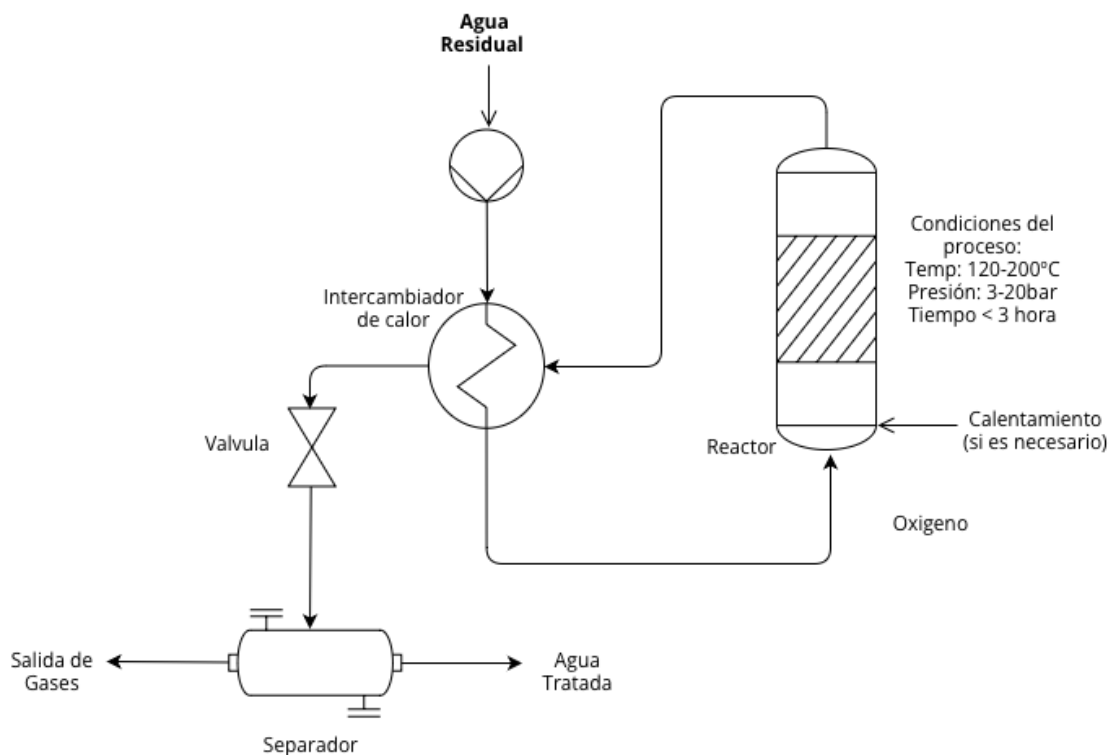
Figura 9

Tecnología ZIMPRO



Nota: Adaptado “Tratamientos avanzados de aguas residuales industriales”(p.58), por Rodríguez et al. 2006.

La aplicación de un catalizador puede mitigar las condiciones rigurosas de la oxidación húmeda. En los procesos industriales predominantes, se emplean principalmente catalizadores homogéneos, lo que plantea el desafío de separarlos y recuperarlos posteriormente. Desde los años ochenta, se han licenciado varios procesos, entre los que destaca el proceso LOPROX (Figura 10) y el Ciba-Geigy. El primer método fue concebido por Bayer y emplea sales de Fe(II) junto con un co-catalizador orgánico, como quinonas, mientras que el proceso desarrollado por Ciba-Geigy utiliza una sal de Cu(II). La Tabla 17 proporciona información detallada sobre estos procedimientos. En Francia se ha desarrollado recientemente un proceso financiado por la Comisión Europea y llamado Athos cuyo objetivo es el acondicionamiento de lodos de depuradora empleando oxidación húmeda con sales de cobre como catalizador homogéneo y que se encuentra en fase de demostración (Rodríguez et al. 2006).

Figura 10*Proceso LOPROX*

Nota: Adaptado “Tratamientos avanzados de aguas residuales industriales”(p.59), por Rodríguez et al. 2006.

La primera patente de un método heterogéneo de oxidación húmeda catalítica data de 1950 (DuPont) y utilizaba un catalizador heterogéneo basado en óxidos de Mn/Zn/Cr para la oxidación de compuestos orgánicos en efluentes industriales a temperaturas en el rango 120-200°C. En los últimos veinte años, Japón ha liderado el desarrollo de los principales métodos comerciales basados en catálisis heterogénea. Estos métodos emplean metales preciosos depositados en óxidos de titanio y circonio, logrando la oxidación de contaminantes orgánicos hasta niveles que permiten su vertido directo o su reutilización. Destacan entre estos el NS-LC, el Osaka Gas y el Kurita. Aunque este último no es estrictamente un método de oxidación de materia orgánica, está diseñado para oxidar el amoníaco presente en aguas amoniacaes a N_2 y N_2O utilizando nitritos a 170°C con un catalizador de platino soportado. Se han obtenido resultados satisfactorios con esta tecnología, incluso a temperaturas inferiores a 100°C. Por otro lado, los métodos de oxidación supercrítica están actualmente en etapas de investigación antes de su

comercialización. El proceso SUWOX process (SUpercritical Water OXidation) es uno de los últimos desarrollos encaminados a superar las dificultades debidas a corrosión y deposición de sales inherentes a la técnica (Rodríguez et al. 2006).

Tabla 18

Procesos Comerciales de Oxidación Directa.

<i>Oxidación húmeda convencional o no catalítica (WAO)</i>
<p><i>Método ZIMPRO</i></p> <p>Oxida materia orgánica soluble o en suspensión en agua utilizando oxígeno o aire como oxidante a 150°C – 320°C y 10-220 bar. Su origen está en la década de los treinta del siglo XX cuando F.J. Zimmermann fundó Zimpro Products (actualmente USFilter Zimpro) para explotar la tecnología Zimpro. Usos: acondicionamiento de lodos (Low Pressure Oxidation, LPO), regeneración de carbón activo (Wet Air Regeneration, WAR) y diversas aplicaciones para efluentes industriales.</p> <p><i>Proceso VerTech</i></p> <p>Puesto a punto por la compañía VerTech, utiliza un reactor que opera a 275°C y 100 bar para el tratamiento de lodos. Desde 1994 opera una planta en Apeldoorn (Holanda) que trata 80t/día de lodos y elimina el 70 % de la demanda química de oxígeno. Los sólidos residuales se utilizan como relleno (landfilling) y el nitrógeno se elimina mediante tratamiento biológico</p>
<i>Oxidación húmeda catalítica (CWAO)</i>
<p><i>Proceso LOPROX (LOw PResure wet OXidation)</i></p> <p>Desarrollado por Bayer AG, utiliza una cascada de columnas de burbujeo como reactor de oxidación. Opera a unos 150-200°C y a presiones en el rango 5-20 bar utilizando como catalizador Fe²⁺ y un co-catalizador orgánico. El tiempo de residencia medio en el reactor está en el rango 1-3 h, dependiendo de la composición del efluente, lo que permite la operación autotérmica a partir de 10 g/L de demanda química de oxígeno. Su capacidad de eliminación de DQO llega al 90 %, con un grado de mineralización del 60-65 %. Existen varias plantas en operación en Alemania y Suiza.</p> <p><i>Proceso Ciba–Geigy</i></p> <p>Utiliza aire como oxidante y como catalizador homogéneo una sal de cobre que se separa mediante precipitación como sulfuro de cobre. Opera a temperatura elevada (300°C) y consigue eficacias de eliminación de hasta el 99 % en aguas con contaminantes muy refractarios a la oxidación, aunque no consigue eliminar totalmente el amoníaco. Existen varias unidades en operación en las plantas de la compañía en Alemania y Suiza.</p>

Proceso NS-LC

Utiliza un catalizador monolítico de Pt-Pd/TiO₂-ZrO₂ y un sistema de flujo denominado “flujo gas-líquido segmentado” en el que gas y líquido se alternan en el contacto con el catalizador. Opera a 220°C y 40 bar. Las conversiones de la mayoría de los compuestos orgánicos superan el 99 %.

Proceso Osaka Gas

Utiliza una mezcla de metales preciosos y de transición sobre TiO₂ o TiO₂-ZrO₂ en forma monolítica o en esferas. Se ha utilizado para efluentes de coquerías y otros procesos de refinería que generan efluentes cianurados, así como lodos de depuradoras urbanas. Opera a 250°C y 70 bar, permitiendo reducir la demanda química y el amoníaco a <10 ppm en un tiempo espacial de 24 min. Al catalizador se le supone una vida en actividad de ocho años.

Nota: Adaptado “Tratamientos avanzados de aguas residuales industriales”(p.60), por Rodríguez et al. 2006.

2.2.1.1 Tendencias en el desarrollo de los métodos de oxidación avanzada

Aunque varios de los métodos avanzados de oxidación mencionados en la Tabla 19 aún se encuentran en fase de desarrollo en planta piloto, ya existen tecnologías aplicables principalmente a los efluentes industriales. La mayoría de los sistemas propuestos hacen uso de O₃/H₂O₂ o están fundamentados en la aplicación de radiación ultravioleta. Su utilización, que aún es muy reducida, está condicionada por las restricciones impuestas por la administración a los vertidos industriales (Rodríguez et al. 2006).

Tabla 19

Algunos Procesos Comerciales de Oxidación Avanzada.

Proceso	Aplicable
<i>Rayox</i>	Es un proceso de fotodesinfección y oxidación fotoquímica y basado en el sistema H ₂ O ₂ /UV que utiliza la energía de lámparas ultravioleta de media presión. Desarrollado por Calgon Oxidation Technologies (Pittsburgh), cuenta con unas 350 unidades en funcionamiento.
<i>CAV-OX</i>	Es un proceso desarrollado y patentado por Magnum Water Technology (California) para oxidar contaminantes orgánicos en agua mediante la utilización de las tecnologías de cavitación hidrodinámica (US), radiación ultravioleta (producida con lámparas de vapor mercurio) y peróxido de hidrógeno. Los

oxidantes del proceso, esencialmente radicales hidroxilos e hidroperóxilo, se producen por la acción simultánea de la cavitación y de la fotólisis directa del peróxido de hidrógeno.

Hydroxyl Hydroxyl es una familia de tratamientos desarrollada por Hydroxyl Industrial Systems Inc., que ofrece diversas tecnologías de oxidación avanzada: Hydroxyl-UVP emplea radiación ultravioleta para disociar peróxido de hidrógeno, Hydroxyl-OZP utiliza el sistema O_3/H_2O_2 , Hydroxyl-UVO la fotólisis de ozono, Hydroxyl-FC está basado en el reactivo de Fenton y Hydroxyl-UVF es un sistema Foto-Fenton.

HiPOX El proceso HiPOx, desarrollado por Applied Process Technologies (California), utiliza el sistema O_3/H_2O_2 para oxidar compuestos orgánicos en agua empleando oxígeno para generar ozono, con lo que consigue concentraciones de 8-10 %, lo que mejora la transferencia de materia. La presión de operación es de unos 2 bar y el sistema está diseñado para evitar la formación de bromatos.

WPO Desarrollado por IDE y el INSA (Francia), es un proceso derivado del método Fenton. Utiliza como oxidante peróxido de hidrógeno y como catalizador Fe(II) en un medio ácido. Opera a 90-130°C y 1-5 bar con eficacias de oxidación superiores al 95 %. El catalizador se recupera mediante precipitación elevando el pH. Se han instalado varias unidades de demostración en Francia y España.

Nota: Adaptado “Tratamientos avanzados de aguas residuales industriales”(p.61), por Rodríguez et al. 2006.

El grueso de las tecnologías avanzadas de oxidación se encuentra en la fase de desarrollo.

Tabla 20

Algunas de las Líneas más Importantes que Marcan las Investigaciones

Desarrollo	Aplicabilidad	Referencias
Degradación de contaminantes emergentes y contaminantes en trazas	Procesos de ozonización	Beltrán et al., 1994 Petrovic et al., 2003
Aplicaciones in-situ mediante inyección de oxidantes en aguas subterráneas y suelos	Fenton clásico	USEPA, 1998

Combinación de ultrasonidos y otras técnicas de oxidación	Técnicas de ultrasonidos	Naffrechoux et al., 2000
Desarrollo de ánodos más estables y eficientes.	Oxidación anódica	Kraft et al., 2003
Desarrollo de catalizadores no convencionales	Ozonización catalítica	Cooper y Burch, 1999
Desarrollo de catalizadores para fotocátalisis solar	Procesos fotocatalíticos	Hermann et al., 2002
Diseño de fotoreactores capaces de aprovechar la radiación solar	Procesos fotocatalíticos	Bahnemann, 2004
Acoplamiento de tratamientos avanzados de oxidación con tratamientos biológicos	Todos los procesos	Martin et al., 2003

Nota: Adaptado “Tratamientos avanzados de aguas residuales industriales”(p.62), por Rodríguez et al. 2006.

CAPÍTULO III

MARCO METODOLÓGICO

3.1 Tipo y diseño de investigación

3.1.1 Tipo de investigación

Este trabajo de investigación aplicada se considera cuantitativo, ya que se midieron los factores de DQO y DBO₅ de las aguas residuales producidos después de la del proceso de fermentación sevillana de aceitunas verdes.

Asimismo, la investigación es de carácter básico aplicado, porque explora en profundidad las variables de la investigación. (Caballero, 2014).

3.1.2 Diseño de investigación

La presente investigación es cuantitativa-experimental en el sentido de que los datos se recopilan en un solo momento. El proceso de identificación de impactos ambientales ocurre a través del análisis analítico experimentales de las interacciones resultantes entre los componentes del proyecto y los diversos componentes ambientales de su entorno.

Tabla 21

Concentraciones para los Distintos Tratamiento

Variable Independiente	Unidad	Concentraciones (Código de Niveles)		
		-	0	+
Carbón Activado	gramos	10	19	38
FeSO ₄	gramos	0,414	0,621	0,828
H ₂ O ₂	mililitros	3,04	4,56	6,08
pH	0-14	2,5	3	3,5

Nota: Adaptado de Agabo (2018).

3.2 Población y muestra de estudio

3.2.1 Población

Se tomará una muestra de agua del proceso, residuales para tratarlas con proceso de adsorción con carbón activo y oxidación avanzada según las normas mencionadas.

Tabla 22

Determinación de la Población: Registro Agua Residual

REGISTROS	CANTIDAD
Nro. 1 agua residual – Zona 01	6 litros de cada muestra
Nro. 2 agua residual – Zona 02	6 litros de cada muestra
Nro. 3 agua residual – Zona 03	6 litros de cada muestra

Fuente: Propia

3.2.2 Muestra

En el presente estudio no fue necesario obtener muestra, se trabajó con toda la población.

3.3 Operacionalización de variables

3.3.1 Identificación de las Variables

Variable independiente

- Carbón activado.
- Oxidación avanzada usando el reactivo de Fenton.

Variable dependiente

- Disminución del DBO₅ y DQO en las aguas residuales del proceso alcalino para aceitunas verdes.

3.3.2 Caracterización de las variables

a) Variable independiente:

Indicadores

Carbón activo (Concentración "g/mL").

Oxidación avanzada usando el reactivo de Fenton.(Concentración "g/mL").

b) Variable dependiente:

Indicadores

DQO : Demanda Química de Oxígeno (mg O₂ /mL).

DBO₅ : Demanda Biológica de Oxígeno (mg O₂ /mL).

3.3.3 Definición operacional de las variables

Variable independiente:

Aplicación de tratamiento de aguas residuales, según sea sus características usando:

- Carbón activo (Concentración "g/ml").
- Reactivo de Fenton (Concentración "g/mL").
-

Variables	Naturaleza de la variable	Definición Operacional	Dimensiones	Indicadores	Nivel de medición de la variable (Escala)
INDEPENDIENTE	Cuantitativa	La aplicación de distintos tratamientos de aguas residuales proveniente del proceso de fermentación de aceituna estilo sevillana	g/mL	Análisis fisicoquímico según norma A.O.A.C., ICMSF-2000 de la Norma Sanitaria.	Numérica Continua
La aplicación de distintos tratamientos de aguas residuales según sea sus características, usando: -Carbón activado -Oxidación avanzada con reactivo de Fenton		considera la concentración de los reactivos en gramos por mililitro de muestra a tratar.	g/mL	Análisis fisicoquímico según norma A.O.A.C., ICMSF-2000 de la Norma Sanitaria.	

Variable dependiente:

Variables	Naturaleza de la variable	Definición Operacional	Dimensiones	Indicadores	Nivel de medición de la variable (Escala)
DEPENDIENTE Disminución del DBO ₅ y DQO en las aguas residuales del proceso alcalino para aceitunas verdes	Cuantitativa	La disminución del DBO ₅ y DQO en las aguas residuales proveniente del proceso de fermentación de aceituna estilo sevillana considera la concentración de los reactivos en miligramos de oxígeno por mililitro de agua tratada.	mg O ₂ /mL	Análisis fisicoquímico según norma A.O.A.C., ICMSF-2000 de la Norma Sanitaria. Comparación en reducción de porcentaje del DQO y DBO ₅ ECA – Agua VMA – SUNASS – VIVIENDA	Numérica Continua
			mg O ₂ /mL	Análisis fisicoquímico según norma A.O.A.C., ICMSF-2000 de la Norma Sanitaria. Comparación en reducción de porcentaje del DQO y DBO ₅ ECA – Agua VMA – SUNASS – VIVIENDA	

3.4 Técnicas e instrumentos para la recolección de datos

3.4.1 Técnicas de recolección de datos

Análisis documental

En el presente trabajo de investigación se utilizó la técnica del análisis documental para evaluar los tratamientos aplicando reactivos químicos en las aguas residuales para el proceso de fermentación de aceitunas verdes estilo sevillana en el distrito de la Yarada Los Palos, región de Tacna, 2022. Las muestras recolectadas fueron homogeneizadas, de las cuales se tomó una muestra representativa. Esta muestra se colocó en envases de plástico limpios y adecuadamente etiquetados para su transporte al laboratorio de aguas de la Escuela Profesional de Ingeniería Ambiental de la una Universidad Privada de Tacna, donde se determinaron sus características fisicoquímicas.

3.4.2 Instrumentos de recolección de datos

Guía de análisis documental

En el presente trabajo de investigación se utilizó la guía del análisis documental para evaluar los factores que intervienen en el tratamiento de aguas residuales para el proceso de fermentación de aceitunas verdes estilo sevillana en el distrito de la Yarada Los Palos, región de Tacna, 2022.

3.4.3 Descripción de trabajo en el campo y laboratorio

En cuanto a materiales y métodos, para esta investigación, que es cuantitativa y experimental, la investigación se realizó en el sector agroindustrial de La Yarada, Los Palos, que es un sector productivo en el valle de Caplina que se ubica en la parte más sur. Valle del río Caplina en el extremo sur del Perú; El Área de Influencia que abarca este Plan de Desarrollo corresponde al Terreno que forma Las Pampas de la Yarada, (Resolución Suprema N° 0211-76-AG/DRAG/AR, de 2 de septiembre de 1976).

Tipo de aguas residual y ajuste del pH

Para determinar el tipo de agua residual, se calcula la relación DBO_5/DQO y se compara.

Tabla 23

Indicadores de la Mejora de la Biodegradabilidad en Aguas Residuales

Parámetro indicador	Evaluación
$DBO / DQO > 0,60$	Contenido orgánico fácilmente biodegradable
$DBO / DQO \approx 0,41 - 0,59$	Contenido orgánico parcialmente biodegradable
$DBO / DQO < 0,4$	Contenido orgánico persistente, no biodegradable

Nota: Adaptado de Jurado(2009)

Según Medina et al. 2018, se ajusta el pH de las unidades experimentales a los valores establecidos según los niveles del plan de experimentación, utilizando H_2SO_4 10 M. Este procedimiento previene la formación de hidróxidos de hierro que podrían precipitar en el medio.

Figura 11

Tipo de Aguas Residuales y Medición de pH



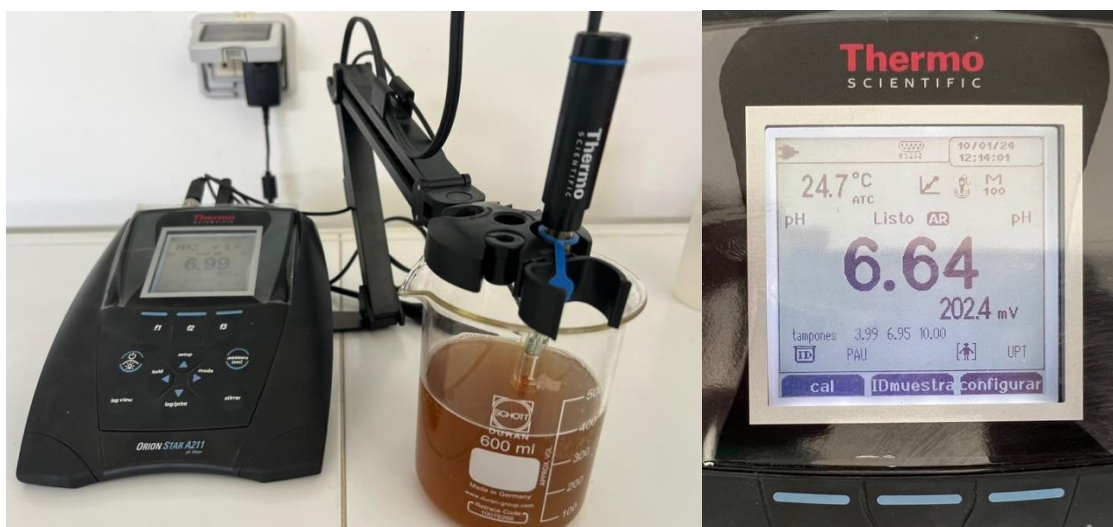
Nota: Elaboración propia.

Preparación de muestras para su tratamiento

La medición del pH para identificar su corrección y pueda reaccionar correctamente con el reactivo de Fenton, se lleva a un rango de 2,5 – 3,5.

Figura 12

Estabilización del pH.



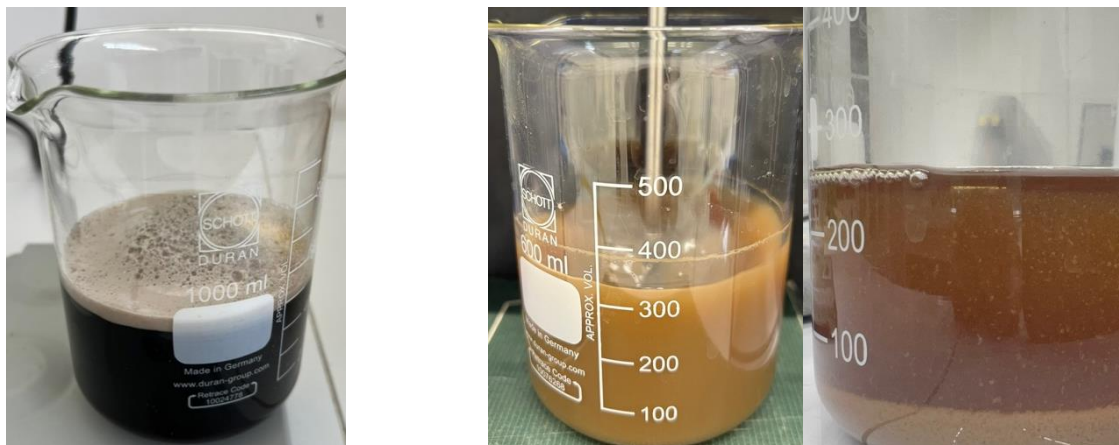
Nota: Elaboración propia.

Reactivo de Fenton con pH neutro y ácido

Las pruebas demuestran un resultado de generación de espuma y un aumento de turbidez; a diferencia de tener un pH ácido, no genera espuma y precipita.

Figura 13

Reactivo de Fenton con pH Neutro(izquierda) y Ácido(derecha)



Nota: Elaboración propia

Test de Jarras

Se utilizó el equipo de prueba o Test de Jarras para tratamiento de aguas de la marca PHIPPS & BIRD, donde se realizó las pruebas con distintas concentraciones de Carbón Activado y reactivo de Fenton, a distintas revoluciones por minuto en agitación.

Figura 14

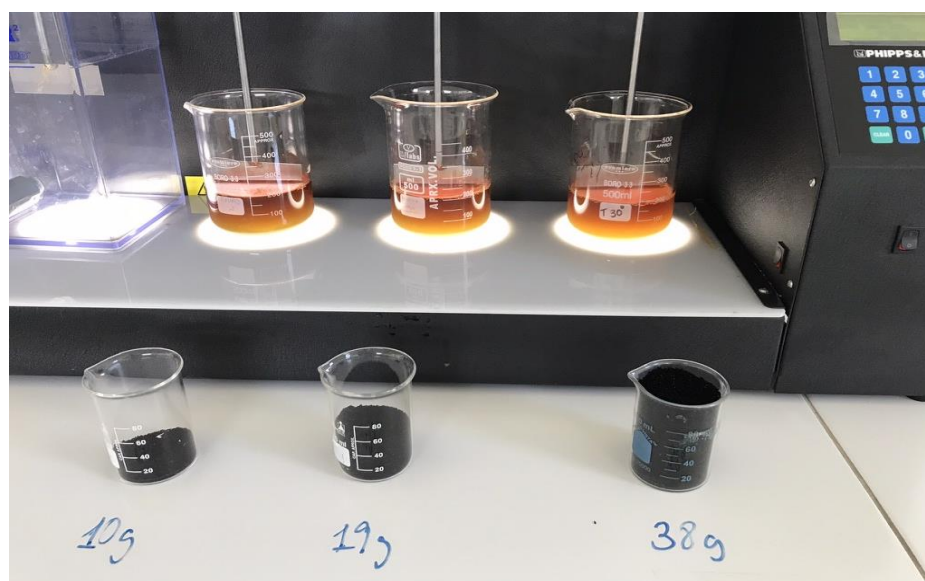
Prueba de Tratamiento de Aguas en el Equipo de Test de Jarras



Nota: Elaboración propia.

Figura 15

Prueba de Test de Jarras con Carbón Activado



Nota: Elaboración propia.

Figura 16

Prueba de Test de Jarras con el Reactivo de Fenton



Nota: Elaboración propia.

Separación de lodos

Se filtro usando una bomba de vacío ROCKER-300 y papel filtro con embudo de vidrio, según las características del aguas residual.

Figura 17

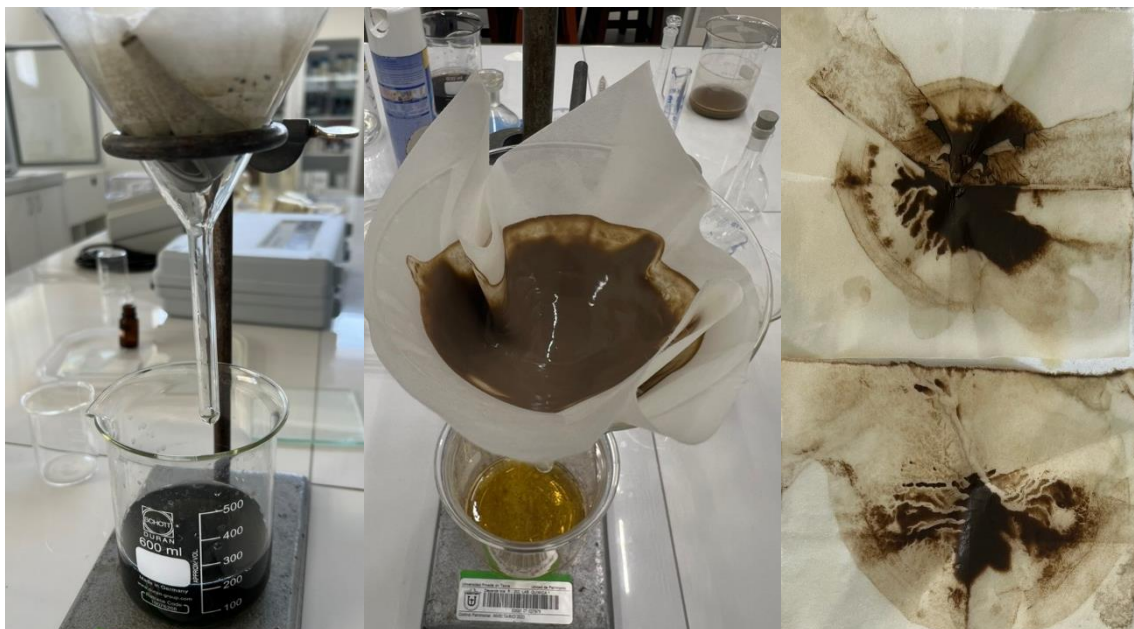
Separación de Lodos (sólidos) – Bomba de Vacío



Nota: Elaboración propia.

Figura 18

Separación de Lodos (sólidos) - Filtro



Nota: Elaboración propia.

Estandarización de soluciones

Las muestras tratadas son estandarizadas, las diluciones en relación 1:4 y 1:6 respectivamente con las distintas concentraciones para su posterior medición fisicoquímica del DBO₅ y DQO.

Figura 19

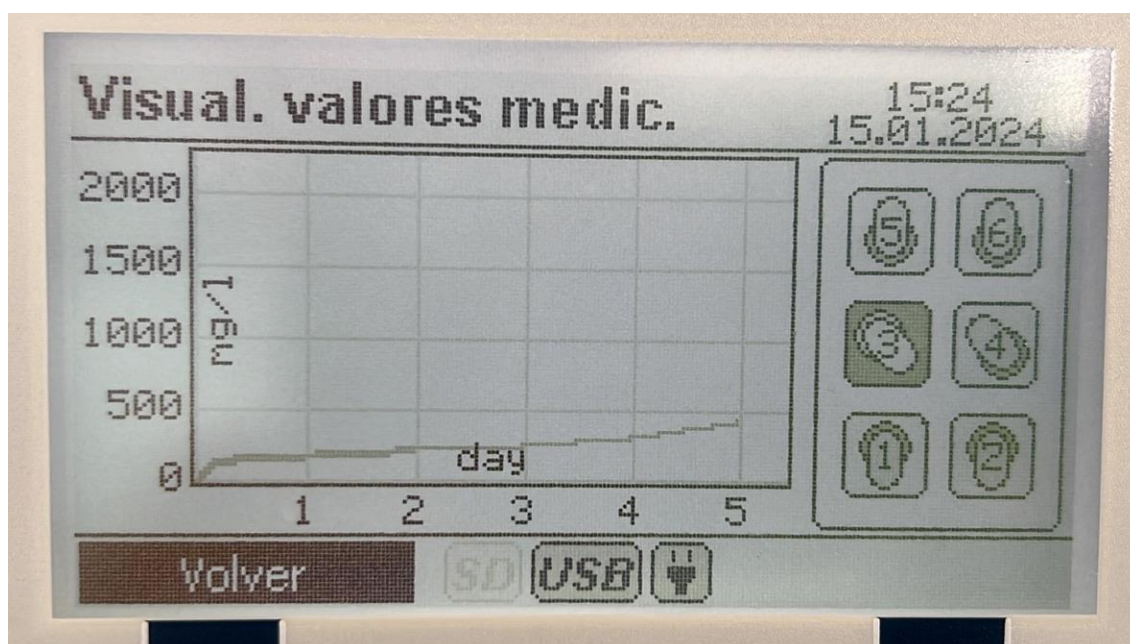
Diluciones en Relación 1:4 y 1:6 Volumen



Nota: Elaboración propia.

Medición de DBO₅

Para la análisis del DBO₅, se utilizó el equipo LOVIBOND WATER TESTING BD-600, con el método analítico de respirometría durante 5 días, usando el inhibidor nitrificante y el catalizador de KOH al 45 %.

Figura 20*Medición del DBO₅*

Nota: Elaboración propia.

Medición de DOO

Para el análisis analítico de la demanda química de oxígeno, se usó los equipos de: Termoreactor RD-125 y Fotómetro MD-600, ambos de la marca LOVIBOND WATER TESTING; se usaron viales con Dicromato/H₂SO₄, donde se agregó 0,2 o 2,0 mL, calentándolos en el termoreactor por 120 minutos a 150°C y después se usa el Fotómetro.

Figura 21*Medición del DQO*

Nota: Elaboración propia.

Objetivo específico 1

Disminuir los valores de DBO_5 y DQO aplicando el carbón activado.

Frecuencia y horario de muestreo: Se realizó en el mes de Marzo de 2023 y 2024, de 9 a 13 horas.

Método: Se aplicó la guía de análisis documental para analizar los valores DBO₅ y DQO de que intervienen a las aguas residuales proveniente del proceso de fermentación de aceitunas verdes estilo sevillana. Además, dicho ensayo Físico-Químico fue realizado en el “Laboratorio de Aguas” de la Facultad de Ingeniería, Escuela Profesional de Ingeniería Ambiental, de la Universidad Privada de Tacna con reactivos químicos(PRO-ANALISIS), de acuerdo a la Norma A.O.A.C. (Association of Analytical Communities) – análisis instrumental.

Prueba de contrastación: Se utilizó las tablas de frecuencia.

Objetivo específico 2

Disminuir los valores de DBO₅ y DQO aplicando la oxidación avanzada usando el reactivo de Fenton.

Frecuencia y horario de muestreo: Se realizó en el mes de Marzo de 2023 y 2024, de 9 a 13 horas.

Método: Se aplicó la guía de análisis documental para analizar los valores DBO₅ y DQO de que intervienen a las aguas residuales proveniente del proceso de fermentación de aceitunas verdes estilo sevillana. Además, dicho ensayo Físico-Químico fue realizado en el “Laboratorio de Aguas” de la Facultad de Ingeniería, Escuela Profesional de Ingeniería Ambiental, de la Universidad Privada de Tacna con reactivos químicos(PRO-ANALISIS), de acuerdo a la Norma A.O.A.C. (Association of Analytical Communities) – análisis instrumental.

Prueba de contrastación: Se utilizó las tablas de frecuencia.

Objetivo específico 3

Establecer la diferencia de la disminución de los valores de DBO₅ y DQO entre la aplicación del carbón activado y la oxidación avanzada usando el reactivo de Fenton.

Frecuencia y horario de muestreo: Se realizó en el mes de Marzo de 2023 y 2024, de 9 a 13 horas.

Método: Se aplicó la guía de análisis documental para analizar los valores DBO₅ y DQO de que intervienen a las aguas residuales proveniente del proceso de fermentación de aceitunas verdes estilo sevillana. Además, dicho ensayo Físico-Químico fue realizado en el “Laboratorio de Aguas” de la Facultad de Ingeniería, Escuela Profesional de Ingeniería Ambiental, de la Universidad Privada de Tacna con reactivos químicos (PRO-ANALISIS), de acuerdo a la Norma A.O.A.C. (Association of Analytical Communities) – análisis instrumental.

Prueba de contrastación: Se utilizó las tablas de frecuencia.

3.5 Procesamiento y análisis de datos

Se utilizó las técnicas y medidas de la estadística descriptiva en las que se emplearon: Tablas de frecuencia absoluta y relativa (porcentual).

Estas tablas sirvieron para la presentación de los datos procesados y ordenados según sus categorías, niveles o clases correspondientes. Se utilizó este tipo de tablas para visualizar la distribución de los datos según las categorías o niveles de los conjuntos de indicadores analizados simultáneamente. Asimismo, se utilizó la contrastación por objetivos. (Campos, 2003). Para el análisis de datos, se consideran los siguientes parámetros:

DBO₅ y DQO

La demanda bioquímica de oxígeno (DBO), es un parámetro que mide la cantidad de oxígeno consumido al degradar la materia orgánica de una muestra líquida (Sánchez & García, 2018).

Y la demanda química de oxígeno (DQO) es un parámetro fisicoquímico que mide la cantidad de sustancia químicamente oxidable disuelta o suspendida en una muestra líquida. Se utiliza para medir el grado de contaminación y se expresa en miligramos de oxígeno diatómico por litro (mg O₂/L) (Martines & Hodaifa, 2016).

Tabla 24*VMA para Descargas Industriales al Alcantarillado*

Parámetro	Unidad	Valor
DBO ₅	mg O ₂ / mL	500
DQO	mg O ₂ / mL	1 000
SST	mg O ₂ / mL	500
pH		6 - 9

*Nota: Decreto Supremo 010-2019-VIVIENDA.***Tabla 25***Comparación de los LMP para Efluentes de PTAR Y ECA-Agua*

ECA Y FACTOR DE DILUCIÓN (FD) DEL LMP NECESARIO EN UN CUERPO NATURAL LIBRE DE CONTAMINACIÓN PARA EL CUMPLIMIENTO DEL ECA												
Parámetro	LMP	Categoría										
		Categoría1 A2		Categoría1 A3		Categoría1 B1		Categoría2 C3		Categoría 3		
		ECA	FD ¹	ECA	FD ¹	ECA	FD ¹	ECA	FD ¹	ECA	FD ¹	
DBO ₅	mg/mL	100	5	20	10	10	5	20	10	10	15	7
DQO	mg/mL	200	20	10	30	7	30	7	-	-	40	5
SST	mg/mL	150	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

Nota: Decreto Supremo 004-2017-MINAM / Elaborado por: Sunass.

1) FD = factor de dilución calculado para que el efluente de la PTAR que cumple los LMP pueda cumplir también los ECA-Agua. Ejemplo: para poder verter el efluente de una PTAR con DBO₅ = 100 mg/l (cumple el LMP) en un río de categoría 1, subcategoría A2, con concentración inicial de DBO₅ = 0 mg/l se necesita que el caudal del río sea por lo menos 20 veces el caudal del efluente de la PTAR.

2) Categoría 1 = Poblacional y recreacional:

Subcategoría a2 = aguas superficiales que pueden ser potabilizadas con tratamiento convencional. Subcategoría a3 = aguas superficiales que pueden ser potabilizadas con tratamiento avanzado. Subcategoría b1 = aguas superficiales destinadas para recreación por contacto primario.

Categoría 2 = actividades marino-costeras; subcategoría c3 = otras actividades

Categoría 3 = Riego de vegetales y bebida de animales; riego de vegetales de tallo alto.

En 2020, el Ministerio de Desarrollo Agrario y Riego publicó en su sitio web un proyecto de decreto supremo que propone niveles de calidad de las aguas residuales tratadas para su reutilización con fines agrícolas. Esta propuesta sirve como referencia, en algunos casos, a valores adoptados en otros países, proponiendo valores bajos de DBO₅ y DQO y como recomendación para revisar si la presencia de nutrientes provenientes de materia orgánica estabilizada será perjudicial para el riego. Actualmente, para evaluar las solicitudes de autorización para el reúso de residuos tratados, la Autoridad Nacional del

Agua, verifica el cumplimiento de los valores guía de la Organización Mundial de la Salud (OMS), de conformidad con lo establecido en el artículo 150 del Reglamento de Aguas. La Ley de Recursos, que establece que para la evaluación de las solicitudes de permisos para el reúso de residuos tratados, se deben tener en cuenta los valores determinados por el sector relacionado con la actividad para la cual se destinará el reúso o agua, lineamientos de la OMS debe ser usado(Sunass, 2022).

CAPÍTULO IV

MARCO FILOSÓFICO

El tratamiento de aguas residuales mediante tecnologías avanzadas de oxidación debe verse desde una perspectiva filosófica que integre aspectos éticos, sociales y ambientales orientado a medir los factores de estudio respecto a la pregunta ¿En qué medida la aplicación del carbón activado y de la oxidación avanzada usando el reactivo de Fenton disminuye los valores de DBO₅ y DQO en las aguas residuales del proceso alcalino para aceitunas verdes en el distrito de la Yarada Los Palos, región Tacna, 2022? Por lo tanto, se encuentra en un enfoque que, éticamente, significa responsabilidad ambiental, justicia y medidas de precaución para proteger los ecosistemas y comunidades vulnerables. A nivel social, se necesita transparencia, participación pública y educación para promover la aceptación y el comportamiento responsable y garantizar beneficios socioeconómicos equitativos. Desde una perspectiva ambiental, el foco está en la sostenibilidad, evaluando el ciclo de vida de los productos químicos y buscando la integración con procesos naturales para maximizar la eficiencia y minimizar los impactos negativos. Este enfoque holístico garantiza que las soluciones tecnológicas sean sostenibles, justas y responsables, protegiendo tanto a las personas como al planeta; por lo que los datos son recogidos mediante procedimientos aceptados tales como la guía de análisis documental.

CAPÍTULO V

RESULTADOS

5.1 Análisis de variables

5.1.1 Análisis por objetivos

a) **Disminuir los valores de DBO₅ y DQO aplicando el carbón activado en las aguas residuales del proceso alcalino para aceitunas verdes en el distrito de la Yarada Los Palos, región Tacna, 2022.**

Valores de DBO₅ aplicando el carbón activado que intervienen a las aguas residuales proveniente del proceso de fermentación de aceitunas verdes estilo sevillana.

Tabla 26

Valores de DBO₅ Aplicando el Carbón Activado que Intervienen a las Aguas Residuales del Proceso Alcalino para Aceitunas Verdes

Medición	Tiempo (h)	Valores de DBO ₅ (mg O ₂ /mL) aplicando el carbón activado					
		Zona 01		Zona 02		Zona 03	
		Sin tratar	Tratada	Sin tratar	Tratada	Sin tratar	Tratada
0	1	0	0	0	0	0	0
1	1	366	348	354	162	1 080	444
2	1	636	450	576	234	1 692	498
3	1	810	540	690	306	2 154	492
4	1	918	606	714	348	2 514	534
5	1	978	672	732	348	2 808	534
6	1	1 002	726	750	396	3 006	546
7	1	1 026	774	774	432	3 210	558
8	1	1 044	816	792	450	3 336	576
9	1	1 062	840	810	444	3 462	558
10	1	1 068	876	822	480	3 588	540
11	1	1 086	906	840	540	3 660	552
12	1	1 086	930	840	534	3 714	564
13	1	1 104	948	858	534	3 744	588
14	1	1 116	972	864	576	3 822	570
15	1	1 134	990	888	540	3 894	576
16	1	1 146	1 008	906	606	3 936	570

17	1	1 152	1 026	906	570	3 948	552
18	1	1 170	1 038	924	630	3 978	588
19	1	1 164	1 050	930	636	3 984	564
20	1	1 182	1 056	942	618	3 984	576
21	1	1 194	1 068	960	618	4 002	564
22	1	1 200	1 014	960	666	4 050	570
23	1	1 212	1 080	978	660	4 074	564
24	1	1 230	1 098	1 002	528	4 104	558
25	1	1 248	1 110	1 020	720	4 104	552
26	2	1 278	1 116	1 056	732	4 188	576
27	2	1 290	1 146	1 074	726	4 152	582
28	2	1 314	1 158	1 098	714	4 146	606
29	2	1 332	1 182	1 116	756	4 194	606
30	2	1 362	1 194	1 152	714	4 182	576
31	2	1 380	1 206	1 170	750	4 272	600
32	2	1 392	1 212	1 182	726	4 272	606
33	2	1 410	1 218	1 206	804	4 284	606
34	2	1 422	1 230	1 224	780	4 320	564
35	2	1 452	1 230	1 260	780	4 326	564
36	2	1 464	1 212	1 272	822	4 362	576
37	24	1 668	948	1 902	894	4 968	612
38	24	2 004	1 260	2 718	1 098	5 682	576
39	24	2 112	1 284	3 408	1 302	6 432	618

Nota: Dicho ensayo Físico-Químico fue realizado en el “Laboratorio de Aguas” de la Facultad de Ingeniería, Escuela Profesional de Ingeniería Ambiental, de la Universidad Privada de Tacna con reactivos químicos (PRO-ANALISIS), de acuerdo a la Norma A.O.A.C. (Association of Analytical Communities) – análisis instrumental.

Interpretación.**Zona 01.****Tabla 27**

Valores De DBO₅ Aplicando el Carbón Activado en Zona 01 en las Aguas Residuales del Proceso Alcalino para Aceitunas Verdes

Medición	Tiempo (h)	Valores de DBO ₅ (mg O ₂ /mL)aplicando el Carbón Activado			
		Zona 01			
		Sin tratar	Tratada	Diferencia	% de disminución
0	1	0	0	0	0
1	1	366	348	18	4,9
2	1	636	450	186	29,2
3	1	810	540	270	33,3
4	1	918	606	312	34,0
5	1	978	672	306	31,3
6	1	1 002	726	276	27,5
7	1	1 026	774	252	24,6
8	1	1 044	816	228	21,8
9	1	1 062	840	222	20,9
10	1	1 068	876	192	18,0
11	1	1 086	906	180	16,6
12	1	1 086	930	156	14,4
13	1	1 104	948	156	14,1
14	1	1 116	972	144	12,9
15	1	1 134	990	144	12,7
16	1	1 146	1 008	138	12,0
17	1	1 152	1 026	126	10,9
18	1	1 170	1 038	132	11,3
19	1	1 164	1 050	114	9,8
20	1	1 182	1 056	126	10,7
21	1	1 194	1 068	126	10,6
22	1	1 200	1 014	186	15,5
23	1	1 212	1 080	132	10,9
24	1	1 230	1 098	132	10,7
25	1	1 248	1 110	138	11,1
26	2	1 278	1 116	162	12,7
27	2	1 290	1 146	144	11,2
28	2	1 314	1 158	156	11,9
29	2	1 332	1 182	150	11,3

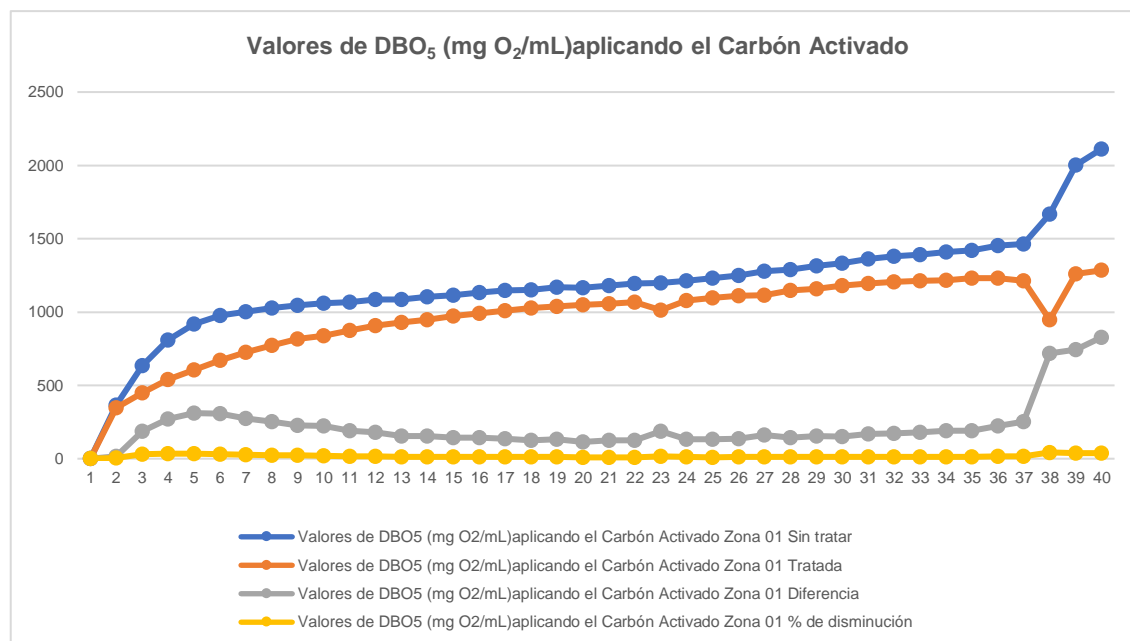
30	2	1 362	1 194	168	12,3
31	2	1 380	1 206	174	12,6
32	2	1 392	1 212	180	12,9
33	2	1 410	1 218	192	13,6
34	2	1 422	1 230	192	13,5
35	2	1 452	1 230	222	15,3
36	2	1 464	1 212	252	17,2
37	24	1 668	948	720	43,2
38	24	2 004	1 260	744	37,1
39	24	2 112	1 284	828	39,2

Nota: Ensayo Físico-Químico fue realizado en el “Laboratorio de Aguas” de la Facultad de Ingeniería, Escuela Profesional de Ingeniería Ambiental, de la Universidad Privada de Tacna con reactivos químicos (PRO-ANALISIS), de acuerdo a la Norma A.O.A.C. (Association of Analytical Communities) – análisis instrumental.

Como se puede apreciar en la tabla para la Zona 01, En cuanto a DBO₅, en las diferentes de mediciones en promedio se puede registrar la medición de miligramos de oxígeno en mililitros disueltos de la solución, donde se obtuvo el DBO₅ inicial de 2 112 mg O₂/mL y DBO₅ final de 1 284 mg O₂/mL , logrando disminuir solo el 39,2 %; siendo este el resultado de la aplicación del carbón activado, utilizando el test de jarras, y aplicando el método de respirometría con un catalizador de KOH al 45 %, y el inhibidor nitrificante; por 5 días de medición. Lo que se debe comparar con la normativa medioambiental vigente.

Figura 22

Valores de DBO₅ Aplicando el Carbón Activado en Zona 01 en las Aguas Residuales del Proceso Alcalino para Aceitunas Verdes



Nota: Elaboración propia.

Zona 02.

Tabla 28

Valores de DBO₅ Aplicando el Carbón Activado en Zona 02 en las Aguas Residuales del Proceso Alcalino para Aceitunas Verdes

Medición	Tiempo (h)	Valores de DBO ₅ (mg O ₂ /mL) aplicando el Carbón Activado			
		Zona 02			
		Sin tratar	Tratada	Diferencia	% de disminución
0	1	0	0	0	0
1	1	354	162	192	54,2
2	1	576	234	342	59,4
3	1	690	306	384	55,7
4	1	714	348	366	51,3
5	1	732	348	384	52,5
6	1	750	396	354	47,2
7	1	774	432	342	44,2
8	1	792	450	342	43,2
9	1	810	444	366	45,2

10	1	822	480	342	41,6
11	1	840	540	300	35,7
12	1	840	534	306	36,4
13	1	858	534	324	37,8
14	1	864	576	288	33,3
15	1	888	540	348	39,2
16	1	906	606	300	33,1
17	1	906	570	336	37,1
18	1	924	630	294	31,8
19	1	930	636	294	31,6
20	1	942	618	324	34,4
21	1	960	618	342	35,6
22	1	960	666	294	30,6
23	1	978	660	318	32,5
24	1	1 002	528	474	47,3
25	1	1 020	720	300	29,4
26	2	1 056	732	324	30,7
27	2	1 074	726	348	32,4
28	2	1 098	714	384	35,0
29	2	1 116	756	360	32,3
30	2	1 152	714	438	38,0
31	2	1 170	750	420	35,9
32	2	1 182	726	456	38,6
33	2	1 206	804	402	33,3
34	2	1 224	780	444	36,3
35	2	1 260	780	480	38,1
36	2	1 272	822	450	35,4
37	24	1 902	894	1 008	53,0
38	24	2 718	1 098	1 620	59,6
39	24	3 408	1 302	2 106	61,8

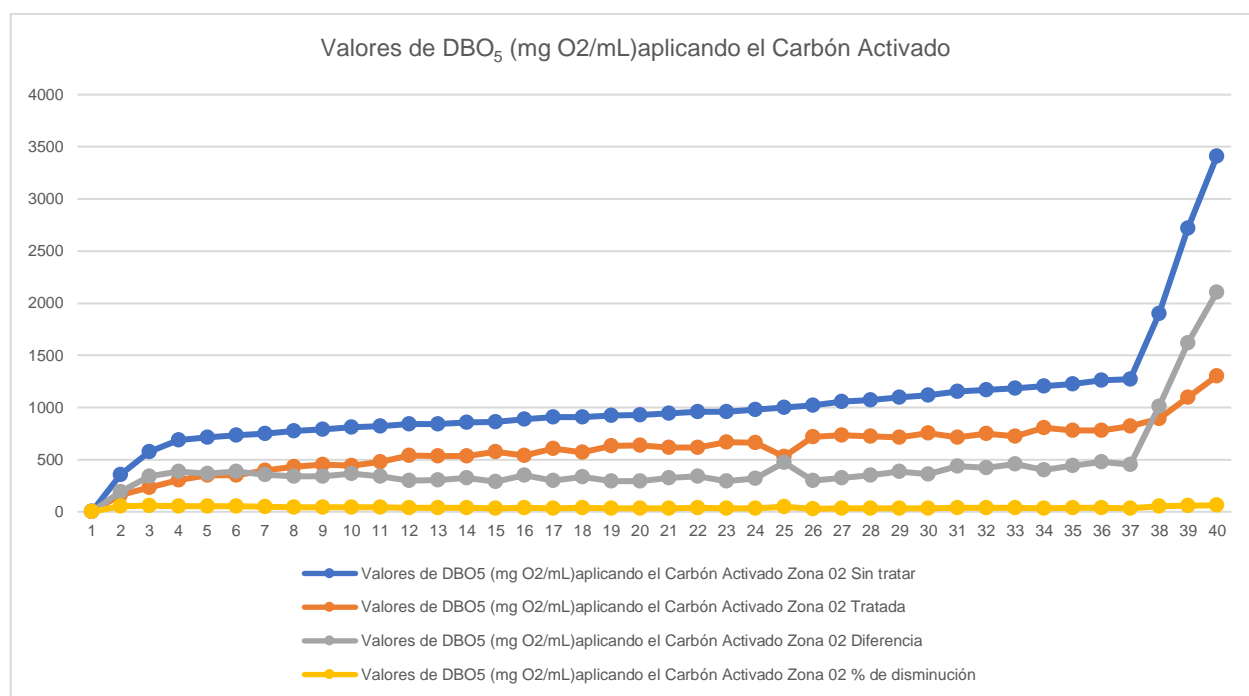
Nota: Ensayo Físico-Químico fue realizado en el “Laboratorio de Aguas” de la Facultad de Ingeniería, Escuela Profesional de Ingeniería Ambiental, de la Universidad Privada de Tacna con reactivos químicos (PRO-ANALISIS), de acuerdo a la Norma A.O.A.C. (Association of Analytical Communities) – análisis instrumental.

Como se puede apreciar en la tabla para la Zona 02, En cuanto a DBO₅, en las diferentes de mediciones en promedio se puede registrar la medición de miligramos de oxígeno en mililitros disueltos de la solución, donde se obtuvo el DBO₅ inicial de 3 408 mg O₂/mL y DBO₅ final de 1 302 mg O₂/mL , logrando disminuir solo el 61,8 %; siendo este el resultado de la aplicación del carbón activado, utilizando el test de jarras, y

aplicando el método de respirometría con un catalizador de KOH al 45 %, y el inhibidor nitrificante; por 5 días de medición. Lo que se debe comparar con la normativa medioambiental vigente.

Figura 23

Valores de DBO₅ Aplicando el Carbón Activado en Zona 02 en las Aguas Residuales del Proceso Alcalino para Aceitunas Verdes



Nota: Elaboración propia.

Zona 03.**Tabla 29**

Valores de DBO₅ Aplicando el Carbón Activado en la Zona 03 a las Aguas Residuales Proveniente del Proceso Alcalino de Aceitunas

Medición	Tiempo (h)	Valores de DBO ₅ (mg O ₂ /mL)aplicando el Carbón Activado			
		Zona 03			
		Sin tratar	Tratada	Diferencia	% de disminución
0	1	0	0	0	0
1	1	1 080	444	636	58,9
2	1	1 692	498	1 194	70,6
3	1	2 154	492	1 662	77,2
4	1	2 514	534	1 980	78,8
5	1	2 808	534	2 274	81,0
6	1	3 006	546	2 460	81,8
7	1	3 210	558	2 652	82,6
8	1	3 336	576	2 760	82,7
9	1	3 462	558	2 904	83,9
10	1	3 588	540	3 048	84,9
11	1	3 660	552	3 108	84,9
12	1	3 714	564	3 150	84,8
13	1	3 744	588	3 156	84,3
14	1	3 822	570	3 252	85,1
15	1	3 894	576	3 318	85,2
16	1	3 936	570	3 366	85,5
17	1	3 948	552	3 396	86,0
18	1	3 978	588	3 390	85,2
19	1	3 984	564	3 420	85,8
20	1	3 984	576	3 408	85,5
21	1	4 002	564	3 438	85,9
22	1	4 050	570	3 480	85,9
23	1	4 074	564	3 510	86,2
24	1	4 104	558	3 546	86,4
25	1	4 104	552	3 552	86,5
26	2	4 188	576	3 612	86,2
27	2	4 152	582	3 570	86,0
28	2	4 146	606	3 540	85,4
29	2	4 194	606	3 588	85,6
30	2	4 182	576	3 606	86,2
31	2	4 272	600	3 672	86,0

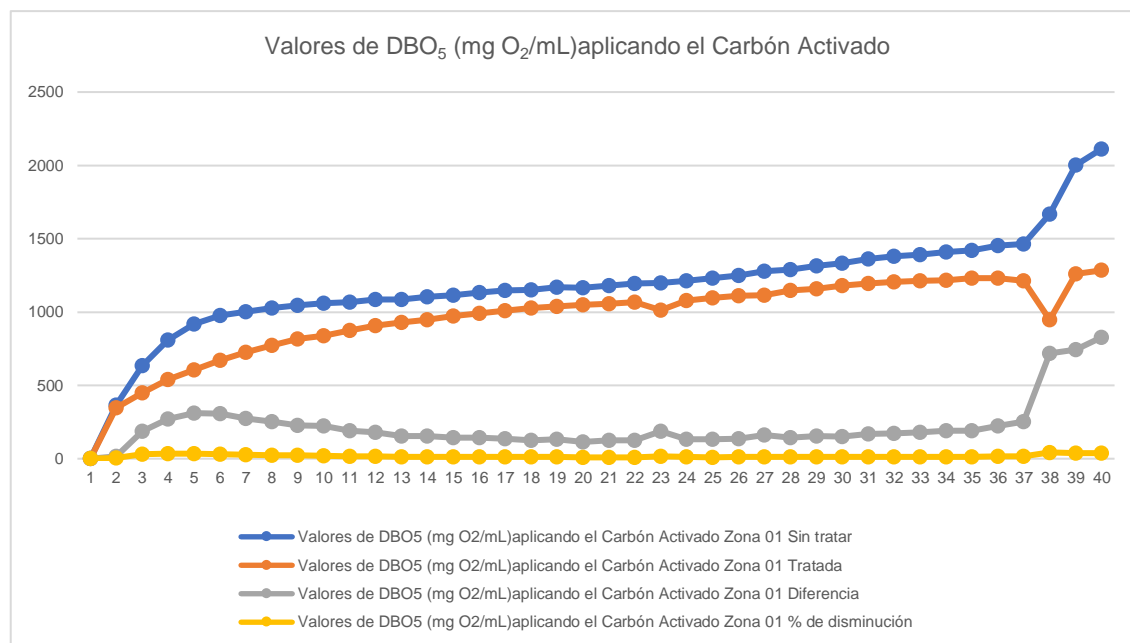
32	2	4 272	606	3 666	85,8
33	2	4 284	606	3 678	85,9
34	2	4 320	564	3 756	86,9
35	2	4 326	564	3 762	87,0
36	2	4 362	576	3 786	86,8
37	24	4 968	612	4 356	87,7
38	24	5 682	576	5 106	89,9
39	24	6 432	618	5 814	90,4

Nota: Ensayo Físico-Químico fue realizado en el “Laboratorio de Aguas” de la Facultad de Ingeniería, Escuela Profesional de Ingeniería Ambiental, de la Universidad Privada de Tacna con reactivos químicos (PRO-ANALISIS), de acuerdo a la Norma A.O.A.C. (Association of Analytical Communities) – análisis instrumental.

Como se puede apreciar en la tabla para la Zona 01, En cuanto a DBO₅, en las diferentes de mediciones en promedio se puede registrar la medición de miligramos de oxígeno en mililitros disueltos de la solución, donde se obtuvo el DBO₅ inicial de 6 432 mg O₂/mL y DBO₅ final de 618 mg O₂/mL , logrando disminuir solo el 90,4 %; siendo este el resultado de la aplicación del carbón activado, utilizando el test de jarras, y aplicando el método de respirometría con un catalizador de KOH al 45 %, y el inhibidor nitrificante; por 5 días de medición. Lo que se debe comparar con la normativa medioambiental vigente.

Figura 24

Valores de DBO₅ Aplicando el Carbón Activado en Zona 03 en las Aguas Residuales del Proceso Alcalino para Aceitunas Verdes



Nota: Elaboración propia.

Valores de DQO aplicando el carbón activado que intervienen a las aguas residuales proveniente del proceso de fermentación de aceitunas verdes estilo sevillana.

Tabla 30

Valores de DQO Aplicando el Carbón Activado que Intervienen en las Aguas Residuales del Proceso Alcalino para Aceitunas Verdes

Valores de DQO (mg O ₂ /mL) aplicando el carbón activado					
Zona 01		Zona 02		Zona 03	
Sin tratar	Tratada	Sin tratar	Tratada	Sin tratar	Tratada
7 760	4 190	6 480	4 277	7 520	2 143

Nota: Ensayo Físico-Químico fue realizado en el “Laboratorio de Aguas” de la Facultad de Ingeniería, Escuela Profesional de Ingeniería Ambiental, de la Universidad Privada de Tacna con reactivos químicos (PRO-ANALISIS), de acuerdo a la Norma A.O.A.C. (Association of Analytical Communities) – análisis instrumental.

Interpretación.**Zona 01.****Tabla 31**

Valores de DQO Aplicando el Carbón Activado en la Zona 01 en las Aguas Residuales del Proceso Alcalino para Aceitunas Verdes

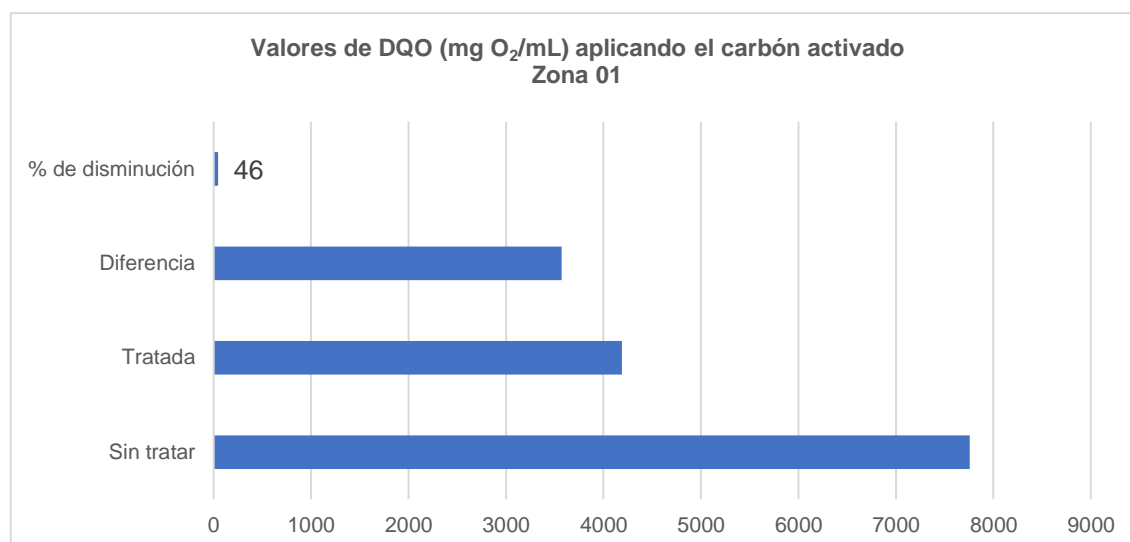
Valores de DQO (mg O₂/mL) aplicando el carbón activado			
Zona 01			
Sin tratar	Tratada	Diferencia	% de disminución
7 760	4 190	3 570	46,0

Nota: Ensayo Físico-Químico fue realizado en el “Laboratorio de Aguas” de la Facultad de Ingeniería, Escuela Profesional de Ingeniería Ambiental, de la Universidad Privada de Tacna con reactivos químicos (PRO-ANALISIS), de acuerdo a la Norma A.O.A.C. (Association of Analytical Communities) – análisis instrumental.

En cuanto a la demanda química de oxígeno (DQO), en la zona 01, respecto a las aguas residuales de la producción de aceituna verde estilo sevillana, se analizó y aplicó el tratamiento aplicando el carbón activado; se observó diferentes niveles de concentraciones, como: DQO inicial de 7 760 O₂/mL y DQO final de 4 190 mg O₂/mL , logrando disminuir solo el 46 %; utilizando el termoreactor para que pueda reaccionar con la solución de Dicromato/Ácido Sulfúrico, y llevarlo al fotómetro para su medición. Ahora se debe comparar con la normativa medioambiental vigente.

Figura 25

Valores de DQO Aplicando el Carbón Activado en la Zona 01 en las Aguas Residuales del Proceso Alcalino para Aceitunas Verdes



Nota: Elaboración propia.

Zona 02.

Tabla 32

Valores de DQO Aplicando el Carbón Activado en la Zona 02 en las Aguas Residuales del Proceso Alcalino para Aceitunas Verdes

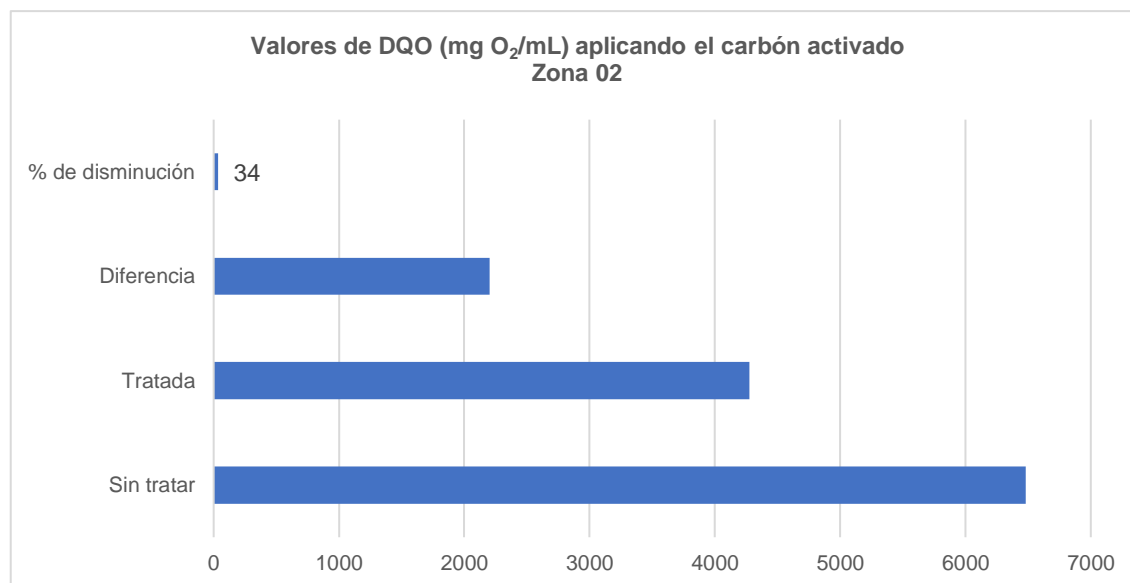
Valores de DQO (mg O ₂ /mL) aplicando el carbón activado			
Zona 02			
Sin tratar	Tratada	Diferencia	% de disminución
6 480	4 277	2 203	34,0

Nota: Ensayo Físico-Químico fue realizado en el “Laboratorio de Aguas” de la Facultad de Ingeniería, Escuela Profesional de Ingeniería Ambiental, de la Universidad Privada de Tacna con reactivos químicos (PRO-ANALISIS), de acuerdo a la Norma A.O.A.C. (Association of Analytical Communities) – análisis instrumental.

En cuanto a la demanda química de oxígeno (DQO), en la zona 01, respecto a las aguas residuales de la producción de aceituna verde estilo sevillana, se analizó y aplicó el tratamiento aplicando el carbón activado; se observó diferentes niveles de concentraciones, como: DQO inicial de 6 480 O₂/mL y DQO final de 4 277 mg O₂/mL, logrando disminuir solo el 34%; utilizando el termoreactor para que pueda reaccionar con la solución de Dicromato/Ácido Sulfúrico, y llevarlo al fotómetro para su medición. Ahora se debe comparar con la normativa medioambiental vigente.

Figura 26

Valores de DQO Aplicando el Carbón Activado en la Zona 02 en las Aguas Residuales del Proceso Alcalino para Aceitunas Verdes



Nota: Elaboración propia.

Zona 03.**Tabla 33**

Valores de DQO Aplicando el Carbón Activado en la Zona 03 en las Aguas Residuales del Proceso Alcalino para Aceitunas Verdes

Valores de DQO (mg O ₂ /mL) aplicando el carbón activado			
Zona 03			
Sin tratar	Tratada	Diferencia	% de disminución
7 520	2 143	5 377	71,5

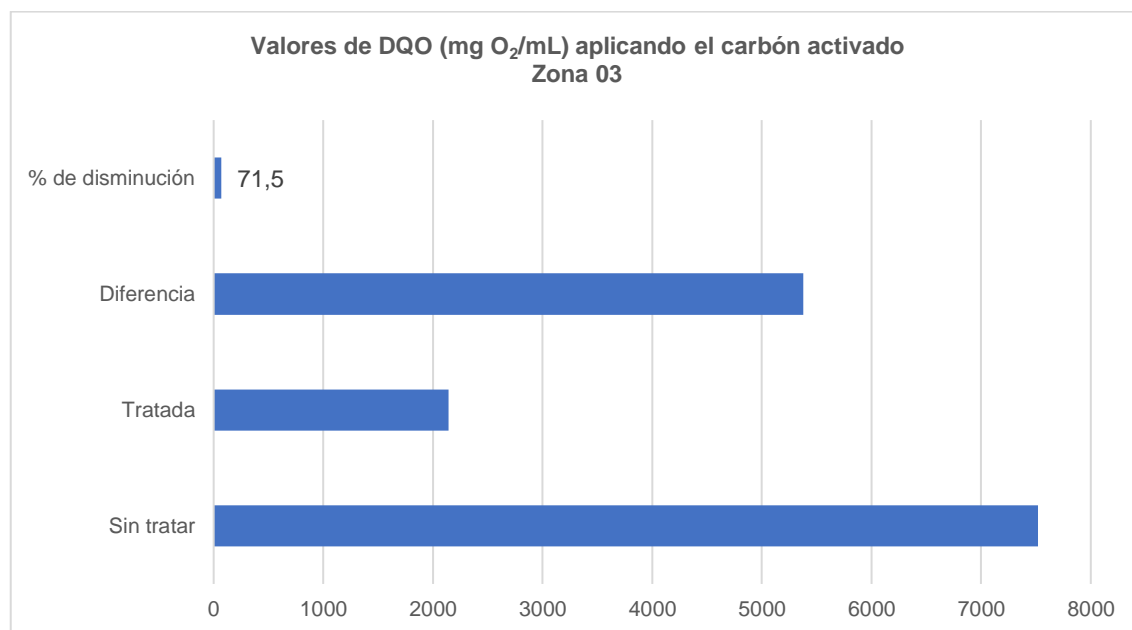
Nota: Ensayo Físico-Químico fue realizado en el “Laboratorio de Aguas” de la Facultad de Ingeniería, Escuela Profesional de Ingeniería Ambiental, de la Universidad Privada de Tacna con reactivos químicos (PRO-ANALISIS), de acuerdo a la Norma A.O.A.C. (Association of Analytical Communities) – análisis instrumental.

En cuanto a la demanda química de oxígeno (DQO), en la zona 01, respecto a las aguas residuales de la producción de aceituna verde estilo sevillana, se analizó y aplicó el tratamiento aplicando el carbón activado; se observó diferentes niveles de concentraciones, como: DQO inicial de 7 520 O₂/mL y DQO final de 2 143 mg O₂/mL, logrando disminuir solo el 71,5 %; utilizando el termoreactor para que pueda reaccionar

con la solución de Dicromato/Ácido Sulfúrico, y llevarlo al fotómetro para su medición. Ahora se debe comparar con la normativa medioambiental vigente.

Figura 27

Valores de DQO Aplicando el Carbón Activado en la Zona 03 en las Aguas Residuales del Proceso Alcalino para Aceitunas Verdes



Nota: Elaboración propia.

b) Disminuir los valores de DBO₅ y DQO aplicando la oxidación avanzada usando el reactivo de Fenton en las aguas residuales del proceso alcalino para aceitunas verdes en el distrito de la Yarada Los Palos, región Tacna, 2022.

Valores de DBO₅ aplicando el reactivo de Fenton que intervienen a las aguas residuales proveniente del proceso de fermentación de aceitunas verdes estilo sevillana.

Tabla 34

Valores de DBO₅ Aplicando el Reactivo de Fenton que Intervienen a las Aguas Residuales Proveniente del Proceso de Alcalino de Aceitunas Verdes

Medición	Tiempo (h)	Valores de DBO ₅ (mg O ₂ /mL) aplicando Fenton					
		Zona 01		Zona 02		Zona 03	
		Sin tratar	Tratada	Sin tratar	Tratada	Sin tratar	Tratada
0	1	0	0	0	0	0	0
1	1	196	184	304	316	336	136
2	1	316	224	500	348	392	164
3	1	452	256	680	364	412	164
4	1	576	308	812	372	432	208
5	1	676	296	964	400	452	212
6	1	800	340	1 096	416	464	256
7	1	880	344	1 180	424	480	260
8	1	1 012	360	1 296	420	496	264
9	1	1 064	372	1 380	416	508	248
10	1	1 124	364	1 480	436	524	248
11	1	1 208	408	1 564	440	540	296
12	1	1 272	396	1 640	436	556	308
13	1	1 344	400	1 712	452	568	292
14	1	1 384	416	1 792	436	580	320
15	1	1 452	420	1 848	440	592	312
16	1	1 496	440	1 888	472	604	320
17	1	1 532	432	1 960	476	616	336
18	1	1 584	448	1 996	484	632	344
19	1	1 616	444	2 028	488	640	324
20	1	1 716	448	2 080	496	652	340
21	1	1 696	456	2 100	480	664	360
22	1	1 744	452	2 160	496	680	356
23	1	1 776	420	2 192	500	692	344
24	1	1 796	244	2 232	464	704	356
25	1	1 856	436	2 288	492	720	360
26	2	1 908	436	2 348	500	752	400
27	2	1 956	436	2 392	512	776	408
28	2	1 992	420	2 432	512	800	400
29	2	2 028	432	2 464	520	824	404
30	2	2 076	444	2 500	524	844	400
31	2	2 072	448	2 528	504	864	408
32	2	2 088	436	2 548	508	884	392
33	2	2 108	464	2 552	528	904	400

34	2	2 164	456	2 552	524	920	432
35	2	2 180	372	2 612	496	940	436
36	2	2 208	460	2 620	348	964	436
37	24	2 452	484	2 800	540	1 628	528
38	24	2 668	508	2 968	536	2 324	544
39	24	3 256	492	3 148	544	2 916	588

Nota: Ensayo Físico-Químico fue realizado en el “Laboratorio de Aguas” de la Facultad de Ingeniería, Escuela Profesional de Ingeniería Ambiental, de la Universidad Privada de Tacna con reactivos químicos (PRO-ANALISIS), de acuerdo a la Norma A.O.A.C. (Association of Analytical Communities) – análisis instrumental.

Interpretación.

Zona 01.

Tabla 35

Valores de DBO₅ Aplicando el Reactivo de Fenton en la Zona 01 en las Aguas

Residuales Proveniente del Proceso de Alcalino de Aceitunas Verdes

Medición	Tiempo (h)	Valores de DBO ₅ (mg O ₂ /mL) aplicando Fenton			
		Zona 01			
		Sin tratar	Tratada	Diferencia	% de disminución
0	1	0	0	0	0
1	1	196	184	12	6,1
2	1	316	224	92	29,1
3	1	452	256	196	43,4
4	1	576	308	268	46,5
5	1	676	296	380	56,2
6	1	800	340	460	57,5
7	1	880	344	536	60,9
8	1	1 012	360	652	64,4
9	1	1 064	372	692	65,0
10	1	1 124	364	760	67,6
11	1	1 208	408	800	66,2
12	1	1 272	396	876	68,9
13	1	1 344	400	944	70,2
14	1	1 384	416	968	69,9
15	1	1 452	420	1 032	71,1
16	1	1 496	440	1 056	70,6
17	1	1 532	432	1 100	71,8
18	1	1 584	448	1 136	71,7

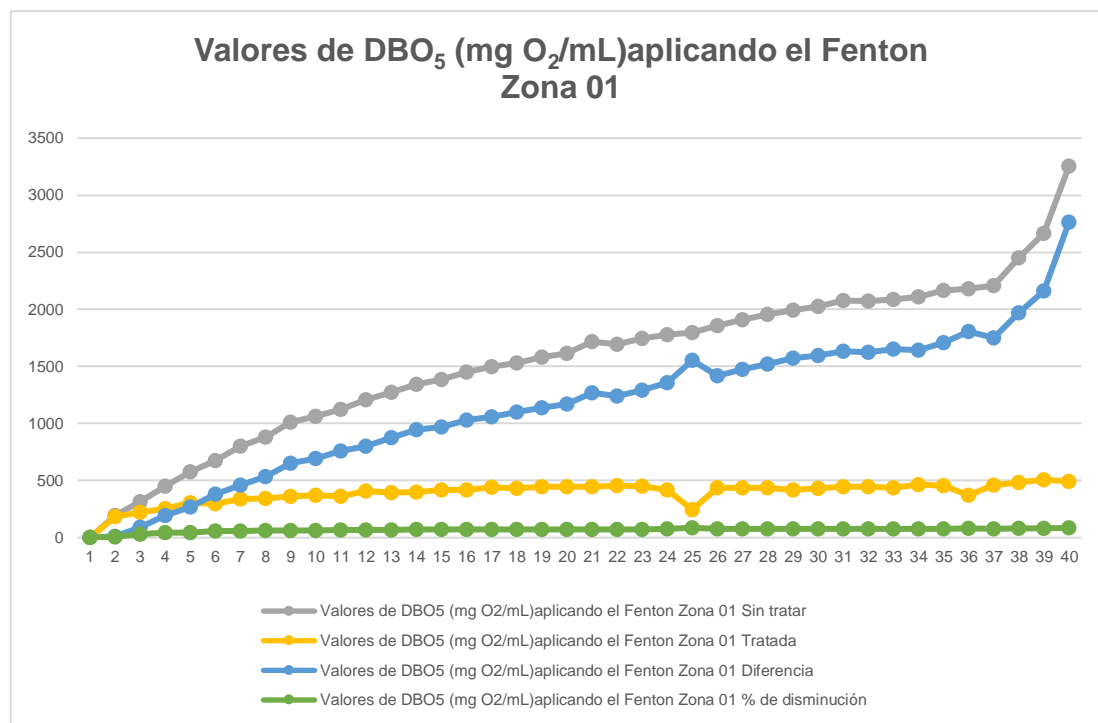
19	1	1 616	444	1 172	72,5
20	1	1 716	448	1 268	73,9
21	1	1 696	456	1 240	73,1
22	1	1 744	452	1 292	74,1
23	1	1 776	420	1 356	76,4
24	1	1 796	244	1 552	86,4
25	1	1 856	436	1 420	76,5
26	2	1 908	436	1 472	77,1
27	2	1 956	436	1 520	77,7
28	2	1 992	420	1 572	78,9
29	2	2 028	432	1 596	78,7
30	2	2 076	444	1 632	78,6
31	2	2 072	448	1 624	78,4
32	2	2 088	436	1 652	79,1
33	2	2 108	464	1 644	78,0
34	2	2 164	456	1 708	78,9
35	2	2 180	372	1 808	82,9
36	2	2 208	460	1 748	79,2
37	24	2 452	484	1 968	80,3
38	24	2 668	508	2 160	81,0
39	24	3 256	492	2 764	84,9

Nota: Ensayo Físico-Químico fue realizado en el “Laboratorio de Aguas” de la Facultad de Ingeniería, Escuela Profesional de Ingeniería Ambiental, de la Universidad Privada de Tacna con reactivos químicos (PRO-ANALISIS), de acuerdo a la Norma A.O.A.C. (Association of Analytical Communities) – análisis instrumental.

Como se puede apreciar en la tabla para la Zona 01, En cuanto a DBO₅, en las diferentes de mediciones en promedio se puede registrar la medición de miligramos de oxígeno en mililitros disueltos de la solución, donde se obtuvo el DBO₅ inicial de 3 256 O₂/mL y DBO₅ final de 492 mg O₂/mL , logrando disminuir solo el 84,9 %; siendo este el resultado de la aplicación del carbón activado, utilizando el test de jarras, y aplicando el método de respirometría con un catalizador de KOH al 45 %, y el inhibidor nitrificante; por 5 días de medición. Lo que se debe comparar con la normativa medioambiental vigente.

Figura 28

Valores de DBO₅ Aplicando el Reactivo de Fenton en la Zona 01 en las Aguas Residuales Proveniente del Proceso de Alcalino de Aceitunas Verdes



Nota: Elaboración propia.

Zona 02.

Tabla 36

Valores de DBO₅ Aplicando el Reactivo de Fenton en la Zona 02 en las Aguas Residuales Proveniente del Proceso de Alcalino de Aceitunas Verdes

Medición	Tiempo (h)	Valores de DBO ₅ (mg O ₂ /mL) aplicando Fenton			
		Zona 02			
		Sin tratar	Tratada	Diferencia	% de disminución
0	1	0	0	0	0
1	1	304	316	-12	-3,9
2	1	500	348	152	30,4
3	1	680	364	316	46,5
4	1	812	372	440	54,2
5	1	964	400	564	58,5
6	1	1 096	416	680	62,0
7	1	1 180	424	756	64,1

8	1	1 296	420	876	67,6
9	1	1 380	416	964	69,9
10	1	1 480	436	1 044	70,5
11	1	1 564	440	1 124	71,9
12	1	1 640	436	1 204	73,4
13	1	1 712	452	1 260	73,6
14	1	1 792	436	1 356	75,7
15	1	1 848	440	1 408	76,2
16	1	1 888	472	1 416	75,0
17	1	1 960	476	1 484	75,7
18	1	1 996	484	1 512	75,8
19	1	2 028	488	1 540	75,9
20	1	2 080	496	1 584	76,2
21	1	2 100	480	1 620	77,1
22	1	2 160	496	1 664	77,0
23	1	2 192	500	1 692	77,2
24	1	2 232	464	1 768	79,2
25	1	2 288	492	1 796	78,5
26	2	2 348	500	1 848	78,7
27	2	2 392	512	1 880	78,6
28	2	2 432	512	1 920	78,9
29	2	2 464	520	1 944	78,9
30	2	2 500	524	1 976	79,0
31	2	2 528	504	2 024	80,1
32	2	2 548	508	2 040	80,1
33	2	2 552	528	2 024	79,3
34	2	2 552	524	2 028	79,5
35	2	2 612	496	2 116	81,0
36	2	2 620	348	2 272	86,7
37	24	2 800	540	2 260	80,7
38	24	2 968	536	2 432	81,9
39	24	3 148	544	2 604	82,7

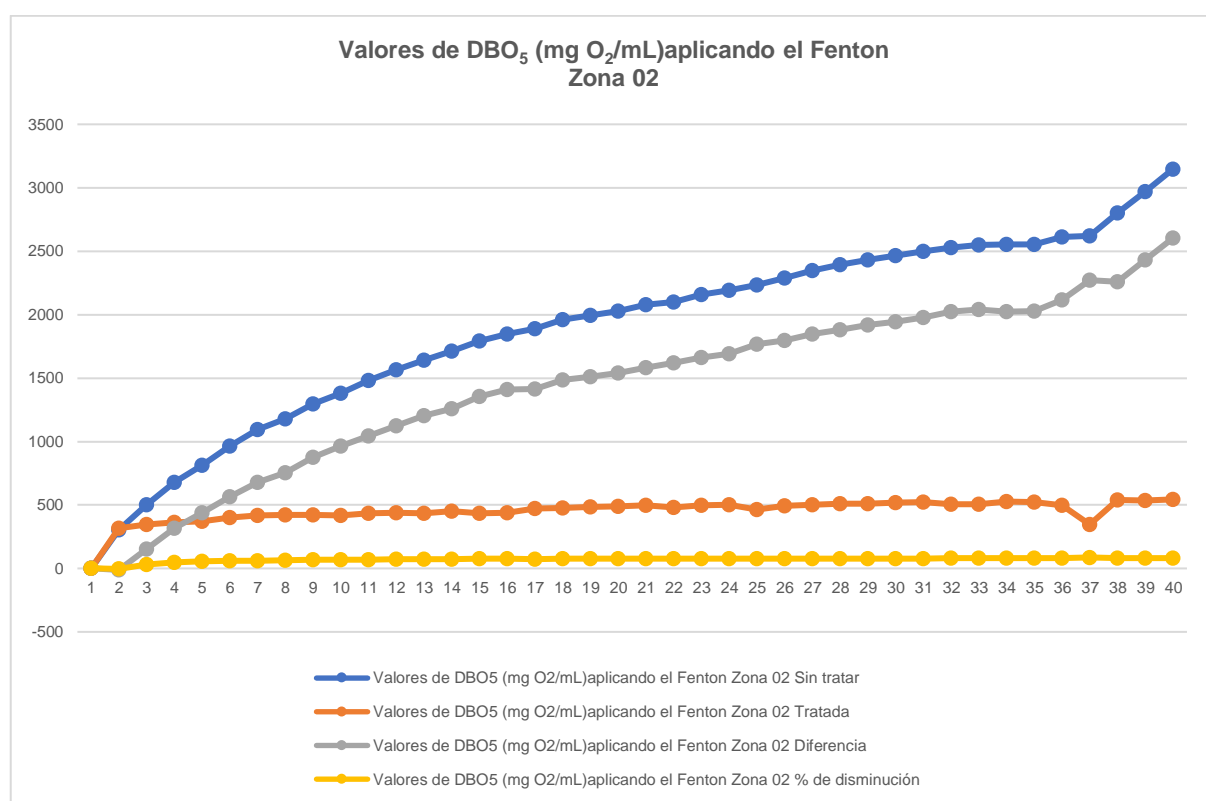
Nota: Ensayo Físico-Químico fue realizado en el “Laboratorio de Aguas” de la Facultad de Ingeniería, Escuela Profesional de Ingeniería Ambiental, de la Universidad Privada de Tacna con reactivos químicos (PRO-ANALISIS), de acuerdo a la Norma A.O.A.C. (Association of Analytical Communities) – análisis instrumental.

Como se puede apreciar en la tabla para la Zona 02, En cuanto a DBO₅, en las diferentes de mediciones en promedio se puede registrar la medición de miligramos de oxígeno en mililitros disueltos de la solución, donde se obtuvo el DBO₅ inicial de 3 148 O₂/mL y DBO₅ final de 544 mg O₂/mL , logrando disminuir solo el 82,7 %; siendo este

el resultado de la aplicación del carbón activado, utilizando el test de jarras, y aplicando el método de respirometría con un catalizador de KOH al 45 %, y el inhibidor nitrificante; por 5 días de medición. Lo que se debe comparar con la normativa medioambiental vigente.

Figura 29

Valores de DBO₅ Aplicando el Reactivo de Fenton en la Zona 02 en las Aguas Residuales Proveniente del Proceso de Alcalino de Aceitunas Verdes



Nota: Elaboración propia.

Zona 03.**Tabla 37**

Valores de DBO₅ Aplicando el Reactivo de Fenton en la Zona 03 en las Aguas Residuales Proveniente del Proceso de Alcalino de Aceitunas Verdes

Medición	Tiempo (h)	Valores de DBO ₅ (mg O ₂ /mL)aplicando Fenton			
		Zona 03			
		Sin tratar	Tratada	Diferencia	% de disminución
0	1	0	0	0	0
1	1	336	136	200	59,5
2	1	392	164	228	58,2
3	1	412	164	248	60,2
4	1	432	208	224	51,9
5	1	452	212	240	53,1
6	1	464	256	208	44,8
7	1	480	260	220	45,8
8	1	496	264	232	46,8
9	1	508	248	260	51,2
10	1	524	248	276	52,7
11	1	540	296	244	45,2
12	1	556	308	248	44,6
13	1	568	292	276	48,6
14	1	580	320	260	44,8
15	1	592	312	280	47,3
16	1	604	320	284	47,0
17	1	616	336	280	45,5
18	1	632	344	288	45,6
19	1	640	324	316	49,4
20	1	652	340	312	47,9
21	1	664	360	304	45,8
22	1	680	356	324	47,6
23	1	692	344	348	50,3
24	1	704	356	348	49,4
25	1	720	360	360	50,0
26	2	752	400	352	46,8
27	2	776	408	368	47,4
28	2	800	400	400	50,0
29	2	824	404	420	51,0
30	2	844	400	444	52,6
31	2	864	408	456	52,8

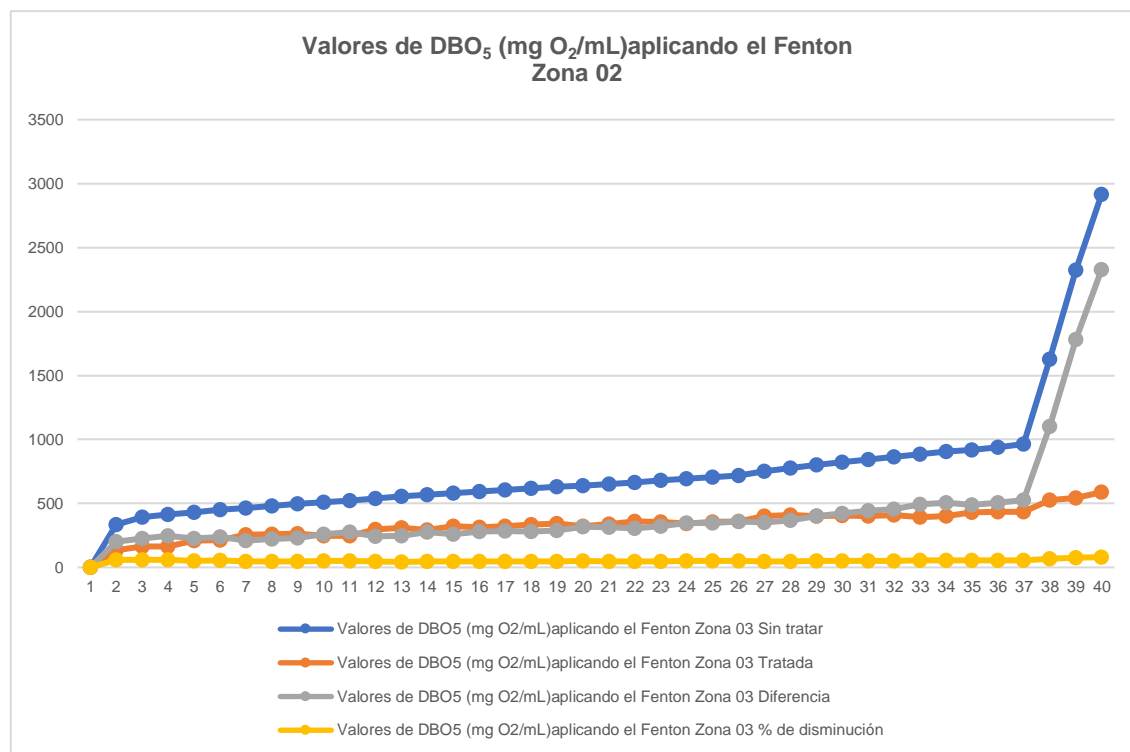
32	2	884	392	492	55,7
33	2	904	400	504	55,8
34	2	920	432	488	53,0
35	2	940	436	504	53,6
36	2	964	436	528	54,8
37	24	1 628	528	1 100	67,6
38	24	2 324	544	1 780	76,6
39	24	2 916	588	2 328	79,8

Nota: Ensayo Físico-Químico fue realizado en el “Laboratorio de Aguas” de la Facultad de Ingeniería, Escuela Profesional de Ingeniería Ambiental, de la Universidad Privada de Tacna con reactivos químicos (PRO-ANALISIS), de acuerdo a la Norma A.O.A.C. (Association of Analytical Communities) – análisis instrumental.

Como se puede apreciar en la tabla para la Zona 01, En cuanto a DBO₅, en las diferentes de mediciones en promedio se puede registrar la medición de miligramos de oxígeno en mililitros disueltos de la solución, donde se obtuvo el DBO₅ inicial de 2 916 O₂/mL y DBO₅ final de 588 mg O₂/mL , logrando disminuir solo el 79,8 %; siendo este el resultado de la aplicación del carbón activado, utilizando el test de jarras, y aplicando el método de respirometría con un catalizador de KOH al 45 %, y el inhibidor nitrificante; por 5 días de medición. Lo que se debe comparar con la normativa medioambiental vigente.

Figura 30

Valores de DBO₅ Aplicando el Reactivo de Fenton en la Zona 02 en las Aguas Residuales Proveniente del Proceso de Alcalino de Aceitunas Verdes



Nota: Elaboración propia.

Valores de DQO aplicando el reactivo de Fenton que intervienen a las aguas residuales proveniente del proceso de fermentación de aceitunas verdes estilo sevillana.

Tabla 38

Valores de DQO Aplicando el Reactivo de Fenton que Intervienen en las Aguas Residuales Proveniente del Proceso Alcalino para las Aceitunas Verde.

Valores de DQO (mg O ₂ /mL) aplicando Fenton					
Zona 01		Zona 02		Zona 03	
Sin tratar	Tratada	Sin tratar	Tratada	Sin tratar	Tratada
11 640	2 794	9 720	2 851	11 280	1 429

Nota: Ensayo Físico-Químico fue realizado en el “Laboratorio de Aguas” de la Facultad de Ingeniería, Escuela Profesional de Ingeniería Ambiental, de la Universidad Privada de Tacna con reactivos químicos (PRO-ANALISIS), de acuerdo a la Norma A.O.A.C. (Association of Analytical Communities) – análisis instrumental.

Interpretación.

Zona 01.

Tabla 39

Valores de DQO Aplicando el Reactivo de Fenton en la Zona 01 en las Aguas Residuales Proveniente del Proceso Alcalino para las Aceitunas Verde.

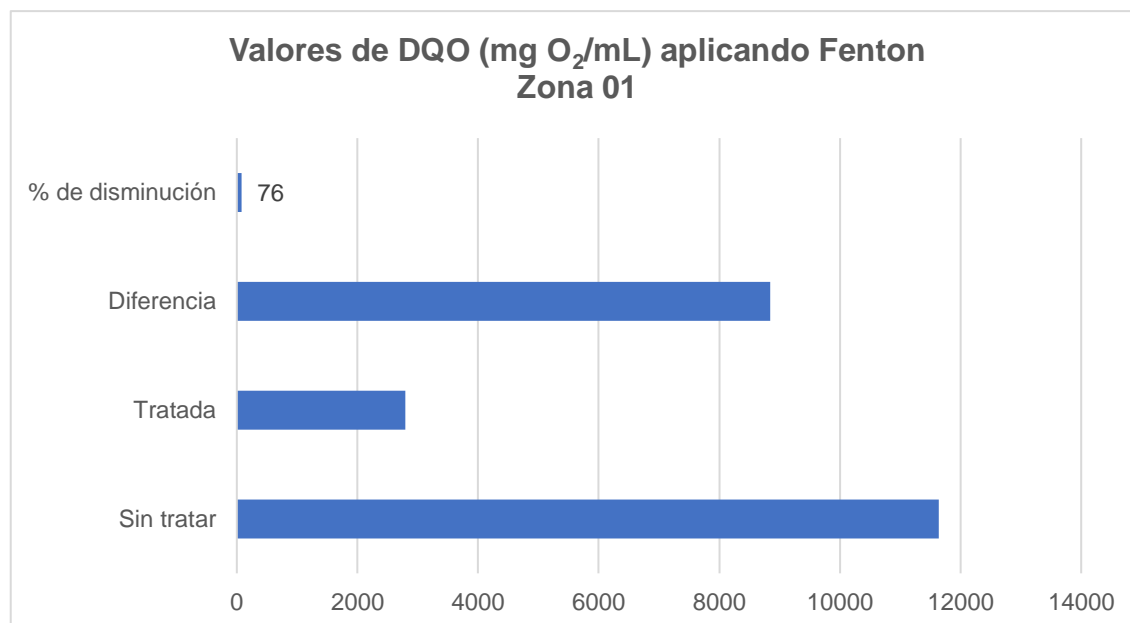
Valores de DQO (mg O₂/mL) aplicando Fenton			
Zona 01			
Sin tratar	Tratada	Diferencia	% de disminución
6 480	4 277	2 203	34,0

Nota: Ensayo Físico-Químico fue realizado en el “Laboratorio de Aguas” de la Facultad de Ingeniería, Escuela Profesional de Ingeniería Ambiental, de la Universidad Privada de Tacna con reactivos químicos (PRO-ANALISIS), de acuerdo a la Norma A.O.A.C. (Association of Analytical Communities) – análisis instrumental.

En cuanto a la demanda química de oxígeno (DQO), en la zona 01, respecto a las aguas residuales de la producción de aceituna verde estilo sevillana, se analizó y aplicó el tratamiento aplicando el carbón activado; se observó diferentes niveles de concentraciones, como: DQO inicial de 6 480 O₂/mL y DQO final de 4 277 mg O₂/mL, logrando disminuir solo el 34 %; utilizando el termoreactor para que pueda reaccionar con la solución de Dicromato/Ácido Sulfúrico, y llevarlo al fotómetro para su medición. Ahora se debe comparar con la normativa medioambiental vigente.

Figura 31

Valores de DQO Aplicando el Reactivo de Fenton en la Zona 01 en las Aguas Residuales Proveniente del Proceso Alcalino para las Aceitunas Verde



Nota: Elaboración propia.

Zona 02.**Tabla 40**

Valores de DQO Aplicando el Reactivo de Fenton en la Zona 02 en las Aguas Residuales Proveniente del Proceso Alcalino para las Aceitunas Verde.

Valores de DQO (mg O ₂ /mL) aplicando Fenton			
Zona 02			
Sin tratar	Tratada	Diferencia	% de disminución
6 480	4 277	2 203	34,0

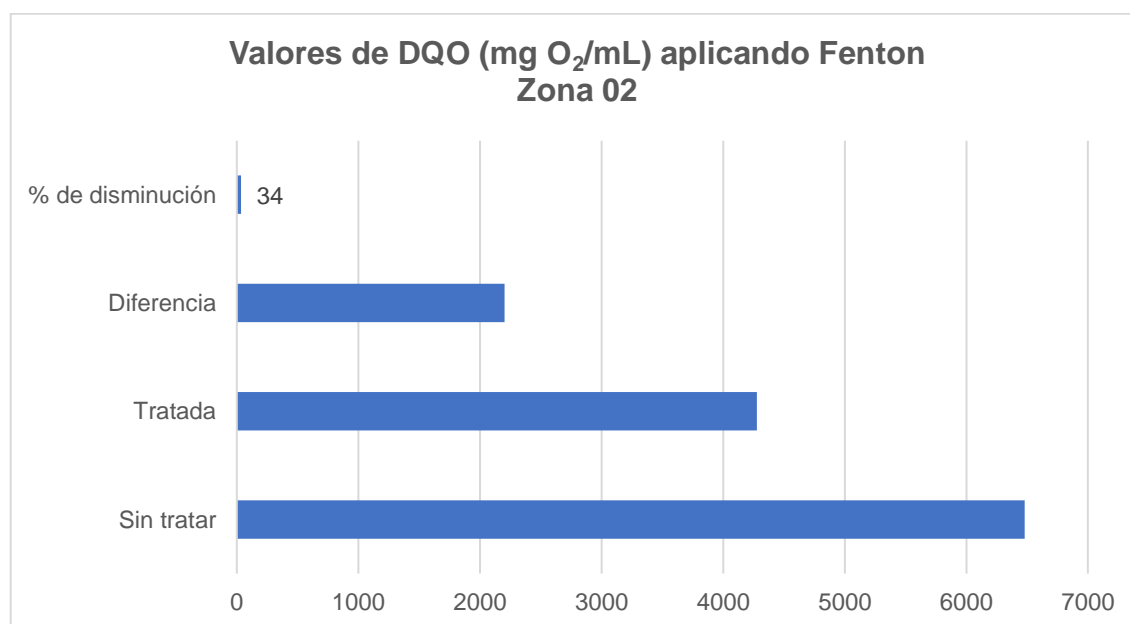
Nota: Ensayo Físico-Químico fue realizado en el “Laboratorio de Aguas” de la Facultad de Ingeniería, Escuela Profesional de Ingeniería Ambiental, de la Universidad Privada de Tacna con reactivos químicos (PRO-ANALISIS), de acuerdo a la Norma A.O.A.C. (Association of Analytical Communities) – análisis instrumental.

En cuanto a la demanda química de oxígeno (DQO), en la zona 01, respecto a las aguas residuales de la producción de aceituna verde estilo sevillana, se analizó y aplicó el tratamiento aplicando el carbón activado; se observó diferentes niveles de concentraciones, como: DQO inicial de 6 480 O₂/mL y DQO final de 4 277 mg O₂/mL,

logrando disminuir solo el 34,0 %; utilizando el termoreactor para que pueda reaccionar con la solución de Dicromato/Ácido Sulfúrico, y llevarlo al fotómetro para su medición. Ahora se debe comparar con la normativa medioambiental vigente.

Figura 32

Valores de DQO Aplicando el Reactivo de Fenton en la Zona 02 en las Aguas Residuales Proveniente del Proceso Alcalino para las Aceitunas Verde



Nota: Elaboración propia.

Zona 03.

Tabla 41

Valores de DQO Aplicando el Reactivo de Fenton en la Zona 03 en las Aguas Residuales Proveniente del Proceso Alcalino para las Aceitunas Verde.

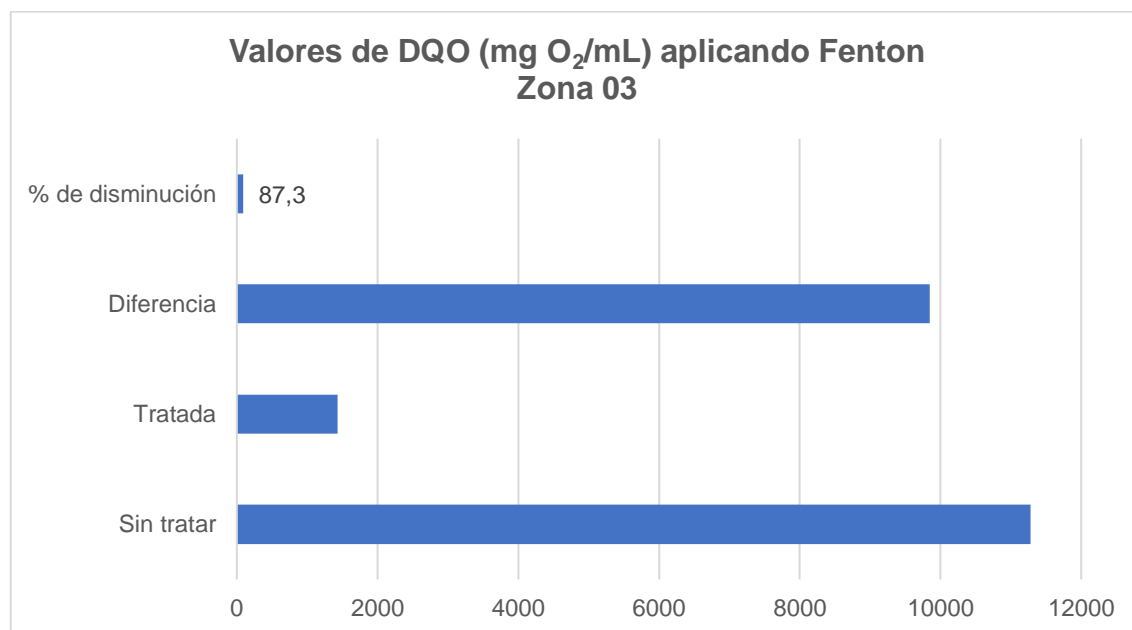
Valores de DQO (mg O ₂ /mL) aplicando Fenton			
Zona 03			
Sin tratar	Tratada	Diferencia	% de disminución
11 280	1 429	9 851	87,3

Nota: Ensayo Físico-Químico fue realizado en el “Laboratorio de Aguas” de la Facultad de Ingeniería, Escuela Profesional de Ingeniería Ambiental, de la Universidad Privada de Tacna con reactivos químicos (PRO-ANALISIS), de acuerdo a la Norma A.O.A.C. (Association of Analytical Communities) – análisis instrumental.

En cuanto a la demanda química de oxígeno (DQO), en la zona 01, respecto a las aguas residuales de la producción de aceituna verde estilo sevillana, se analizó y aplicó el tratamiento aplicando el carbón activado; se observó diferentes niveles de concentraciones, como: DQO inicial de 11 280 O₂/mL y DQO final de 1 429 mg O₂/mL, logrando disminuir solo el 87,3 %; utilizando el termoreactor para que pueda reaccionar con la solución de Dicromato/Ácido Sulfúrico, y llevarlo al fotómetro para su medición. Ahora se debe comparar con la normativa medioambiental vigente.

Figura 33

Valores de DQO Aplicando el Reactivo de Fenton en la Zona 03 en las Aguas Residuales Proveniente del Proceso Alcalino para las Aceitunas Verde



Nota: Elaboración propia.

c) **Establecer la diferencia de la disminución de los valores de DBO₅ y DQO entre la aplicación del carbón activado y la oxidación avanzada usando el reactivo de Fenton en las aguas residuales del proceso alcalino para aceitunas verdes en el distrito de la Yarada Los Palos, región Tacna, 2022.**

Factor: Disminución de los valores de DBO₅ entre la aplicación del carbón activado y la oxidación avanzada usando el reactivo de Fenton en las aguas residuales del proceso alcalino para aceitunas verdes.

Tabla 42

Factor: DBO₅ entre la Aplicación del Carbón Activado y la Oxidación Avanzada Usando el Reactivo de Fenton en las Aguas Residuales del Proceso Alcalino para Aceitunas Verdes

Valores de DBO ₅ (mg O ₂ /mL)			
Carbón Activado		Fenton	
Sin tratar	Tratada	Sin tratar	Tratada
3 984	1 068	3 106	541

Nota: Ensayo Físico-Químico fue realizado en el “Laboratorio de Aguas” de la Facultad de Ingeniería, Escuela Profesional de Ingeniería Ambiental, de la Universidad Privada de Tacna con reactivos químicos (PRO-ANALISIS), de acuerdo a la Norma A.O.A.C. (Association of Analytical Communities) – análisis instrumental.

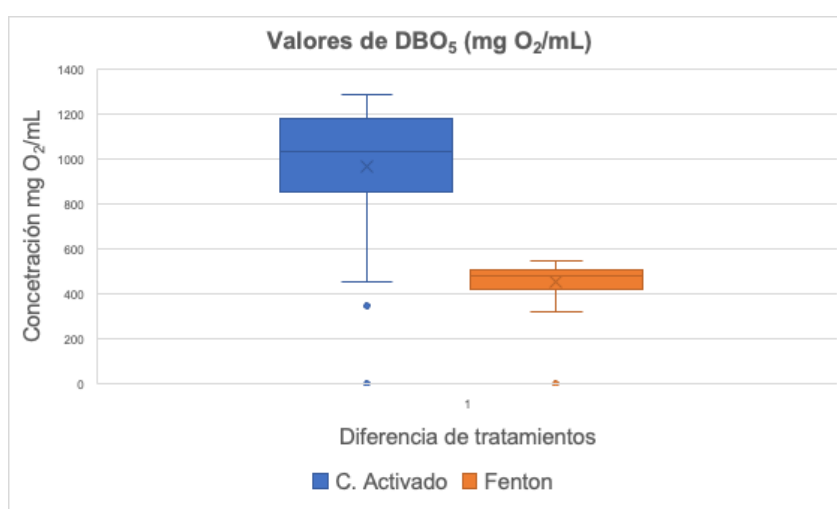
Interpretación.

Como se puede observar en la tabla, la demanda bioquímica de oxígeno (DBO₅) es un parámetro que mide la cantidad de sustancias oxidables por medios biológicos presentes en una muestra líquida, tanto disueltas como en suspensión, durante un período de 5 días mediante el método analítico de respirometría. Este parámetro se utiliza para evaluar el grado de contaminación y se expresa en miligramos de oxígeno disuelto por litro (mg O₂/L). En la etapa de tratamiento alcalino, usando una solución de NaOH para la producción de aceituna verde estilo sevillano, se observan diferentes niveles de DBO₅. Así, se puede verificar una diferencia con cada tratamiento: el carbón activado muestra un DBO₅ de 1 068 mg O₂/L, mientras que el reactivo de Fenton presenta un DBO₅ de 541 mg O₂/L. El carbón activado logra una disminución del 63 %, en comparación con el

reactivo de Fenton, que alcanza una reducción mayor del 82,48 %. Por lo tanto, el tratamiento con el reactivo de Fenton resulta ser más efectivo para reducir el DBO₅ en las aguas residuales.

Figura 34

Factor: DBO₅ entre la Aplicación del Carbón Activado y la Oxidación Avanzada Usando el Reactivo de Fenton en las Aguas Residuales del Proceso Alcalino para Aceitunas Verdes



Nota: Elaboración propia.

Factor: Disminución de los valores de DQO entre la aplicación del carbón activado y la oxidación avanzada usando el reactivo de Fenton en las aguas residuales del proceso alcalino para aceitunas verdes.

Tabla 43

Factor: DQO entre la Aplicación del Carbón Activado y la Oxidación Avanzada Usando el Reactivo de Fenton en las Aguas Residuales del Proceso Alcalino para Aceitunas Verdes

Valores de DQO (mg O₂/mL)			
Carbón Activado		Fenton	
Sin tratar	Tratada	Sin tratar	Tratada
3 984	1 068	3 106,67	541,33

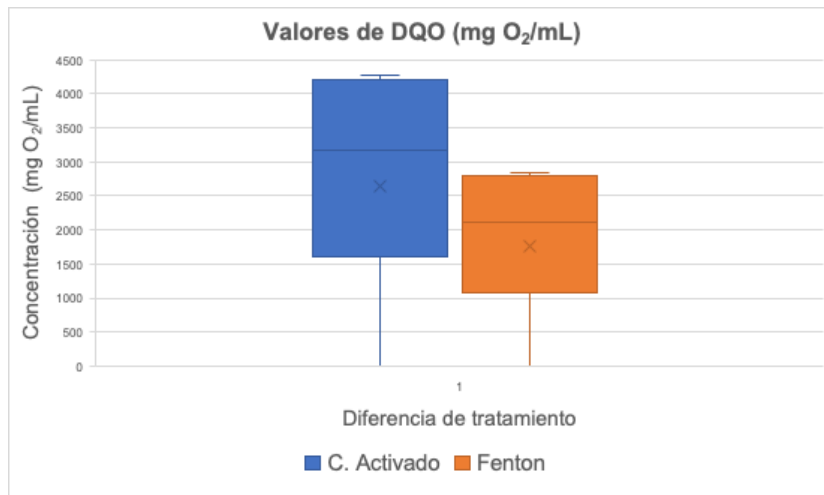
Nota: Ensayo Físico-Químico fue realizado en el “Laboratorio de Aguas” de la Facultad de Ingeniería, Escuela Profesional de Ingeniería Ambiental, de la Universidad Privada de Tacna con reactivos químicos (PRO-ANALISIS), de acuerdo a la Norma A.O.A.C. (Association of Analytical Communities) – análisis instrumental.

Interpretación.

Como se puede observar en la tabla, la demanda química de oxígeno (DQO) se define como cualquier sustancia tanto orgánica como inorgánica susceptible de ser oxidada, mediante un oxidante fuerte. La cantidad de oxidante consumida se expresa en términos de su equivalencia en oxígeno. DQO se expresa en mg O₂/L. En la etapa de tratamiento alcalino, usando una solución de NaOH para la producción de aceituna verde estilo sevillano se observan diferentes niveles de DQO. Así, se puede verificar una diferencia con cada tratamiento: el carbón activado muestra un DQO de 3 536,67 mg O₂/L, mientras que el reactivo de Fenton presenta un DQO de 2 358,0 mg O₂/L. El carbón activado logra una disminución del 63,80 %, en comparación con el reactivo de Fenton, que alcanza una reducción mayor del 33,32 %. Por lo tanto, el tratamiento con el reactivo de Fenton resulta ser más eficaz para reducir el DQO en las aguas residuales.

Figura 35

Factor: DQO entre la Aplicación del Carbón Activado y la Oxidación Avanzada Usando el Reactivo de Fenton en las Aguas Residuales del Proceso Alcalino para Aceitunas Verdes



Nota: Elaboración propia.

DISCUSIÓN

Los resultados obtenidos en las pruebas analíticas aplicadas en las aguas residuales del proceso alcalino para aceitunas verdes respecto a la demanda bioquímica de oxígeno DBO_5 con una concentración inicial promedio fue 3 984 $\text{mg O}_2/\text{mL}$ y 3 106 O_2/mL ; supera la normativa de los límites máximos permisibles (LMP), según el Decreto Supremo 003-2010-MINAM y Estándares de Calidad Ambiental para Agua (ECA-Agua) luego de la zona de mezcla con el efluente de las plantas de tratamiento de aguas residuales, establecidos en el Decreto Supremo 004-2017-MINAM; donde LMP es “la medida de la concentración o del grado de elementos, sustancias o parámetros físicos, químicos y biológicos que caracterizan a una emisión, que al ser excedida causa o puede causar daños a la salud, al bienestar humano y al ambiente”. Los LMP definen la calidad del efluente de las PTAR cuando se vierte a un cuerpo natural de agua. Según lo establecido debería tener un DBO_5 máximo de 100 $\text{mg O}_2/\text{mL}$ para los efluentes de PTAR a un cuerpo de agua, teniendo en cuenta que estas aguas residuales se clasificaran como agroindustriales, y sus características fisicoquímicas y microbiológicas, podrían interferir con el ensayo analítico, por el contenido de polifenoles, cloruros, y otra materia insoluble que pueda modificar en la obtención de datos. Pero cuando se aplicó el carbón activado en distintas concentraciones, en el equipo de test de jarras con un pH inicial de 6,64; se pudo verificar que se generó espuma por la agitación, y no logró precipitar instantáneamente la parte sólida; Las muestras obtenidas son preparadas, primeramente se tendrían que diluir para un mejor control de las mediciones; llevándolos a un pH en el rango de 6,5 – 7,5; y midiendo el volumen cuidadosamente para llevarlos a los reactores(botellas), donde ocurriría la reacción química aplicando el inhibidor nitrificante y el hidróxido de potasio al 45 % como catalizador. Obteniendo un resultado de DBO_5 de 1068 $\text{mg O}_2/\text{mL}$, lo que evidencia que el nivel de concentración del referido elemento químico ha disminuido, pero no dentro de lo establecido en la normativa. Cabe mencionar que el proceso de medición se hace en una etapa del tratamiento, para verificar su cambio o comportamiento frente al uso del compuesto químico. Cuando se aplicó el reactivo de Fenton, en un medio ácido con pH de 2,5-3,5; y recién aplicar el peróxido de hidrógeno(H_2O_2) al 33 % y sulfato de hierro (II) (FeSO_4); se obtuvo un DBO_5 de 541 mg

O₂/mL; lo que evidencia que el nivel de concentración del referido elemento químico ha disminuido, pero no dentro de lo establecido en la normativa; considerando el resultado aplicando el carbón activado frente al del reactivo de Fenton, este último tuvo mayor disminución del parámetro fisicoquímico de la demanda bioquímica de oxígeno. Se debería considerar neutralizar, el uso de floculantes y coagulantes en la muestra para la separación de lodos; y medir el DBO₅.

Sin embargo, en cuanto a la demanda química de oxígeno (DQO) en la producción de aceituna verde estilo sevillano, se observan diferentes niveles de concentración en las aguas residuales del proceso alcalino para aceitunas verdes. Las muestras obtenidas deben diluirse inicialmente para un mejor control de las mediciones, ajustándolas a un pH entre 6,5 y 7,5, y midiendo cuidadosamente un volumen de 0,2 mL para colocarlas en viales que contienen dicromato/H₂SO₄, donde se produce la reacción química a 150°C durante 120 minutos en un termoreactor. Tras el proceso, se utiliza un fotómetro para obtener el resultado cuantitativo. La DQO inicial promedio fue de 7 253,33 mg O₂/L y 10 880,00 mg O₂/L, superando los límites máximos permisibles (LMP) según el Decreto Supremo 003-2010-MINAM y los Estándares de Calidad Ambiental para Agua (ECA-Agua) del Decreto Supremo 004-2017-MINAM, que establecen que el LMP es la concentración de elementos, sustancias o parámetros que, al ser excedidos, pueden causar daños a la salud y al ambiente. Los LMP determinan la calidad del efluente de las plantas de tratamiento de aguas residuales (PTAR) al verterse en cuerpos de agua natural, con un DQO máximo permitido de 200 mg O₂/L para efluentes agroindustriales. Las características físico-químicas y microbiológicas de estas aguas, incluyendo polifenoles, cloruros y materia insoluble, pueden interferir en el análisis. Aplicando carbón activado en diferentes concentraciones, la muestra mostró una DQO de 3 536 mg O₂/L, lo que indica una reducción pero aún por encima de la normativa. Este proceso se mide en una etapa del tratamiento para evaluar el comportamiento frente al uso del compuesto químico. Con el uso del reactivo de Fenton (peróxido de hidrógeno al 33 % y sulfato de hierro (II)), se obtuvo una DQO de 2 358 mg O₂/L, demostrando una mayor disminución en la concentración, aunque todavía fuera de los límites normativos. El reactivo de Fenton resultó más eficaz que el carbón activado en la reducción de la DQO. Se debería

considerar el uso de floculantes y coagulantes para la separación de lodos y medir nuevamente la DQO.

Zorpas y Costa (2010), Combinación de oxidación Fenton y compostaje para el tratamiento del residuo sólido de aceituna y las aguas residuales de la milla de olivo procedentes de la industria del aceite de oliva en Chipre. Instituto de Tecnología Ambiental y Desarrollo Sostenible, Departamento de Investigación y Desarrollo, Laboratorio de Tecnología Amigable con el Medio Ambiente, Chipre. El co-compostaje de residuos sólidos de aceite de oliva (OOSR) y aguas residuales tratadas (con Fenton) del proceso de producción de aceite de oliva se ha estudiado como un método alternativo para el tratamiento de aguas residuales que contienen altos contaminantes orgánicos y tóxicos en la pequeña industria del aceite de oliva en Chipre. Los resultados experimentales indicaron que el agua residual de la almazara (OMW) se desintoxica al final del proceso Fenton y la DQO se reduce hasta un 70 %. El material co-compostado final de OOSR con las aguas residuales tratadas de la milla del olivo (TOMW) se presenta con características óptimas y es apto para fines agrícolas. El producto final que sale de un reactor en recipiente parece madurar más rápido que el producto del sistema en hileras y se presenta con un mejor acondicionador del suelo.

Zorpas y Costa (2010), combinaron la oxidación Fenton y el compostaje para el tratamiento de residuos sólidos de aceituna y aguas residuales de almazara de la industria del aceite de oliva chipriota. Departamento de Tecnología Ambiental y Sostenibilidad, Departamento de Investigación y Desarrollo, Laboratorio de Tecnologías Ambientales, Chipre. El co-compostaje de residuos sólidos de aceite de oliva (OOSR) y aguas residuales tratadas de los procesos de producción de aceite de oliva (Fenton) se ha investigado como un método alternativo para el tratamiento de aguas residuales que contienen grandes contaminantes orgánicos y tóxicos de industrias de aceite de oliva de pequeña escala. Los resultados experimentales muestran que las aguas residuales de las almazaras (OMW) se desintoxican al final del proceso Fenton y la DQO se reduce hasta en un 70 %. El material co-compostado final de OOSR con aguas residuales tratadas (TOMW) tiene propiedades óptimas y es adecuado para uso agrícola. El producto final que sale del reactor de tanque parece madurar más rápido que el producto que sale del

sistema de surcos y parece ser una mejor enmienda del suelo.

Lucas y Pérez (2009), también son relevantes. La eliminación de DQO de aguas residuales oleaginosas utilizando el reactivo de Fenton: un estudio cinético. Centro de Química de la Universidad de Tras-os-Montes y Alto Douro (UTAD), Portugal. La conclusión es utilizar el reactivo de Fenton ($\text{H}_2\text{O}_2/\text{Fe}^{2+}$) para eliminar la demanda química de oxígeno (DQO) de las aguas residuales de una refinería de petróleo (OMW) en un reactor discontinuo a escala de laboratorio. Se evaluaron los efectos de diferentes condiciones operativas (es decir, concentraciones de peróxido de hidrógeno e iones férricos, temperatura y pH inicial). Monitoreo en línea de ORP, pH y oxígeno disuelto. Si el pH inicial es 3,5, la temperatura es 30°C , la relación molar $\text{H}_2\text{O}_2/\text{Fe}^{2+} = 15$ y la relación en peso $R = \text{H}_2\text{O}_2/\text{DQO} = 1,75$, la tasa de conversión de DQO es 70 %. Los estudios cinéticos se realizaron utilizando un modelo de pseudo primer orden modificado. Los experimentos realizados a diferentes temperaturas permitieron calcular los parámetros de la ecuación de Arrhenius y la energía de activación global de la reacción de pseudo primer orden (28,2 kJ/mol).

La oxidación Fenton y la coagulación/floculación se combinan para tratar efluentes de refinería altamente concentrados. LEPABE – Laboratorio de Ingeniería de Procesos, Medio Ambiente, Biotecnología y Energía, Facultad de Ingeniería, Universidad de Oporto, Portugal. Se describe la efectividad de un proceso tipo Fenton/Fenton para la oxidación de materia orgánica en aguas residuales de refinerías de petróleo (OMW) reales. Las pruebas se llevaron a cabo en un reactor discontinuo a escala de laboratorio y se evaluaron los efectos de diversos parámetros operativos, a saber: el tipo de sal de hierro, el efecto del ajuste del pH durante la reacción, el método de adición de reactivo y la relación másica $\text{Fe}/\text{H}_2\text{O}_2$. Para el sistema tipo Fenton ($\text{Fe}^{3+}/\text{H}_2\text{O}_2$), encontramos que el consumo de H_2O_2 y la tasa resultante de descomposición del carbono orgánico total (TOC) se vieron significativamente afectados por el método de adición de reactivo, especialmente en el primer paso de la reacción, aunque el TOC no lo hizo. no proporciona el monto total de la remoción. Los resultados mostraron que la demanda química de oxígeno (DQO) y el contenido fenólico total (TPh) se pueden reducir mejor, agregando gradualmente H_2O_2 y ajustando el pH durante el proceso. Operando a $\text{pH}_0 = 3,0$, $T_0 = 25$

°C, $[\text{Fe}^{3+}] = 1,0 \text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ y $\text{Fe}/\text{H}_2\text{O}_2 = 0,04$, se eliminó 34,9 % de TOC después de 180 min, 55,7 % de DQO y 81,4 % de TPh. En las mismas condiciones, utilizando irradiación artificial (proceso tipo foto-Fenton), la degradación de la materia orgánica mejoró ligeramente (TOC 41,8 %, DQO 63,2 %, eliminación total de fósforo 83,8 %). La capacidad del catalizador (sal de cloruro de hierro (III)) para actuar como coagulante/floculante después del proceso de oxidación también se probó con una reducción total de DQO del 76,7 % y TPh del 96,4 % después de 1 h de precipitación sin ajuste adicional del pH. . Además, la biodegradabilidad (relación $\text{DBO}_5:\text{DQO}$) de los efluentes tratados combinados aumentó del valor inicial de 0,11 a 0,33, y la toxicidad para la bacteria bioluminiscente *Vibrio fischeri* disminuyó del 53 % al 4 %, lo que destaca la posibilidad de una conexión. Aguas abajo de la unidad biológica para que el efluente final cumpla con los límites de descarga legales (Esteves et al., 2019).

El tratamiento de salmueras de fermentación de aceitunas verdes, realizado en la Unidad Estructural de Biotecnología de Alimentos del Instituto de la Grasa y sus Derivados en Sevilla, España. En este estudio, se investigaron diversos tratamientos de regeneración aplicables a las salmueras de fermentación de aceitunas verdes estilo sevillano para su reutilización en otras etapas del proceso productivo, especialmente en el envasado final de los frutos. Esto permitiría reducir el vertido de soluciones responsables de la carga contaminante en el efluente industrial. Los dos métodos más efectivos son la adsorción con carbón activo, seguida de filtración tangencial para separar el absorbente, y la ultrafiltración. El tipo de carbón activo más eficiente es el denominado GA, utilizado en una proporción de 5 a 10 g por litro. En el caso de la ultrafiltración, una membrana de polisulfona de 1 000 daltons de corte molecular es adecuada, operando a una presión de 18 bares. Un pretratamiento con bentonita (2 g/L), a temperaturas entre 30 y 45 °C y con baja concentración inicial de polifenoles y sólidos en suspensión, aumenta significativamente el rendimiento. Un análisis económico preliminar sugiere que la regeneración mediante cualquiera de los dos métodos resulta en una salmuera regenerada más económica que la preparación del líquido de gobierno a partir de sus componentes. Estos hallazgos también se relacionan con el estudio de Cabrera (1995), titulado “Características y tratamiento de las aguas residuales industriales por sectores: molturado de aceituna para la obtención de aceite de oliva virgen”, que concluyó que el aceite de

oliva se obtiene mediante métodos de presión en discontinuo o centrifugación en continuo, resultando en tres fases: aceite (20 %), residuo sólido (30 %) y licor acuoso (50 %). El residuo sólido (orujo), compuesto por pulpa, huesos del fruto, aceite y agua, se utiliza para la extracción de aceite y, una vez agotado (orujillo), como combustible. Otros usos del orujo y del orujillo incluyen la alimentación animal y la producción de abonos orgánicos, composts, carbones activos y furfural (Garrido et al.1992).

Asimismo, tales hallazgos se relacionan con L. Ioannou-Ttofa et al., (2017). En el estudio de las aguas residuales de almazara (OMW) son un importante flujo residual resultante de numerosas operaciones que se producen durante las etapas de producción del aceite de oliva. El efluente resultante contiene diversos contaminantes orgánicos e inorgánicos y su impacto ambiental puede ser notable. El presente trabajo tiene como objetivo investigar la eficiencia de (i) reactor jet-loop con sistema de membrana de ultrafiltración (UF) (Jacto.MBR), (ii) oxidación solar foto-Fenton después del pretratamiento de coagulación/floculación y (iii) procesos integrados de filtración por membrana (es decir, UF/nanofiltración (NF)) utilizados para el tratamiento de OMW. Según los resultados, la eficiencia del tratamiento biológico fue alta, equivalente a un 90 % de DQO y un 80 % de eliminación de compuestos fenólicos totales (TPh). Se logró una remoción de DQO superior al 94 % aplicando el proceso de fotooxidación solar-Fenton como post-tratamiento de coagulación/floculación de la AMO, mientras que se eliminó completamente la fracción fenólica. El proceso combinado de UF/NF dio como resultado una conductividad muy alta y una eliminación de DQO, hasta un 90 % y un 95 %, respectivamente, mientras que los TPh se concentraron en la corriente de concentrado de NF (es decir, una concentración del 93 %). Muy importante es el hecho de que el concentrado NF, una corriente valiosa y rica en polifenoles, puede valorizarse aún más en diversas industrias (por ejemplo, alimentaria, farmacéutica, etc.). También se descubrió que los procesos de tratamiento anteriores podían reducir la fitotoxicidad inicial de OMW en experimentos de invernadero; siendo la corriente de efluente del proceso fotoFenton solar la menos fitotóxica en comparación con los otros efluentes tratados. Se realizó un análisis FODA (Fuerzas, Debilidades, Oportunidades, Amenazas), con el fin de determinar tanto las fortalezas de cada tecnología, como los posibles obstáculos a superar para alcanzar los niveles de tratamiento deseados. Finalmente, se realizó una

evaluación económica de las tecnologías probadas en un esfuerzo por medir la aplicabilidad y viabilidad de estos sistemas a escala real; destacando que el coste no puede considerarse un "criterio de corte", ya que la opción más rentable no siempre es la óptima.

CONCLUSIONES

1. Se ha establecido que los resultados obtenidos en las pruebas analíticas aplicadas en las aguas residuales del proceso alcalino para aceitunas verdes respecto a la demanda bioquímica de oxígeno DBO₅ con una concentración inicial promedio fue 3 984 mg O₂/mL; supera la normativa de los límites máximos permisibles (LMP), según el Decreto Supremo 003-2010-MINAM y Estándares de Calidad Ambiental para Agua (ECA-Agua) luego de la zona de mezcla con el efluente de las plantas de tratamiento de aguas residuales, establecidos en el Decreto Supremo 004-2017-MINAM.. Según la normativa que no especifica las aguas residuales provenientes de la agroindustria establece un DBO₅ máximo de 100 mg O₂/mL, las características fisicoquímicas y microbiológicas, podrían interferir con el ensayo analítico, por el contenido de polifenoles, cloruros, y otra materia insoluble que pueda modificar en la obtención de datos. Al aplicar el carbón activado en distintas concentraciones, en el equipo de test de jarras con un pH inicial de 6,64; se generó espuma por la agitación, donde no se modificó el pH, y no logra precipitar instantáneamente la parte sólida; Las muestras obtenidas son preparadas, se diluyen en relaciones de 1:4 o 1:6, según será la característica de las aguas(sólidos insolubles) para un mejor control de las mediciones; llevándolos a un pH en el rango de 6,5 – 7,5 antes de colocarlos en los reactores del equipo del DBO; el volumen debe ser cuidadosamente medido para llevarlos a los reactores(botellas), donde ocurre la reacción química aplicando el inhibidor nitrificante y el hidróxido de potasio al 45 % como catalizador. Obteniendo un resultado de DBO₅ de 1 068 mg O₂/mL, lo que evidencia que el nivel de concentración del referido elemento químico ha disminuido, pero no dentro de lo establecido en la normativa. Cabe mencionar que el proceso de medición se hace en una etapa del tratamiento, para verificar su cambio o comportamiento frente al uso del compuesto químico.
2. Se ha establecido para la demanda bioquímica de oxígeno DBO₅ con una concentración inicial promedio fue 3 106 O₂/mL; supera la normativa de los

límites máximos permisibles (LMP), según el Decreto Supremo 003-2010-MINAM y Estándares de Calidad Ambiental para Agua (ECA-Agua). Los LMP definen la calidad del efluente de las PTAR cuando se vierte a un cuerpo natural de agua. Según lo establecido debería tener un DBO_5 máximo de $100 \text{ mg O}_2/\text{mL}$ para los efluentes; Al aplicar el reactivo de Fenton, en un medio ácido con pH de 2,5-3,5; usando el peróxido de hidrógeno (H_2O_2) al 33 % y sulfato de hierro (II) (FeSO_4); se obtuvo un DBO_5 de $541 \text{ mg O}_2/\text{mL}$; lo que evidencia que el nivel de concentración del referido elemento químico ha disminuido, pero no dentro de lo establecido en la normativa; En el caso de la demanda química de oxígeno (DQO) en la producción de aceituna verde estilo sevillano, para diferentes niveles de concentración en las aguas residuales del proceso alcalino para aceitunas verdes. Las muestras analizadas se diluyeron en relación de 1:4 y 1:6 inicialmente para un mejor control de las mediciones, ajustándolas a un pH entre 6,5 y 7,5, y midiendo cuidadosamente un volumen de 0,2 mL o 2mL según sea el rango estimado del DQO estimado, colocándolas en viales con dicromato/ H_2SO_4 , donde se produce la reacción química a 150°C durante 120 minutos en un termoreactor. Tras el proceso, se utiliza un fotómetro para obtener el resultado cuantitativo. La DQO inicial promedio fue de $10\ 880,00 \text{ mg O}_2/\text{L}$, superando los límites máximos permisibles (LMP) según el Decreto Supremo 003-2010-MINAM y los Estándares de Calidad Ambiental para Agua (ECA-Agua) del Decreto Supremo 004-2017-MINAM, que establecen que el LMP es la concentración de elementos, sustancias o parámetros que, al ser excedidos, pueden causar daños a la salud y al ambiente. Los LMP determinan la calidad del efluente de las plantas de tratamiento de aguas residuales (PTAR) al verterse en cuerpos de agua natural, con un DQO máximo permitido de $200 \text{ mg O}_2/\text{L}$ para efluentes agroindustriales. Las características físico-químicas y microbiológicas de estas aguas, incluyendo polifenoles, cloruros y materia insoluble, pueden interferir en el análisis. Aplicando carbón activado en diferentes concentraciones; Con el uso del reactivo de Fenton (peróxido de hidrógeno al 33 % y sulfato de hierro (II)), se obtuvo una DQO de $2\ 358 \text{ mg O}_2/\text{L}$, demostrando una mayor disminución en la concentración en las aguas residuales del proceso alcalino para aceitunas verdes en el distrito de la Yarada Los Palos, región Tacna, 2022.

3. La aplicación de la oxidación avanzada usando el reactivo de Fenton; que contiene $\text{H}_2\text{O}_2 / \text{Fe}^{2+}$ en medio ácido de 2,5 a 3,5 de pH, no genera espuma y generando que precipite la parte sólida; para su mejor medición; a diferencia del uso del Carbón Activado, genera espuma y no muestra materia precipitante de forma instantánea; esto ocurre después de 24 horas, quedando aún materia suspendida, siendo este una interferencia para la obtención de datos fisicoquímico, teniendo como resultado que se encuentra “FUERA DE RANGO” en el equipo de fotometría. El reactivo de Fenton resultó más eficaz que el carbón activado en la reducción de la DQO, que el Carbón Activado. Cabe mencionar que no se obtiene los resultados según la normativa, ya que aún no se aplicó el proceso de neutralización, coagulante y floculantes; ya que esto podría disminuir aún más la materia orgánica que se encuentra en las aguas residuales; ayudando a separar los lodos; y poder tener un mecanismo óptimo para su tratamiento, siendo estas aguas residuales agroindustriales provenientes del proceso de fermentación de aceitunas verdes estilo sevillana que influye en la contaminación del suelo en el distrito de la Yarada Los Palos, que contienen distintos factores fisicoquímicos y microbiológico que alteran los resultados esperados para una reducción del DQO.
4. En relación con los polifenoles, los estudios han demostrado que estos compuestos son sensibles a cambios en el pH, experimentando degradación oxidativa en medios alcalinos, y demostrando una mejor estabilidad en pH inferiores a 5,0 (Boza et al. 2000). Además, es importante destacar que las aguas residuales generadas durante el proceso de fermentación de aceitunas contienen un alto contenido de compuestos fenólicos, los cuales son difíciles de degradar y poseen un carácter fitotóxico para el suelo.

RECOMENDACIONES

1. La medición de compuestos fenólicos podrían tener una influencia en el tratamiento de las aguas residuales proveniente del proceso alcalino de las aceitunas verdes, ya que la variedad de aceituna que se encuentra en nuestra ciudad, es la variedad “Sevillana”; para poder entender el grado de maduración respecto al tiempo de cosecha; al contener un amplio grupo de sustancias químicas, consideradas metabolitos secundarios diluidas en las soluciones del proceso de producción de estas aceitunas verdes.
2. Además, se insta al Órgano de Fiscalización Ambiental de Tacna (OEFA) a proceder con la fiscalización en el distrito de la Yarada Los Palos para identificar y determinar la responsabilidad de los productores de aceituna en la contaminación de suelos causada por las aguas residuales del tratamiento de aceitunas. Según la Ley N° 29325, Ley del Sistema Nacional de Evaluación y Fiscalización Ambiental (SINEFA), la OEFA tiene la responsabilidad de supervisar, fiscalizar y sancionar a las entidades que incumplan con las normativas ambientales. Al Ministerio de Agricultura, se le solicita ordenar la elaboración de un Informe de identificación de sitios contaminados (suelo) y un Plan de descontaminación de suelos en el distrito de la Yarada Los Palos, región de Tacna, debido a la contaminación por aguas residuales provenientes del proceso de fermentación de aceitunas. Esta acción debe basarse en la Guía para la elaboración de planes de descontaminación de suelos en el marco del Decreto Supremo N° 002-2013-MINAM, que aprueba los Estándares de Calidad Ambiental (ECA). Este decreto establece los parámetros y valores de referencia para evaluar la calidad ambiental y la protección de la salud humana y los ecosistemas, especificando límites permisibles para diversos contaminantes en el suelo.
3. En cuanto a la gestión de aguas residuales, el Decreto Supremo N° 003-2010-MINAM establece los Límites Máximos Permisibles (LMP) para los efluentes de actividades industriales, incluidos aquellos provenientes de la agroindustria

de aceitunas. Estos LMP son valores de referencia que determinan la calidad de los efluentes vertidos a cuerpos de agua y deben ser cumplidos para proteger la salud pública y el medio ambiente. La Ley N° 28611, Ley General del Ambiente, también promueve la gestión integral de los recursos hídricos, estableciendo la necesidad de prevenir y controlar la contaminación de las aguas, y asegurar que las actividades industriales implementen sistemas de tratamiento adecuados para sus aguas residuales.

1. El cumplimiento de estas normativas asegura que los productores de aceitunas en la región adopten medidas correctivas para tratar sus aguas residuales adecuadamente, minimizando la carga contaminante y protegiendo los recursos hídricos y suelos del distrito de la Yarada Los Palos. La implementación de estas regulaciones es fundamental para la sostenibilidad ambiental y la salud de las comunidades locales.

4. Realizar un estudio detallado de los lodos generados del tratamiento de aguas residuales provenientes del proceso alcalino en la producción de aceitunas verdes estilo sevillano, para asegurar el cumplimiento de la normativa vigente. Aunque la normativa actual no especifica el tratamiento, manejo y características exactas de estas aguas residuales, es crucial para Tacna, siendo la principal región productora de aceitunas en nuestro país, implementar prácticas que alineen con el Decreto Supremo N° 003-2010-MINAM, que establece los Límites Máximos Permisibles (LMP) para efluentes industriales, y con la Ley N° 28611, Ley General del Ambiente, que promueve la gestión adecuada de residuos y efluentes para proteger el medio ambiente y la salud pública.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Agroecología Universidad Cochabamba-Bolivia (1988). *Manual Práctico para la interpretación de análisis de suelos en Laboratorio*.
- Bonini C., M. D'Auria, L. Emanuele, R. Ferri, R. Pucciariello, A.R. Sabia, (2005) *Polyurethanes and polyesters from lignin, J. Appl. Polym. Sci.* 98 1451e1456.
- Caballero, A. (2014). *Metodología integral innovadora para planes y tesis*. Lima.
- Cabrera, F. (1995). *Características y tratamiento de las aguas residuales industriales por sectores: molturado de aceituna para la obtención de aceite de oliva virgen*. Instituto de Recursos Naturales y Agrobiología de Sevilla, CSIC.
- Cabrera, F. (1995). *Características y tratamiento de las aguas residuales industriales por sectores: molturado de aceituna para la obtención de aceite de oliva virgen*. Instituto de Recursos Naturales y Agrobiología de Sevilla, CSIC. Apartado 1052, 41080 Sevilla.
- Campos, C. (2003). *Los procesos de control interno en el departamento de ejecución presupuestal de una institución del Estado*. (Tesis de maestría). Universidad Nacional Mayor de San Marcos – Lima
- Clavijo, C.; Chipana, V.; Centeno; Zúñiga, D. y Guillén, C. (2012). *Aislamiento, caracterización e identificación de Bacterias Diazotróficas de la Rizósfera del Cultivo de Olea europea*, en Tacna Perú. Universidad Nacional Agraria La Molina – Lima.
- Decreto Supremo N° 002-2013-MINAM
- Domènech, X. & Peral, J. (2012). *Química Ambiental de sistemas terrestres José Peral* (Profesor Titular de Universidad de Química Física) Departamento de Química Universitat Autònoma de Barcelona, Editorial Reverté. S.A.

- Enciclopedia (2017). *Definición de sólidos disueltos*. Recuperado de www.carbotecnia.info/encyclopedia/solidos-disueltos-totales-tds/
- Espinoza, J. (2014). *Gestión de los efluentes líquidos generados en la Planta de Harina y Aceite de Pescado, de la Empresa Corporación PFG-Centinela SAC*. (Tesis de grado). Universidad Nacional de Trujillo.
- Estrada, J. (2011). *La aceituna de mesa: Nociones sobre sus características, elaboración y cualidades*. Andalucía.
- Fernández et al (1985). *Biotecnología de la aceituna de mesa. Instituto de la Grasa y sus Derivados*. C.S.I.C. Sevilla - España.
- Fernández, J.; Arreghini, M.; Ugarte, S.; Herrero, C.; Herrero, O. y Maya, S. *Efluentes líquidos del procesamiento de las aceitunas verdes en fresco. Situación en la provincia de Mendoza. Grupo de Estudios Tratamiento de Aguas Residuales (G.E.S.T.A.R.) Inst. Medio Amb. – Fac. Ing. (D.E.T.I.). - U.N. Cuyo Centro Universitario - Mendoza - República Argentina*.
- Ferrarese E., G. Andreottola, I.A. Oprea, (2008) Remediation of PAH-contaminated sediments by chemical oxidation, *J. Hazard Mater.* 152 128e139.
- García, P. y Sánchez, A. (2005). *Primer curso de elaboración de aceituna de mesa*. CITE-Agroindustrial Tacna – Junta de Andalucía – EXTENDA (Agencia Andaluza de Promoción Exterior). Tacna-Perú.
- Garrido, A. (1979). *Modificaciones de los procesos de elaboración y envasado de aceitunas verdes de mesa en relación con la eliminación y reúsos de vertidos.II. XV Asamblea de Miembros del Instituto de la Grasa y sus Derivados*. Sevilla.
- Garrido, A. (1991). *Elaboración de la aceituna de mesa*”. *Boletín de Servicios Agrícolas de la FAO 81*. Roma.
- Garrido, A. (1980). *Aguas residuales del aderezo de aceitunas. Posibilidades de tratamiento y reutilización*”. *Seminario sobre tratamiento y reciclado de aguas*

residuales de bajos costos económicos y energéticos. OCDE. Ministerio de Obras Públicas. Madrid.

Garrido, A. (1983). *Grasas y aceites*. Instituto de la Grasa y sus Derivados. Sevilla - España.

Garrido, A.; Brenes, M. y García, P. (1992). *Tratamiento de salmueras de fermentación de aceitunas verdes. Unidad Estructural de Biotecnología de Alimentos*. Instituto de la Grasa y sus Derivados. Sevilla - España.

Garrido, A.; García, P.; López, A. ; y Arroyo, N. (2004). *Características nutricionales del aceite de oliva y las aceitunas de mesa. Instituto de la Grasa y sus Derivados – Enciclopedia del Olivo del TDC-OLIVE*. Sevilla - España.

Geboers J.A., S. Van de Vyver, R. Ooms, B.O. de Beeck, P.A. Jacobs, B.F. Sels, (2011) Chemocatalytic conversion of cellulose: opportunities, advances and pitfalls, Catal. Sci. Technol. 1. 714e726.

Grueso Pérez, Roberto (2009). *Depuración de aguas residuales de lavado de aceituna y aceite*. Universidad de Granada.

Hernández-Acosta, E.; Quiñones-Aguilar, E.; Cristóbal-Acevedo, D.; Rubiños, J. (2014). *Calidad biológica de aguas residuales utilizadas para riego de cultivos forrajeros en Tulancingo, Hidalgo, México*. Revista Chapingo. Serie Ciencias Forestales y del Ambiente, vol. 20, núm. 1, 2014, pp. 89-100 Universidad Autónoma Chapingo Chapingo, México.

Ioannou-Ttofa L., I. Michael-Kordatou, S.C. Fattas, A. Eusebio, B. Ribeiro, M. Rusan, A.R.B. Amer, S. Zuraiqi, M. Waismand, C. Linder, Z. Wiesman, J. Gilron, D. Fatta-Kassinou (2017) “*Treatment efficiency and economic feasibility of biological oxidation, membrane filtration and separation processes, and advanced oxidation for the purification and valorization of olive mill wastewater*” .Water Research.10.1016/j.watres.2017.02.020

- Inc. Metcalf & Eddy, George Tchobanoglous, H. Stensel, Ryujiro Tsuchihashi, Franklin Burton (2013) “*Wastewater Engineering: Treatment and Resource Recovery*”
- Kamm B., (2007) Production of platform chemicals and synthesis gas from biomass, *Angew. Chem. Int. Ed.* 46. 505.
- Kawahara F.K., B. Dávila, S.R. Al-Abed, S.J. Vesper, J.C. Ireland, S. Rock, (1995) Polynuclear aromatic hydrocarbon (PAH) release from soil during treatment with Fenton’s reagent, *Chemosphere* 31. 4131e4142.
- Laurichesse S., L. Avérous, (2014) Chemical modification of lignin: towards biobased polymers, *Prog. Polym. Sci.* 39.1266e1290.
- López, R. (2007). *Características y tratamiento de las aguas residuales de la industria de aderezo de aceituna de mesa*. Instituto de Recursos Naturales y Agrobiología de Sevilla – CSIC
- López, R. (s/f). *Características y tratamiento de las aguas residuales de la industria de aderezo de aceituna de mesa*. Instituto de Recursos Naturales y Agrobiología de Sevilla – CSIC.
- Luo Q., X. Zhang, H. Wang, Y. Qian, (2005) The use of non-uniform electrokinetics to enhance in situ bioremediation of phenol-contaminated soil, *J. Hazard Mater.* B121. 187e194.
- Maldonado, M.; Zuritz, C., A.; Gascón, A. y Rey, E. (2003). *Difusión de Sodio en Aceitunas Verdes Durante el Tratamiento Alcalino. I: Efecto de la Concentración de la Lejía*. Facultad de Ciencias Agrarias - Universidad Nacional de Cuyo, Mendoza, Argentina. *Grasas y Aceites* 358 Vol. 54. Fasc. 4 (2003), Recuperado de 358-364
- Marcano, K.; Delvasto, P. (2016). *Contaminación de suelos por metales pesados debido a la presencia de pilas gastadas* Revista de Investigación, vol. 40, núm. 88, mayo-agosto, 2016, pp. 78-104 Universidad Pedagógica Experimental Libertador Caracas, Venezuela.

- Martínez Nieto L; Hodaifa G(2007) *Depuración de las aguas de lavado de aceite y aceitunas por oxidación química a escala piloto-industrial*. Ingeniería Química, Universidad de Granada, Granada
- Medina Et Al.,(2018), Aplicación del Proceso Fenton para Degradar Aguas Residuales del Camal de Chota. Universidad Nacional Autónoma de Chota
- Norma Técnica Peruana (2006). *Aceituna de Mesa: Definiciones, requisitos y rotulados*. Comisión de Reglamentos Técnicos y Comerciales - INDECOPI. Primera edición.
- Ocampo-Gaspar, M; Cano-Guzmán, C; Luis F. Payan-Martínez, Leonardo González-Reyes, Isaías Hernández-Pérez, Vicente Garibay-Febles, Juan P. Pérez-Orozco, Lourdes I. Cabrera-Lara, María L. Ramón-García, Laura Galicia-Luis, Raúl Suárez-Parra (2017). *Sizing the Fenton's Catalyst*. Journal of Photochemistry and Photobiology A: Chemistry.
- <https://doi.org/10.1016/j.jphotochem.2017.12.022>
- OEFA - Organismo de Evaluación y Fiscalización Ambiental - OEFA (2014). *La fiscalización ambiental en Aguas Residuales (2014)*. Organismo de Evaluación y Fiscalización Ambiental - OEFA Primera edición: abril.
- Orozco Jaramillo Álvaro (2014) *Bioingeniería de Aguas Residuales*. Teoría y Diseño Segunda Edición
- Raffo & Ruiz (2014), *La Caracterización de Las Aguas Residuales y La Demanda Bioquímica de Oxígeno*; Revista De La Facultad De Ingeniería Industrial Eduardo Raffo Lecca / Edgar Ruiz Lizama.UNMSM
- Rodríguez Fernández, Antonio - Letón García, Alba Pedro, Roberto Rosal García, Miriam Dorado Valiño, Susana Villar Fernández, Juana M. Sanz García (2006) “*Tratamientos avanzados de aguas residuales industriales*”. Informe de Vigilancia Tecnología. Universidad de Alcalá del Círculo de Innovación en Tecnologías Medioambientales y Energía

- Rosatella A., S.P. Simeonov, R.F.M. Frade, C.A.M. Afonso, (2011) 5-Hydroxymethylfurfural (HMF) as a building block platform: biological properties, synthesis and synthetic applications, *Green Chem.* 13. 754e793.
- Rivas F.J., (2006) Polycyclic aromatic hydrocarbons sorbed on soils: a short review of chemical oxidation-based treatments, *J. Hazard Mater.* B138. 234e251.
- Sirguy C., P.T. de Souza e Silva, C. Schwartz, M.-O. Simonnot, (2008) Impact of chemical oxidation on soil quality, *Chemosphere* 72. 282e289.
- Serrano-Ruiz J.C., J.A. Dumesic, (2011) Catalytic routes for the conversion of biomass into liquid hydrocarbon transportation fuels, *Energy Environ. Sci.* 4. 83e99.
- Silva, S. & Correa, F. (2009). *Análisis de la contaminación del suelo: revisión de la normativa y posibilidades de regulación económica*. Universidad de Medellín-Colombia.
- Sosaari P. I, R. Piskonen, P. Ojala, S. Voipio, K. Eilola, E. Lehmus, M. Itävaara,(2007) Integration of electrokinetics and chemical oxidation for the remediation of creosote-contaminated clay, *J. Hazard Mater.* 144. 538e548.
- SUNASS (2022) *Diagnóstico De Las Plantas De Tratamiento De Aguas Residuales (Ptar) En El Ámbito De Las Empresas Prestadoras*
- Vannes y Abbott (1991). *Termodinámica*. Departamento de Ingeniería Química. Segunda Edición- México D.F.
- Van Putten R.-J., J.C. van der Waal, E. de Jong, C.B. Rasrendra, H.J. Heeres, J.G. de Vries, (2013) Hydroxymethylfurfural, a versatile platform chemical made from renewable resources, *Chem. Rev.* 113. 1499.
- Villarroel, J. (1988). *Agruco* (Agroecología Universidad Cochabamba-Bolivia).
- Yap C.L., S. Gan, H.K. Ng, (2011) Fenton based remediation of polycyclic aromatic hydrocarbons e contaminated soils, *Chemosphere* 83. 1414e1430

ANEXOS



PROCESO ALCALINO DE ACEITUNAS VERDES



AGUAS ALCALINAS

AGUAS RESIDUALES



TOMA DE MUESTRAS



ZONA 01





ZONA 02



ZONA 03

Artículo original

**Eficacia del carbón activado y reactivo
Fenton en el tratamiento de aguas
residuales del procesamiento de aceituna
verde****Effectiveness of Activated Carbon and Fenton Reagent
in the Treatment of Wastewater from Green Olive
Processing****JUNIOR SOVIET MIRANDA GUTIERREZ¹** <https://orcid.org/0000-0001-8514-3593>**JULIO MIGUEL FERNÁNDEZ PRADO²** <https://orcid.org/0000-0002-3243-4255>

Recibido: 03/09/2024

Aceptado: 15/10/2024

Publicado: 29/10/2024

¹Escuela de Posgrado, Universidad Nacional Jorge Basadre Grohmann, Tacna, Perú²Escuela Profesional de Ingeniería de Minas, Universidad Nacional Jorge Basadre Grohmann,
Tacna, PerúE-mail: ¹jmirandag@unjbg.edu.pe, ²jmfernandezp@unjbg.edu.peEsta obra está bajo licencia internacional
Creative Commons Reconocimiento 4.0Facultad de Ingeniería
Publicación Oficial

Resumen

La industria olivícola (IO) genera grandes cantidades de aguas residuales contaminadas, especialmente durante el tratamiento alcalino de aceitunas verdes, lo que representa un problema ambiental debido a los altos niveles de materia orgánica, compuestos fenólicos y sales presentes en estos efluentes. El objetivo del estudio fue evaluar la efectividad de dos tratamientos, adsorción con carbón activado y reactivo Fenton, para reducir la demanda biológica de oxígeno (DBO₅) y la demanda química de oxígeno (DQO) en aguas residuales de la IO. Se recolectaron muestras de tres zonas afectadas en Tacna, Perú, y se aplicaron ambos tratamientos utilizando diferentes concentraciones de reactivos. Los análisis incluyeron la medición de DBO₅ y DQO antes y después de los tratamientos, y se procesaron mediante pruebas estadísticas para validar los resultados. Los resultados mostraron que, aunque ambos métodos lograron reducciones significativas en DBO₅ y DQO, el tratamiento con reactivo de Fenton fue más eficiente en la reducción de DQO en todas las zonas, mientras que el carbón activado fue más efectivo en la reducción de DBO₅ en zonas con alta carga orgánica. En conclusión, la elección del tratamiento dependerá de las condiciones específicas de las aguas residuales, siendo el reactivo de Fenton más adecuado para zonas con moderada contaminación orgánica.

Palabras clave: aceituna de mesa; efluentes agroindustriales; gestión de aguas residuales.

Abstract

The olive industry (OI) generates large quantities of contaminated wastewater, especially during the alkaline treatment of green olives, posing an environmental problem due to the high levels of organic matter, phenolic compounds, and salts present in these effluents. The aim of this study was to evaluate the effectiveness of two treatments, adsorption with activated carbon and Fenton reagent, to reduce biochemical oxygen demand (BOD₅) and chemical oxygen demand (COD) in OI wastewater. Samples were collected from three affected zones in Tacna, Peru, and both treatments were applied using different reagent concentrations. The analysis included measuring BOD₅ and COD before and after the treatments, followed by statistical tests to validate the results. The findings showed that although both methods achieved significant reductions in BOD₅ and COD, Fenton's reagent was more efficient in reducing COD in all zones, while activated carbon was more effective in reducing BOD₅ in areas with high organic loads. In conclusion, the choice of treatment will depend on the specific conditions of the wastewater, with Fenton's reagent being more suitable for areas with moderate organic contamination.

Keywords: table olive; agro-industrial effluents; wastewater management.



1. Introducción

La industria olivícola (IO) es una de las actividades agroindustriales más consolidadas en la cuenca mediterránea y se ha expandido a otras regiones del mundo debido a la creciente demanda de productos derivados de la aceituna. Esta industria se centra principalmente en la producción de dos productos importantes: aceite de oliva y aceitunas de mesa, que son ampliamente valorados tanto por sus beneficios nutricionales como por sus propiedades organolépticas. El aceite de oliva, reconocido como uno de los insumos de la dieta mediterránea, se caracteriza por su alto contenido de ácidos grasos saludables y antioxidantes. Las aceitunas de mesa, por su parte, se consumen en diversas formas y variedades, como verdes, negras o rellenas, siendo un ingrediente esencial en la gastronomía global (Lanza, 2012; Rallo et al., 2018; Safeie-Noghbari et al., 2024). Los principales países productores de aceitunas incluyen a España, Italia, Grecia y Turquía, que en conjunto generan más del 70 % de la producción mundial (Russo et al., 2016). En América Latina, países como Argentina y Perú también han emergido como productores importantes, especialmente en lo que respecta a la producción de aceitunas de mesa (Torres et al., 2017; Vilar et al., 2018).

El auge de la IO ofrece grandes oportunidades económicas, no solo para la exportación, sino también para la creación de empleo en las zonas rurales y la dinamización del sector agroindustrial en los países productores (Palma y Espinoza, 2021; Rodríguez-Cohard, 2011). Su proceso productivo varía según el producto final, pero sigue generalmente etapas similares. En el caso de las aceitunas de mesa, después de la recolección, las aceitunas pasan por una fase de tratamiento alcalino, especialmente en el caso de las aceitunas verdes. Este tratamiento se realiza para eliminar el sabor amargo natural del fruto mediante la aplicación de una solución alcalina, habitualmente hidróxido de sodio. Posteriormente, las aceitunas son lavadas y fermentadas en salmuera para mejorar sus características organolépticas (Conte et al., 2020). Este proceso, aunque eficiente para la producción de aceitunas de alta calidad, genera una gran cantidad de aguas residuales con altas concentraciones de contaminantes.

A pesar de los beneficios económicos y sociales que genera, la IO enfrenta desafíos significativos en términos de sostenibilidad ambiental. Uno de los principales problemas asociados con la producción de aceitunas es la contaminación de las aguas residuales derivadas de los procesos de tratamiento alcalino y fermentación. Estas aguas residuales contienen una alta carga de materia orgánica no biodegradable, sólidos en suspensión, grasas y, en particular, compuestos fenólicos, que son tóxicos para los ecosistemas acuáticos. Además, las elevadas concentraciones de demanda química de oxígeno (DQO) y demanda biológica de oxígeno (DBO₅) reflejan el impacto potencial que estos vertidos pueden tener sobre los cuerpos de agua receptores, reduciendo la calidad del agua y afectando la biodiversidad. Otro aspecto preocupante es su alta conductividad debido al contenido de sales utilizadas en la fermentación y conservación de las aceitunas (Khdair y Abu-Rumman, 2020; Rincón-Llorente et al., 2018).

Los impactos ambientales negativos derivados de la gestión ineficaz de las aguas residuales de la industria olivícola incluyen la eutrofización de cuerpos de agua, la contaminación de fuentes subterráneas y superficiales, y el daño a la flora y fauna circundante. Además, el vertido de estas aguas puede alterar las propiedades del suelo, afectando su capacidad de retención de nutrientes y agua, y perjudicando la productividad agrícola a largo plazo. A medida que la producción olivícola sigue expandiéndose en diversas regiones del

— J. Miranda y J. Fernández. Carbón activado y Fenton en tratamiento de aguas residuales

mundo, la gestión sostenible de estos residuos líquidos se ha convertido en una prioridad tanto para las autoridades ambientales como para los productores.

A lo largo de los años, se han desarrollado diversas tecnologías para el tratamiento de aguas residuales generadas en la producción de aceitunas de mesa, clasificándose en físicos, biológicos, químicos y combinaciones de estos. Los tratamientos físicos, como la filtración y sedimentación, son efectivos para eliminar sólidos en suspensión y grasas, pero son ineficaces ante contaminantes orgánicos disueltos, como los compuestos fenólicos característicos de los efluentes olivícolas. Los tratamientos biológicos, como los sistemas de lodos activados y la digestión anaerobia, utilizan la actividad microbiana para degradar la materia orgánica, pero su eficiencia disminuye frente a compuestos tóxicos que inhiben el crecimiento microbiano. Por su parte, los tratamientos químicos, como la coagulación-floculación, enfrentan dificultades para eliminar compuestos solubles y refractarios, mientras que la oxidación química con agentes como el ozono o el peróxido de hidrógeno muestra resultados prometedores, aunque con altos costos y requerimientos operativos rigurosos (Al-Hmoud, 2020; Chiavola et al., 2014; Esteves et al., 2019; Faggiano et al., 2023; Ioannou-Ttofa et al., 2017).

Recientemente, los procesos avanzados de oxidación han ganado protagonismo debido a su capacidad para tratar compuestos orgánicos difíciles de degradar. Entre ellos, la oxidación avanzada con reactivo de Fenton ($\text{Fe}^{2+}/\text{H}_2\text{O}_2$) ha demostrado ser particularmente efectiva, gracias a la generación de radicales hidroxilos altamente reactivos que pueden descomponer los contaminantes orgánicos más persistentes. Este proceso ha sido aplicado con éxito en diferentes industrias y podría representar una solución viable para los efluentes olivícolas (Domingues et al., 2021). Por lo tanto, el objetivo del estudio se enfoca en evaluar comparativamente la efectividad de los métodos de carbón activado y reactivo Fenton en la reducción de DQO y DBO_5 en aguas residuales provenientes del proceso alcalino de aceitunas verdes.

2. Metodología

2.1. Muestras y tratamientos previos

Las muestras fueron recolectadas de las aguas residuales producidos después del proceso de fermentación alcalino de aceitunas verdes estilo sevillano en la región de Tacna, Perú, específicamente en el distrito de La Yarada Los Palos. Se tomaron tres muestras representativas (seis litros de cada zona) de diferentes zonas afectadas por los efluentes agroindustriales (Figura 1), y posteriormente se trasladaron al laboratorio para su análisis.

Figura 1

Zonas evaluadas para el estudio

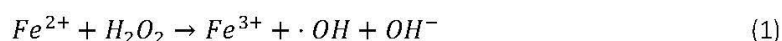




Previamente a la aplicación de los métodos de tratamiento, las muestras se almacenaron en envases plásticos estériles, que fueron lavados y esterilizados para evitar la contaminación. Las muestras se homogenizaron mediante agitación suave para garantizar una distribución uniforme de sólidos en suspensión y materia orgánica. En el caso de las pruebas con oxidación avanzada, el pH de las muestras fue ajustado utilizando ácido sulfúrico (H_2SO_4) concentrado a 10 M, para mantener un pH óptimo entre 2,5 y 3,5, necesario para la reacción de Fenton, que requiere condiciones ácidas, tal como indica Medina et al. (2018).

2.3. Reactivo Fenton

La reacción de Fenton se basa en la oxidación de compuestos orgánicos mediante la generación de radicales hidroxilos ($\cdot OH$). Esta reacción ocurre cuando el peróxido de hidrógeno (H_2O_2) se descompone en presencia de iones de hierro (Fe^{2+}), lo cual produce radicales altamente reactivos que oxidan la materia orgánica. La ecuación química que describe este proceso es la ecuación 1:



Los radicales hidroxilos generados ($\cdot OH$) son responsables de degradar los compuestos orgánicos presentes en las aguas residuales hasta dióxido de carbono (CO_2) y agua (H_2O), y su efectividad depende del pH y de las concentraciones de H_2O_2 y $FeSO_4$ utilizadas. Por otro lado, la adsorción con carbón activado es un proceso físico en el que la materia orgánica se adhiere a la superficie porosa del carbón, reduciendo la concentración de contaminantes en la fase acuosa (Babuponnusami y Muthukumar, 2014).

2.2. Diseño experimental

Se evaluaron dos tratamientos diferentes para reducir los valores de demanda biológica de oxígeno (DBO_5) y demanda química de oxígeno (DQO): adsorción con carbón activado y oxidación avanzada mediante el reactivo de Fenton. Como se muestra en la Figura 2, ambos tratamientos se llevaron a cabo en un equipo de Test de Jarras (PHIPPS & BIRD) tal como se indica en la metodología de la AOAC International (2019), que permitió una mezcla controlada de las soluciones. Para el tratamiento con carbón activado, se utilizaron concentraciones de 10 g/L, 19 g/L y 38 g/L, agitando las muestras a 200 rpm durante 30 min. En el caso del tratamiento con el reactivo de Fenton, se aplicaron concentraciones de sulfato ferroso ($FeSO_4$) de 0,414 g/L, 0,621 g/L y 0,828 g/L, junto con peróxido de hidrógeno (H_2O_2) en concentraciones de 304 mL/L, 456 mL/L y 608 mL/L. La agitación se mantuvo durante 60 min a 250 rpm, controlando el pH entre 2,5 y 3,5.

Una vez finalizados los tratamientos, se realizó la separación de los lodos mediante filtración utilizando una bomba de vacío ROCKER-300 y papel filtro en un embudo de vidrio, seleccionando el material de filtración de acuerdo con las características del agua residual. Esta etapa fue vital para eliminar los sólidos suspendidos y obtener una fase líquida adecuada para el análisis posterior. Así mismo, Las muestras tratadas fueron estandarizadas mediante diluciones en relaciones de 1:4 y 1:6, utilizando las distintas concentraciones. Esta estandarización fue necesaria para la posterior medición fisicoquímica de DBO_5 y DQO, asegurando la precisión en los resultados obtenidos.

— J. Miranda y J. Fernández. Carbón activado y Fenton en tratamiento de aguas residuales

Figura 2

Análisis previos de DBO₅ y DQO para los tratamientos con carbón activado y reactivo Fenton



Nota. (a) representa las pruebas de Test de jarras. (b) Separación de sólidos por la bomba de vacío. (c) Filtración. (d) Estandarización.

2.4. Determinación de DBO₅ y DQO

Para la medición de la demanda biológica de oxígeno (DBO₅), se utilizó el método respirométrico, con el equipo LOVIBOND WATER TESTING BD-600. Las muestras de aguas residuales fueron incubadas a 20 °C durante un período de cinco días, utilizando inhibidores nitrificantes y el catalizador de KOH al 45 % para evitar la oxidación de amoníaco y la interferencia en la medición. Durante este periodo, se midió el consumo de oxígeno disuelto (OD) en las muestras diluidas y en el blanco (Orozco, 2014). La ecuación 2 indica el cálculo para determinar el DBO₅:

Para la medición de DBO₅ se utilizó el método respirométrico con el equipo LOVIBOND WATER TESTING BD-600. Las muestras se incubaron a 20°C durante cinco días, utilizando inhibidores



nitrificantes y el catalizador de KOH al 45 % para evitar la interferencia de la oxidación de amoníaco. El consumo de oxígeno durante este período refleja la cantidad de materia orgánica biodegradable presente

$$DBO_5 = \frac{(OD_i - OD_f) - (OD_{bi} - OD_{bf}) \times \left(\frac{V_m}{V_b}\right)}{D} \quad (2)$$

Donde: OD_i : Es el oxígeno disuelto inicial en la muestra diluida (mg/L). OD_f : Oxígeno disuelto final en la muestra diluida (mg/L). OD_{bi} : Oxígeno disuelto inicial en el blanco (mg/L). OD_{bf} : Oxígeno disuelto final en el blanco (mg/L). V_m : Volumen del blanco menos el volumen del inóculo (mL). V_b : Volumen del blanco (mL). D : Factor de dilución, expresado en decimales (por ejemplo, si la dilución es del 2 %, entonces $D = 0,02$).

El proceso incluyó la preparación de diluciones de las muestras, utilizando relaciones de dilución adecuadas para evitar el agotamiento total del oxígeno disuelto durante el período de incubación. Los volúmenes de las muestras y del blanco se seleccionaron cuidadosamente para garantizar la precisión en la medición. Al final del período de incubación, se midió el oxígeno disuelto en las muestras tratadas y no tratadas, y los valores obtenidos se corrigieron utilizando los valores del blanco para asegurar la exactitud de los resultados.

La DQO se determinó mediante el método de Fotometría, en el cual se utilizó viales LOVIBOND que contenían una solución de dicromato de potasio ($K_2Cr_2O_7$) y ácido sulfúrico (H_2SO_4) como oxidante en medio ácido. La cantidad de dicromato consumido es proporcional a la cantidad de materia orgánica oxidada. Las muestras (0,2 ó 2,0 mL) se calentaron en un Termoreactor RD-125 por 120 min a 150 °C y la medición final se realizó en un fotómetro MD-600 de la marca LOVIBOND que incorpora la ecuación 3 para la determinación de la DQO:

$$DQO = (A - B) \times F \quad (3)$$

Donde: A es el volumen de dicromato consumido en la muestra (mL). B es el volumen de dicromato consumido en el blanco (mL). F es el factor de equivalencia de oxígeno (8000 mg O_2 /mL de dicromato).

2.5. Análisis de datos

Se utilizó la prueba T de Student para muestras relacionadas con la finalidad de determinar la significancia de las diferencias en DBO_5 tras los tratamientos con carbón activado y reactivo de Fenton en tres zonas, con un nivel de significancia de $p < 0,05$. Se calculó la media, desviación estándar y error estándar, validando la efectividad de los tratamientos. Por otro lado, para el DQO se calcularon los porcentajes de reducción para cada parámetro. En ambos casos, se compararon los resultados obtenidos con los Estándares de Calidad Ambiental (ECA) establecidos en Perú para determinar si los tratamientos lograron cumplir con las normativas vigentes.

3. Resultados

Los tratamientos de aguas residuales del proceso alcalino de aceitunas verdes mostraron

— J. Miranda y J. Fernández. Carbón activado y Fenton en tratamiento de aguas residuales

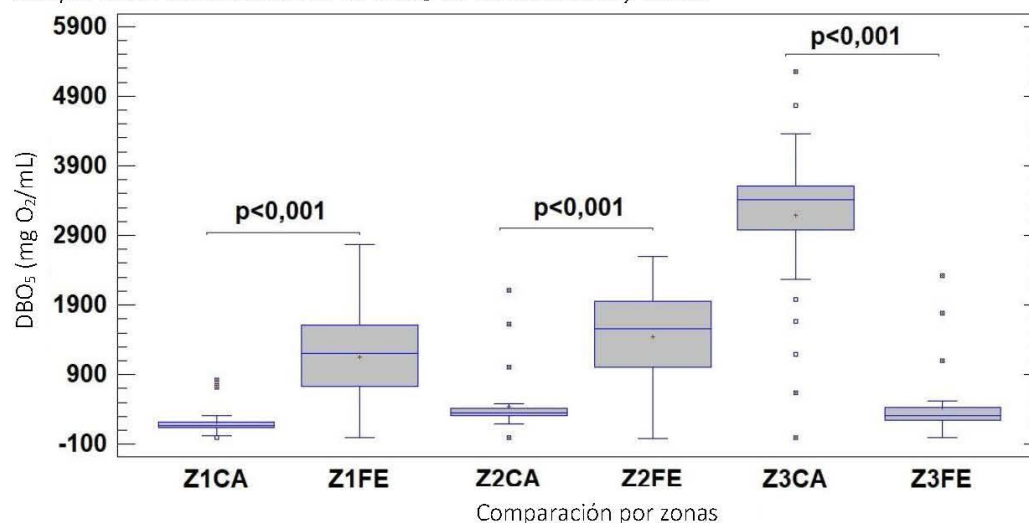
diferencias estadísticamente significativas en la reducción de la demanda biológica de oxígeno (DBO₅) al utilizar carbón activado y oxidación avanzada con reactivo de Fenton, así como se aprecia en la Figura 3.

El carbón activado logró reducciones significativas de DBO₅ en las tres zonas evaluadas. En la zona 1, la DBO₅ disminuyó de 1180,35 mg O₂/mL a 963,45 mg O₂/mL (diferencia promedio de 216,9 mg O₂/mL, $t=8,053$, $p<0,001$). En la zona 2, pasó de 1041,75 mg O₂/mL a 604,35 mg O₂/mL (reducción promedio de 437,4 mg O₂/mL, $t=7,665$, $p<0,001$). La zona 3 mostró la mayor efectividad, reduciendo la DBO₅ de 3740,70 mg O₂/mL a 551,40 mg O₂/mL (diferencia de 3189,3 mg O₂/mL, $t=19,537$, $p<0,001$). Estas reducciones reflejan la efectividad del carbón activado en la disminución de la carga orgánica en las tres zonas, con una mayor eficiencia en la zona 3, donde se registraron valores iniciales de DBO₅ más elevados.

Por su parte, el tratamiento con reactivo Fenton resultó más eficaz. En la zona 1, la DBO₅ disminuyó de 1543,10 mg O₂/mL a 389,90 mg O₂/mL (reducción de 1153,2 mg O₂/mL, $t=11,735$, $p<0,001$). En la zona 2, pasó de 1890,90 mg O₂/mL a 451,50 mg O₂/mL (reducción de 1439,4 mg O₂/mL, $t=13,432$, $p<0,001$). En la zona 3, la DBO₅ se redujo de 756,90 mg O₂/mL a 332,60 mg O₂/mL (reducción de 424,3 mg O₂/mL, $t=6,442$, $p<0,001$). Estas reducciones evidencian que el reactivo Fenton presenta un desempeño más eficiente en las zonas 1 y 2, aunque en la zona 3, el margen de mejora fue más limitado en comparación con el carbón activado.

Figura 3

Comparación de la reducción de DBO₅ de tratamientos y zonas



Nota. (Z) representa las zonas 1, 2 y 3. (CA) Significa Carbón Activado. (FE) Reactivo Fenton.

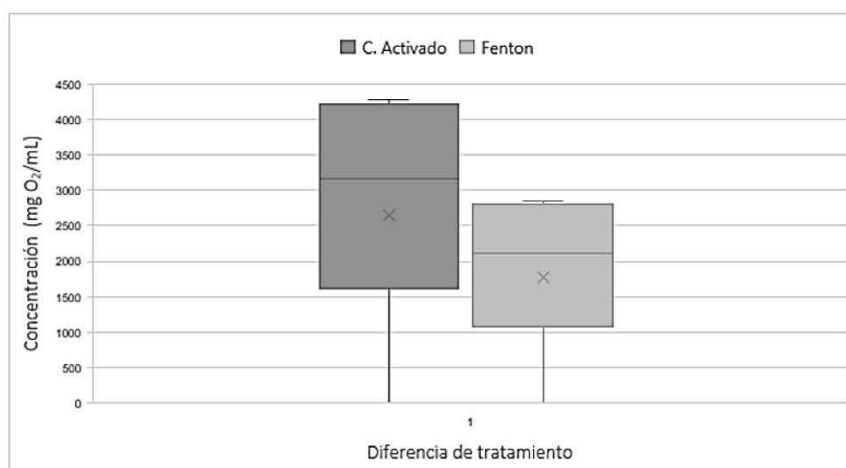
Al comparar ambos tratamientos, el reactivo Fenton superó al carbón activado en las zonas 1 y 2, con diferencias promedio de -936,30 mg O₂/mL ($t=-10,580$, $p<0,001$) y -1002,00 mg O₂/mL ($t=-10,937$, $p<0,001$), respectivamente. Sin embargo, en la zona 3, el carbón activado logró una mayor reducción, con una diferencia promedio de 2765,00 mg O₂/mL ($t=21,875$, $p<0,001$). Por lo tanto, se indica que, aunque ambos tratamientos fueron eficaces para reducir la DBO₅ en todas las zonas evaluadas, el reactivo Fenton mostró una mayor eficiencia en las zonas 1 y 2, mientras que el carbón activado fue más efectivo en la zona 3, donde los niveles



iniciales de DBO_5 eran considerablemente más elevados. Esta información es clave para la selección del tratamiento más adecuado según las condiciones particulares de cada área o zona.

Mientras que, para el DQO también mostraron diferencias significativas en la eficacia de ambos tratamientos. Para el carbón activado, se observó una reducción en las tres zonas evaluadas. En la Zona 1, la DQO disminuyó de 7760 $\text{mg O}_2/\text{L}$ (sin tratar) a 4190 $\text{mg O}_2/\text{L}$ (tratada). De manera similar, en la Zona 2, los valores pasaron de 6480 $\text{mg O}_2/\text{L}$ a 4,277 $\text{mg O}_2/\text{L}$ tras el tratamiento, y en la Zona 03, se redujeron de 7520 $\text{mg O}_2/\text{L}$ a 2143 $\text{mg O}_2/\text{L}$. Sin embargo, los resultados con el tratamiento de Fenton revelaron una mayor eficacia en la disminución de la DQO. En la Zona 1, pasó de 11,640 $\text{mg O}_2/\text{L}$ (sin tratar) a 2,794 $\text{mg O}_2/\text{L}$ (tratada). En la Zona 2, la DQO se redujo de 9,720 $\text{mg O}_2/\text{L}$ a 2,851 $\text{mg O}_2/\text{L}$, mientras que en la Zona 3 se observó una disminución aún más pronunciada, de 11,280 $\text{mg O}_2/\text{L}$ a 1,429 $\text{mg O}_2/\text{L}$. Estos resultados indican que el método de Fenton logra una mayor reducción de la carga orgánica en comparación con el carbón activado, destacando su mayor efectividad en la degradación de los contaminantes orgánicos presentes en las aguas residuales (Figura 4).

Figura 4
Valores de DQO para los dos tratamientos



Discusión

Los resultados muestran que la concentración inicial de DBO_5 , con un promedio de 3,984 $\text{mg O}_2/\text{L}$ y 3,106 $\text{mg O}_2/\text{L}$, excede los límites máximos permisibles (LMP) establecidos en el Decreto Supremo 003-2010-MINAM (2010) y los Estándares de Calidad Ambiental (ECA-Agua) según el Decreto Supremo 004-2017-MINAM (2017), que fijan un límite de 100 $\text{mg O}_2/\text{L}$ para DBO_5 en efluentes agroindustriales. Este comportamiento es similar a los reportes de Zorpas y Costa (2010), quienes observaron resultados similares en los efluentes de la industria olivícola.

Al aplicar el tratamiento con carbón activado en diferentes concentraciones, se observó que, tras ajustar el pH entre 6,5 y 7,5, se logró una reducción de la DBO_5 a 1,068 $\text{mg O}_2/\text{L}$, lo que indica una disminución importante en los niveles de este parámetro, aunque todavía por encima de los valores establecidos por la normativa. Este comportamiento es comparable con los resultados obtenidos por Lucas y Peres (2009), quienes también observaron una reducción

— J. Miranda y J. Fernández. Carbón activado y Fenton en tratamiento de aguas residuales

moderada de DBO₅ en aguas residuales tratadas con carbón activado. Durante el tratamiento, se notó que la agitación generó espuma y no permitió la precipitación inmediata de los sólidos, lo cual podría haber interferido en el proceso de adsorción, afectando la eficacia del tratamiento.

En el caso del tratamiento con reactivo de Fenton, utilizando peróxido de hidrógeno al 33 % y sulfato ferroso (FeSO₄) en un pH entre 2,5 y 3,5, se obtuvo una DBO₅ final de 541 mg O₂/L. Aunque este valor no cumple con la normativa vigente, representa una mayor disminución en comparación con el tratamiento con carbón activado, lo que concuerda con los estudios realizados por Esteves et al. (2019), donde el proceso Fenton mostró una mayor capacidad para reducir la demanda biológica de oxígeno en efluentes industriales.

Por otro lado, la DQO inicial promedio fue de 7253,33 mg O₂/L y 10 880 mg O₂/L, también superando los límites máximos permisibles establecidos en el Decreto Supremo 003-2010-MINAM (2010) y el Decreto Supremo 004-2017-MINAM (2017), donde el límite máximo permitido para efluentes agroindustriales es de 200 mg O₂/L para DQO. Estos resultados están alineados con lo reportado por Garrido et al. (1992) en estudios sobre la industria olivícola, donde se evidenció una alta concentración de contaminantes orgánicos en los efluentes. Al aplicar el carbón activado, la DQO se redujo a 3536 mg O₂/L, lo que demuestra una disminución, pero aún fuera de los valores normativos. En contraste, el tratamiento con el reactivo de Fenton logró reducir la DQO a 2358 mg O₂/L, lo que confirma la superioridad del proceso Fenton, como también lo indicaron Ioannou-Ttofa et al. (2017) en su investigación sobre el tratamiento de aguas residuales mediante oxidación avanzada.

4. Conclusiones

Se ha comparado la eficacia de dos tecnologías de tratamiento de aguas residuales generadas por el proceso alcalino de aceitunas verdes: el carbón activado y la oxidación avanzada mediante el reactivo de Fenton. Los resultados obtenidos evidencian que el reactivo Fenton supera al carbón activado en términos de reducción de la demanda química de oxígeno (DQO) y la demanda biológica de oxígeno (DBO₅), particularmente en la eliminación de compuestos orgánicos refractarios, como los fenoles. Si bien el carbón activado ha demostrado ser una tecnología efectiva para la adsorción de ciertos contaminantes, su capacidad es limitada frente a compuestos de naturaleza más persistente, que representan un reto en las aguas residuales del proceso de aceitunas. Por otro lado, el proceso Fenton ha mostrado un alto potencial para la degradación de estos contaminantes, siendo capaz de reducir significativamente la carga orgánica de las aguas tratadas. Esto sugiere que, en escenarios donde se busca una remoción eficiente de materia orgánica compleja, el reactivo de Fenton ofrece una solución más adecuada.

5. Referencias Bibliográficas

- Al-Hmoud, L., Dr. (2020). Olive mill wastewater treatment: A recent review. *Jordanian Journal of Engineering and Chemical Industries (JJEI)*, 3(3), 91–106. <https://doi.org/10.48103/jjeci3112020>
- AOAC International. (2019). *Official Methods of Analysis*: (21.^a ed.). Association of Official Analytical Chemists.



- Babuponnusami, A., y Muthukumar, K. (2014). A review on Fenton and improvements to the Fenton process for wastewater treatment. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 2(1), 557–572. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2013.10.011>
- Chiavola, A., Farabegoli, G., y Antonetti, F. (2014). Biological treatment of olive mill wastewater in a sequencing batch reactor. *Biochemical Engineering Journal*, 85, 71–78. <https://doi.org/10.1016/j.bej.2014.02.004>
- Conte, P., Fadda, C., Del Caro, A., Urgeghe, P. P., y Piga, A. (2020). Table olives: An overview on effects of processing on nutritional and sensory quality. *Foods (Basel, Switzerland)*, 9(4), 514. <https://doi.org/10.3390/foods9040514>
- Decreto Supremo N° 003-2010-MINAM. (2010, 17 de marzo). *Aprueba Límites Máximos Permisibles para los efluentes de plantas de tratamiento de aguas residuales domésticas o municipales*. Diario Oficial El Peruano. https://www.minam.gob.pe/wp-content/uploads/2013/09/ds_003-2010-minam.pdf
- Decreto Supremo N° 004-2017-MINAM. (2017, 7 de junio). *Aprueban Estándares de Calidad Ambiental (ECA) para agua y establecen disposiciones complementarias*. Diario Oficial El Peruano. <https://www.minam.gob.pe/wp-content/uploads/2017/06/DS-004-2017-MINAM.pdf>
- Domingues, E., Fernandes, E., Gomes, J., Castro-Silva, S., y Martins, R. C. (2021). Olive oil extraction industry wastewater treatment by coagulation and Fenton's process. *Journal of Water Process Engineering*, 39(101818), 101818. <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2020.101818>
- Esteves, B. M., Rodrigues, C. S. D., Maldonado-Hódar, F. J., y Madeira, L. M. (2019). Treatment of high-strength olive mill wastewater by combined Fenton-like oxidation and coagulation/flocculation. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 7(4), 103252. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2019.103252>
- Faggiano, A., De Carluccio, M., Fiorentino, A., Ricciardi, M., Cucciniello, R., Proto, A., y Rizzo, L. (2023). Photo-Fenton like process as polishing step of biologically co-treated olive mill wastewater for phenols removal. *Separation and Purification Technology*, 305(122525), 122525. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2022.122525>
- Garrido Fernández, A., Brenes Balbuena, M., y García García, P. (1992). Tratamiento de salmueras de fermentación de aceitunas verdes. *Grasas y aceites*, 43(5), 291–298. <https://doi.org/10.3989/gya.1992.v43.i5.1144>
- Ioannou-Ttofa, L., Michael-Kordatou, I., Fattas, S. C., Eusebio, A., Ribeiro, B., Rusan, M., Amer, A. R. B., Zuraiqi, S., Waismand, M., Linder, C., Wiesman, Z., Gilron, J., y Fatta-Kassinou, D. (2017). Treatment efficiency and economic feasibility of biological oxidation, membrane filtration and separation processes, and advanced oxidation for the purification and valorization of olive mill wastewater. *Water Research*, 114, 1–13. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2017.02.020>
- Khdaif, A., y Abu-Rumman, G. (2020). Sustainable environmental management and valorization options for Olive mill byproducts in the middle east and north Africa (MENA) region. *Processes (Basel, Switzerland)*, 8(6), 671. <https://doi.org/10.3390/pr8060671>

■ **J. Miranda y J. Fernández.** Carbón activado y Fenton en tratamiento de aguas residuales

- Lanza, B. (2012). Nutritional and sensory quality of table olives. En *Olive Germplasm - The Olive Cultivation, Table Olive and Olive Oil Industry in Italy*. InTech. <https://doi.org/10.5772/51723>
- Lucas, M. S., y Peres, J. A. (2009). Removal of COD from olive mill wastewater by Fenton's reagent: Kinetic study. *Journal of Hazardous Materials*, 168(2–3), 1253–1259. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2009.03.002>
- Orozco, A. (2014). *Bioingeniería de aguas residuales: teoría y diseño* (2.ª ed.). ACODAL Asociación Colombiana de Ingeniería Sanitaria y Ambiental.
- Palma, M., y Espinoza, N. A. (2021). Competitividad de la agroindustria aceitunera de Tacna en tiempos de pandemia COVID-19. *Ingeniería Investiga*, 4. <https://doi.org/10.47796/ing.v4i0.575>
- Rallo, L., Díez, C. M., Morales-Sillero, A., Miho, H., Priego-Capote, F., y Rallo, P. (2018). Quality of olives: A focus on agricultural preharvest factors. *Scientia Horticulturae*, 233, 491–509. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2017.12.034>
- Rincón-Llorente, B., De la Lama-Calvente, D., Fernández-Rodríguez, M. J., y Borja-Padilla, R. (2018). Table Olive wastewater: Problem, treatments and future strategy. A review. *Frontiers in microbiology*, 9. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2018.01641>
- Rodríguez-Cohard, J. C. (2011). The Olive growing agri-industrial district of Jaén and the international Olive oils cluster. *The Open Geography Journal*, 4(1), 55–72. <https://doi.org/10.2174/1874923201104010055>
- Russo, C., Cappelletti, G., Nicoletti, G., Di Noia, A., y Michalopoulos, G. (2016). Comparison of European Olive production systems. *Sustainability*, 8(8), 825. <https://doi.org/10.3390/su8080825>
- Safeie-Noghbari, B., Amiri, Z., Allahyari, M. S., Nikkah, A., Ben Hassen, T., y Bacenetti, J. (2024). Social life cycle assessment of the olive oil industry: a case study in Guilan Province, Iran. *Environment Development and Sustainability*. <https://doi.org/10.1007/s10668-024-04463-2>
- Torres, M., Pierantozzi, P., Searles, P., Rousseaux, M. C., García-Inza, G., Miserere, A., Bodoira, R., Contreras, C., y Maestri, D. (2017). Olive cultivation in the southern hemisphere: Flowering, water requirements and oil quality responses to new crop environments. *Frontiers in plant science*, 8. <https://doi.org/10.3389/fpls.2017.01830>
- Vilar, J., Pereira, J. E., Urieta, D., Menor, A., Caño, S., Barreal, J., Velasco, M., y Puentes, R. (2018). *International Olive Growing: Worldwide Analysis and Summary*. Fundación Caja Rural de Jaén. <https://www.oliveoiltimes.com/library/olive-growing.pdf>
- Zorpas, A. A., & Costa, C. N. (2010). Combination of Fenton oxidation and composting for the treatment of the olive solid residue and the olive mill wastewater from the olive oil industry in Cyprus. *Bioresource Technology*, 101(20), 7984–7987. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2010.05.030>