

2025



UNIVERSIDAD DE LAS PALMAS DE GRAN CANARIA
Escuela de Ingeniería Industriales y Civiles
Instituto de Estudios Ambientales y Recursos Naturales
Departamento de Ingeniería de Procesos

TESIS DOCTORAL
Modalidad
Por Compendio de Publicaciones

ANÁLISIS Y EXPERIMENTACIÓN DE SISTEMAS DE DEPURACIÓN NATURAL (SDN) APLICADOS EN EFLUENTES INDUSTRIALES DE CERVEZA EN MOZAMBIQUE

Programa de Doctorado de Calidad Ambiental y Recursos Naturales

Nicolau Chirinza Rafael Penicela

Las Palmas de Gran Canaria, mayo 2025



PROGRAMA DE DOCTORADO

CALIDAD AMBIENTAL Y RECURSOS NATURALES

INSTITUTO DE ESTUDIOS AMBIENTALES Y RECURSOS NATURALES

TESIS DOCTORAL POR COMPENDIO DE PUBLICACIONES

**ANÁLISIS Y EXPERIMENTACIÓN DE SISTEMAS DE
DEPURACIÓN NATURAL (SDN) APLICADOS EN EFLUENTES
INDUSTRIALES DE CERVEZA EN MOZAMBIQUE.**

Las Palmas de Gran Canaria, mayo de 2025

Autor: Nicolau Chirinza	Director: Dr. Carlos A.	Director: Dr. Federico A.
Rafael Penicela	Mendieta Pino	León Zerpa

Director:

Carlos Alberto Mendieta Pino

Departamento de Ingeniería de Procesos

Instituto de Estudios Ambientales y Recursos Naturales. Escuela de Ingenierías
Industriales y Civiles

Universidad de Las Palmas de Gran Canaria

Director:

Federico Antonio León Zerpa

Departamento de Ingeniería de Procesos

Instituto de Estudios Ambientales y Recursos Naturales. Escuela de Ingenierías
Industriales y Civiles

Universidad de Las Palmas de Gran Canaria

Tutor:

Sebastián Ovidio Pérez Báez

Departamento de Ingeniería de Procesos

Instituto de Estudios Ambientales y Recursos Naturales. Escuela de Ingenierías
Industriales y Civiles

Universidad de Las Palmas de Gran Canaria

AGRADECIMENTOS

Ante todo, quiero agradecer a Dios Padre, el Altísimo, por concederme la salud y permitirme concluir el programa de doctorado en calidad ambiental y recursos naturales con la realización del último requisito, es decir, la tesis.

Quiero agradecer respetuosamente a mi heroína madre Isabel Vasco António Nhacada que, a pesar de enviudar a temprana edad con cuatro hijos pequeños en intervalos de (5 meses para el último hijo y 13 años para el primero, en este caso el mayor), logró mantener la frente en alto educando a sus hijos y mostrándoles con palabras la importancia de estudiar. Muchas gracias mamá, que Dios te bendiga.

A mis hermanos Suzana Chirinza, Vasco Chirinza y Joaquim Chirinza por su paciencia, apoyo y por transmitirnos un espíritu de positividad y creencia en que seríamos capaces de superar las dificultades de la vida.

A mis hijos Rafael Nicolau Chirinza y Nishely Nicolau Chirinza por darme la responsabilidad de conseguir más en el ámbito académico, sirviendo de base para mi desarrollo profesional.

A la familia Roberto João Vicente, muchas gracias por el apoyo y cariño que siempre me han demostrado, y mi inmensa gratitud por su disposición a responder sanamente cada vez que he solicitado su apoyo.

Muchas gracias a mi ahijado Amarildo Mulandez por su disposición y prontitud para responder siempre que lo necesité en asuntos relacionados con la programación de computadoras.

Gracias a la existencia de Dios y a que mi preocupación como hijo suyo fue escuchada al más alto nivel, me fueron dados grandes individuos, hombres de Dios con gran espíritu y disposición para ayudar y hacer felices a los demás. Incluso en medio de diversas dificultades, estas personas nunca se cruzaron de brazos, nunca se fueron a dormir sin aportar soluciones, como si los problemas fueran directamente suyos. Quisiera expresar mi más profunda gratitud por todo a mi Tutor de Tesis y a mis directores de Tesis, a saber, los respetados profesores: Dr. Sebastián Ovidio Báez Pérez, Dr. Carlos A. Mendieta Pino y Dr. Federico A. León Zerpa. Quisiera decir que las palabras no serán suficientes para

mostrar cuán eternamente agradecido estoy por su apoyo, que Dios Padre los siga bendiciendo.

También quiero agradecer a la Universidad de Las Palmas de Gran Canaria por la puerta que me brindó, a todos los profesores, directivos y colaboradores de esta gran universidad que directa o indirectamente me apoyaron para lograr mi doctorado. En especial al director del programa DOCARNA, Dr. Jesús García Rubiano.

A la Universidad de Zambeze por darme la oportunidad de continuar mis estudios.

ABSTRACT

Urbanization and industrial development have significantly increased the production of wastewater from various sources and characteristics. Studies indicate that the combination of untreated wastewater with that from other receiving water sources endangers environmental health. In this circumstance, it is imperative to characterize wastewater and adopt treatment technology as a form of mitigation. In this context of wastewater treatment requirements, several technologies are being used, requiring alternatives that demonstrate efficiency, sustainability, low implementation and maintenance costs, lower energy consumption and ease of handling. Given the listed points of need regarding the wastewater treatment system, it is necessary to choose the best alternative for natural wastewater purification systems. In order to develop and achieve the objectives of this present work, priority was given to defining the themes and preparing the different scientific articles that had finally materialized and compiled. The main objective of the work was to develop materials and approaches for water treatment and life cycle assessment studies, whereby the process of characterizing raw water was first carried out to obtain requirements for identifying an optimal treatment system. The process of characterizing the wastewater was preceded by regular visits to a certain Mozambican brewery with the aim of understanding the different activities that produce wastewater and collecting samples which were later analyzed in the Water Laboratory of the Zambeze University – Faculty of Science and Technology in Mozambique. In characteristic terms, the wastewater from the brewery is complex and poses a challenge for environmental engineers in the search for treatment and reuse. Among several studies, the use of *Moringa Oleifera* seed as a coagulant was idealized, where its efficiency in removal was subsequently verified. Where it proved to be efficient in removal and recommended in water treatment. Several natural purification technologies were also studied, and an analysis was subsequently made regarding the life cycle of the system. Considering that any implementation of a given water treatment system requires studies on the identification of the critical stage related to the contributor to environmental degradation, the work also included the development of an article regarding the life cycle of a system where the phase that contributes most to the emission of substances harmful to environmental health was eventually identified. In the same view, it was possible to

optimize the use of existing resources in each seawater treatment plant based on the Pareto diagram.

RESUMEN

La urbanización y el desarrollo industrial han aumentado considerablemente la producción de aguas residuales de distintas fuentes, así como sus características. Los estudios demuestran que la combinación de aguas residuales no tratadas con otras fuentes de agua pone en peligro la salud ambiental, por lo que es imperativo caracterizar las aguas residuales y adoptar la tecnología de tratamiento de aguas residuales como medio de mitigación. En el contexto de los requisitos de tratamiento de aguas residuales, se están utilizando diversas tecnologías, que requieren alternativas que demuestren eficiencia, sostenibilidad, bajos costes de implantación y mantenimiento, menor consumo de energía y facilidad de manejo. En vista de lo anterior, los requisitos de los sistemas de tratamiento de aguas residuales exigen la elección de la mejor alternativa para los sistemas naturales de depuración de aguas residuales. Para el desarrollo y consecución de los objetivos de este trabajo se dio prioridad a la definición de los temas y a la elaboración de los diferentes artículos científicos que finalmente se materializaron y recopilaron. El objetivo principal del trabajo fue desarrollar temas y enfoques para los estudios de tratamiento de aguas y de evaluación del ciclo de vida, para lo cual se llevó a cabo en primer lugar el proceso de caracterización del agua bruta con el fin de obtener los requisitos para identificar un sistema óptimo de tratamiento. El proceso de caracterización de las aguas residuales comenzó con visitas periódicas a una cervecería mozambiqueña concreta para conocer las distintas actividades que producen las aguas residuales y recoger muestras que luego se analizaron en el Laboratorio de Aguas de la Universidad Zambeze - Facultad de Ciencia y Tecnología de Mozambique. Las aguas residuales de las cervecerías son característicamente complejas y plantean un reto a los ingenieros medioambientales en su búsqueda de tratamiento y reutilización. Entre varios estudios, se idealizó el uso de la semilla de Moringa oleífera como coagulante y posteriormente se comprobó su eficacia de eliminación. Demostró ser eficaz en la eliminación del agua y se recomendó para su tratamiento. También se estudiaron varias tecnologías de depuración natural y posteriormente se analizó el ciclo de vida del sistema.

Teniendo en cuenta que cualquier implantación de un determinado sistema de tratamiento de aguas requiere estudios sobre la identificación de la etapa crítica en relación con la que contribuye a la degradación del medio ambiente, el trabajo también incluyó la elaboración

de un artículo sobre el ciclo de vida de un sistema que acabó identificando la etapa que más contribuye a la emisión de sustancias nocivas para la salud ambiental. Del mismo modo, utilizando el diagrama de Pareto, fue posible optimizar el uso de los recursos existentes en una determinada planta de tratamiento de agua de mar.

ÍNDICE GENERAL

PARTE I.....	3
1 Aceptación de coautores para que el doctorando presente el trabajo.....	4
PARTE II	17
2 Introducción	18
2.1 Antecedentes	18
2.2 Objetivos de la Tesis	22
2.3 Obras publicadas	23
2.3.1. Como autor principal.....	24
2.3.2. Como colaborador en artículos relacionados con la Tesis doctoral.....	24
2.4 Justificación de la unidad temática de la tesis	35
3 Investigación Bibliográfica	42
3.1 Introducción	42
3.1.1 Agua	42
3.1.1.1 Aguas residuales.....	42
3.1.1.2 Aguas residuales de cervecería.....	44
3.1.1.3 Sistemas de tratamiento de aguas residuales.....	44
3.1.1.3.1 Sistemas de tratamiento convencionales.....	45
3.1.1.3.2 Decantación	45
3.1.1.3.2.1 Filtración	45
3.1.1.3.2.2 Coagulación/Floculación.....	46
3.1.1.3.2.3 Tratamiento biológico.....	47
3.1.1.3.3 Sistemas de tratamiento no convencionales.....	48
3.1.1.3.3.1 Sistemas de tratamiento del suelo.....	49
3.1.1.3.4 Sistemas de infiltración lenta en el suelo.....	50
3.1.1.3.4.1 Sistemas de infiltración rápida del suelo.....	51
3.1.1.3.4.2 Sistemas de escurrimiento del suelo	52
3.1.1.3.4.3 Humedales	54
3.1.1.3.4.3.1 Humedales construidos o artificiales.....	54
3.1.1.3.4.3.1.1 Humedales de flujo superficial construido (CWsFS).....	55
3.1.1.3.4.3.1.2 Humedales artificiales de flujo subsuperficial	56
3.1.1.3.4.3.1.2.1 Flujo subsuperficial vertical	57
3.1.1.3.4.3.1.2.2 Flujo subterráneo horizontal	57
3.1.1.3.4.4 Papel de la vegetación en el sistema de	58

3.2 Modelización del sistema natural de depuración de aguas residuales.....	59
3.2.1 Concepto	59
3.2.1.1 Ecuación de Streeter y Phelps utilizada para calcular la concentración de oxígeno disuelto (OD):.....	61
Referencias	65
Parte III.....	70
4. Life-Cycle Analysis of Natural Treatment Systems for Wastewater (NTSW) Applied to Municipal Effluents	71
5. A Comparative analysis of brewery effluents in Africa.	72
6. Caracterización de las aguas residuales de la cervecería mozambiqueña: comparación de características con efluentes de cervecerías de otros países.....	73
7. Extracto de semilla de moringa oleífera como coagulante en el tratamiento de agua potable	74
8. Proposal for the use of moringa oleifera seed extract as a coagulant in the treatment of drinking water	75
9. Resources optimization using Pareto analysis for sea water desalination plants	76
10. Resumen de artículos	77
10.1 Life-Cycle Analysis of Natural Treatment Systems for Wastewater (NTSW) Applied to Municipal Effluents	77
10.2 A Comparative analysis of brewery effluents in Africa.....	79
10.3 Caracterización de las aguas residuales de la cervecería mozambiqueña: comparación de características con efluentes de cervecerías de otros países.....	81
10.4 Extracto de semilla de moringa oleífera como coagulante en el tratamiento de agua potable.....	85
10.5 Proposal for the use of moringa oleifera seed extract as a coagulant in the treatment of drinking wáter.....	86
10.6 Resources optimization using Pareto analysis for sea water desalination plants	88
Parte IV	90
11. Conclusiones y recomendaciones.....	91
11.1 Conclusiones	91
11.2 Recomendaciones.....	93

PARTE I

Solicitud de presentación de tesis

1 Aceptación de coautores para que el doctorando presente el trabajo

En las páginas siguientes se adjunta claramente la lista completa de los trabajos publicados y el poder otorgado al doctorando para presentar el trabajo en cuestión. Se incluye el nombre y la afiliación del autor y de los respectivos coautores, así como descripción completa de la revista utilizada para publicar los artículos científicos y las firmas originales de los coautores a fin de transmitir el consentimiento para que los artículos aparezcan como compendio en esta tesis doctoral.

Autores: NICOLAU RAFAEL PENICELA CHIRINZA¹, FEDERICO A. LEÓN ZERPA², PAULINO MARIANO VASCO MUGUIRRIMA¹, TANIA DEL PINO GARCÍA², GILBERTO MARTEL RODÍGUEZ³, CAMILA GUTIERREZ³ and CARLOS ALBERTO MENDIETA PINO²

TÍTULO LIFE-CYCLE ANALYSIS OF NATURAL TREATMENT SYSTEMS FOR WASTEWATER (NTSW) APPLIED TO MUNICIPAL EFFLUENTS.

REFERENCIA: DOI: <https://doi.org/10.3390/w16182653>

REVISTA: WATER



AFILIACIONES:

nicolau.chirinza101@alu.ulpgc.es, paulino.muguirrima101@alu.ulpgc.es (1)

Facultad de Ciencia y Tecnología, Universidad de Zambeze (UniZambeze), Mozambique; (N. Rafael Penicela - Chirinza), (P. Vasco Mariano - Muguirrima)

federico.leon@ulpgc.es, carlos.mendieta@ulpgc.es, tania.garcia@ulpgc.es, (2)

Instituto de Estudios Ambientales y Recursos Naturales (iUNAT), Universidad de Las Palmas de Gran Canaria (ULPGC). (3) Instituto Tecnológico de Canarias (ITC), Gobierno de Canarias, 35001 Canarias, España; gmartel@itccanarias.org,

camila_armellini@hotmail.com.

LUGAR DE PUBLICACIÓN: Water 2024, 16 (18), 2653.

FECHA DE PUBLICACIÓN: SEPTIEMBRE DE 2024

DESCRIPCIÓN	PUESTO	CUARTILE
WATER RESOURCES	40/128	Q2

REVISIÓN POR AL MENOS DOS EXPERTOS INDEPENDIENTES

Los coautores del artículo científico titulado "LIFE-CYCLE ANALYSIS OF NATURAL TREATMENT SYSTEMS FOR WASTEWATER (NTSW) APPLIED TO MUNICIPAL

EFFLUENTS" con referencia : DOI: <https://doi.org/10.3390/w16182653>., certifica que el estudiante de doctorado Nicolau Chirinza Rafael Penicela con **DNI 27922000T** es el autor principal de la investigación incluida en el artículo científico referenciado en el que tiene experiencia en la materia indicada y vota para que el artículo sea utilizado como compendio en esta tesis doctoral de Nicolau Chirinza Rafael Penicela sobre **“LIFE-CYCLE ANALYSIS OF NATURAL TREATMENT SYSTEMS FOR WASTEWATER (NTSW) APPLIED TO MUNICIPAL EFFLUENTS”**.

Dr. Federico A. León Zerpa

Dr. Carlos A. Mendieta Pino

Dña. Tania Del Pino García Ramírez

D. Paulino Mariano Muguirrima

D. Gilberto Martel Rodríguez

Dña. Camila Gutiérrez

Autores: NICOLAU RAFAEL PENICELA CHIRINZA¹, PAULINO MARIANO VASCO MUGUIRRIMA¹, FEDERICO LEON ZERPA², and CARLOS ALBERTO MENDIETA PINO²

TÍTULO: A COMPARATIVE ANALYSIS OF BREWERY EFFLUENTS IN AFRICA.

REFERENCIA: DOI: <https://doi.org/10.52152/D11361>

REVISTA: DYNA. Ingeniería e Industria. VOL.101, N.1.



AFILIACIONES:

nicolau.chirinza101@alu.ulpgc.es, paulino.muguirrima101@alu.ulpgc.es (1)

Facultad de Ciencia y Tecnología, Universidad de Zambeze

(UniZambeze), Mozambique; (N. Rafael Penicela - Chirinza), (P. Vasco Mariano

- Muguirrima) federico.leon@ulpgc.es, carlos.mendieta@ulpgc.es (2) Instituto

de Estudios Ambientales y Recursos Naturales (iUNAT), Universidad de Las

Palmas de Gran Canaria (ULPGC).

LUGAR DE PUBLICACIÓN: DYNA SL -- c) Mazarredo nº69 - 2º -- 48009-

BILBAO (ESPAÑA)

FECHA DE PUBLICACIÓN: MAYO DE 2025

DESCRIPCIÓN	PUESTO	CUARTILE
Ingeniería Multidisciplinar	128/181	Q3

REVISIÓN POR AL MENOS DOS EXPERTOS INDEPENDIENTES

Los coautores del artículo científico titulado "A COMPARATIVE ANALYSIS OF BREWERY EFFLUENTS IN AFRICA" con referencia: DOI <https://doi.org/10.52152/D11359> VOL.100, N.1., certifica que el Doctorando Nicolau Chirinza Rafael Penicela con **DNI 27922000T** es el autor principal de la investigación incluida en el artículo científico referenciado donde tiene conocimiento en la materia enumerada y voto para que el artículo sea utilizado como compendio en esta tesis doctoral de Nicolau Chirinza Rafael Penicela sobre "A COMPARATIVE ANALYSIS OF BREWERY EFFLUENTS IN AFRICA".

Dr. Federico A. León Zerpa

Dr. Carlos A. Mendieta Pino

D. Paulino Mariano Muguirrima

Autores: NICOLAU RAFAEL PENICELA CHIRINZA¹, PAULINO MARIANO VASCO MUGUIRRIMA¹, FEDERICO LEON ZERPA², a n d CARLOS ALBERTO MENDIETA PINO²

TÍTULO: CARACTERIZACIÓN DE LAS AGUAS RESIDUALES DE LA CERVECERÍA MOZAMBIQUEÑA: COMPARACIÓN DE CARACTERÍSTICAS CON EFLUENTES DE CERVECERÍAS DE OTROS PAÍSES.

Referencia: DOI: <https://doi.org/10.52152/DES11189>

REVISTA: DYNA ENERGÍA Y SOSTENIBILIDAD. VOL.13, N



AFILIACIONES:

nicolau.chirinza101@alu.ulpgc.es, paulino.muguirrima101@alu.ulpgc.es (1)

Facultad de Ciencia y Tecnología, Universidad de Zambeze

(UniZambeze), Mozambique; (N. Rafael Penicela - Chirinza), (P. Vasco Mariano

- Muguirrima) federico.leon@ulpgc.es, carlos.mendieta@ulpgc.es (2) Instituto

de Estudios Ambientales y Recursos Naturales (iUNAT), Universidad de Las

Palmas de Gran Canaria (ULPGC).

LUGAR DE PUBLICACIÓN: DYNA SL -- c) Mazarredo nº69 - 2º -- 48009-BILBAO (ESPAÑA)

FECHA DE PUBLICACIÓN: DICIEMBRE DE 2024

REVISIÓN POR AL MENOS DOS EXPERTOS INDEPENDIENTES

Los coautores del artículo científico titulado "CARACTERIZACIÓN DE LAS AGUAS RESIDUALES DE LA CERVECERÍA MOZAMBIQUEÑA: COMPARACIÓN DE CARACTERÍSTICAS CON EFLUENTES DE CERVECERÍAS DE OTROS PAÍSES" con referencia DOI: <https://doi.org/10.52152/DES11189> VOL.13, N.1₂ certifica que el estudiante de doctorado Nicolau Chirinza Rafael Penicela con **DNI 27922000T** es el autor principal de la investigación incluida en el artículo científico referenciado donde tiene

conocimiento en la materia indicada y vota para que el artículo sea utilizado en la composición de la tesis doctoral. utilizado como compendio en esta tesis doctoral de Nicolau Chirinza Rafael Penicela **sobre “CARACTERIZACIÓN DE LAS AGUAS RESIDUALES DE LA CERVECERÍA MOZAMBIQUEÑA: COMPARACIÓN DE CARACTERÍSTICAS CON EFLUENTES DE CERVECERÍAS DE OTROS PAÍSES”.**

Dr. Federico A. León Zerpa

Dr. Carlos A. Mendieta Pino

D. Paulino Mariano Muguirrima

Autores: NICOLAU RAFAEL PENICELA CHIRINZA¹, PAULINO MARIANO VASCO MUGUIRRIMA¹, FEDERICO LEON ZERPA² and CARLOS ALBERTO MENDIETA PINO²

TÍTULO: EXTRACTO DE SEMILLA DE MORINGA OLEIFERA COMO COAGULANTE EN EL TRATAMIENTO DEL AGUA POTABLE.

REFERENCIA: DOI: <https://doi.org/10.52152/D11359>

REVISTA: DYNA. Ingeniería e Industria. VOL.100, N.1.



AFILIACIONES:

nicolau.chirinza101@alu.ulpgc.es, paulino.muguirrima101@alu.ulpgc.es (1)

Facultad de Ciencia y Tecnología, Universidad de Zambeze

(UniZambeze), Mozambique; (N. Rafael Penicela - Chirinza), (P. Vasco Mariano

- Muguirrima) federico.leon@ulpgc.es, alejandro.ramos@ulpgc.es,

carlos.mendieta@ulpgc.es (2) Instituto de Estudios Ambientales y Recursos

Naturales (iUNAT), Universidad de Las Palmas de Gran Canaria (ULPGC).

LUGAR DE PUBLICACIÓN: DYNA SL -- c) Mazarredo nº69 - 2º -- 48009-BILBAO (ESPAÑA)

FECHA DE PUBLICACIÓN: ENERO DE 2025

DESCRIPCIÓN	PUESTO	CUARTILE
Ingeniería Multidisciplinar	128/181	Q3

REVISIÓN POR AL MENOS DOS EXPERTOS INDEPENDIENTES

Los coautores del artículo científico titulado EXTRACTO DE SEMILLA DE MORINGA OLEIFERA COMO COAGULANTE EN EL TRATAMIENTO DEL AGUA POTABLE" con referencia: DOI <https://doi.org/10.52152/D11359> VOL.100, N.1., certifica que el Doctorando Nicolau Chirinza Rafael Penicela con **DNI27922000T** es el autor principal de la investigación incluida en el artículo científico referenciado donde tiene conocimiento en la materia enumerada y voto para que el artículo sea utilizado en la composición de la tesis doctoral de Nicolau Chirinza

Rafael Penicela **sobre “EXTRACTO DE SEMILLA DE MORINGA OLEIFERA COMO COAGULANTE EN EL TRATAMIENTO DEL AGUA POTABLE”.**

Dr. Federico A. León Zerpa

Dr. Carlos A. Mendieta Pino

D. Paulino Mariano Muguirrima

Autores: NICOLAU RAFAEL PENICELA CHIRINZA¹, PAULINO MARIANO VASCO MUGUIRRIMA¹, FEDERICO LEON ZERPA², ALEJANDRO RAMOS MARTIN², CARLOS ALBERTO MENDIETA PINO²

TÍTULO: PROPOSAL FOR THE USE OF MORINGA OLEIFERA SEED EXTRACT AS A COAGULANT IN THE TREATMENT OF DRINKING WATER.

REFERENCIA:DOI: <https://doi.org/10.52152/DES11244>

REVISTA: DYNA ENERGÍA Y SOSTENIBILIDAD. VOL.13,



AFILIACIONES:

nicolau.chirinza101@alu.ulpgc.es, paulino.muguirrima101@alu.ulpgc.es (1)

Facultad de Ciencia y Tecnología, Universidad de Zambeze (UniZambeze), Mozambique; (N. Rafael Penicela - Chirinza), (P. Vasco Mariano - Muguirrima) federico.leon@ulpgc.es, alejandroramos@ulpgc.es,

carlos.mendieta@ulpgc.es (2) Instituto de Estudios Ambientales y Recursos Naturales (iUNAT), Universidad de Las Palmas de Gran Canaria (ULPGC).

LUGAR DE PUBLICACIÓN: DYNA SL -- c) Mazarredo nº69 - 2º -- 48009-BILBAO (ESPAÑA)

FECHA DE PUBLICACIÓN: DICIEMBRE DE 2024

REVISIÓN POR AL MENOS DOS EXPERTOS INDEPENDIENTES

Los coautores del artículo científico titulado "PROPOSAL FOR THE USE OF MORINGA OLEIFERA SEED EXTRACT AS A COAGULANT IN THE TREATMENT OF DRINKING WATER" con referencia: DOI: <https://doi.org/10.52152/DES11244> VOL.13,N.1., certifica que el Doctorando Nicolau Chirinza Rafael Penicela con **DNI27922000T** es el autor principal de la investigación incluida en el artículo científico referenciado donde tiene conocimiento en la materia enumerada y voto para que el artículo sea utilizado en la composición de la tesis doctoral de Nicolau Chirinza Rafael Penicela

sobre **“PROPOSAL FOR THE USE OF MORINGA OLEIFERA SEED EXTRACT
AS A COAGULANT IN THE TREATMENT OF DRINKING WATER”**.

Dr. Federico A. León Zerpa

Dr. Carlos A. Mendieta Pino

Dr. Alejandro Ramos Martín

D. Paulino Mariano Muguirrima

Autores: NICOLAU RAFAEL PENICELA CHIRINZA¹, PAULINO MARIANO VASCO MUGUIRRIMA¹, FEDERICO LEON ZERPA², ALEJANDRO RAMOS MARTIN², CARLOS ALBERTO MENDIETA PINO²

TÍTULO RESOURCES OPTIMIZATION USING PARETO ANALYSIS FOR SEA WATER DESALINATION PLANTS.

REFERENCIA: DOI: //doi.org/10.1016/j.clwat.2024.100054

REVISTA: CLEANER WATER, VOL. 2, 100054.



AFILIACIONES:

nicolau.chirinza101@alu.ulpgc.es, paulino.muguirrima101@alu.ulpgc.es (1)

Facultad de Ciencia y Tecnología, Universidad de Zambeze

(UniZambeze), Mozambique; (N. Rafael Penicela - Chirinza), (P. Vasco Mariano

- Muguirrima) federico.leon@ulpgc.es, carlos.mendieta@ulpgc.es (2) Instituto

de Estudios Ambientales y Recursos Naturales (iUNAT), Universidad de Las

Palmas de Gran Canaria (ULPGC).

LUGAR DE PUBLICACIÓN: ELSEVIER LtD

FECHA DE PUBLICACIÓN: DICIEMBRE DE 2024

REVISIÓN POR AL MENOS DOS EXPERTOS INDEPENDIENTES

Los coautores del artículo científico titulado "RESOURCES OPTIMIZATION USING PARETO ANALYSIS FOR SEA WATER DESALINATION PLANTS" con referencia : DOI: <https://doi.org/10.1016/j.clwat.2024.100054>, certifican que el estudiante de doctorado Nicolau Chirinza Rafael Penicela con **DNI27922000T** es el autor principal de la investigación incluida en el artículo científico referenciado en el que tiene conocimientos en la materia indicada y votan para que el artículo sea utilizado en la composición de la tesis doctoral de Nicolau Chirinza Rafael Penicela sobre “**RESOURCES**

**OPTIMIZATION USING PARETO ANALYSIS FOR SEA WATER
DESALINATION PLANTS”.**

Dr. Federico A. León Zepa

Dr. Carlos A. Mendieta Pino

Dr. Alejandro Ramos Martín

D. Paulino Mariano Muguirrima

PARTE II

Introducción

2 Introducción

2.1 Antecedentes

En los últimos tiempos ha habido muchas preocupaciones por la calidad del medio ambiente y se han realizado diversos estudios para responder a la necesidad de mitigar cualquier acontecimiento que contribuya a la degradación medioambiental.

Cabe señalar que, en las últimas décadas, diversas clases han suscitado una enorme preocupación por la percepción de las condiciones medioambientales globales, marcadas por un aumento sustancial de las emisiones de carbono, que han pasado de 22.149,4 millones de toneladas en 1990 a 36.390,3 millones de toneladas en 2018. Este aumento de las emisiones contribuye de forma destacada al calentamiento global, ya que representa el 58,8% del total de las emisiones mundiales. A escala internacional, se ha producido un rápido y alarmante deterioro de las condiciones medioambientales, lo que ha agravado el problema del calentamiento global [1], [2], [3], [4]. Los efectos destructivos de la contaminación atmosférica sobre la salud humana subrayan la necesidad urgente de atajar este problema. A un nivel mundial considerable, India, Pakistán y China, como principales contribuyentes a las emisiones mundiales de carbono, se enfrentan a distintas dificultades en materia de gobernanza medioambiental. Es crucial abordar estos retos adoptando enfoques sostenibles y aplicando políticas que promuevan el progreso ecológico al tiempo que mitigan los impactos negativos sobre la calidad del medio ambiente [5]. El suelo y el agua son recursos naturales que vitalizan el planeta Tierra, pero su contaminación puede tener efectos nocivos sobre la calidad del medio ambiente. El agua es el componente más delicado del medio ambiente y un elemento necesario para el progreso humano e industrial. En todo el mundo se reconoce cada vez más que el agua será uno de los recursos naturales más importantes en el futuro. Sin embargo, existe una creciente escasez mundial de agua y una presión sobre los recursos hídricos ya disponibles como consecuencia de la

INTRODUCCIÓN

creciente demanda [6], [7], [8], [9]. Especialmente en África, la degradación medioambiental causada por el vertido de aguas residuales domésticas e industriales ha

aumentado considerablemente, por ejemplo, en países como Sudáfrica, Angola y Mozambique. Este aumento del fenómeno se ve catapultado por el crecimiento demográfico y la expansión industrial derivada de los más variados descubrimientos de recursos naturales [10], [11]. Para minimizar la contaminación del cuerpo que recibe las aguas residuales, se están llevando a cabo diversos estudios con el fin de obtener sistemas viables de tratamiento de aguas residuales. Varios países de Europa, América y Asia han puesto en marcha políticas de tratamiento de aguas residuales tanto descentralizadas como centralizadas con el fin de satisfacer la demanda. Existen dos grupos de sistemas de tratamiento de aguas residuales según la composición del material utilizado en el proceso de construcción y su origen. Tenemos los sistemas intensivos o convencionales y los sistemas extensivos o no convencionales [12], [13], [14], [15]. Sistemas intensivos o convencionales - Son sistemas que consumen importantes cantidades de energía para su funcionamiento (equipos electromecánicos) y utilizan pequeñas superficies de terreno por habitante equivalente (por ejemplo: lodos activados y lechos permeables). Sistemas extensivos o naturales - Se basan en procesos naturales, consumen poca o ninguna energía y ocupan mayores superficies por habitante equivalente (por ejemplo: balsas de estabilización, humedales construidos y sistemas de tratamiento de suelos).

Entre las diversas alternativas a elegir, las industrias buscan actualmente el sistema de tratamiento de aguas residuales más económico y con una eficacia óptima en la eliminación de parámetros para minimizar el coste total de la industria. Cuando se adoptaron por primera vez en todo el mundo políticas sobre la necesidad de tratar las aguas residuales antes de verterlas al cuerpo receptor o de reutilizarlas finalmente, muchas industrias optaron por tecnologías convencionales más avanzadas y, con el tiempo, se dieron cuenta de que es posible tratarlas de forma más económica sin dejar de cumplir las normas. Con esta visión, muchas industrias buscan alternar con sistemas no convencionales. En el caso particular de Mozambique, la visión de implantar un sistema de tratamiento de aguas residuales en las industrias tiende a ganar protagonismo debido a la percepción de su contribución a la mejora de la calidad ambiental y también como práctica en respuesta a las exigencias de la legislación ambiental nacional. En cuanto a la

industria estudiada, tiene un sistema convencional de tratamiento de aguas residuales con muchos requisitos

INTRODUCCIÓN

técnicos para su manejo, muchos dispositivos conectados, consumo excesivo de electricidad y otros recursos.

2.2 Objetivos de la Tesis

El agua es uno de los recursos esenciales para la supervivencia humana, sin duda el más crucial. Por ello, corresponde a la comunidad científica dedicarse intensamente a esta cuestión, tratando de debatir y encontrar formas de garantizar la sostenibilidad a largo plazo de este recurso. En este contexto, es crucial comprender cómo se distribuye y utiliza el agua en el planeta, así como las consecuencias de su exposición una vez caracterizada como agua residual bruta [16]. Las aguas residuales no tratadas pueden contaminar tanto las aguas subterráneas como las superficiales, por lo que es imprescindible tratarlas antes de verterlas o drenarlas en masas receptoras. Hablar de tratamiento de aguas residuales es una de las necesidades más acuciantes de nuestro tiempo. Las industrias de todo el mundo se ven presionadas para implantar sistemas de tratamiento de aguas residuales como forma de mitigar la degradación de la calidad del medio ambiente. La contaminación del agua puede proceder de numerosas fuentes, incluidos los entornos domésticos y urbanos, pero la industria es una de las principales responsables de la formación de aguas residuales que requieren tratamiento [16], [17], [18]. Se están llevando a cabo diversos estudios con vistas a ofrecer mejores alternativas para los sistemas de tratamiento de aguas residuales. En Mozambique, la organización responsable del medio ambiente se ha esforzado por sancionar a todas las industrias que contribuyen a la degradación del medio ambiente. Sin embargo, el objetivo de esta tesis es analizar y modelizar el sistema de tratamiento natural de los efluentes industriales de una fábrica de cerveza mozambiqueña. Además de este objetivo principal, sirve como documento orientativo de las principales actividades que deben seguirse para proponer un sistema de depuración natural y de las ventajas de utilizar un sistema no convencional frente a uno convencional.

2.3 Obras publicadas

En este apartado se relacionan los diferentes artículos científicos desarrollados y publicados en revistas de reconocido prestigio, incluyendo los nombres de los autores, título, periodo de publicación, referencia, así como datos relevantes sobre la revista; nombre, editorial, cargo y cuartil. Cabe destacar que este listado muestra claramente la relación entre artículos científicos en los que el doctorando responde como investigador principal y otros artículos en los que responde como colaborador.

2.3.1. Como autor principal

Artículo 1.

Autores: NICOLAU RAFAEL PENICELA CHIRINZA¹, FEDERICO A. LEÓN ZERPA², PAULINO MARIANO VASCO MUGUIRRIMA¹, TANIA DEL PINO GARCÍA², GILBERTO MARTEL RODRÍGUEZ³, CAMILA GUTIERREZ³ and CARLOS ALBERTO MENDIETA PINO²

TÍTULO LIFE-CYCLE ANALYSIS OF NATURAL TREATMENT SYSTEMS FOR WASTEWATER (NTSW) APPLIED TO MUNICIPAL EFFLUENTS.

REFERENCIA: DOI: <https://doi.org/10.3390/w16182653>

REVISTA: WATER



AFILIACIONES:

nicolau.chirinza101@alu.ulpgc.es, paulino.muguirrima101@alu.ulpgc.es (1)

Facultad de Ciencia y Tecnología, Universidad de Zambeze (UniZambeze), Mozambique; (N. Rafael Penicela - Chirinza), (P. Vasco Mariano - Muguirrima)

federico.leon@ulpgc.es, carlos.mendieta@ulpgc.es, tania.garcia@ulpgc.es, (2)

Instituto de Estudios Ambientales y Recursos Naturales (iUNAT), Universidad de Las Palmas de Gran Canaria (ULPGC). (3) Instituto Tecnológico de Canarias (ITC), Gobierno de Canarias, 35001 Canarias, España; gmartel@itccanarias.org, camila_armellini@hotmail.com.

LUGAR DE PUBLICACIÓN: Water 2024, 16 (18), 2653.

FECHA DE PUBLICACIÓN: SEPTIEMBRE DE 2024

DESCRIPCIÓN	PUESTO	CUARTILE
WATER RESOURCES	40/128	Q2

REVISIÓN POR AL MENOS DOS EXPERTOS INDEPENDIENTES

Artículo 2.

Autores: NICOLAU RAFAEL PENICELA CHIRINZA¹, PAULINO MARIANO VASCO MUGUIRRIMA¹, FEDERICO LEON ZERPA², and CARLOS ALBERTO MENDIETA PINO²

TÍTULO: A COMPARATIVE ANALYSIS OF BREWERY EFFLUENTS IN AFRICA.

REFERENCIA: DOI: <https://doi.org/10.52152/D11361>

REVISTA: DYNA. Ingeniería e Industria. VOL.101, N.1.



AFILIACIONES:

nicolau.chirinza101@alu.ulpgc.es, paulino.muguirrima101@alu.ulpgc.es (1)

Facultad de Ciencia y Tecnología, Universidad de Zambeze

(UniZambeze), Mozambique; (N. Rafael Penicela - Chirinza), (P. Vasco Mariano

- Muguirrima) federico.leon@ulpgc.es, carlos.mendieta@ulpgc.es (2) Instituto

de Estudios Ambientales y Recursos Naturales (iUNAT), Universidad de Las

Palmas de Gran Canaria (ULPGC).

LUGAR DE PUBLICACIÓN: DYNA SL -- c) Mazarredo nº69 - 2º -- 48009-BILBAO (ESPAÑA)

FECHA DE PUBLICACIÓN: MAYO DE 2025

DESCRIPCIÓN	PUESTO	CUARTILE
Ingeniería Multidisciplinar	122/181	Q3

REVISIÓN POR AL MENOS DOS EXPERTOS INDEPENDIENTES

Artículo 3.

Autores: NICOLAU RAFAEL PENICELA CHIRINZA¹, PAULINO MARIANO VASCO MUGUIRRIMA¹, FEDERICO LEON ZERPA², and CARLOS ALBERTO MENDIETA PINO²

TÍTULO: CARACTERIZACIÓN DE LAS AGUAS RESIDUALES DE LA CERVECERÍA MOZAMBIQUEÑA: COMPARACIÓN DE CARACTERÍSTICAS CON EFLUENTES DE CERVECERÍAS DE OTROS PAÍSES.

Referencia: DOI: <https://doi.org/10.52152/DES11189>

REVISTA: DYNA ENERGÍA Y SOSTENIBILIDAD. VOL.13,

**AFILIACIONES:**

nicolau.chirinza101@alu.ulpgc.es, paulino.muguirrima101@alu.ulpgc.es (1)

Facultad de Ciencia y Tecnología, Universidad de Zambeze

(UniZambeze), Mozambique; (N. Rafael Penicela - Chirinza), (P. Vasco Mariano

- Muguirrima) federico.leon@ulpgc.es, carlos.mendieta@ulpgc.es (2) Instituto

de Estudios Ambientales y Recursos Naturales (iUNAT), Universidad de Las Palmas de Gran Canaria (ULPGC).

LUGAR DE PUBLICACIÓN: DYNA SL -- c) Mazarredo nº69 - 2º -- 48009-

BILBAO (ESPAÑA)

FECHA DE PUBLICACIÓN: DICIEMBRE DE 2024

REVISIÓN POR AL MENOS DOS EXPERTOS INDEPENDIENTES

Artículo 4.

Autores: NICOLAU RAFAEL PENICELA CHIRINZA¹, PAULINO MARIANO VASCO MUGUIRRIMA¹, FEDERICO LEON ZERPA² and CARLOS ALBERTO MENDIETA PINO²

TÍTULO: EXTRACTO DE SEMILLA DE MORINGA OLEIFERA COMO COAGULANTE EN EL TRATAMIENTO DEL AGUA POTABLE.

REFERENCIA: DOI: <https://doi.org/10.52152/D11359>

REVISTA: DYNA. Ingeniería e Industria. VOL.100, N.1.



AFILIACIONES:

nicolau.chirinza101@alu.ulpgc.es, paulino.muguirrima101@alu.ulpgc.es (1)

Facultad de Ciencia y Tecnología, Universidad de Zambeze

(UniZambeze), Mozambique; (N. Rafael Penicela - Chirinza), (P. Vasco Mariano

- Muguirrima) federico.leon@ulpgc.es, alejandro.ramos@ulpgc.es,

carlos.mendieta@ulpgc.es (2) Instituto de Estudios Ambientales y Recursos

Naturales (iUNAT), Universidad de Las Palmas de Gran Canaria (ULPGC).

LUGAR DE PUBLICACIÓN: DYNA SL -- c) Mazarredo nº69 - 2º -- 48009-BILBAO (ESPAÑA)

FECHA DE PUBLICACIÓN: ENERO DE 2025

DESCRIPCIÓN	PUESTO	CUARTILE
Ingeniería Multidisciplinar	122/181	Q3

REVISIÓN POR AL MENOS DOS EXPERTOS INDEPENDIENTES

Artículo 5.

Autores: NICOLAU RAFAEL PENICELA CHIRINZA¹, PAULINO MARIANO VASCO MUGUIRRIMA¹, FEDERICO LEON ZERPA², ALEJANDRO RAMOS MARTIN², CARLOS ALBERTO MENDIETA PINO²

TÍTULO: PROPOSAL FOR THE USE OF MORINGA OLEIFERA SEED EXTRACT AS A COAGULANT IN THE TREATMENT OF DRINKING WATER.

REFERENCIA:DOI: <https://doi.org/10.52152/DES11244>

REVISTA: DYNA ENERGÍA Y SOSTENIBILIDAD. VOL.13,

**AFILIACIONES:**

nicolau.chirinza101@alu.ulpgc.es, paulino.muguirrima101@alu.ulpgc.es (1)

Facultad de Ciencia y Tecnología, Universidad de Zambeze

(UniZambeze), Mozambique; (N. Rafael Penicela - Chirinza), (P. Vasco Mariano

- Muguirrima) federico.leon@ulpgc.es, alejandro.ramos@ulpgc.es,

carlos.mendieta@ulpgc.es (2) Instituto de Estudios Ambientales y Recursos

Naturales (iUNAT), Universidad de Las Palmas de Gran Canaria (ULPGC).

LUGAR DE PUBLICACIÓN: DYNA SL -- c) Mazarredo nº69 - 2º -- 48009-BILBAO (ESPAÑA)

FECHA DE PUBLICACIÓN: DICIEMBRE DE 2024

REVISIÓN POR AL MENOS DOS EXPERTOS INDEPENDIENTES

Artículo 6.

Autores: NICOLAU RAFAEL PENICELA CHIRINZA¹, PAULINO MARIANO VASCO MUGUIRRIMA¹, FREDERICO LEON ZERPA², ALEJANDRO RAMOS MARTIN², CARLOS ALBERTO MENDIETA PINO²

TÍTULO RESOURCES OPTIMIZATION USING PARETO ANALYSIS FOR SEA WATER DESALINATION PLANTS. REFERENCIA: DOI:

[//doi.org/10.1016/j.clwat.2024.100054](https://doi.org/10.1016/j.clwat.2024.100054)

REVISTA: CLEANER WATER, VOL. 2, 100054.

**AFILIACIONES:**

nicolau.chirinza101@alu.ulpgc.es, paulino.muguirrima101@alu.ulpgc.es (1)

Facultad de Ciencia y Tecnología, Universidad de Zambeze

(UniZambeze), Mozambique; (N. Rafael Penicela - Chirinza), (P. Vasco Mariano

- Muguirrima) federico.leon@ulpgc.es, carlos.mendieta@ulpgc.es (2) Instituto

de Estudios Ambientales y Recursos Naturales (iUNAT), Universidad de Las Palmas de Gran Canaria (ULPGC).

LUGAR DE PUBLICACIÓN: ELSEVIER Ltd

FECHA DE PUBLICACIÓN: DICIEMBRE DE 2024

REVISIÓN POR AL MENOS DOS EXPERTOS INDEPENDIENTES

2.3.2 Como colaborador en artículos relacionados con la Tesis doctoral

Artículo 7.

Autores: PAULINO MARIANO VASCO MUGUIRRIMA¹, NICOLAU RAFAEL PENICELA CHIRINZA¹, FEDERICO LEON ZERPA² and CARLOS ALBERTO MENDIETA PINO²

TÍTULO: EVALUACIÓN DE LAS PROPIEDADES FISICOQUÍMICAS DE LOS EFLUENTES DE LA INDUSTRIA

AZUCARERA DE MOZAMBIQUE.

Referencia: DOI: <https://doi10.52152/DES11188>

REVISTA: DYNA Ingeniería e Industria. VOL.100, N.1.



AFILIACIONES:

paulino.muguirrima101@alu.ulpgc.es; nicolau.chirinza101@alu.ulpgc.es (1)

Facultad de Ciencia y Tecnología, Universidad de Zambeze

(UniZambeze), Mozambique; (P. Vasco Mariano - Muguirrima); ; (N. Rafael

Penicela - Chirinza) federico.leon@ulpgc.es (F. Leon - Zerpa),

carlos.mendieta@ulpgc.es (C.A. Mendieta - Pino) (2) Instituto de Estudios

Ambientales y Recursos Naturales (iUNAT), Universidad de Las Palmas de Gran Canaria (ULP[GC];

LUGAR DE PUBLICACIÓN: DYNA SL -- c) Mazarredo nº69 - 2º -- 48009-BILBAO (ESPAÑA)

FECHA DE PUBLICACIÓN: ENERO DE 2025

DESCRIPCIÓN	PUESTO	CUARTILE
Ingeniería Multidisciplinar	122/181	Q3

REVISIÓN POR AL MENOS DOS EXPERTOS INDEPENDIENTES

Artículo 8.

Autores:, PAULINO MARIANO VASCO MUGUIRRIMA¹, NICOLAU RAFAEL PENICELA CHIRINZA¹, FEDERICO LEON ZERPA² and CARLOS ALBERTO MENDIETA PINO²

TÍTULO: EVALUATION OF THE PHYSICO-CHEMICAL PROPERTIES OF EFFLUENTS FROM THE MOZAMBIQUE SUGAR COMPANY. A PROPOSAL FOR EFFLUENT TREATMENT.

Referencia: DOI: <https://doi.org/10.52152/DES11188>

REVISTA: DYNA ENERGÍA Y SOSTENIBILIDAD

**AFILIACIONES:**

paulino.muguirrima101@alu.ulpgc.es; nicolau.chirinza101@alu.ulpgc.es (1)

Facultad de Ciencia y Tecnología, Universidad de Zambeze

(UniZambeze), Mozambique; (P. Vasco Mariano - Muguirrima); ; (N. Rafael

Penicela - Chirinza) federico.leon@ulpgc.es (F. Leon - Zerpa),

carlos.mendieta@ulpgc.es (C.A. Mendieta - Pino) (2) Instituto de Estudios

Ambientales y Recursos Naturales (iUNAT), Universidad de Las Palmas de Gran Canaria (ULP[GC]);

LUGAR DE PUBLICACIÓN: DYNA SL -- c) Mazarredo nº69 - 2º -- 48009-BILBAO (ESPAÑA)

FECHA DE PUBLICACIÓN: SEPTIEMBRE DE 2024

REVISIÓN POR AL MENOS DOS EXPERTOS INDEPENDIENTES

Artículo 9.

Autores: PAULINO MARIANO VASCO MUGUIRRIMA¹, NICOLAU RAFAEL PENICELA CHIRINZA¹, FEDERICO LEON ZERPA², SEBASTIAN OVIDIO PEREZ BAEZ², CARLOS ALBERTO MENDIETA PINO²

TÍTULO: DIMENSIONAMIENTO DE UN SISTEMA DE TRATAMIENTO DE EFLUENTES DE LA COMPAÑÍA AZUCARERA DE MOZAMBIQUE.

REFERENCIA:

<https://doi.org/10.3390/su16198334>

REVISTA Sostenibilidad **2024**, 16, 8334.



AFILIACIONES:

paulino.muguirrima101@alu.ulpgc.es; nicolau.chirinza101@alu.ulpgc.es (1)

Facultad de Ciencia y Tecnología, Universidad de Zambeze (UniZambeze), Mozambique; (P. Vasco Mariano - Muguirrima) , (N. Rafael Penicela - Chirinza).

federico.leon@ulpgc.es (F. Leon - Zerpa), sebastianovidio.perez@ulpgc.es (S.

Ovido.Perez- Baez), carlos.mendieta@ulpgc.es (C.A. Mendieta - Pino). (2)

Instituto de Estudios Ambientales y Recursos Naturales (iUNAT), Universidad de Las Palmas de Gran Canaria (ULP[GC];

LUGAR DE PUBLICACIÓN: MDPI, Basilea, Suiza

FECHA DE PUBLICACIÓN: SEPTIEMBRE DE 2024

DESCRIPCIÓN CATEGORÍA	POSICIÓN:	Cuartil
SUSTAINABILITY	58/91 (2023)	Q2

REVISIÓN POR AL MENOS DOS EXPERTOS INDEPENDIENTES

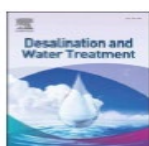
Artículo 10.

Autores: PAULINO MARIANO VASCO MUGUIRRIMA¹, NICOLAU RAFAEL PENICELA CHIRINZA¹, FEDERICO LEON ZERPA², CARLOS ALBERTO MENDIETA PINO²

TÍTULO: TRATAMIENTO DE EFLUENTES DOMÉSTICOS MEDIANTE MÉTODOS DE BIOFILTRO SOSTENIBLES

REFERENCIA: <https://doi.org/10.1016/j.dwt.2024.100266>

REVISTA DESALINATION AND WATER
TREATMENT.

**AFILIACIONES:**

paulino.muguirrima101@alu.ulpgc.es; nicolau.chirinza101@alu.ulpgc.es (1)
Facultad de Ciencia y Tecnología, Universidad de Zambeze (UniZambeze),
Mozambique; (P. Vasco Mariano - Muguirrima), (N. Rafael Penicela - Chirinza).

federico.leon@ulpgc.es (F.Leon - Zerpa), carlos.mendieta@ulpgc.es (C.A.
Mendieta - Pino). (2) Instituto de Estudios Ambientales y Recursos Naturales
(iUNAT), Universidad de Las Palmas de Gran Canaria (ULP[GC]).

LUGAR DE PUBLICACIÓN: DESALINATION AND WATER TREATMENT

PLAZO DE PUBLICACIÓN: FEBRERO DE 2024

DESCRIPCIÓN	PUESTO	CUARTILE
WATER RESOURCES	132/170	Q4

REVISIÓN POR AL MENOS DOS EXPERTOS INDEPENDIENTES

2.4 Justificación de la unidad temática de la tesis

La Universidad de Las Palmas de Gran Canaria (ULPGC) permite la presentación de tesis doctorales en formato de compendio de publicaciones. Este formato consiste en la recopilación de varios artículos científicos relacionados y publicados por el doctorando durante su periodo de investigación. Según el REGLAMENTO 1/2023, DE ESTUDIOS DE DOCTORADO DE LA UNIVERSIDAD DE LAS PALMAS DE GRAN CANARIA, para la presentación de tesis por compendio de publicaciones será necesario:

1.- Un mínimo de tres publicaciones, con unidad temática, indexadas en el Journal Citations Reports, Arts and Humanities Citation Index o equivalentes, de las que el doctorando sea el primer autor o autor principal. Al menos una de ellas deberá haber sido publicada en una revista cuyo índice de impacto la sitúe dentro de la primera mitad en orden decreciente de índice de impacto entre las revistas del área. Se considerarán publicaciones equivalentes aquellas que se recojan en los procedimientos de la última convocatoria de obtención de sexenios de investigación en cada campo.

2.- Para acreditar la condición de autor principal, esta deberá ser reconocida por el resto de los autores de las publicaciones presentadas como núcleo de la tesis doctoral, al mismo tiempo que estos deberán renunciar a utilizar estas publicaciones como núcleo principal de otras tesis doctorales, sin perjuicio de que dichas publicaciones puedan ser presentadas como méritos complementarios en las tesis doctorales que pudieran presentar los otros autores de dichas publicaciones. El documento de Autoría Principal Tesis de Compendio de Publicaciones se encuentra disponible en dos versiones (inglés y español).

3.- En áreas de especial incidencia tecnológica dos de estas publicaciones podrán ser sustituidas por patentes en explotación o publicaciones en congresos reconocidos por la CNEAI en sus baremos para la obtención de sexenios.

4.- Que en las publicaciones o patentes conste la Universidad de Las Palmas de Gran Canaria a través de la afiliación del doctorando y del director en su caso. Las tesis doctorales presentadas como compendio de publicaciones deberán ajustarse, en todo caso, al formato establecido en los artículos 21 a 23 del REGLAMENTO 1/2023, DE

ESTUDIOS DE DOCTORADO DE LA UNIVERSIDAD DE LAS PALMAS DE GRAN CANARIA y contener los apartados siguientes:

- Una introducción en la que se presenten los objetivos de la tesis, los trabajos publicados y la justificación de la unidad temática de la tesis;
- Una copia de los trabajos publicados;
- Las conclusiones finales.

La Comisión Académica es el órgano encargado de verificar que el contenido de la tesis reúne los requisitos previstos por la norma para ser defendida bajo esta modalidad.

A continuación, mencionaremos los artículos que sirven como hitos para esta tesis doctoral.

Artículo 21. Contenido de la tesis doctoral

1. La tese doctoral consistirá en un trabajo Original de Investigación elaborado por el doctorando sobre un tema relacionado con el campo Científico, técnico o artístico, propio del del Programa de Doctorando en que se encuentre matriculado.
2. El trabajo Contendrá, al menos, una introducción, o estado de la cuestión, los objetivos planteados, la metodología desarrollada, los resultados y la discusión sobre los mismos, así como las conclusiones más relevantes y la bibliografía utilizada. No será necesario que tales contenidos figuren en epígrafes específicos en el documento final que se presente.

Artículo 22. Lengua de la tesis doctoral

1. La tesis podrá ser desarrollada y, en su caso, defendida, en los idiomas habituales para la comunicación científica en su campo de conocimiento.
2. En el caso de tesis doctorales escritas en una lengua distinta a la da española se deberá apartar un resumen en español sobre el contenido de esta, de una extensión de entre 3 y 15 páginas, en el que se incluyan los objetivos y las conclusiones.

Artículo 23. Formato de la memoria de tesis

1. En la cubierta de todas las tesis deberá figurar el logotipo, conforme a lo establecido en el manual de identidad visual corporativa, el nombre de la Universidad de Las Palmas de Gran Canaria, y el nombre del Programa de Doctorado, título de la tesis, autor, fecha y lugar.
2. El ejemplar de la tesis para el depósito contendrá una página inicial, en blanco, en la que los servicios administrativos de la universidad harán constar, en su momento, el tribunal, calificación global otorgada, fecha y firmas.
3. La siguiente página a la dejada en blanco contendrá los siguientes datos: el mencionado logotipo, el nombre de la Universidad de Las Palmas de Gran Canaria, el nombre del programa doctoral, el título de esta, nombre y firmas del autor y director o directores, así como el lugar y fecha de finalización de la tesis.

Cumplimiento de requisitos: Esta tesis por compendio cumple con todos los requisitos establecidos por la ULPGC y reglamentos para su presentación y validación.

La unidad temática de esta tesis doctoral, a modo de compendio, fue desde el punto de vista de la elaboración de un trabajo orientado en torno a una línea de investigación. A través de los artículos elaborados y publicados en revistas de reconocido prestigio, se comprobó la relación entre el objetivo de la investigación, la metodología seguida y los resultados alcanzados. El cambio climático es una realidad en casi todo el mundo, por lo que se recomienda que los estudios estén alineados con la innovación de tecnologías de mitigación y medidas de conservación de los recursos naturales. Sin embargo, la alineación de los artículos desarrollados se puede ver en la aclaración de sus objetivos, con (1) el análisis del ciclo de vida de los sistemas naturales de tratamiento de aguas residuales aplicados al tratamiento de efluentes municipales, (2) la discusión de la propuesta de uso de extracto de semilla de Moringa como coagulante en el tratamiento de aguas, (3) la caracterización de las aguas residuales de la fábrica de cerveza de Mozambique y (4) la optimización de los recursos utilizando el análisis de Pareto para una planta desalinizadora de agua de mar. La relevancia del estudio fue realizar una contribución científica para

minimizar las ideologías orientadas al uso de sistemas de depuración natural, en detrimento del uso de tecnologías convencionales que requieren el consumo de mucha electricidad, requisitos rigurosos en el manejo del sistema y la necesidad de cuantificación óptima de insumos a veces de difícil acceso.

El primer artículo con el tema "**Life-Cycle Analysis of Natural Treatment Systems for Wastewater (NTSW) Applied to Municipal Effluents**". La preservación de los recursos naturales es una necesidad actual a la que toda la humanidad está llamada por este motivo. El objetivo principal de este artículo es analizar el ciclo de vida de los sistemas naturales de tratamiento de aguas residuales como base para dar visibilidad a la preservación económica y al valor añadido de la utilización de sistemas no convencionales. El estudio se llevó a cabo en un sistema de tratamiento natural de aguas residuales de la isla de Santiago, en la localidad de Achada Galego, en Cabo Verde, donde el país está adoptando ideas para reutilizar las aguas residuales tratadas en un sistema de tratamiento natural con fines de riego agrícola. Para garantizar la realización del análisis del ciclo de vida del sistema natural de tratamiento de aguas residuales, se emprendieron varias acciones, a saber: a) Análisis del inventario de la fase de construcción, que consiste en evaluar las entradas y salidas asociadas a la construcción del (NTSW), incluidos los materiales, el consumo de energía, el transporte y la generación de residuos. A continuación, se evalúan las fases de mantenimiento y explotación, centrándose en las actividades continuas de mantenimiento y explotación necesarias para la (NTSW), incluido el consumo de energía, el uso de agua, los insumos químicos (si los hubiera), la mano de obra y el mantenimiento de los equipos. (b) Por último, se evalúan los impactos de la (NTSW) en términos de los impactos ambientales, sociales y económicos generados por la (NTSW). Los resultados muestran que el impacto de la instalación no es excesivamente elevado en comparación con las depuradoras acreditadas en la categoría convencional.

El segundo artículo se titula "**A Comparative analysis of brewery effluents in Africa**". Las aguas residuales producidas por la industria cervecera presentan características complejas, lo que plantea importantes retos a los ingenieros medioambientales a la hora de buscar métodos eficaces para su tratamiento y reutilización. El objetivo principal de este estudio es comparar las propiedades fisicoquímicas de las aguas residuales de cervecerías

de Mozambique y Sudáfrica. Esta selección se basa en el importante consumo de agua que conllevan los procesos de fabricación de cerveza, así como en la necesidad crítica de adoptar prácticas adecuadas de gestión de efluentes. Para esta investigación se recogieron muestras y se analizaron sus parámetros físicos y químicos. Los resultados fueron comparados con datos de cervecerías de otros países de la región, con la legislación vigente en Mozambique y con valores reportados en diversos estudios encontrados en la literatura. El efluente presenta un perfil ácido variable con una ligera tendencia a la acidez, como indican sus valores de pH. Esta débil característica ácida de las aguas residuales de la cervecería mozambiqueña puede atribuirse a la utilización de ácidos fuertes y moderados, como el ácido nítrico y el ácido fosfórico, durante los procesos de limpieza e higienización, que luego son neutralizados por el vertido de una base fuerte (sosa cáustica) utilizada durante el proceso de llenado. En conclusión, la DQO analizada en Mozambique se sitúa en el mismo rango que las referencias, aunque ligeramente por debajo. Del mismo modo, la DBO se encuentra dentro del mismo rango que otros estudios. La turbidez, aunque inferior a la de otras referencias, se mantiene dentro de un rango aceptable. Los niveles de fosfato y nitrógeno también se encuentran dentro del rango esperado para las aguas residuales de cervecería.

El tercer artículo describe acerca de "**Caracterización de las aguas residuales de la cervecería mozambiqueña: comparación de las características con los efluentes de cervecerías de otros países**". El principal objetivo del estudio era caracterizar las aguas residuales de la fábrica de cerveza mozambiqueña con el fin de obtener conocimientos sólidos sobre su composición y su capacidad para responder a las exigencias de tratamiento de las aguas analizadas. Para llevar a cabo los análisis, se realizaron visitas periódicas a una determinada fábrica de cerveza mozambiqueña con el fin de identificar las principales fuentes de producción de aguas residuales y tomar muestras. Los diferentes parámetros se analizaron en el Laboratorio de Aguas de la Universidad Zambezi, en la Facultad de Ciencia y Tecnología, situada en la ciudad de Beira, en Mozambique. Los parámetros definidos para el análisis se basaron en las normas internacionales y nacionales relativas a los principales parámetros que deben controlarse para evitar la contaminación del medio ambiente. Los resultados obtenidos en este estudio muestran que la DQO de las aguas

residuales de la cervecera mozambiqueña está en el mismo rango y con una ligera tendencia por debajo de los valores de los resultados de otros países, la DBO con una tendencia de igualdad en el rango de los otros análisis referenciados, la turbidez inferior a otras referencias, pero aún dentro del rango y el fósforo y el nitrógeno también están en el rango de las aguas residuales de la industria cervecera.

Artículo cuarto sobre **“Extracto de semillas de moringa oleífera como coagulante en el tratamiento del agua potable”** donde el objetivo principal demuestra la importancia de utilizar extracto de Moringa oleífera como coagulante en el proceso de tratamiento de agua potable. Cabe señalar que para llevarlo a cabo se pudo utilizar estudios realizados en un laboratorio de aguas de Mozambique, a partir de los cuales fue posible definir los principales parámetros que se analizaron en el agua antes y después del uso del extracto de la semilla de Moringa Oleífera como coagulante. En términos de resultados, su evaluación de eficiencia fue posible mediante la comparación de los valores obtenidos con el tratamiento de agua utilizando sulfato de aluminio como coagulante. Vale la pena señalar que se recomienda el uso del extracto debido a su eficacia en la eliminación, así como por cuestiones ambientales.

Quinto artículo sobre **"Proposal for the use of moringa oleifera seed extract as a coagulant in the treatment of drinking water"**. El objetivo principal de este artículo es contribuir a una técnica menos exigente y de fácil aplicación en el tratamiento del agua, independientemente de sus características y origen. Para llevar a cabo el estudio fue necesario tomar muestras en diferentes momentos de un depósito receptor de agua bruta a tratar en la ETA de la empresa distribuidora de agua potable (AdRC - Água da região do centro, SA) de la ciudad de Beira y del distrito de Donde en Mozambique, donde las muestras tomadas fueron analizadas en el laboratorio analítico de la misma empresa (AdRC), centrándose en los parámetros recomendados en las normas internacionales y nacionales relativas a los principales parámetros mínimos necesarios para la potabilidad del agua. Los resultados muestran que el uso del extracto de semillas de Moringa oleífera como coagulante en el tratamiento del agua es eficaz, cumpliendo los requisitos normalizados para los parámetros. Sin embargo, hay que señalar que es necesaria una

preparación optimizada para obtener la mejor eficacia, desde la limpieza y molienda de las semillas hasta la concentración del biocoagulante.

El sexto artículo se titula **“Resources optimization using Pareto analysis for sea water desalination plants”**. El artículo al que se hace referencia en este párrafo contribuye a la utilización de los recursos de forma optimizada, tratando de alcanzar el objetivo de la excelencia. Cada día surgen muchas tecnologías en diversos ámbitos de actividad, pero siempre con vistas a racionalizar el uso de los recursos para lograr una mayor productividad. Este estudio examina el potencial de aplicar un enfoque sistemático al pilotaje de plantas desalinizadoras, con el objetivo de evaluar las mejoras energéticas en los procesos de desalinización de agua. Las tecnologías empleadas en el proceso de desalinización del agua de mar han supuesto una tarea exigente en muchos aspectos, y la adopción de medidas que puedan contribuir a obtener el producto final a un coste menor es lo que desearía una comunidad. En un universo de 180 desaladoras repartidas por las Islas Canarias, fue posible utilizar la herramienta de análisis de Pareto para describir las principales contribuciones de cada recurso al coste total de una planta de todo el proceso de desalación de agua de mar. Utilizando el gráfico del análisis de Pareto, quedó claro en términos porcentuales el impacto que aporta cada recurso, por lo que es fácil corregir la etapa o el recurso que más impacto tiene en el coste total.

3 Investigación Bibliográfica

3.1 Introducción

3.1.1 Agua

El agua es un recurso fundamental para la vida, desde que el planeta fue concebido, ha jugado un papel directo en la evolución de todas las especies, convirtiéndose en el principal producto utilizado y consumido por la humanidad, por lo que genera en la salud, la alimentación y su respectivo uso en las industrias y su distribución. Encontrándose en diferentes estados y formas, cada uno cumpliendo una función específica para el desarrollo del Planeta Tierra, cerca del 97,5% de todo el acuífero existente se caracteriza por ser salado y, por lo tanto, no apto para el consumo humano directo ni para la irrigación agrícola. Del 2,5% restante, la mayor parte se elimina en los glaciares, lo que dificulta su terminación [19], [20].

3.1.1.1 Aguas residuales

El agua es un recurso natural importante, por lo que debe preservarse. Como reserva importante para la flora y la fauna predominantes, es necesario evitar su contaminación mediante contaminantes orgánicos e inorgánicos [21]. El agua es un recurso muy importante para el desarrollo humano. Se calcula que en 2030 podría haber una escasez del 40% de los recursos hídricos. Por lo tanto, el tratamiento sostenible de las aguas residuales y la reutilización del agua representan un importante reto mundial [22]. Las aguas residuales son los efluentes líquidos (aguas residuales) resultantes del uso de diversos procesos o producidos por actividades humanas, que deben recogerse para su tratamiento adecuado en una planta de tratamiento de aguas residuales antes de ser reutilizadas y/o devueltas al medio ambiente [23], [24]. En función de su origen, existen dos tipos de aguas residuales: domésticas e industriales [25], [26], [27].

Las aguas residuales domésticas son generalmente el resultado de la actividad residencial y pueden ser fecales o negras y con espuma. Dentro de esta clase también podemos considerar: Las aguas residuales turísticas, que tienen características estacionales y pueden tener una carga contaminante menor o mayor según procedan de establecimientos hoteleros aislados o de grandes complejos turísticos. Las aguas pluviales, que proceden de precipitaciones atmosféricas en las que su carga contaminante en sólidos en suspensión puede ser muy superior a la de las aguas residuales domésticas. También pueden considerarse las aguas residuales industriales, que pueden verterse a los desagües municipales y son el resultado de actividades industriales y sus características dependen del tipo y proceso de producción, es decir, también pueden definirse como una corriente que contiene contaminantes disueltos o en suspensión, tanto de naturaleza orgánica como inorgánica. Por último, también hay que considerar las resultantes de la mezcla de aguas residuales domésticas con aguas industriales y/o pluviales: las aguas residuales urbanas.

Las aguas residuales industriales constituyen una presión medioambiental, aunque en algunos casos estas aguas son recogidas por un sistema de alcantarillado local, tratadas en una estación depuradora de aguas residuales urbanas (EDAR) y posteriormente vertidas al medio ambiente. Sin embargo, también hay casos en los que estas aguas se vierten directamente a una masa de agua, normalmente tras su tratamiento en la planta industrial donde se genera el efluente. Existe una amplia y diversa gama de actividades económicas que afectan a la producción de aguas residuales [28]. La reutilización del agua mediante el reciclado de aguas residuales industriales ha despertado el interés de la comunidad científica en las últimas décadas. El reciclado de las aguas residuales resulta muy ventajoso en las actividades agrícolas porque contienen una gran cantidad de nutrientes, por lo que su tratamiento seguido de una aplicación agrícola debe llevarse a cabo con gran precaución para garantizar que sea respetuoso con el medio ambiente, económico y que aumente la producción agrícola. El reto que plantea el tratamiento de las aguas residuales es mucho mayor de lo que parece. Hay dos fuentes principales de contaminantes en las aguas residuales: (i) la natural, que incluye, entre otras, la actividad volcánica, la erosión del suelo y la meteorización de las rocas, y (ii) la dispersión de contaminantes minerales a través de actividades antropogénicas, vertederos, escorrentías urbanas, minería,

fabricación de circuitos impresos, actividades agrícolas, tratamiento de superficies metálicas y galvanoplastia, quema de combustibles, tintes textiles, fabricación de semiconductores, etc [21].

3.1.1.2 Aguas residuales de cervecería

La composición del flujo de efluentes de la planta de tratamiento de aguas residuales de las fábricas de cerveza fluctúa significativamente debido a las actividades internas de la fábrica (por ejemplo, el lavado de la cebada malteada, rica en hidratos de carbono, las calderas de fermentación, los tanques de fermentación de la levadura, así como otras unidades de procesamiento de la cerveza) y a los productos químicos utilizados [29]. El efluente presenta un nivel de acidez variado con una tendencia débil en referencia a los valores de pH. La débil variación de la acidez característica de las aguas residuales de cervecería procede de la utilización de ácidos fuertes y moderados (ácido nítrico y ácido fosfórico) en el proceso de limpieza e higienización, y se ve amortiguada por el drenaje de una base fuerte (sosa cáustica) utilizada en el proceso de llenado. En cuanto al parámetro de alcalinidad, cabe destacar que representa la capacidad cuantitativa del ácido para ser absorbido sin alterar el pH. Según los datos de la muestra para este parámetro, tiene una gran capacidad de amortiguación y se ve menos afectada cuando se añade ácido. Por otra parte, resiste los cambios de pH cuando se añade una pequeña cantidad de ácido o base fuerte. En relación con la conductividad, tiene un menor contenido de sales disueltas, aunque éste es directamente proporcional a su conductividad. En cuanto a los sólidos disueltos, los valores obtenidos indican un nivel elevado. Las aguas residuales tienen una elevada concentración de Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO) debido a la presencia de carbohidratos y proteínas utilizados en la producción de cerveza [11].

3.1.1.3 Sistemas de tratamiento de aguas residuales

Los sistemas de tratamiento de aguas residuales pueden dividirse en dos grupos: Sistemas intensivos o convencionales - Son sistemas que consumen mucha energía para su funcionamiento (equipos electromecánicos) y utilizan pequeñas superficies de terreno por habitante equivalente (por ejemplo, lodos activados y lechos de percolación). Sistemas extensivos o naturales - Se basan en procesos naturales, con escaso o nulo consumo

energético, y ocupan mayores superficies de terreno por habitante equivalente (por ejemplo, lagunas de estabilización, humedales construidos y sistemas de tratamiento de suelos) [12], [30]

3.1.1.3.1 Sistemas de tratamiento convencionales

Según diversos autores, los principales sistemas convencionales de tratamiento de aguas residuales son:

3.1.1.3.2 Decantación

El proceso de decantación es la operación de separación de partículas sólidas en suspensión con una densidad superior a la del líquido circundante, cuyo objetivo es separar los sólidos sedimentables y el material flotante, reduciendo así los sólidos en suspensión en el agua y la DBO₅ asociada a estos sólidos [20], [31].

La decantación es uno de los procesos clave utilizados en el tratamiento convencional del agua para eliminar las partículas en suspensión y los flóculos formados durante la coagulación y la floculación. El proceso de decantación tiene lugar en unidades denominadas decantadores, diseñadas para favorecer la separación de las partículas sedimentables del agua [31].

El proceso de sedimentación es una de las etapas de clarificación y debe aplicarse en función de las características de cada efluente y del proceso de tratamiento. Los decantadores pueden tener diversas formas, tanto circulares como rectangulares. En términos de eficiencia, en buenas condiciones este proceso debería ser capaz de eliminar entre el 50 y el 70% de los sólidos en suspensión y entre el 25 y el 40% de la DBO₅ [32], [33].

3.1.1.3.2.1 Filtración

Es el proceso de depuración en el que una mezcla sólido-líquido pasa a través de un medio poroso (filtro), que retiene los sólidos en suspensión según la capacidad del filtro y deja pasar la fase líquida.

La filtración, normalmente relacionada con el tratamiento del agua, consiste en eliminar los sólidos en suspensión de un líquido haciéndolo pasar a través de un lecho filtrante (normalmente formado por un medio filtrante compresible o granular) a presión atmosférica o a alta presión. La elección del lecho dependerá de los objetivos de la filtración, pudiendo variar la granulometría, la composición del lecho (por ejemplo, arena, antracita, etc.) y el número de capas [31], [32]. La filtración por membrana es actualmente el proceso más desarrollado para aplicaciones en efluentes industriales [19], [33].

3.1.1.3.2.2 Coagulación/Floculación

La coagulación es un proceso fundamental en el tratamiento convencional del agua. Consiste en la adición de sustancias químicas denominadas coagulantes para promover la formación de flóculos a partir de las partículas en suspensión presentes en el agua. El objetivo de la coagulación es desestabilizar las partículas para la posterior formación de partículas más grandes o flóculos. Las partículas por desestabilizar se conocen como coloides y son tan pequeñas (entre 0,01 y 1 μm) que es poco probable que se fusionen o sedimenten en el fondo del tanque. Por eso hay que recurrir a procesos químicos como la coagulación. Esta técnica funciona añadiendo un coagulante que desestabilizará la superficie cargada negativamente de la partícula, facilitando la formación de flóculos. Ejemplos de estos compuestos son el sulfato de aluminio, el sulfato férrico, los polímeros orgánicos naturales y sintéticos y las sales metálicas prehidrolizadas. Se requiere algún tipo de mezcla rápida para facilitar el contacto entre el coagulante y las partículas e iniciar la formación de flóculos [19], [31], [32].

El mecanismo de floculación es el proceso por el cual las partículas suspendidas en el agua se aglutinan para formar flóculos más grandes y pesados, facilitando así la eliminación de estas partículas en las siguientes etapas del tratamiento convencional del agua (decantación y filtración) [32].

La formación de agregados o flóculos no siempre se produce con la suficiente rapidez, por lo que se recurre a la floculación. A menudo se utilizan polielectrolitos para facilitar esta operación, con el fin de mejorar el funcionamiento de los filtros que suelen encontrarse aguas abajo para eliminar los flóculos formados. La adición de productos químicos se ve

favorecida por una agitación lenta del agua para promover la colisión entre partículas sin destruir los flóculos ya formados [31].

3.1.1.3.2.3 Tratamiento biológico

En el tratamiento biológico de efluentes, el objetivo es oxidar la materia orgánica y eliminar los sólidos coloidales no ajustables y estabilizar la materia orgánica. En el caso de los efluentes industriales, el objetivo es eliminar o reducir la concentración de compuestos orgánicos e inorgánicos, ya que muchos de estos compuestos son tóxicos para los microorganismos [34].

Los principales tipos de sistemas de tratamiento biológico son la biomasa en suspensión, la biomasa fija y los híbridos (por ejemplo, lecho percolador/lodos activados, biofiltros activados, etc.). En el caso de la biomasa suspendida, los microorganismos responsables del tratamiento se suspenden en el líquido, utilizando métodos de mezcla adecuados. La mayoría de los procesos de este tipo utilizados para el tratamiento de aguas residuales domésticas e industriales operan en modo aeróbico, sin embargo, por ejemplo, cuando las concentraciones de materia orgánica son muy altas, el efluente tiene una temperatura elevada o cuando el objetivo es la eliminación biológica de fósforo, se pueden utilizar condiciones anaeróbicas [32], [34]

El proceso de biomasa en suspensión más común en el tratamiento de aguas residuales son los lodos activados. Este proceso consiste en un tanque de aireación donde la materia orgánica es oxidada por la masa activada de microorganismos, con agitación y transferencia de oxígeno proporcionadas por equipos mecánicos. La lista de procesos de biomasa fija no termina con los lechos percoladores; también existen discos biológicos y biofiltros, por ejemplo, que son alternativas más compactas y versátiles. En cuanto a las aplicaciones, los procesos biológicos se suelen utilizar más para tratar aguas residuales domésticas o urbanas, pero también se pueden utilizar para tratar aguas residuales industriales. En estos casos, si la concentración de compuestos orgánicos es muy elevada o si son refractarios, será necesario adaptar los procesos, introducir pretratamientos o incluso sustituirlos por otras técnicas [19], [31].

3.1.1.3.3 Sistemas de tratamiento no convencionales

Los estanques de estabilización son una técnica que se utiliza en todo el mundo desde hace 50 años, en poblaciones que van desde cientos de personas a un millón, y en climas diferentes. Son una técnica adecuada para los países en desarrollo porque requieren una cantidad considerable de terreno (que es más asequible en los países más pobres), no necesitan prácticamente electricidad y no requieren equipos electromecánicos sofisticados. Hay que tener en cuenta que el efluente final tratado es rico en fósforo y nitrógeno, y en periodos estivales arrastra grandes concentraciones de algas. Se pueden adoptar instalaciones a la salida de la laguna para eliminar parcialmente las algas del efluente final [12], [35].

Estos sistemas son, por definición, un proceso natural de tratamiento de aguas residuales llevado a cabo por bacterias (anaerobias/aerobias) y algas. El rendimiento de estas lagunas depende de muchos factores y es muy difícil derivar un modelo que tenga en cuenta todos los parámetros que intervienen en la predicción de su rendimiento. Por lo tanto, estos modelos sólo deben utilizarse a título orientativo. Modificaciones en el diseño físico de una laguna, como dimensiones, profundidad, recirculación, eliminación de algas del efluente, entre otras, pueden mejorar la calidad del efluente [36].

Según [13], [15], [37] diferentes tipos de balsas de

- Lagunas anaeróbicas: profundidad media de 2,5-5 metros, tiempo de retención hidráulica (TRH) de 20-50 días. En la laguna predominan los procesos de descomposición anaeróbica. Se caracteriza por la ausencia de oxígeno (libre o combinado). Se utilizan para tratar aguas residuales con alta carga orgánica y alta concentración de sólidos en suspensión. Problema: malos olores.
- Estanques facultativos: son los estanques típicos. Tienen una profundidad media de 1,2-2,5 metros. Tienen una fase aeróbica en la parte superior y una fase anaeróbica en el fondo. TRH de 25-180 días. Los procesos de descomposición aeróbica predominan en la superficie y los anaeróbicos en el fondo. La zona de separación entre ambas se caracteriza por procesos anóxicos (biodegradación en presencia únicamente de oxígeno combinado).

Las eliminaciones conseguidas por este sistema son: DBO₅ (80 % a 90 %); Nitrógeno Orgánico (75 % a 95 %); Nitrógeno Amoniacal (51 % a 82 %); Fósforo (32 % a 98

%); Coliformes Fecales (99,9 %) (Monte en Seminario 279, 1981). Problema: altas concentraciones de microalgas en el efluente tratado, posible necesidad de postratamiento.

- Lagunas aeróbicas: También conocidas como lagunas de oxidación (3-5 d TRH) o de maduración (5-20 d TRH). Poco profundas (0,3-0,5 metros). Predominan los procesos de descomposición aeróbica de la laguna. Se caracterizan por tener oxígeno disuelto en toda la masa líquida. Las eliminaciones conseguidas por este sistema son: DBO₅ (80 % a 95 %).

3.1.1.3.3.1 Sistemas de tratamiento del suelo

Según [38], en los sistemas de escorrentía en el suelo, las aguas residuales se aplican en la parte superior de una pendiente inclinada que permite que el líquido fluya por toda la superficie con vegetación y luego se recoja en depresiones en los valles, como se muestra en la Figura 1. Este tipo de tratamientos suelen utilizarse aguas abajo de los pretratamientos, ya que estos últimos ayudan a retrasar la colmatación del suelo (reduciendo el funcionamiento y el mantenimiento del sistema) y a controlar las cargas orgánicas que entran en el sistema. Los inconvenientes de estos sistemas son la necesidad de proteger las aguas subterráneas, si existen. Su aplicación requiere estudios previos adecuados [17].

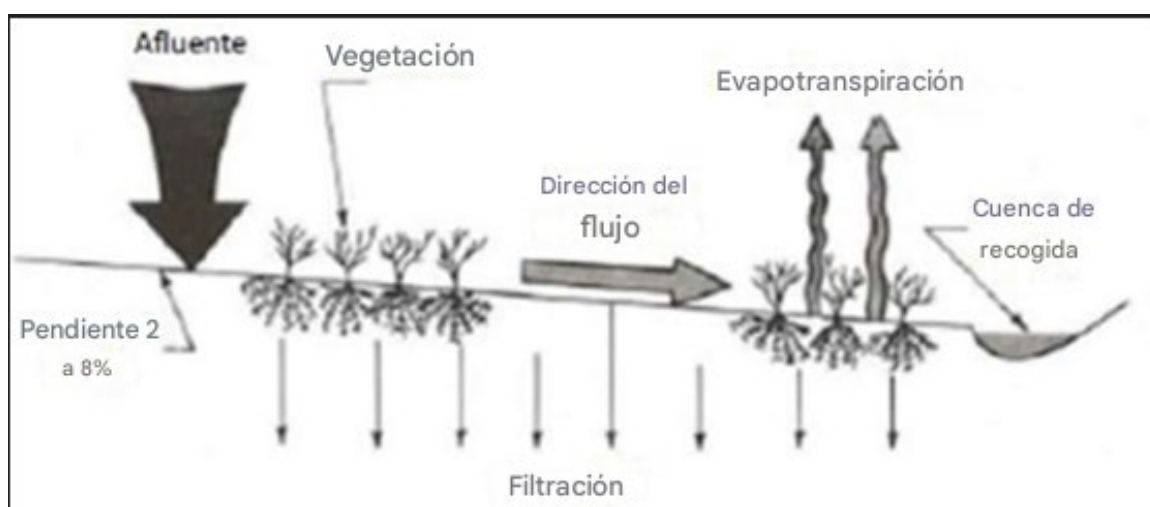


Figura 1- Representación esquemática del sistema de escorrentía del suelo (adaptado de Borges, 2014).

La introducción de aguas residuales en el suelo no sólo satisface las necesidades de las plantas en términos de mayor disponibilidad de agua y nutrientes, sino que también conduce a la recarga de las aguas subterráneas y/o a la evapotranspiración. Esta agua puede aplicarse al suelo mediante inundación periódica, pulverización, goteo y otras técnicas [17], [39]. Estos sistemas se dividen en tres tipos:

3.1.1.3.4 Sistemas de infiltración lenta en el suelo

Este método consiste en aplicar aguas residuales a una zona con vegetación con el fin de proporcionar agua y nutrientes para el crecimiento de las plantas.

Como puede verse en la figura 2, parte del efluente se evapora y parte se infiltra, siendo la mayor parte absorbida por las plantas. Esta técnica se aplica a suelos con alta permeabilidad y puede producirse mediante grietas, pulverización o inundación.

Aunque los sistemas de infiltración lenta en el suelo son los más caros de implantar de los sistemas naturales, su ventaja es su impacto positivo en las prácticas de desarrollo sostenible. Además de tratar las aguas residuales, también proporcionan un retorno económico por la reutilización de esta agua y nutrientes, principalmente en la posibilidad de producir y comercializar productos agrícolas y aplicarlo a proyectos de reforestación en zonas con estrés hídrico. En estos sistemas, el efluente se introduce a un ritmo controlado

y se trata a su paso por el suelo mediante filtración, adsorción, intercambio iónico, precipitación, acción microbiana y adsorción por las plantas. La vegetación es un componente crítico en estos sistemas, ya que sirve para extraer nutrientes, reducir la erosión y mantener la permeabilidad del suelo.

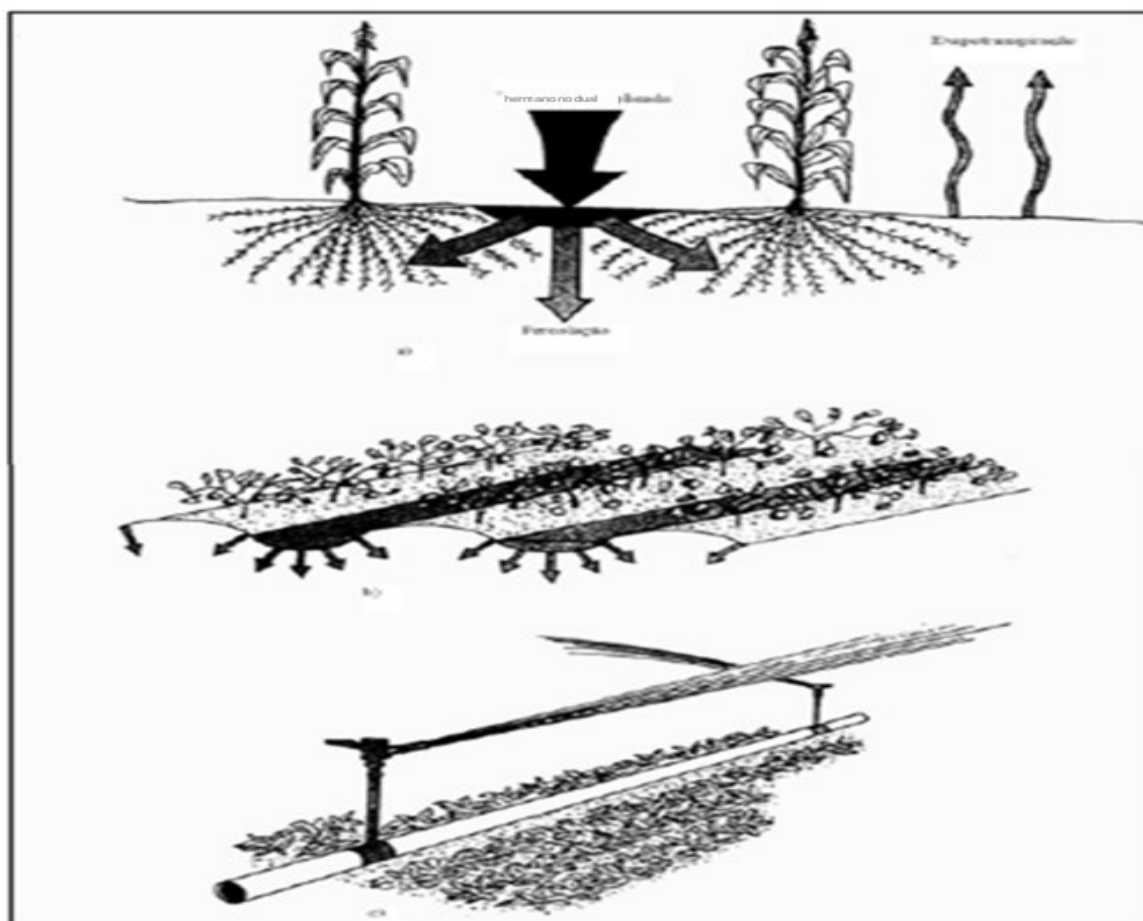


Figura 2- Procesos de aplicación de aguas residuales por el sistema de infiltración lenta en el suelo: a) por escorrentía hidráulica, b) por distribución superficial y c) distribución por aspersores. Adaptado: (Qasim, 1999)

3.1.1.3.4.1 Sistemas de infiltración rápida del suelo

De los tres sistemas de tratamiento de aguas residuales, el sistema de infiltración rápida en el suelo es el que tiene capacidad para tratar el mayor volumen de efluente en la menor superficie.

En esta técnica, las aguas residuales se introducen en cuencas poco profundas construidas en depósitos de suelo profundo y permeable. Esta aplicación puede tener lugar por inundación o aspersión (Figura 3). El tratamiento puede tener lugar por filtración, adsorción, intercambio iónico, precipitación y acción microbiana a medida que el efluente se desplaza por la matriz del suelo, y no se utiliza vegetación. El fósforo y la mayoría de los metales quedan retenidos en el suelo, mientras que los componentes orgánicos tóxicos son adsorbidos o degradados. A medida que las aguas residuales se infiltran en el suelo, pueden dirigirse a las aguas subterráneas o a los acuíferos subterráneos.

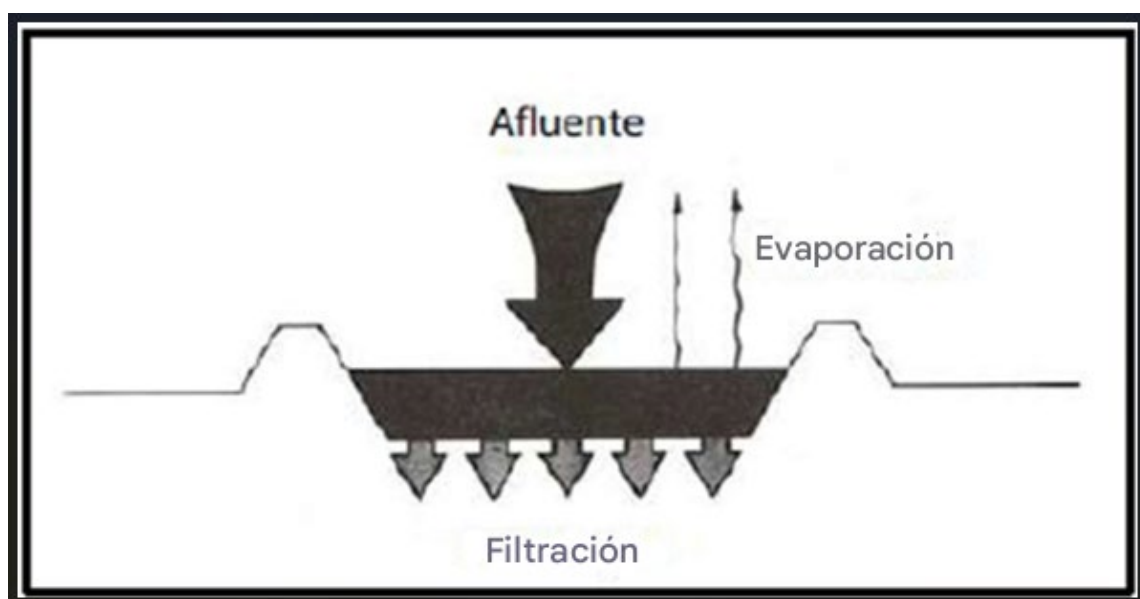


Figura 3- Representación esquemática de la técnica de infiltración rápida del suelo
(Ferreira, 2021)

3.1.1.3.4.2 Sistemas de escorrentía del suelo

La figura 4 muestra el funcionamiento simplificado del tratamiento de aguas residuales por escorrentía superficial. Como puede verse, el agua se aplica a caudales superiores a la capacidad de infiltración del suelo en pendiente. A continuación, la escorrentía superficial fluye hacia los canales de recogida situados al final del sistema. A medida que el agua fluye por el suelo, una parte se evapora, otra se infiltra y el , que en suelos de baja permeabilidad corresponde a entre el 50% y el 60% efluente total, llega a las balsas de recogida. Este procedimiento debe implantarse en suelos de baja permeabilidad, como los arcillosos, en terrenos con pendientes moderadas y con presencia de vegetación, ya que aumenta la tasa

de absorción de nutrientes disponibles en el suelo y la pérdida de agua por transpiración. Diversos estudios indican que estos alcanzan tasas de remoción de entre 75% y 90% de nitrógeno (absorbido por las plantas), 50% a de fósforo (adsorbido por arcillas coloidales) y hasta 90% de sólidos suspendidos (removidos por sedimentación y filtración) (Franco et al., 2014).

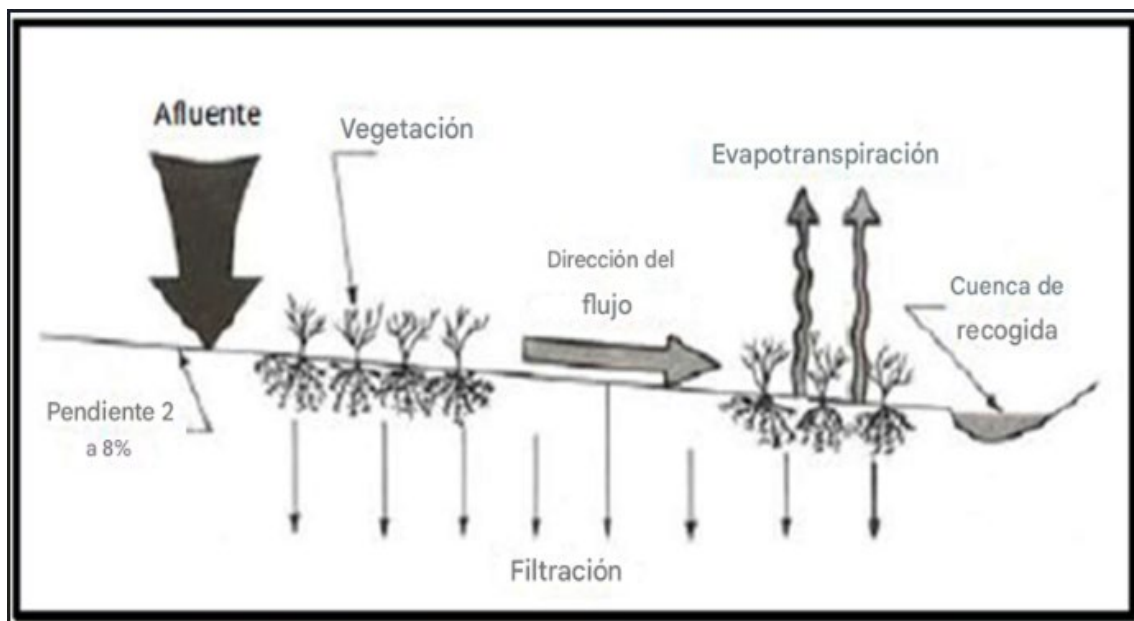


Figura 4- Representación esquemática de la técnica de escurrimiento superficial del suelo (Ferreira, 2021)

Los sistemas pueden clasificarse por:

Tipo de esorrentía: vertical u horizontal; ascendente o descendente; superficial o subsuperficial.

Tipo de sustratos: matriz de recepción líquida y no líquida; basada o no en suelo cohesivo (grava, gravilla, gravilla)

Tipo de plantas utilizadas: plantas acuáticas flotantes o fijas; plantas sumergidas o emergentes

3.1.1.3.4.3 Humedales

El término *humedales* se utiliza para caracterizar diversos ecosistemas naturales que se inundan parcial o totalmente durante el año.

En opinión de los autores [40] [41], estos sistemas tienen importantes funciones dentro de los ecosistemas en los que operan, entre las que destacan las siguientes:

- a) La capacidad de regularizar los flujos de agua, amortiguando los picos de crecida;
- b) La capacidad de modificar y controlar la calidad del agua;
- c) Su importancia como zona de reproducción y alimentación de la fauna acuática, incluidos los peces;
- d) La protección de la biodiversidad como zona de refugio para la fauna terrestre;
- e) Control de la erosión, evitando el encenagamiento de los ríos.

Los humedales pueden clasificarse de distintas formas en función del tipo de planta, de si son naturales o contruidos y de sus objetivos [17], [40], [42].

3.1.1.3.4.3.1 Humedales contruidos o artificiales

Los humedales contruidos o artificiales comprenden diversas estrategias para simular *humedales* naturales, utilizando los principios básicos de modificación de la calidad del agua de los humedales naturales. Desde un punto de vista práctico, estos sistemas artificiales ofrecen mejores oportunidades para el tratamiento de aguas contaminadas que los naturales, ya que se puede maximizar su eficiencia, la reducción de los parámetros DBO y DQO, los procesos de eliminación de nutrientes y el control del sistema hidráulico y la vegetación.

Los humedales artificiales se utilizan para tratar efluentes desde los años sesenta. Con el objetivo de reproducir los mecanismos implicados en diversos procesos naturales, los CW se diseñan de forma selectiva con el fin de obtener condiciones de tratamiento que den como resultado la mejor calidad posible para el efluente final [43]. Existen básicamente dos tipos principales de *humedales* artificiales, clasificados según el nivel de la columna

de agua: de flujo superficial y de flujo subsuperficial, dividiéndose estos últimos en flujos subsuperficiales horizontales y verticales, dependiendo de la dirección del flujo del fluido. Estos tipos de *humedales* se describen a continuación [39].

3.1.1.3.4.3.1.1 Humedales de flujo superficial construido (CWsFS)

Estos humedales construidos tratan de reproducir el comportamiento de los humedales naturales, especialmente de aquellos con flujos superficiales poco profundos. La figura 5 muestra las cuatro características principales de los humedales de este tipo, que pueden tener distintas configuraciones:

- Dispositivo de entrada de efluentes;
- Muelle;
- Plantas;
- Dispositivo de salida de efluentes.

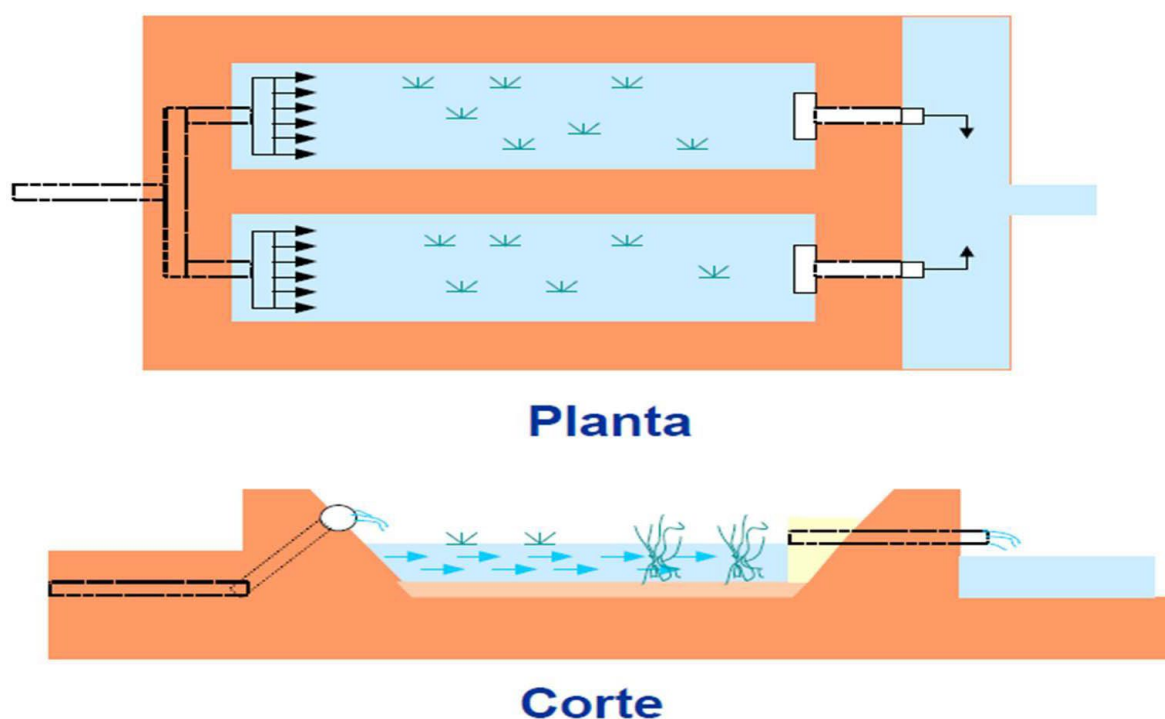


Figura 5: Configuración típica de un humedal construido de flujo superficial (Adaptado de Lautenschlager, 2001)

3.1.1.3.4.3.1.2 Humedales artificiales de flujo subsuperficial

Estos sistemas tratan las aguas residuales haciéndolas pasar a través de medios porosos que contienen raíces de plantas, mediante flujos horizontales o verticales.

Los principales componentes de un humedal construido de flujo subsuperficial son:

- Sistema de entrada;
- Muelle;
- El medio poroso;
- Tipos de plantas;
- Sistema de control de salida de efluentes.

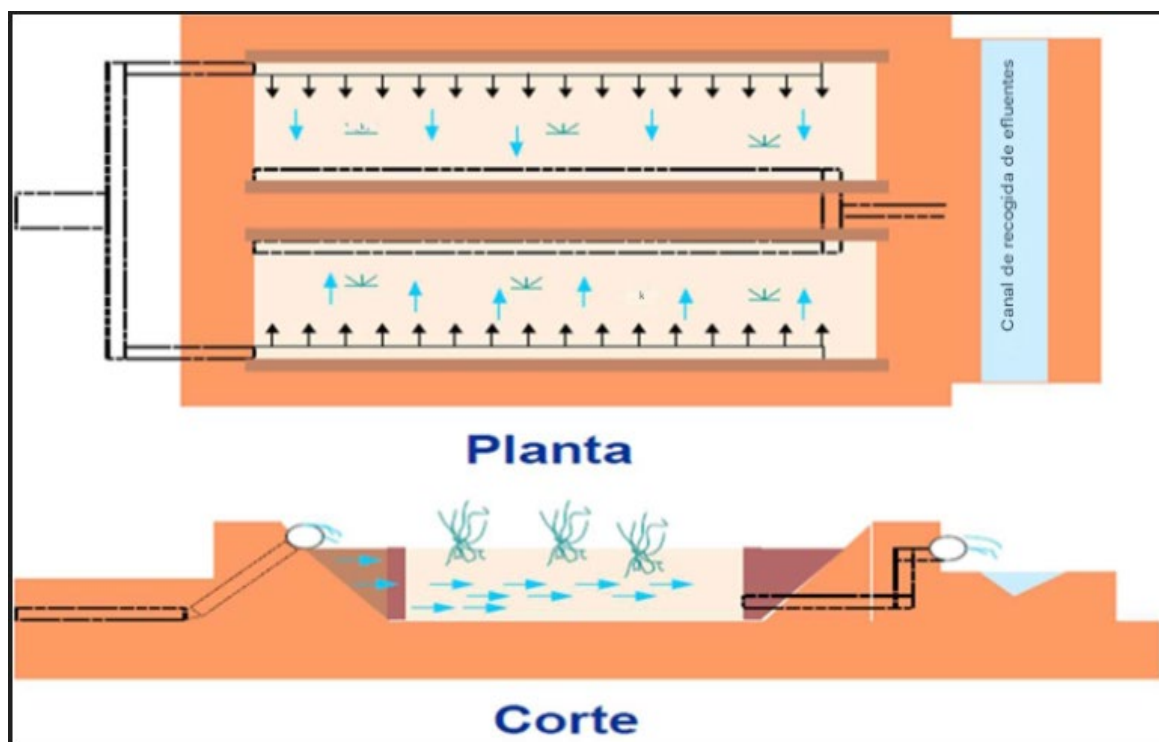


Figura 6: Configuración típica de un humedal construido de flujo subsuperficial (Adaptado de Lautenschlager, 2001)

En términos de flujo, los sistemas de humedales construidos subsuperficiales pueden ser horizontales o verticales, dependiendo de su configuración.

3.1.1.3.4.3.1.2.1 Flujo subsuperficial vertical

Humedales contruidos de flujo vertical subsuperficial (WCFVS) el efluente se desplaza verticalmente desde la capa plantada hacia abajo a través del sustrato. Este sistema es más eficaz porque requiere menos tiempo que un sistema de flujo horizontal. La profundidad de este sistema puede variar de 45 a 100 cm, siendo 70 cm la más recomendada, ya que proporciona los mejores resultados en términos de nitrificación y eliminación de contaminantes orgánicos [44]. La eficiencia de la eliminación de en estos sistemas depende de la capacidad de aireación del suelo y, por tanto, de las propiedades del material de relleno. La figura 6 muestra un lecho de macrófitos de flujo subsuperficial vertical.

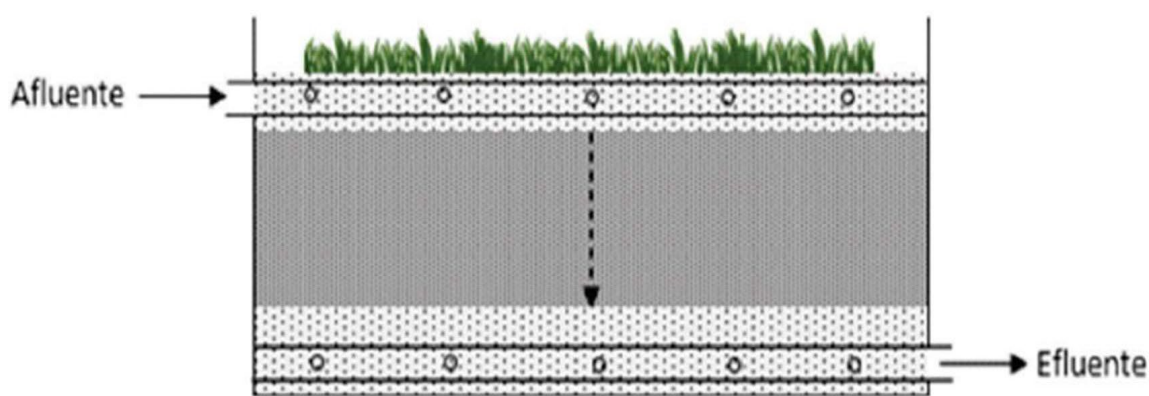


Figura 6- Representación gráfica de un humedal artificial de flujo subsuperficial vertical (Ferreira et al., 2021)

3.1.1.3.4.3.1.2.2 Flujo subterráneo horizontal

El efluente se descarga en un extremo del lecho, recorriendo horizontalmente el medio poroso y la rizosfera. El suelo suele tener una ligera pendiente, lo que favorece el flujo horizontal. Estos sistemas son los más comunes en la mayoría de los países europeos y mediterráneos. Las principales ventajas sobre los sistemas de flujo superficial provienen principalmente de la minimización de las condiciones propicias para la formación de mosquitos y otros vectores de enfermedades, las aguas residuales se mantienen por debajo de la superficie del lecho. Debido a las bajas tasas de transferencia de oxígeno en este caso, son los procesos anaeróbicos los que degradan la materia orgánica. La eliminación de sólidos en suspensión y la reducción de la demanda bioquímica de oxígeno son procesos

interrelacionados en este tipo de sistemas. La figura 7 muestra una representación de un lecho horizontal de macrófitos de flujo subsuperficial [39].

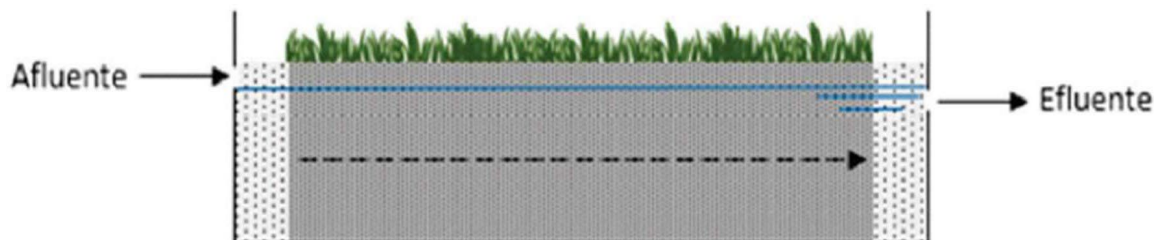


Figura 7- Representación gráfica de un *humedal* artificial de flujo subsuperficial horizontal (Benassi Apud Ferreira, 2021).

3.1.1.3.4.4 Papel de la vegetación en el sistema de

Las plantas desempeñan un papel eficaz en el tratamiento de las aguas residuales porque tienen la capacidad de crear un entorno rico en oxígeno alrededor de sus raíces y rizomas, donde se generan condiciones oxidantes que estimulan la descomposición aeróbica de la materia orgánica y el crecimiento de bacterias nitrificantes.

La vegetación (raíces y rizomas) garantiza una superficie en la que se desarrollan biopelículas que ayudan a filtrar y adsorber los componentes de las aguas residuales.

Además de formar una especie de hábitat para las comunidades microbianas, el sistema radicular de las plantas también desempeña una función drenante en el sustrato, minimizando los efectos de la colmatación.

Remociones alcanzadas por este sistema: DBO (50 % a 90 %); SST (60 % a 70 %); Nitrógeno total (24 % a 95 %); Amoníaco (57 % a 94 %); Fósforo (0 % a 95 %); Patógenos (> 82 %) (Hammer, 1989), (Qasim, 1999), (Ré, 1996), (Relvão, 1999).

3.2 Modelización del sistema natural de depuración de aguas residuales

3.2.1 Concepto

La modelización matemática y computacional es un área científica que hace un uso extensivo de las matemáticas y la computación científica y está orientada a la utilización de métodos matemáticos y computacionales para desarrollar modelos matemáticos en busca de soluciones a problemas actuales en las más diversas áreas del conocimiento [45].

El objetivo principal de la modelización es determinar, a partir de datos previamente conocidos, las variaciones de concentración de una determinada carga contaminante en función del espacio y del tiempo. Esto implica, obviamente, un conocimiento básico del transporte de masas difusivo y convectivo y de la cinética de las reacciones biológicas implicadas en el proceso [46].

Los modelos matemáticos tienen la capacidad de englobar procesos hidrológicos, físicos, químicos y biológicos de forma simplificada y práctica, aunque estos procesos sean complejos. El uso de estos modelos proporciona no sólo la simulación de eventos, sino también la simulación de condiciones futuras y alternativas propuestas para la masa de agua [47], [48].

La historia de la ciencia de la modelización matemática y computacional afirma que el primer modelo de calidad del agua creado, estimado a partir del perfil de oxígeno disuelto, fue el modelo Streeter-Phelps (1925). También se afirma que, a día de hoy, sus fundamentos sirven de base para el desarrollo y mejora de otros modelos más complejos [45], [47], [48]. El régimen hidráulico del curso de agua debe tenerse en cuenta en la estructura de los modelos.

Según VON SPERLING (1996), existen básicamente tres tipos de modelos hidráulicos para una masa de agua: flujo pistón, mezcla completa y flujo disperso. Una masa de agua en régimen ideal de mezcla completa se caracteriza por tener la misma concentración en todos los puntos de la masa líquida, mientras que en el flujo de pistón no hay intercambios entre las secciones aguas abajo y aguas arriba. De hecho, las masas de agua tienen una

característica de dispersión de contaminantes intermedia entre las dos situaciones extremas: dispersión total (mezcla completa) y dispersión nula (flujo de pistón) [46].

Datos de parámetros necesarios para utilizar el modelo de Streeter y Phelps [46], [47], [49]:

- Caudal de la masa de agua, aguas arriba del vertido (Q_r);
- Caudal de aguas residuales (Q_e);
- Oxígeno disuelto en la masa de agua, aguas arriba del vertido (OD_r);
- Oxígeno disuelto en las aguas residuales (OD_e);
- DBO5 en la masa de agua, aguas arriba del vertido (DBO_r);
- DBO5 de las aguas residuales (DBO_e);
- Coeficiente de desoxigenación (K_1);
- Coeficiente de reaeración (K_2);
- Velocidad de desplazamiento de la masa de agua (V);
- Tiempo de viaje (t);
- Concentración de saturación de OD (CS);
- Oxígeno disuelto mínimo admisible (OD_{min}).

En el modelo de Streeter y Phelps, el proceso de descomposición de la materia orgánica en el medio acuático sigue una reacción de primer orden.

$$DBO_t = L_O * e^{-K_1 t} \quad (1)$$

DBO_t – es la cantidad de oxígeno disuelto consumido desde el instante inicial hasta el instante t ;

L_O – es la DBO inmediatamente después del punto de liberación, es decir, la cantidad total de oxígeno necesaria para estabilizar completamente la materia orgánica;

K_t – es la constante de desoxigenación que depende del tipo de efluente;

t – tiempo en días.

3.2.1.1 Ecuación de Streeter y Phelps utilizada para calcular la concentración de oxígeno disuelto (OD):

$$C_t = C_s - \left[\frac{K_1 * L_0}{K_2 - K_1} (e^{-K_1 * t} - e^{-K_2 * t}) + (C_s - C_o) * e^{-K_2 * t} \right] \quad (2)$$

Donde:

C_t – Concentración de oxígeno disuelto en el momento t (mg/l);

C_s – Concentración de saturación de oxígeno (mg/l);

C_o – Concentración inicial de oxígeno tras la mezcla (mg/l);

K_1 – Coeficiente de la tasa de desoxigenación (día^{-1});

K_2 – Coeficiente de la tasa de reaeración (día^{-1});

L_0 – Concentración de un contaminante determinado en la masa receptora tras mezclarse con el vertido (mg/l);

D_t – Déficit inicial de oxígeno disuelto en el punto de mezcla (mg/l).

K_1) A la hora de determinar el valor del coeficiente de la tasa de desoxigenación, es importante comprobar determinados parámetros en relación con el tipo de materia orgánica, el grado de tratamiento, la temperatura y la presencia de sustancias inhibidoras [41], [50], [51].

Tabla 1 (20°C): Representación de los valores genéricos del coeficiente de la tasa de desoxigenación para varios tipos de efluentes (VON SPERLING, 1996 y Apud (DA SILVA et al 2010).

ORIGEN	$K_1(d^{-1})$
Aguas residuales	0,35 - 0,45
Agua de reflujo de baja concentración	0,30 - 0,40
Efluente	0,30 - 0,40
Efluente	0,12 - 0,24
Efluentes	0,10 - 0,20
Ríos de agua	0,09 - 0,21
Agua para abastecimiento	< 0,12

Existen algunas fórmulas matemáticas y estadísticas que pueden utilizarse para obtener el valor del coeficiente de desoxigenación, para lo que sólo se necesitan muestras del agua que se va a analizar. Hay que destacar que este valor tiene una fuerte dependencia de la temperatura, ya que influye en el metabolismo microbiano. La relación empírica entre la temperatura y el coeficiente de desoxigenación puede expresarse de la siguiente manera:

$$K_1 = K_1 * \theta^{(T-20)} \quad (3)$$

En el que;

K_{1T} – K_1 (d^{-1}) a cualquier temperatura T ;

K_{120} – K_1 a una temperatura T=20°C (d^{-1});

T – temperatura del líquido (°C);

θ – Coeficiente de temperatura (admisión).

Según (VON SPERLING, 1996) se suele utilizar el valor de 1,047 para el coeficiente de temperatura (θ).

El valor del coeficiente de reaeración (K_2) de una masa de agua puede determinarse mediante métodos estadísticos. Los datos de entrada son el oxígeno disuelto (OD) en distintos momentos (t). La selección del valor del coeficiente K_2 influye más en los resultados del balance de oxígeno disuelto que el coeficiente K_1 , ya que los márgenes de variación de este último son más estrechos.

Tabla 2 (20°C): Valores típicos de K_2 (FAIR et al, 1973, ARCEIVELA, 1981 Apud DA SILVA et al 2010).

CUERPO DE AGUA	$K_2(d^{-1})$	
	PROFUNDO	RASO
Pequeños estanques	0,12	0,23
Ríos imprecisos, grandes lagunas	0,23	0,37
Ríos grandes con poca velocidad	0,37	0,46
Grandes ríos a velocidad normal	0,46	0,69
Ríos	0,69	1,15

Rápidos	➤ 1,15	➤ 1,61
---------	--------	--------

Tabla 3 (20°C): Valores del coeficiente K₂ según los modelos basados en datos hidráulicos (COVAR, citado por DA SILVA et al 2010).

INVESTIGADOR	FÓRMULA	CAMPO DE APLICACIÓN
O'Connor y Dobbins (1958)	$3,73 \cdot V^{0,5} H^{-1,5}$	$0,6 \text{ m} \leq H < 4,0 \text{ m}$ $0,05 \text{ m/s} \leq V < 0,8 \text{ m/s}$
Churchill et al (1962)	$5,0 \cdot V^{0,97} H^{-1,67}$	$0,6 \text{ m} \leq H < 4,0 \text{ m}$ $0,8 \text{ m/s} \leq V < 1,5 \text{ m/s}$
Owen et al (Apud Branco, 1976)	$5,3 \cdot V^{0,67} H^{-1,85}$	$0,1 \text{ m} \leq H < 0,6 \text{ m}$ $0,05 \text{ m/s} \leq V < 1,5 \text{ m/s}$

Leyenda:

V - velocidad del flujo de agua (m/s);

H - altura de la lámina de agua (m).

La temperatura influye en la oxigenación de la masa de agua de dos maneras: reduce la concentración de saturación del agua y acelera el proceso de absorción de oxígeno. En general, se observa que el agua previamente desoxigenada absorbe menos oxígeno de la atmósfera a medida que aumenta la temperatura, si todas las demás condiciones permanecen constantes (Nunes, 2008 Apud Santos et al 2010). Los niveles de oxígeno disuelto que deben mantenerse en las masas de agua están estipulados por la legislación. Los valores varían en función de la clase en la que se clasifique la masa de agua (VON SPERLING, 1996 Apud Santos et al 2010).

Referencias

- [1] D. Santos Dep Eng Civ EST and Ua. Cláudio Brito, “Tratamento De Efluentes Por Processos Naturais.”Projecto de investigação aplicada em construção, Escola superior dde tecnologia da universidade do Algarve, 2000.
- [2] T. Kornilłowicz-Kowalska, J. Bohacz, K. Rybczyńska-Tkaczyk, and K. Józwiakowski, “Evaluation of the Richness, Species Diversity, and Biosafety of Saprotrophic Fungal Communities in Constructed Wetlands and Biological Wastewater Ponds,” *Water (Switzerland)*, vol. 15, no. 1, Jan. 2023, doi: 10.3390/w15010031.
- [3] S. R. Wilkinson, M. A. Naeth, and A. Dhar, “Potential of Macrophytes for Wastewater Remediation with Constructed Floating Wetlands in Cold Climates,” *Water (Switzerland)*, vol. 15, no. 13, Jul. 2023, doi: 10.3390/w15132479.
- [4] S. Chen, W. Arnold, N. Wright, K. Zhu, O. Ajayi, and P. Novak, “Encapsulation technology for decentralized brewery wastewater treatment: A small pilot experiment,” *Bioresour Technol*, vol. 347, Mar. 2022, doi: 10.1016/j.biortech.2021.126435.
- [5] Y. Ding, F. H. Tunio, and A. A. Nabi, “Harmonizing the complexities of financial development and fiscal decentralization in highly populated nations for monitoring environmental quality,” *Heliyon*, vol. 10, no. 21, p. e39691, Nov. 2024, doi: 10.1016/j.heliyon.2024.e39691.
- [6] A. Das, “Surface water potential zones delineation and spatiotemporal variation characteristics of water pollution and the cause of pollution formation in Brahmani River Basin, Odisha,” *HydroResearch*, vol. 8, pp. 99–112, Jan. 2025, doi: 10.1016/j.hydres.2024.10.002.
- [7] H. Wu and Z. Yang, “Effects of Drought Stress and Postdrought Rewatering on Winter Wheat: A Meta-Analysis,” *Agronomy*, vol. 14, no. 2, p. 298, Jan. 2024, doi: 10.3390/agronomy14020298.
- [8] Y. Zheng *et al.*, “A feasible method for the composition analysis and chemical remediation of clogging matter in subsurface flow constructed wetland,” *Water Cycle*, Mar. 2024, doi: 10.1016/j.watcyc.2024.03.003.
- [9] M. Herminia Ferreira, “Principais Modelos Matemáticos De Qualidade Da Água E Suas Aplicações: Uma Revisão Main Mathematical Models Of Water Quality And Its Applications: A Review”.
- [10] K. P. Shabangu, B. F. Bakare, and J. K. Bwapwa, “The Treatment Effect of Chemical Coagulation Process in South African Brewery Wastewater: Comparison of Polyamine and Aluminum-Chlorohydrate coagulants,” *Water (Switzerland)*, vol. 14, no. 16, Aug. 2022, doi: 10.3390/w14162495.
- [11] F. Leon Zerpa, N. P. Chirinza, P. V. Muguirima, And C. Mendieta Pino, “Characterisation Of Wastewater From The Mozambican Brewery: Characteristic

- Comparison With Brewery Effluents From Other Countries,” *Dyna Energia Y Sostenibilidad*, vol. 13, no. 1, p. [8P.]-[8P.], Sep. 2024, doi: 10.52152/DES11189.
- [12] C. A. Mendieta-Pino, S. O. Pérez-Báez, A. Ramos-Martín, F. León-Zerpa, and S. Brito-Espino, “Natural treatment system for wastewater (NTSW) in a livestock farm, with five years of pilot plant management and monitoring,” *Chemosphere*, vol. 285, Dec. 2021, doi: 10.1016/j.chemosphere.2021.131529.
- [13] C. A. Mendieta-Pino, T. Garcia-Ramirez, A. Ramos-Martin, and S. O. Perez-Baez, “Experience of Application of Natural Treatment Systems for Wastewater (NTSW) in Livestock Farms in Canary Islands,” *Water (Switzerland)*, vol. 14, no. 14, Jul. 2022, doi: 10.3390/w14142279.
- [14] F. J. C. Magalhães Filho, J. C. M. de Souza Filho, and P. L. Paulo, “Multistage constructed wetland in the treatment of greywater under tropical conditions: Performance, operation, and maintenance,” *Recycling*, vol. 6, no. 4, Dec. 2021, doi: 10.3390/recycling6040063.
- [15] O. E. Bachi *et al.*, “Wastewater Treatment Performance of Aerated Lagoons, Activated Sludge and Constructed Wetlands under an Arid Algerian Climate,” *Sustainability (Switzerland)*, vol. 14, no. 24, Dec. 2022, doi: 10.3390/su142416503.
- [16] C. Lima dos Santos, L. Henrique Moreira de Lima, F. Renato Moreira da Silva, and R. Saraiva da Silva, “Sistema Autônomo Para Tratamento De Água Residual ContaminADA Autonomous system for treatment of contaminated wastewater.”
- [17] D. Santos Dep Eng Civ EST and Ua. Cláudio Brito, “TRATAMENTO DE EFLUENTES POR PROCESSOS NATURAIS.”
- [18] P. Sanciolo, A. K. Sharma, D. Navaratna, and S. Muthukumaran, “Stormwater Treatment Using Natural and Engineered Options in an Urban Growth Area: A Case Study in the West of Melbourne,” *Water (Switzerland)*, vol. 15, no. 23, Dec. 2023, doi: 10.3390/w15234047.
- [19] “T.M.Pessoa Cabrita.” Processos físico-químicos de tratamento de águas residuais industriais: estado da arte e novas fronteiras, Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em Mestrado Integrado de Engenharia do Ambiente, perfil Engenharia Sanitária, Faculdade de ciências e tecnologia Universidade Nova de Lisboa, Setembro de 2023.
- [20] R.Thyago Lemos Moraes, P.Peres Oliveira” Sistemas De Tratamento De Águas Cinzas: Diferentes Métodos De Tratamento” Revista Multidisciplinar do Nordeste Mineiro, v.05,2024 ISSN 2178-6925.
- [21] F. Younas *et al.*, “Current and emerging adsorbent technologies for wastewater treatment: Trends, limitations, and environmental implications,” Jan. 02, 2021, *MDPI AG*. doi: 10.3390/w13020215.

- [22] G. Salbitani and S. Carfagna, “Ammonium utilization in microalgae: A sustainable method for wastewater treatment,” Jan. 02, 2021, *MDPI*. doi: 10.3390/su13020956.
- [23] A. A. Galindo Montero, Y. M. Berrio Arrieta, and E. V. Pimienta Serrano, “Treatment of Slaughterhouse Wastewater through a Series System: Upflow Anaerobic Reactor and Artificial Wetland,” *Water (Basel)*, vol. 16, no. 5, p. 700, Feb. 2024, doi: 10.3390/w16050700.
- [24] A. E. Alprol, A. T. Mansour, M. E. E. D. Ibrahim, and M. Ashour, “Artificial Intelligence Technologies Revolutionizing Wastewater Treatment: Current Trends and Future Prospective,” Jan. 01, 2024, *Multidisciplinary Digital Publishing Institute (MDPI)*. doi: 10.3390/w16020314.
- [25] D. Paula Breda, M. Regina Linck, and P. Fundo, “Área: Tecnologia de Alimentos Tratamento De Efluente Cervejeiro Para Reuso De Água.”
- [26] Khumalo, “characterization of south African Brewery wastewater,” pp. 1–12, 2022.
- [27] X. Zhu, R. Qie, C. Luo, and W. Zhang, “Assessment and Driving Factors of Wetland Ecosystem Service Function in Northeast China Based on InVEST-PLUS Model,” *Water (Basel)*, vol. 16, no. 15, p. 2153, Jul. 2024, doi: 10.3390/w16152153.
- [28] M. Vítězová, A. Kohoutová, T. Vítěz, N. Hanišáková, and I. Kushkevych, “Methanogenic microorganisms in industrial wastewater anaerobic treatment,” Dec. 01, 2020, *MDPI AG*. doi: 10.3390/pr8121546.
- [29] S. M. Khumalo, B. F. Bakare, S. Rathilal, and E. K. Tetteh, “Characterization of South African Brewery Wastewater: Oxidation-Reduction Potential Variation,” *Water (Switzerland)*, vol. 14, no. 10, May 2022, doi: 10.3390/w14101604.
- [30] T. P. Mendoza-Tinoco, V. Sánchez-Vázquez, M. del Carmen Fajardo-Ortiz, I. González, and R. Beristain-Cardoso, “How does a low-magnitude electric field influence anaerobic digestion in wastewater treatment? A review,” Jun. 01, 2023, *Elsevier Ltd*. doi: 10.1016/j.chemosphere.2023.138402.
- [31] “Bacharelado Em Engenharia Ambiental Métodos Convencionais De Tratamento De Água: Eficiência, Impacto Ambiental E Perspectivas Gabrielly Cristiny Silva Garcia.”
- [32] A. Leone, C. Perone, A. Berardi, and A. Tamborrino, “Energy analysis and numerical evaluation of the decanter centrifuge for wastewater management to allow a sustainable energy planning of the process,” Apr. 01, 2024, *Elsevier Ltd*. doi: 10.1016/j.ecmx.2024.100596.
- [33] E. Y. T. Gan, Y. J. Chan, Y. K. Wan, T. J. Tiong, W. C. Chong, and J. W. Lim, “Examining the synergistic effects through machine learning prediction and optimisation in the anaerobic Co-digestion (ACoD) of palm oil mill effluent (POME) and decanter cake (DC) with economic analysis,” *J Clean Prod*, vol. 437, Jan. 2024, doi: 10.1016/j.jclepro.2024.140666.

- [34] J. Mauro and A. Lima Brito, “Universidade Federal De Uberlândia Faculdade De Engenharia Química Curso De Graduação Em Engenharia Química Tratamento Biológico De Efluentes Industriais,” 2017.
- [35] N. Chirinza *et al.*, “Life-Cycle Analysis of Natural Treatment Systems for Wastewater (NTSW) Applied to Municipal Effluents,” *Water (Switzerland)*, vol. 16, no. 18, Sep. 2024, doi: 10.3390/w16182653.
- [36] H. Marecos and M. A. Albuquerque, *Reutilização de Águas Residuais*.
- [37] A. García-Valero *et al.*, “Swine Wastewater Treatment System Using Constructed Wetlands Connected in Series,” *Agronomy*, vol. 14, no. 1, Jan. 2024, doi: 10.3390/agronomy14010143.
- [38] D. Raquel and M. Borges, “Contribuição para a solução de tratamento de águas residuais domésticas da Vila de São Sebastião.” Universidade dos Açores, Departamento de Ciências Agrárias, Angra do Heroísmo Outubro 2014.
- [39] J.Ferreira”. Sistemas naturais de tratamento de águas residuais,Relatório de Dissertação do Mestrado em Engenharia Biológica e Química, Instituto politécnico de Setúbal, Escola Superior de Tecnologia do Barreiro, Dezembro 2021
- [40] E. Salatti, “Utilização De Sistemas De Wetlands Construídas Para Tratamento De Águas,” 2003.
- [41] M. Macário, A. Saraiva, E. Ferreira, L. Filipe Ferreira, and M. Oliveira, “Leitos Húmidos Construídos Como Alternativa Aos Sistemas De Tratamento De Águas Residuais Convencionais-Revisão Constructed wetlands as an alternative to conventional wastewater treatment systems-A Review,” 2018. [Online]. Available: <http://ojs.ipsantarem.pt/index.php/REVUIIPS>
- [42] S. Rogério, “Ficha Catalográfica.” Modelagem Do Desempenho De Wetlands Construídas, Escola Politécnica daUniversidade de São Paulo, Dissertação,Dissertação, São Paulo 2001.
- [43] S. X. de Campos and M. Soto, “The Use of Constructed Wetlands to Treat Effluents for Water Reuse,” Feb. 01, 2024, *Multidisciplinary Digital Publishing Institute (MDPI)*. doi: 10.3390/environments11020035.
- [44] D. Antonio and T. Fochi, “Universidade De Santa Cruz Do Sul Programa De Pós-Graduação Em Tecnologia Ambiental-Mestrado Área De Concentração Em Gestão E Tecnologia Ambiental,” 2024.
- [45] “Regimento Do Programa De Pós-Graduação Stricto Sensu Em Modelagem Matemática E Computacional Capítulo I Da Natureza E Dos Objetivos Do Programa- Unjuí.” Reconhecida pela portaria Ministerial n497 de 28/06/1985.
- [46] M. Aparecido Martinez Prof^a Ann Honor Munteer Alisson Carraro Borges Demetrius David da Silva, “Daniele Gonçalves Nunes Modelagem Da Autodepuração E Qualidade Da Água Do Rio Turvo Sujo.”

- [47] M. Williams. Rodrigues de Souza. Neto, “Modelagem Ambiental De Autodepuração Do Rio.” Universidade federal do Amazonas instituto de educação, agricultura e ambiente curso de graduação em engenharia ambiental, HUMAITÁ, 2021.
- [48] S. Helena and R. Gomes, “Universidade Federal De Pelotas Centro De Engenharias Curso De Engenharia Ambiental E Sanitária Modelagem da qualidade da água do Rio dos Sinos/RS utilizando o modelo QUAL-UFMG,” 2016.
- [49] T. S. Duarte, “Curso De Engenharia Ambiental E Sanitária Modelagem Aplicada A Estudo De Recuperação De Rios Poluídos Por Esgoto Doméstico.” Centro Universitário Unifacvest ,Curso De Engenharia Ambiental E Sanitária, LAGES 2019
- [50] R. Miranda Barcia *et al.*, “Modelagem E Otimização De Sistemas De Lagoas De Estabilização Para Tratamento De Dejetos Suínos Waldir Medri Esta Tese foi julgada para a obtenção do título de Doutor Em Engenharia De Produção e aprovada em sua forma final pelo programa de Pós-Graduação Coordenador do Curso Banca Examinadora Profa. Rejane H. Ribeiro da Costa, Dra. Orientadora.”
- [51] H. Marecos do Monte Maria Teresa Santos, A. Maria Barreiros António Albuquerque, and M. Teresa Santos Ana Maria Barreiros António Albuquerque, “Em parceria com.” [Online]. Available: www.ersar.pt
- [52] S. Barbosa, P. Vitor Goes, P. Franklin Tavares, L. Camila Costa, C. Neto, and J. Aprígio, “Diagrama de Pareto: verificação da ferramenta de qualidade por patentes R E S U M O Pareto Diagram: patent quality tool verification.” [Online]. Available: www.simprod.ufs.br

Parte III

Publicaciones originales que contempla esta Tesis Doctoral

4. Life-Cycle Analysis of Natural Treatment Systems for Wastewater (NTSW) Applied to Municipal Effluents

Article

Life-Cycle Analysis of Natural Treatment Systems for Wastewater (NTSW) Applied to Municipal Effluents

Nicolau Chirinza ¹, Federico A. Leon Zerpa ^{2,*}, Paulino Muguirrima ¹, Tania del Pino García ², Gilberto Martel Rodriguez ³, Camila Gutierrez ³ and Carlos A. Mendieta Pino ²

¹ Faculty of Science and Technology, Zambezi University (Unizambeze), 2100 Beira, Mozambique;

nicolau.chirinza101@alu.ulpgc.es (N.C.); paulino.muguirrima101@alu.ulpgc.es (P.M.)

² Institute of Environmental Studies and Natural Resources (iUNAT), University of Las Palmas de Gran Canaria, 35001 Canary, Spain; tania.garcia@ulpgc.es (T.d.P.G.); carlos.mendieta@ulpgc.es (C.A.M.P.)

³ Canary Islands Institute of Technology (ITC), Gobierno de Canarias, 35001 Canary, Spain; gmartel@itccanarias.org (G.M.R.)

* Correspondence: federico.leon@ulpgc.es; Tel.: +34-686169516

Abstract: The objective of the described activity is to develop technologies or proposals that can be implemented within the cycle to enhance the relationship between climate change, water, energy, and food. The focus is on analyzing natural treatment systems for wastewater (NTSW) within the context of Macaronesia, considering factors such as life-cycle assessment (LCA), carbon footprint, impacts, and mitigation capacity. The analysis of real case data from the Canary Islands and Cape Verde will inform the development of appropriate technologies tailored to different areas and scales within Macaronesia. This work includes a comprehensive life-cycle analysis of the Santa Catarina (Cape Verde) NTSW. This analysis encompasses: (a) Inventory analysis of the construction phase: This involves the assessment of inputs and outputs associated with the construction of the NTSW, including materials, energy consumption, transportation, and waste generation. The maintenance and operation phases are then evaluated, with a focus on the ongoing maintenance and operation activities required for the NTSW, including energy consumption, water usage, chemical inputs (if any), labor, and equipment maintenance. (b) Finally, the impacts of the NTSW are evaluated. The environmental, social, and economic impacts generated by the NTSW are assessed. This includes an analysis of factors such as carbon emissions, water usage, land use, ecosystem impacts, human health effects, and economic costs. By conducting a comprehensive analysis of the Santa Catarina NTSW, the document aims to provide insights into the environmental performance and sustainability of the system. This information can then be used as a tool and experience of educational innovation for final-year undergraduate students to identify areas for improvement, develop mitigation strategies in the water sector, and inform decision-making processes regarding wastewater treatment technologies in Macaronesia. Furthermore, lessons learned from real case studies in the Canary Islands and Cape Verde can be applied to similar regions within the Macaronesia archipelago (IDIWATER project).

Keywords: life cycle analysis (LCA); natural treatment; climate change

Citation: Chirinza, N.; Zerpa, F.A.L.; Muguirrima, P.; del Pino García, T.; Rodriguez, G.M.; Gutierrez, C.; Pino, C.A.M. Life-Cycle Analysis of natural treatment systems for wastewater (NTSW) applied to municipal effluents. *Water* **2024**, *16*, 2653. <https://doi.org/10.3390/w16182653>

Academic Editor: Pankaj Kumar

Received: 12 August 2024

Revised: 6 September 2024

Accepted: 16 September 2024

Published: 18 September 2024



Copyright: © 2024 by the authors. Submitted for possible open access publication under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

1. Introduction

The literature suggests various waste-management strategies, including conventional treatments, with outcomes varying depending on farm type [1–4]. Natural treatment systems for wastewater (NTSW) have emerged as viable options for both urban and rural settings due to their low energy requirements, effective contaminant removal capabilities, and potential for effluent reuse [5–12]. NTSW, as defined in the essay, are treatment systems where effluent storage involves high residence times, allowing organic matter degradation by bacterial activity. These systems are referred to in the scientific

literature as unconventional technologies, low-cost systems, soft technologies, green systems, and others. The key differences between NTSW and conventional systems include zero energy consumption for removal and a larger treatment surface area. NTSW harnesses the synergy of physical, chemical, and biological processes found in nature. It has demonstrated suitability across various applications, including urban and rural contexts, with high pollutant-removal capacities and opportunities for effluent reuse. On Gran Canaria Island, NTSW solutions have been trialed in remote rural areas [13–15], yielding promising results with removal efficiencies exceeding 75% for chemical oxygen demand (COD) and 90% for total suspended solids (TSS).

The life-cycle assessment (LCA) is defined as a methodology for evaluating the environmental impacts of a product system throughout its life cycle. This life cycle encompasses all consecutive and interrelated stages, from the acquisition of raw materials to final disposal. LCA involves collecting and assessing data regarding inputs, outputs, and potential environmental impacts associated with each stage of the product system's life cycle. Depending on the specific objectives of the assessment, LCA can be conducted at different levels of detail, resulting in three main types. The first type is a qualitative study that identifies the most significant impacts generically. The second type is a more comprehensive LCA that focuses on the most important steps and analyzes the most important data. The final type is the most intricate, as it involves a comprehensive analysis of the impacts, stages, and inventory at both qualitative and quantitative levels [16–19]. The LCA covers all stages of the system's life cycle, from the extraction and processing of raw materials for construction to its operation and maintenance. By conducting a comprehensive LCA, it aims to provide an estimate of the environmental impacts associated with each stage of the system's life cycle. Furthermore, the results of this LCA can serve as a valuable tool for decision-making in the planning of wastewater treatment and reuse models in similar areas. It can provide insights into the environmental implications of different treatment options, helping stakeholders make informed choices that prioritize sustainability and minimize environmental harm. Ultimately, this LCA contributes to the development of a decision-making guide for sustainable wastewater management in regions with characteristics like those studied [20–24].

The aim of this study is to evaluate the environmental impact of a natural wastewater treatment system, which is designed to reuse, throughout its entire life cycle using life-cycle assessment (LCA). The system is designed to treat wastewater discharges from the municipality of Santa Catarina, with a focus on the Achada Galego locality on the island of Santiago, Cape Verde. Currently, the system operates at a flow rate of 140 m³ per day, although it was designed for a maximum capacity of 200 m³ per day [25–28].

The novelty of this study is that the data used were collected from the operational NDS located in Santa Catarina, a region considered into the IDIWATER project (DESAL+ LIVING LAB); co-financed by the European Interreg MAC Programme 2021–2027. In contrast, most other studies are conducted in pilot plants. However, this study considers the impact of real-world factors such as rainfall, droughts, population density, and wastewater generation. Furthermore, the subsequent application of treated water, either for irrigation or direct discharge, is a further innovation. This is due to the properties of the treated water. It was not possible to consider the use of water for irrigation in this study due to a lack of information and knowledge regarding its application in the program, necessitating further study.

2. Materials and Methods

NTSW is located on the island of Santiago (Cape Verde), in the locality of Achada Galego (N: 15.05' 49.99, W: 23.4101.75). This pilot project is financed by the Spanish Cooperation and aims to provide Cape Verde with a system for the storage, treatment, and distribution of treated wastewater for agricultural purposes. The planned infrastructure takes as a reference a small experimental part of the reuse of treated wastewater carried out in the framework of the ADAPTaRES project at the Santa Catarina

NTSW, co-financed in this case by the European Interreg MAC Program 2014–2020 and Canary Islands Technological Institute (ITC). The facility is designed for a population equivalent of 1600 inhabitants.

2.1. Description Plant

- Preliminary treatment consisting of roughing screens: this stage will guarantee the proper functioning of the subsequent equipment, avoiding possible obstructions. There are two lines of 0.4 m wide and 3 m long.
- Primary treatment (anaerobic lagoons): this process consists of reproducing the self-purification phenomena that occur naturally in rivers and lakes. In this type of lagoon, there are high organic loads that produce oxygen-free conditions, and anaerobic bacteria proliferate. This slows down the velocity and causes the heavier suspended particles to settle to the bottom, thus reducing the suspended solid content. These accumulate at the bottom and result in the formation of a sludge layer, which is usually removed every 5–10 years of operation due to anaerobic stabilization at room temperature, which reduces its volume. There are three lines 3.6 m deep, 21.8 m long, and 8.8 m wide. This is followed by a batch-discharge system.
- Secondary treatment (Constructed Wetland with Vertical flow): The water coming from the anaerobic lagoon flows vertically through media collected in a drainage network at the bottom of the wetland, which is connected to aeration chimneys. The feed is discontinuous. In this case, there are 6 vertical-flow wetlands, 13 m wide and 26.8 m long. Each is made up of different layers of gravel and sand and has an impermeable membrane at the bottom of the basin.
- The reserve lagoon is covered with a shading mesh made up of two grids of 5 mm Bayco-type black polyamide monofilament yarn, arranged in 0.5×0.5 grids, with dynamometer-controlled tensioning tied to the perimeter anchoring structure and a double layer of black polyethylene shading fabric with a minimum 85% shade, located between the two grids of yarns. The dimensions of this water are 31.6 m long, 20.60 m wide, and 0.5 m deep, giving a volume of about 325 m³. This lagoon will act as an initial reservoir, where the water treated in the treatment plant will be stored and can be pumped to feed the tertiary treatment.

The wastewater reclamation processes installed at the plant will be described below.

- Underground treated water tank: The storage volume is 10 m³. It has two impulsion pumps at the outlet that will propel the water to the filtration system.
- Filtration: In this stage, the aim is to eliminate dissolved solids practically in their entirety, in addition to reducing the microbiological activity of the water. This filtration system consists of a vertical filter with AFM (Activated Filter Media, DIMASA, Barcelona, Spain), from DIMASA (Barcelona, Spain) as the filter medium. These must have a backwashing system with clean water. Two lines are arranged in parallel, and at the inlet of this system, there is a flow meter to control the flow of water entering the system.
- Refining: Once the water has been filtered, it will be passed through a manual cleaning ring filter with a 50 mm pitch, which will improve the quality of suspended solids and turbidity. In this process, there are also two lines consecutive to the previously mentioned filters.
- Main disinfection: The selected disinfection system is a compact ultraviolet disinfection equipment. This system can interact with the DNA and RNA of bacteria viruses, preventing their reproduction.
- Final tank: The treated water will be deposited in a 50 m³ closed reinforced concrete tank. This is equipped with a water disinfection system based on the addition of trichlorine tablets.

Figure 1 shows the stages of Santa Catarina NTSW.

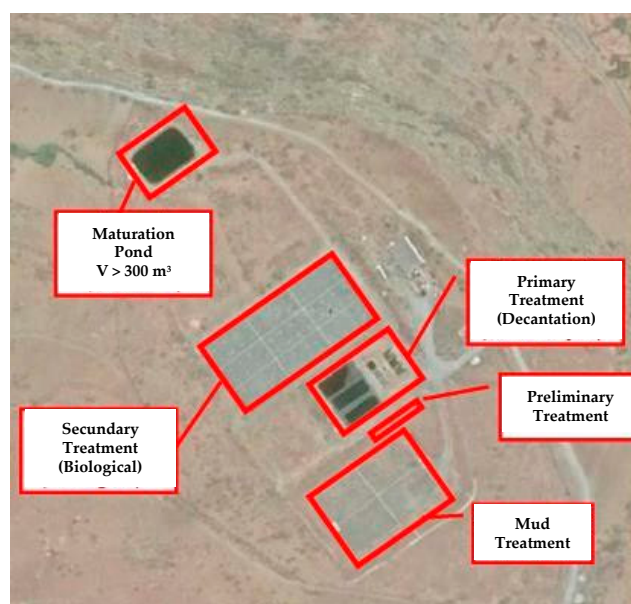


Figure 1. Stages of the Santa Catarina NTSW.

The stages/aspects that are considered in the LCA are the following:

1. Materials for the construction of the facilities and their transport.
2. Construction of the installation considering the required energy/fuel consumption.
3. Maintenance and operation.
4. The impact of the treatment and disposal of waste to be landfilled or treated as byproducts.

The stage excluded from the analysis is the dismantling. Likewise, charges relating to the manufacture of the machinery and infrastructure necessary for the extraction and transport of any raw materials or materials used in the construction of the plant or the materials, waste, or byproducts resulting from the maintenance of the plant are also disregarded. Figure 2 shows the stages that are included in the study (red box) and those that have not been considered for this study.

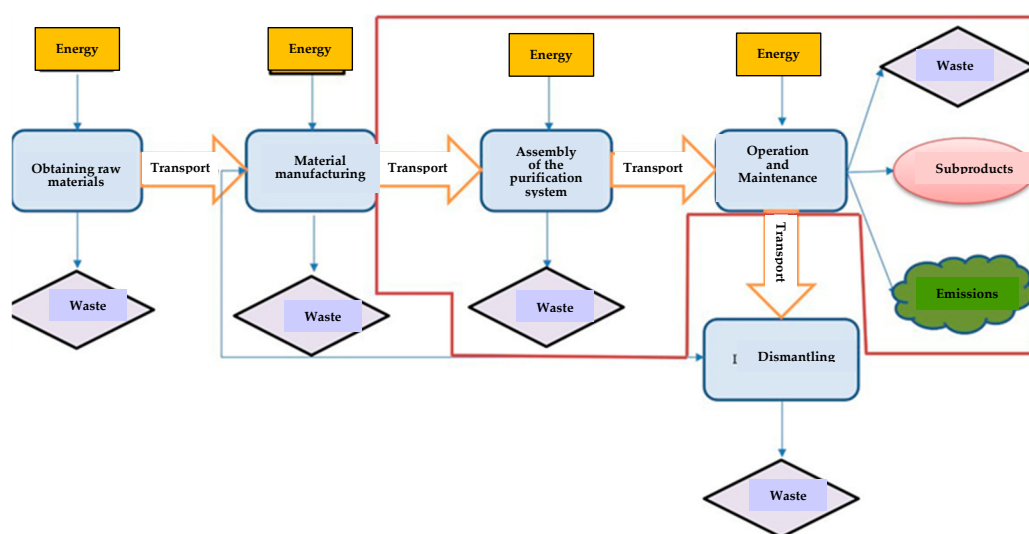


Figure 2. Stages included and excluded from the LCA.

2.2. Inventory

In this section, the inventory analysis of each of the selected wastewater treatment plants must be carried out. To do this, it is necessary to describe the facilities in such a

way that all the processes that make them up are known. The inventory will consist of two parts: one associated with the construction phase, where all the materials and processes necessary for the construction of the treatment plant will be collected, and the other with the maintenance and operation phase. The latter will include the reagents necessary for the correct development of the plant, the maintenance stages, and the waste/byproducts obtained from this maintenance. In turn, the emissions associated with each of the processes in this operation phase will be obtained.

Construction Phase

Materials Used

This section defines the quantities of the main components of each of the stages that make up the Santa Lucia wastewater treatment plant, namely the intake works, the roughing works, the septic tank, the siphon and flow meter boxes, the vertical wetlands, the horizontal wetlands, the storage tank, the interconnection elements, and the passageways. For the calculation of the quantities required and the materials used for the construction of the treatment plant, reference was made to the construction reports for both the Santa Lucia treatment plant and the Calheta treatment plant (Maio Island in Cape Verde), which has similar characteristics to the Santa Lucia NTSW. The latter is required for the calculation of elements such as the septic tank and the interconnection chambers, which were not included in the Santa Lucia report.

Arrival and Roughing Works

It is considered that the pit is built with a medium-hard concrete base, like cleaning concrete. Elements such as plastering the inside of the pit, compacting the soil, or the removal of surplus material are not considered. For the roughing gratings, it is considered that they are manufactured with low-alloy steel as this steel is the most used for the manufacture of stainless steel in this case. The following are also not considered. The quantities of steel required for the manufacture of the grating are considered in the manufacturing process of the grating. The excavation of the ground is considered to be the sum of the amount of ground to be excavated from the roughing pit.

Roughing

First, the amount of concrete necessary for the construction of the pit containing the roughing gratings is obtained per inhabitant. The area of the concrete = 2.6×10^{-4} m³/h.e. Second, the amount of steel required for the construction of the roughing grate is obtained. The weight of the steel was 0.18 kg/h.e.

Excavation

To obtain the impact associated with the excavation process, it is considered that the entire impact will be determined by the fuel use of the backhoe loader carrying out the excavation. The total excavation area is determined as the land occupied by the backhoe loader 1995 m³. Knowing that the efficiency of the backhoe loader is 0.12 h/m³, we can calculate the number of hours needed to excavate the land. Furthermore, it is known that the power of the backhoe loader is 70 kW, so we multiply the time needed to obtain the kWh needed. The efficiency of the backhoe loader is 90%. As the fuel used by this machinery is diesel, the number of liters per inhabitant equivalent used is obtained by means of the LCV of this fuel. The fuel used was 0.011 L/h.e.

Land Occupation

One of the most important aspects of this type of treatment system is the amount of land it occupies, so it is considered very necessary to quantify the amount of land occupied by each of the processes that make up the NTSW. The land occupation was 0.0018 m²/h.e.

Discontinuous Discharge System

The discontinuous discharge system consists of “decolloideurs” and “chasses”, both composed of 3 compartments of equal magnitude. The first of these has dimensions of 4.5 m by 5 m each with a depth of 2 m, making a total of 4.5 m wide by 15 m long. The second of these is 7 m wide by 4.5 m long, and each has a depth of 1 m, making a total of 13.5 m

long. Both structures will be made of medium-hard concrete with a thickness of 0.1 m. The area of the concrete was 0.02 m³/h.e.

Excavation

To obtain the impact associated with the excavation process, it is considered that the entire impact will be determined using fuel by the backhoe loader carrying out the excavation. For this purpose, the total excavation surface is determined as the land occupied by both systems: 94.5 m³ (chasses) and 135 m³ (decolloideurs), and was 0.13 L/h.e. The land occupation was 0.101 m²/h.e.

Anaerobic Lagoon

The anaerobic lagoons in the treatment plant are open-air. The purpose of these lagoons is to reduce the content of suspended solids, which are incorporated into the layer of sludge accumulated at the bottom. The water is introduced at the bottom of the lagoon, causing an absence of oxygen in the inlet water. The output water is obtained from the upper part. The considerations made in the manufacturing process of the anaerobic lagoons are as follows: There are three parallel lagoons operating at the same time whose dimensions are 8.24 m wide (each) and 23.26 m long. The depth of the three lagoons is 4 m each. The construction process is based on excavating the area where the lagoons are installed, covering the ground with a layer of geotextile and a layer of EPDM on top of the geotextile. This will allow the surface to be waterproof and the EPDM covering with geotextile will prevent cracks in the geotextile. On the other hand, pipes are required for the drainage of the incoming and outgoing water, and a manhole at the inlet to allow the correct distribution of the water.

Anaerobic Lagoon Pit

The water inlet to the lagoons is regulated by a chamber located at the beginning of the lagoons. The dimensions of the chamber are 1 m wide, 1 m long, and 1 m high. Considering a thickness of 0.05 m of concrete, the result is as follows: The area of concrete was 1.6×10^{-4} m³/h.e. The steel used in the manhole closure plate is calculated according to the dimensions of the manhole and the thickness of the door, which are 1 m long, 1 m wide, and 0.02 m thick. The weight of the steel was 0.098 kg/h.e.

Anaerobic Lagoon Manufacture

The lagoons are waterproofed with a 1.52 mm thick EPDM sheet and a 300 g/m² geotextile sheet underneath the EPDM sheet. The geotextile sheet is made of polypropylene. In this case, more EPDM and geotextile are required because in addition to covering the ground, the sides (4 m high) must be covered, and there is material left over at the top of the wetland (0.5 m will be considered). Therefore, Geotextile 0.27 kg/h.e. and EPDM 0.185 kg/h.e. will be needed.

Pipelines

Approximately 15 m of piping is required in each of the lagoons, with three lagoons totaling 45 m. PE pipes with a diameter of 160 mm and a thickness of 3.0 mm are used at 0.033 kg/h.e.

Obtaining the Required Volume of PE

Calculation of the perimeter of the cylinder with a diameter of 160 mm and calculation of the perimeter of the cylinder with a diameter of 154 mm was carried out by subtracting and multiplying by the length to obtain the amount of PE required. To obtain the weight of the PE required, we multiply by the density of the cylinder.

Excavation

The excavated land corresponds to the sum of the dimensions of the three anaerobic lagoons and the inlet chamber, which is 2300 m³ in total. The volume of diesel is calculated in the same way as in the previous sections and was found to be 1.31 L/h.e.

Land Occupation

The anaerobic lagoons occupy a total of 574.99 m² so they will have a much more relevant weight than the rest of the processes. The total surface area occupied was 0.36 m²/h.e.

Vertical-Flow-Constructed Wetlands

There are six vertical-flow-constructed wetlands. It should be noted that for the inventory of wetlands, a single wetland is considered, the dimensions of which are the sum of the two wetlands separately, thus creating a wetland of 3335 m². The aggregates used are 15–25 mm and 5–12 mm gravel, but due to the lack of data on particle sizes, all gravel is 30–32 mm. In addition, a sheet of ethylene–propylene–diene rubber (EPDM) will be used to waterproof the system. In addition, there is a collection chamber at the inlet of the vertical-flow system. No account will be taken of the stones protecting the sheeting or other materials other than gravel, EPDM, polyethylene (PE) pipes, and concrete.

Vertical Wetland Pit

The dimensions of both manholes were considered to be 3.1×10^{-4} m³/h.e. The steel used in the manhole closure plate is calculated in the same way as the closure plate of the roughing manhole and was found to be 0.314 kg/h.e.

Manufacture of Vertical-flow Wetland

The dimensions of each wetland are as follows (note that there are 6 wetlands in total): 13 m wide, 26.8 m long, and 1.2 m deep. In this case, the flattening of the terrain is not considered. The wetland is waterproofed with a 1.52 mm thick EPDM sheet and 2 sheets of 300 g/m² geotextile between the EPDM sheets. The geotextile sheet is made of polypropylene. In this case, a larger quantity of EPDM and geotextile is required because, in addition to covering the ground, the sides must be covered (1.2 m of height), and surplus material at the top of the wetland (0.5 m) shall be considered. Therefore, the following will be needed: 1.039 m²/h.e. and EPDM 0.36 kg/h.e. For the calculation of the amount of gravel required, the same gravel is considered for the entire surface. Therefore, 1698 kg/h.e. was required.

Pipelines

A total of 1245 m of pipes are needed for the conduits corresponding to vertical wetlands. PE pipes with a diameter of 160 mm and a thickness of 3.0 mm are used. A total of 0.922 kg/h.e. was required.

Obtaining the Required Volume of PE

Calculation of the perimeter of the cylinder with a diameter of 110 mm and calculation of the perimeter of the cylinder with a diameter of 106.8 mm was carried out by subtracting and multiplying by the length to obtain the amount of PE required. To obtain the weight of the PE required, we multiply by the density of the PE.

Excavation

The excavated land corresponds to the sum of the dimensions of the two vertical wetlands and the manholes of each of them, being 2509 m³ in total. The volume of diesel is calculated in the same way as in the previous sections. A total of 1.42 L/h.e. was required.

Land Occupation

The vertical-flow wetlands occupy a total of 2090 m², so they will have a more relevant weight than the rest of the processes. The total surface area considered was 1.31 m²/h.e.

Storage

The manufacturing process of the storage lagoon is based on the excavation of the land occupied by the lagoon, the placement of a concrete slab, and its subsequent waterproofing with waterproofing paint. As in the previous cases, the removal of excess material and backfilling with excavated material is not considered. One of the main problems of the water treated in this NTSW is that it suffers a worsening of its quality conditions because it is in the open air, thus encouraging the growth of micro-algae. This factor causes a lack of oxygen. Also, the presence of birds on the surface of the lagoon can lead to an increase in microbiological indicators. It is, therefore, proposed that the lagoon be covered as a solution to these problems. A cover consisting of a 5 mm polyamide shading mesh and a double layer of high-density polyethylene shading fabric was considered.

Manufacture of the Storage Lagoon

The dimensions of the storage pond are 30.6 m long, 19 m wide, and 1 m deep. A thickness of 0.04 m of concrete was considered, which was calculated as 0.15 m³/h.e. It was proposed to carry out the waterproofing with waterproofing paint. In the same way as for the septic tank, since this product was not found in the SimaPro bases, it was decided to choose a waterless acrylic varnish, which can also be used as a waterproofing agent. The volume of acrylic varnish is obtained from the dimensions of the walls to be waterproofed and a thickness of approximately 60 microns. It was considered of 0.0052 kg/h.e.

Excavation

It is, therefore, necessary to excavate 590 m³, which is 0.335 L/h.e.

Land Occupation

The total surface area occupied by the storage lagoon is quite similar to that of the wetlands, i.e., 0.369 m²/h.e.

Lagoon Cover

In this case, it is necessary to know the quantity of polyamide yarn and shading mesh to be used.

Polyamide Yarn

Polyamide yarn is a synthetic fiber plastic (such as nylon or Kevlar) and/or natural (wool or silk). In this case, a type of nylon is used. The total surface area of the storage pond is estimated, and using these data, the thickness of the thread, and the density of this material, the necessary weight was 2.10 kg/h.e.

Shading Mesh

The lagoon will be covered with double high-density polyethylene (HDPE) mesh with shading capacity. The quantity required is calculated in the same way as for the polyamide yarn. This was found to be 3.50 kg/h.e.

Passageways and Pipelines

In this section, the materials necessary for the construction of the access and protection areas of the treatment plant and the connections to be made for the transport of water from one point to another will be obtained.

Conducts

The connections will be made with polyethylene pipes with a diameter of 160 mm and a thickness of 3.9 mm. The length required was 133 m of pipe or 0.804 kg/h.e.

Excavation of the Pipeline Area

Taking into account the dimensions, it is estimated that the total area to be excavated amounts to 35 m³, calculated to be 0.02 L/h.e.

Occupation of Land in Pipelines

This section will consider the total number of meters required for pipes that serve as connections between the different processes of the WWTP:

$$\text{Occupied surface} = (133 \times 0.5)/1600 = 0.042 \text{ m}^2/\text{h.e.}$$

Passage Areas

The areas that have had to be prepared so that the terrain is in the best possible condition for transit, if necessary, are referred to as transit areas.

In addition, the protection of the terrain by means of fences covering it will also be considered in this section.

The total plot size is 14,867 m². These data are approximate and obtained by means of the Graf Can Visor. If we deduct from this the areas where the purification equipment is located, the plot to be developed is 10,217 m². (The land of the drying beds is considered to have been developed, but no inventory of the same is made).

To prepare the plot, the land will be cleared and cleaned using a wheel loader.

Knowing that the efficiency of the loader is 0.021 h/m³, we can calculate the number of hours necessary to excavate the terrain. We also know that the power of the same is 120 kW, so if we multiply the time required by the power, we obtain the kWh required. (Consider an efficiency of 90%).

As the fuel used by this machinery is diesel, if we obtain the PCI of this fuel, we can obtain the liters of fuel needed.

Fence Used

The fence used to surround the entire plot is a flat grey electro-welded mesh with holes ($50 \times 50 \times 4$ cm), whose dimensions are 2.6 m wide by 2 m high.

Taking into account that the perimeter of the plot is 806 m, about 310 prefabricated steel fences will be needed. As each mesh weighs 18.41 kg, this makes a total of 5707 kg.

Chromium-plated steel will be used, as this is the most commonly used steel in the stainless-steel industry.

Occupation of the Land in Transit Areas

This section considers all the land that has had to be conditioned to allow easy access to all the processes that make up WWTP. This quantity has been calculated beforehand, as it was necessary to know the diesel used to prepare the plot. Therefore, the following is obtained:

Elements of Tertiary Treatment

- Feed pump for tertiary treatment: compact, reliable, horizontal, multistage end-suction centrifugal pump.
- Water pumps usually consist of the following materials:
 - Hydraulic body: stainless steel
 - Pump casing: AISI 304
 - Impeller: Stainless steel

As can be seen, the material most commonly used for the manufacture of this type of pump is stainless steel, so for this study, the pump will be considered to be made entirely of stainless steel. The weight of the pump is 31.7 kg, according to its technical data sheet.

- Washing pump: single-stage pump with top extraction system for easy disassembly.

The main component used for the manufacture of the seal is cast iron. Some small parts, such as the rotary seal ring or the stationary seat, are made of silicon carbide or EPDM in the case of the secondary seal.

- Filtration (AFM filter): In this case, the filter is made of laminated polyester reinforced with glass fiber almost entirely except for the cover.

This will not be introduced in our analysis as not all systems have this treatment.

The side manhole is made of plastic-coated steel, and the crepinas (filtered water collectors at the bottom of the filter) are made of polypropylene. It should also be noted that the filtering material, green glass, is inserted inside the filter.

- Ring filter: This is a physical filtration system produced by the retention of particles in the channels created by the superimposition of a set of rings. The materials used in this case are fiberglass-reinforced polyamide and synthetic rubber for the seals. It is considered to be made entirely of reinforced polyamide. The weight of these devices is approximately 6 kg.
- Main disinfection (UV disinfection): This equipment generates ultraviolet radiation at a frequency of 254 nm, capable of destroying harmful bacteria and persistent viruses in the water without generating harmful byproducts. The radiation chamber is made of AISI 314 stainless steel. The weight and whether any other material is in higher proportion than steel is unknown.

The UV filter installed at the WWTP is the SAV-UV-6 with a maximum flow rate of 5 m³/h and 80 W power.

- Final secondary disinfection tank (chlorine): After the filtration, refining, and main disinfection stages, the disinfected water is sent to the new reusable water tank, with a volume of 100 m³ made of concrete.

The dimensions of the tank are as follows: 7 m wide, 4.5 m long, and 3.2 m high. Considering a thickness of 0.05 m of concrete, we obtain:

- Tertiary process building: It is proposed that the construction of the building containing the treatment equipment be as follows:
 - Concrete floor
 - Concrete block walls

The impact assessment establishes a relationship between the data collected in the inventory analysis and the environmental loads generated by them. To carry out the assessment, it is advisable to have a computer program that performs the calculations quickly and reliably. There is a great variability of programs such as SimaPro, Boustead, Umberto, Open LCA, etc. Each of them has different assessment methodologies. The assessment process is conducted in five distinct stages: classification, characterization, normalization, weighting, and damage assessment. The latter three stages are optional. The initial stage involves defining and selecting impact categories. An impact category is defined as a representative class of environmental variables to which the results of the inventory can be assigned. The classification is based on the grouping of the environmental loadings of the different inputs and outputs of resources and energy according to the environmental effects produced. It should be noted that certain outputs contribute to more than one category. The effect produced by the repetition of some factor will be accepted, provided that these outputs are independent. Finally, regarding the characterization, the process by which the potential contribution of each compound detected in the inventory analysis is obtained regarding a given environmental effect. Computer programs are available that provide characterization results directly, obviating the need for separate calculations. The processes are obtained directly as a result of the program, whereby the program itself performs the classification and characterization of the study, negating the need for manual input.

Databases available in SimaPro are as follows:

ETH-ESU Library 96 (2003): Contains energy inventory data. The inventory tables include emissions from primary energy extraction, refining, and distribution, extraction of mineral matter, production of raw materials, production of semi-factories and auxiliary and working materials, provision of transport and waste treatment services, construction of infrastructure, and energy conversion and transmission.

Infrastructure and energy conversion and transmission: The system description depicts the energy distribution situation of Switzerland and Western Europe concerning the production and imports of fuels and the production and imports of fuels and electricity production and business [5].

BUWAL Bookshop 250 (2001): The inventory tables include emissions from raw material production, energy production, production of semi-factories and auxiliary materials, and transport and material production processes. The description of the system is based on the Swiss consumption of packaging materials and imports and exports of materials. The energy systems are based on ETH data without considering capital goods; the plastics data are based on PWMI data [5].

IDEMAT Library 2001: Developed by the Faculty of Industrial Design Engineering of the Delft University of Technology (Delft, The Netherlands). The focus of the database is more than just the production of materials. Most of the data are original (not collected from other LCA databases) and come from a wide variety of sources. The Life-Cycle inventory includes mining, concentration, and processing in the case of minerals or harvesting and processing for agricultural products. In general, the average global situation is considered. Accordingly, transport is allocated to global mining and production of resources, with Rotterdam as the final destination. Recycling of secondary materials is considered according to the average Western European situation. The system boundaries cover all processes from nature [5].

Industry Data Library (2007): This database contains detailed inventories of common materials and processes sourced directly from industries. It includes the ecoprofiles of plastics and their associated intermediates, created by Boustead for AMPE (European

Centre for Plastics in the Environment of the Association of Plastics Manufacturers in Europe). The results are the industry average, calculated as the principal value of the participating companies weighted by their production. The inventory table includes raw materials, emissions to air, water, and waste for all operations since the extraction of raw materials from the earth [5].

Ecoinvent v.3.7.1, founded in 2000 and developed by several Swiss institutes, namely the Swiss Centre for Life-Cycle Inventories, the Swiss Federal Office, and EMPA (Swiss Federal Laboratories for Materials Testing and Research). This can be seen as an update of the BUWAL 250 and ETH databases, containing data on products and services from the energy, transport, building materials, chemicals, pulp and paper and waste treatment, and agricultural sector, which are valid for Swiss and Western European conditions [5].

Dutch Input/Output database: This is available on the SimaPro Dutch Input/Output economic database. The starting point was an overview of how the distribution of the average consumer is spread over 350 categories. A connection was made between these categories and the economic sectors. The economic input–output table was used to plot the trade flows between these sectors. There are also foreign tables for OECD and non-OECD regions. This allows the tracing of the impact of goods produced outside the Netherlands [5].

Finally, the impact assessment methods to be used must be defined, so first, the impact categories to be considered must be determined. The following is a description of the most relevant impact categories according to the Society of Environmental Toxicology and Chemistry (SETAC):

- Global warming (kg CO₂ equivalents)
- Consumption of energy resources (MJ)
- Ozone layer depletion (kg CFC-11 equivalents)
- Eutrophication (kg NO₃ equivalents)
- Acidification (kg. SO₂ equivalents)
- Consumption of raw materials (Tn)
- Formation of photochemical oxidants (kg. C₂H₄ equivalents)

It should also be noted that these are not the only impact categories that exist, as it must be considered that different categories are required in each study area. Some of them are the following:

- Human toxicity
- Ecotoxicity
- Land use (area occupied in m²/year)
- Depletion of mineral and fossil resources
- Biodiversity (number of species or density of vascular plants representative of species diversity)
- Loss of life-supporting function (data on net primary production)
- Depletion of biotic resources

3. Results

3.1. Operation and Maintenance Phase

3.1.1. Emissions to Soil and Water Environment

The emissions associated with each process are determined by the conditions under which each of the stages operates. Likewise, as the entire system is waterproofed, there are no emissions into the soil. Furthermore, since the treated water obtained at the end of the treatment process is reused for olive tree cultivation, emissions to the water environment will not be taken into account. If, on the other hand, the treated water were to be discharged into the public water domain (marine environment, watercourse, or subsoil), these emissions would be considered [5].

It should be noted that this study does not take into account the impact generated by the water used to irrigate the olive trees due to existing limitations. Likewise, an LCA

could be considered for the olive trees in which the water needed for irrigation is obtained from the storage pond. In this case, it is considered that the treated water is kept in the storage pond without taking into account what happens to it afterward [1].

Therefore, the only emissions that will occur in the Santa Lucia treatment system will be emissions to the atmosphere in the form of CO₂, CH₄, H₂S, H₂O, or N₂, depending on the operating conditions.

3.1.2. Atmospheric Emissions

To calculate these emissions, it is first necessary to determine the quantity of BOD₅ eliminated, which can then be related to the amount of biogas produced. In this case, the characterization of the water entering the plant is available, but the BOD₅ parameter has not been included in the study (Table 1). Therefore, these values will be estimated based on the theoretical yields [11]. The emissions to air will be contingent upon the biodegradable organic matter removed at each stage of the process. To achieve this, it is essential to ascertain which treatments are anaerobic or operate under aerobic conditions in an overloaded state. In this instance, the anaerobic lagoon and vertical-flow system represent the anaerobic processes that will result in the generation of the aforementioned emissions. No treatments operate at a higher discharge level than that for which they are sized, and thus, no emissions are associated with this type of system [7]. This information is shown in Table 1.

Table 1. Input water characterization.

Date	Influent—Santa Catarina					
	TSS (mg/L)	COD _T (mgO ₂ /L)	COD _S (mgO ₂ /L)	TN (mgN/L)	NO ₃ (mgN/L)	TP (mg P/L)
22/Dec	725	2025	1248	167	0.66	20
29/Dec	500	1590	639	226	1.2	21
12/Jan	1075	1504	416	241	0.09	26
19/Jan	475	1146	543	200	1.1	22
26/Jan	900	2018	489	231	0.69	15
2/Feb	175	340	322	139	0.47	16
9/Feb	600	1700	704	230	0.71	36
16/Feb	725	1872	718	195	0.68	11
23/Feb	825	1484	563	227	0.76	19
2/Mar	800	1638	738	293	0.88	29
9/Mar	350	1124	666	241	0.96	20

For every kg of BOD₅ removed, 0.25 kg of methane is produced, i.e., approximately 0.42 kg of biogas, with 60% of the biogas being methane and 40% carbon dioxide. This ratio gives the emissions generated in each stage.

To know the kg/year of BOD₅, it is necessary to know the flow with which it operates. From the data obtained in 2018, it is estimated that the average daily flow is 198 m³.

Anaerobic lagoons:

In the absence of a characterization of the water entering the plant via the theoretical elimination yields of the anaerobic lagoons, it is possible to obtain an estimate of the input parameters by taking into account the characteristics of the water leaving the lagoons. This allows the quantity of BOD₅ removed during the process to be determined. The BOD₅ removal efficiency in an anaerobic lagooning system is approximately 40–50% (Manual for the Implementation of Purification Systems in Small Towns). If an average efficiency is employed, namely 45% removal, the inlet water to the system is found to possess the following characteristics, as detailed in Tables 2 and 3 [8,9].

1. The kg/year of BOD₅ eliminated is calculated using the values shown in Table 2:

$$96 \text{ mg/L} = 0.096 \text{ kg/m}^3 \times 198 \text{ m}^3/\text{day} \times 365 \text{ days/year} = 6938 \text{ kg/year DBO}_5 \text{ eliminated} \quad (1)$$

Table 2. Anaerobic lagoon parameters.

	BOD ₅ (mg/L)
Anaerobic lagoon inlet	310
Anaerobic lagoon outlet	214
Performance elimination	45%

Table 3. Parameters of the vertical-flow system.

	BOD ₅ (mg/L)
Entrance	214
Exit	47
Performance elimination	78%

The water inlet to the lagoons is regulated by a chamber located at the beginning of the lagoons. The dimensions of the chamber are 1 m wide, 1 m long, and 1 m high.

2. The kg of biogas emitted are obtained:

$$6938 \text{ kg DBO}_5/\text{year DBO}_{\text{eliminada}} \times 0.42 \text{ kg biogas/kg DBO}_5 = 2914 \text{ kg biogas/year} \quad (2)$$

The steel used in the manhole closure plate is calculated according to the dimensions of the manhole and the thickness of the door, which are 1 m long, 1 m wide, and 0.02 m thick.

3. Knowing that the biogas mixture is composed of 60% methane and 40% CO₂, these emissions are calculated:

$$2914 \text{ kg biogas/year} \times 60 \text{ kg CH}_4/100 \text{ kg biogas} = 1748 \text{ kg CH}_4/\text{year} \quad (3)$$

$$= 1.1 \text{ kg CH}_4/\text{year-h.e.}$$

$$2914 \text{ kg biogas/year} \times 40 \text{ kg CO}_2/100 \text{ kg biogas} = 1165 \text{ kg CO}_2/\text{year} = 0.73 \text{ kg CO}_2/\text{year-h.e.} \quad (4)$$

Vertical-flow system:

The lagoons are waterproofed with a 1.52 mm thick EPDM sheet and a 300 g/m² geotextile sheet underneath the EPDM sheet. The geotextile sheet is made of polypropylene. In this case, more EPDM and geotextile are required because in addition to covering the ground, the sides (4 m high) must be covered, and there is material left over at the top of the wetland (0.5 m will be considered).

1. The kg/year of BOD₅ eliminated is calculated using the values shown in Table 2, Figures 3 and 4:

$$167 \text{ mg/L} = 0.167 \text{ kg/m}^3 \times 198 \text{ m}^3/\text{day} \times 365 \text{ days/year} = 12069 \text{ kg/year DBO}_5 \text{ eliminated} \quad (5)$$

Approximately 15 m of piping is required in each of the lagoons, with three lagoons totaling 45 m. PE pipes with a diameter of 160 mm and a thickness of 3.0 mm are used.

2. The weight of biogas emitted is obtained:

$$12,069 \text{ kg DBO}_5/\text{year DBO eliminated} \times 0.42 \text{ kg biogas/kg DBO}_5 = 5069 \text{ kg biogas/year} \quad (6)$$

Calculation is made of the perimeter of the cylinder with a diameter of 160 mm and calculation of the perimeter of the cylinder with a diameter of 154 mm by subtracting and

multiplying by the length to obtain the amount of PE required. Then, we multiply by the density of the cylinder and obtain the kg of PE required.

- Knowing that the biogas mixture is composed of 60% methane and 40% CO₂, these emissions are calculated:

$$5069 \text{ kg biogas/year} * 60 \text{ kg CH}_4/100 \text{ kg biogas} = 6041 \text{ kg CH}_4/\text{year} = 3.78 \text{ kg CH}_4/\text{year-h.e.} \quad (7)$$

$$5069 \text{ kg biogas/year} * 40 \text{ kg CO}_2/100 \text{ kg biogas} = 2028 \text{ kg CO}_2/\text{year} = 1.27 \text{ kg CO}_2/\text{year-h.e.} \quad (8)$$

The excavated land corresponds to the sum of the dimensions of the three anaerobic lagoons and the inlet chamber, which is 2300 m³ in total. The anaerobic lagoons occupy a total of 574.99 m² so they will have a much more relevant weight than the rest of the processes.

Figures 3 and 4 show the primary and secondary effluent parameters of ETAR Santa Catarina. Moreover, Table 4 shows the generation of waste and/or byproducts.

Table 4. Generation of waste and/or byproducts.

Local of Intervenor	Type of Intervention	Frequency	Material Used
network	Pressure cleaning	2 times per week	Pit road
Estação de Bombagem	maintenance cleaning	2 times per week	Pit lorry/operator
Pre-treatment	permanent cleaning of thick waste	daily and permanent	operator
Drying bed	Deferred separation of waste		conveyor of waste
Separator from decanter	waste removal fluctuant	three times a week	clamshell
	Bottom cleaning	when necessary	Pit lorry
Decanter	Removal of waste fluctuating	permanent due to the accumulation of two residues	Cable net
	operation	2 in simultaneous and 1 in standby	
	removal of slats	from 2 to 2 months (for 30 months)	manager
Brita filter	cleaning and effluent removal	every 4 months with pond water discharge	Fossa road
	removal of gravel	every 3 years and checking gravel quality	
Chasse	cleaning	2 times per month	Lorry/manager
	change/operation of box	1 time per week	operator
		rest 2 weeks for each operator	operator
Filtro de Areia	Sand Filter change in operation	box one box for each week	operator
Lagoa	Lagoon Emptying/cleaning Lagoon	when necessary	manager and operator

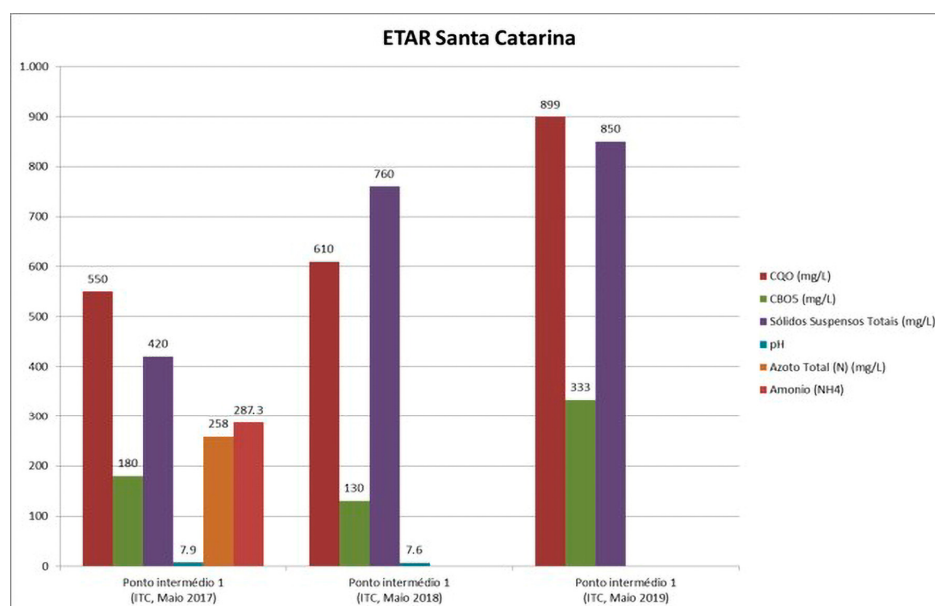


Figure 3. Primary effluent parameters of ETAR Santa Catarina [10,11].

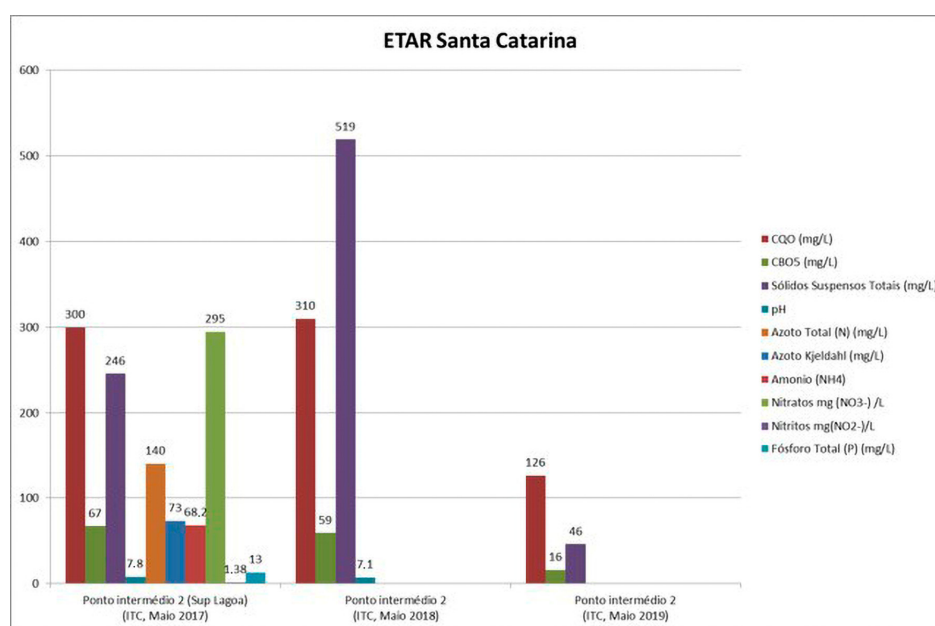


Figure 4. Secondary effluent parameters of ETAR Santa Catarina [10,11].

The activities described in the maintenance manuals are not being carried out. Consequently, waste is being generated, and the quantities generated in the different cases will be estimated, as shown in Table 4 [10,11].

Roughing Grid

The roughing system installed is in the pumping station outside the treatment plant, i.e., the management of this waste does not belong to the plant, but it will be taken into account as it is waste generated as a result of wastewater treatment. The data will be obtained by estimating the production of Santa Lucia.

If the waste generated in Santa Lucia is 10 kg per week, taking into account that the water of 1600 equivalent inhabitants is treated in this system, 32 kg of waste will be generated per week, therefore:

$$32 \text{ kg/week} \times 52 \text{ weeks/1 year} \times 1/1600 \text{ h.e.} = 1.04 \text{ kg/(year-h.e.)}$$

Anaerobic Lagoon

In these systems, the flotsam that appears on the surface of the lagoons must be removed, using a pool leaf catcher and taking advantage of the moments when the prevailing winds accumulate the flotsam. This quantity of waste is not considerable and will therefore not be taken into account in the analysis. However, every 5–10 years, the sludge that has accumulated at the bottom of the lagoons in operation will be purged. It is estimated that the sludge production is 30–40 L/h.e. per year (manual for the implementation of wastewater treatment systems in small settlements). As a result, it can be estimated that the amount of waste in this case will be about 35 L/h.e. per year of sludge on a wet basis [19,20].

Vertical-Flow Wetlands

From similar cases such as the purification system in St Lucia, the following is considered.

In these wetlands, the sludge that has accumulated on the surface of the gravel during the operating period is left to dehydrate. Once it has dried, the surface is raked to remove them and prepare the system for the new period of operation. This operation is carried out once a month, taking into account the two operating wetlands. This mainly produces solids in the form of dewatered primary sludge and leaf debris. This is considered to be waste to be sent to landfill. The amount of waste obtained monthly from the vertical wetlands is 15 kg.

$$15 \text{ kg/month} \times 12 \text{ meses/1 año} \times 1/1600 \text{ h.e.} = 0.11 \text{ kg/(año-h.e.)}$$

LCV Impact Assessment of the Studied Systems

For the correct development of the LCA methodology, it is necessary to use a software tool to save time and achieve reliable results. The basic function of these is to perform the material and energy balances on the specific process and to allocate emissions, energy uses, etc., normalized on a common basis. In this case, SimaPro version 9.1.1 is used.

For this LCA, we work with the most appropriate database, Ecoinvent v3.7.1, as it is an improvement of the BUWAL 250 and ETH databases, with more than 4000 processes belonging to different sectors.

The methodology used in the study is the ILCD 2011, as it will be the reference methodology for the EU Environmental Footprints, with the impact categories shown below:

- Climate change
- Depletion of the ozone layer
- Ecotoxicity to freshwater ecosystems
- Human toxicity (carcinogenic effects)
- Inorganic particles with respiratory effects
- Ionizing radiation and its effects on human health
- Photochemical ozone formation
- Acidification
- Terrestrial eutrophication
- Aquatic eutrophication
- Freshwater ecotoxicity
- Depletion of resources (water, minerals, fossils)
- Land transformation

It should also be noted that the IPCC 2013 methodology is used to calculate carbon footprint [24].

- Assessment and interpretation of the impacts of the construction phase.

- According to the results obtained in the impact assessment of the construction phase (Figure 3), it can be seen that the passage and pipeline area generate greater effects on the environment. It is believed that this is because more impact-generating materials are used in this stage than in other stages. It should also be noted that the greatest occupation of the land is at this stage. When compared to the rest of the processes, the other stages generate very low impacts.
- As illustrated in Table 5, the storage and passage areas and pipelines consistently represent the processes that generate the most significant impact. The considerable size of these two stages in comparison to the remainder may be a contributing factor to the elevated impact generation. Additionally, the negative values associated with “water resource depletion” in these passage areas are noteworthy. This may be linked to the processing of the steel within the factory itself. An assessment and interpretation of the impacts of the operational and maintenance phase [26] is essential. A comparison of the most significant impact categories (see Table 5) reveals that the “freshwater ecotoxicity” category exhibits the highest level of impact. The source of the elevated values for this impact remains uncertain. Table 5 provides a more comprehensive overview of the impacts generated at each stage of the process, as outlined in references [19,20].

Table 5. Impact assessment of the construction phase by impact category (characterization).

Freshwater Ecotoxicity	CTUe	37.7	11.2	26.6	77.5	164	746
Climate change	kg CO ₂ eq	0.816	6.68	2.01	7.25	68.9	17.1
Land use	kg C deficit	0.645	22.7	6	21.1	165	103
Ionizing radiation HH	kBq U235 eq	0.0555	0.254	0.358	0.545	2.21	1.37
Terrestrial eutrophication	molc N eq	0.00995	0.0791	0.0225	0.069	0.749	0.202
Adification	molc H+ eq	0.00487	0.0225	0.0139	0.0392	0.247	0.108
Photochemical ozone form	kg NMVOC eq	0.00273	0.0202	0.00891	0.0251	0.197	0.0579
Particulate matter	kg PM2.5 eq	0.00133	0.00197	0.00183	0.00517	0.022	0.0268
Marine eutrophication	kg N eq	0.000933	0.00711	0.00211	0.00646	0.084	0.019
Freshwater eutrophication	kg P eq	0.000245	0.000732	0.000363	0.00102	0.00719	0.00469
Mineral, fossil & ren resources	kg Sb eq	0.000111	0.0000281	0.0000823	0.000243	0.000252	0.00219

There is a contribution to impact generation of the operation and maintenance phase. It can be seen that maintenance of the vertical-flow wetland is the process that generates the greatest impact. It should also be noted that the roughing grate does not generate any impact despite the generation of waste produced there and that, despite the amount of sludge extracted in the anaerobic lagoon, it generates a lower impact than the rest of the stages.

Of particular interest is the presence of only two impact categories in the assessment. When entering the data into the program, the only two impact categories that occur are “climate change” and “photochemical ozone formation”, while the rest have a value of zero, i.e., they do not occur.

This chapter presents a comparative analysis of the impacts generated during the construction phase and those generated during the operation and maintenance phase.

Only two impact categories are shared between the construction, operation, and maintenance phases. In the remaining categories, no impact is identified during the latter phase. Similarly, the operation and maintenance phase results in a more significant impact within the “climate change” category. This is attributable to the removal of organic matter across all stages considered. However, the operation and maintenance phases generate a considerably lower impact in the “photochemical ozone formation” category than the construction phase. It is important to note that, as this is a biological purification system in

which the energy input is zero, the operation phase is only affected by the emissions generated in the different stages and the waste and/or byproducts obtained in each of these stages. However, the construction phase entails the utilization of considerably larger quantities of materials and entails greater distances to be traversed by means of transport [28].

4. Discussion and Conclusions

During the construction phase, the highest values of environmental impact are obtained. Therefore, it is possible to improve the environmental performance of the construction process using less environmentally harmful materials. For instance, the utilization of natural cements, which consume less energy due to their lower firing temperatures, or the substitution of steel with other metals in the fabrication of grating components could be considered. The substitution of thermoplastic polyolefin for EDPM is a potential avenue for improvement. An additional potential enhancement would be the implementation of automated and regular maintenance systems, which could be powered by solar energy.

As in previous studies, in the construction stage, the materials that contribute most to the generation of impact are the steel and concrete used. In the impact of this type of steel and concrete, chosen from the database of the computer program, it can be seen how the impacts of the production of these materials in the factories at source are accounted for, which is why they have such a negative impact in this analysis. It should also be noted that the impact category “human toxicity, carcinogenic effects” is the highest. This is due to the use of steel and concrete. However, the impact category “land use” compared to the above mentioned is much lower.

Even though the consumption of materials is lower in the operation and maintenance phase, and it is a plant that operates at zero energy cost, two relevant impact categories are obtained in the study. The “climate change” category is the highest in this case, significantly outweighing the other categories. A total of 124 kg CO₂ equivalent was generated during the operation and maintenance phase of the plant.

When comparing the impacts generated in both phases, it can be seen that the maintenance and operation phase generates a greater impact than the construction phase in the “climate change” impact category. Even though the installations operate at zero energy cost, the maintenance phase is higher than the construction phase. The highest impact category in both cases is “climate change”, which produces 227 kg CO₂ equivalent. Of this, 103 kg of CO₂ corresponds to the construction phase, i.e., 45% of the total emissions, so once again, it can be seen that this first phase contributes less to the generation of impact.

If a comparison is made of the impacts generated at the Santa Catarina WWTP located on the island of Cape Verde, made up of the previously described stages, with other treatment plants that operate similarly, the data obtained in this case are similar to those obtained in the other studies. In conclusion, the overall impact of the installation is not excessively high when compared with wastewater treatment plants that have stages with high energy costs, such as activated sludge, MBR, etc. Even so, it should be noted that the impact of this installation would be lower if the program did not use materials from the database that take into account the manufacturing part of the same.

Author Contributions: Conceptualization, N.C., P.M., G.M.R., C.G., C.A.M.P. and F.A.L.Z.; Data curation, N.C., P.M., G.M.R., C.A.M.P. and F.A.L.Z.; Formal analysis, C.A.M.P., G.M.R., T.d.P.G. and F.A.L.Z.; Funding acquisition, G.M.R., F.A.L.Z. and C.A.M.P.; Investigation, N.C., P.M., G.M.R., T.d.P.G. and C.A.M.P.; Methodology, C.G., P.M., G.M.R., and F.A.L.Z.; Project administration, G.M.R., C.G. and C.A.M.P.; Resources, N.C., P.M., C.G. and G.M.R.; Software, N.C., G.M.R., and C.A.M.P.; Supervision, C.A.M.P., G.M.R. and, F.A.L.Z.; Validation, G.M.R., C.A.M.P., T.d.P.G. and F.A.L.Z.; Visualization, N.C., G.M.R., C.A.M.P. and, F.A.L.Z.; Writing—original draft, N.C., T.d.P.G. and G.M.R.; Writing—review and editing, N.C., G.M.R., C.A.M.P. and, F.A.L.Z. All authors have read and agreed to the published version of the manuscript.

Funding: This work has been financed by own funds of the University of Las Palmas de Gran Canaria 2023, with the title “Application of active and collaborative learning techniques in laboratories as work environments. Design, development and adaptation of equipment for its application in practical sessions” and PIE code 2023-60 of the University of Las Palmas de Gran Canaria. and the open-access with IDIWATER project (1/MAC/1/1.1/0022), co-financed by the European INTERREG MAC Programme 2021-2027

Acknowledgments: The authors are grateful for the invaluable collaboration of Aguas de Santiago (Cape Verde) and the contribution of the IDIWATER project (1/MAC/1/1.1/0022), co-financed by the European INTERREG MAC Programme 2021-2027.

Data Availability Statement: Data is contained within the article.

Conflicts of Interest: The authors declare no conflict of interest.

References

- Corbella, C.; Puigagut, J.; Garfí, M. Life cycle assessment of constructed wetland systems for wastewater treatment coupled with microbial fuel cells. *Sci. Total Environ.* **2017**, *584–585*, 355–362.
- Kadlec, R.; Wallace, S. *Treatment Wetlands*, 2nd ed.; CRC Press: Boca Raton, FL, USA, 2008.
- Saeed, T.; Sun, G. A review on nitrogen and organics removal mechanisms in subsurface flow constructed wetlands: Dependency on environmental parameters, operating conditions and supporting media. *J. Environ. Manag.* **2012**, *112*, 429–448.
- Wu, H.; Zhang, J.; Ngo, H.H.; Guo, W.; Hu, Z.; Liang, S.; Fan, J.; Liu, H. A review on the sustainability of constructed wetlands for wastewater treatment: Design and operation. *Bioresour. Technol.* **2014**, *175*, 594–601.
- Bohnes, F.A.; Hauschild, M.Z.; Schlundt, J.; Laurent, A. Life cycle assessments of aquaculture systems: A critical review of reported findings with recommendations for policy and system development. *Rev. Aquac.* **2018**, *11*, 1061–1079.
- ISO 14040; Environmental Management—Life Cycle Assessment—Principles and Framework. International Standard: Geneva, Switzerland, 2006.
- Lutterbeck, C.A.; Kist, L.T.; Lopez, D.R.; Zerwes, F.V.; Machado, L. Life cycle assessment of integrated wastewater treatment systems with constructed wetlands in rural areas. *J. Clean. Prod.* **2017**, *148*, 527–536.
- Garfí, M.; Flores, L.; Ferrer, I. Life Cycle Assessment of wastewater treatment systems for small communities: Activated sludge, constructed wetlands and high rate algal ponds. *J. Clean. Prod.* **2017**, *161*, 211–219.
- Lopsik, K. Life cycle assessment of small-scale constructed wetland and extended aeration activated sludge wastewater treatment system. *Int. J. Environ. Sci. Technol.* **2013**, *10*, 1295–1308.
- Nasution, M.A.; Wibawa, D.S.; Ahamed, T.; Noguchi, R. Comparative environmental impact evaluation of palm oil mill effluent treatment using a life cycle assessment approach: A case study based on composting and a combination for biogas technologies in North Sumatera of Indonesia. *J. Clean. Prod.* **2018**, *184*, 1028–1040.
- Flores, L.; García, J.; Pena, R.; Garfí, M. Constructed wetlands for winery wastewater treatment: A comparative Life Cycle Assessment. *Sci. Total Environ.* **2018**, *659*, 1567–1576.
- Hassan, A.S.A.; Ahmed, H.Y.; Fadhil, H.A.; Zeghid, M.; Chehri, A.; El-Mottaleb, S.A.A. Implementation of Shared Laser-LED Sources in a Free Space Optics (FSO) Network under Environmental Impact. *Electronics* **2023**, *12*, 801.
- DiMuro, J.L.; Guertin, F.M.; Helling, R.K.; Perkins, J.L.; Romer, S. A Financial and Environmental Analysis of Constructed Wetlands for Industrial Wastewater Treatment. *J. Ind. Ecol.* **2014**, *18*, 631–640.
- Saeed, T.; Afrin, R.; Al Mueyed, A.; Sun, G. Treatment of tannery wastewater in a pilot-scale hybrid constructed wetland system in Bangladesh. *Chemosphere* **2012**, *88*, 1065–1073.
- Saeed, T.; Khan, T. Constructed wetlands for industrial wastewater treatment: Alternative media, input biodegradation ratio and unstable loading. *J. Environ. Chem. Eng.* **2019**, *7*, 103042.
- Saeed, T.; Muntaha, S.; Rashid, M.; Sun, G.; Hasnat, A. Industrial wastewater treatment in constructed wetlands packed with construction materials and agricultural by-products. *J. Clean. Prod.* **2018**, *189*, 442–453.
- Saeed, T.; Yasmin, N.; Sun, G.; Hasnat, A. The use of biochar and crushed mortar in treatment wetlands to enhance the removal of nutrients from sewage. *Environ. Sci. Pollut. Res.* **2018**, *26*, 586–599.
- Vandepaer, L.; Treyer, K.; Mutel, C.; Bauer, C.; Amor, B. The integration of long-term marginal electricity supply mixes in the ecoinvent consequential database version 3.4 and examination of modeling choices. *Int. J. Life Cycle Assess.* **2019**, *24*, 1409–1428.
- Welz, T.; Hirschier, R.; Hilty, L. Environmental impacts of lighting technologies—Life cycle assessment and sensitivity analysis. *Environ. Impact Assess. Rev.* **2011**, *31*, 334–343.
- Niero, M.; Pizzol, M.; Bruun, H.G.; Thomsen, M. Comparative life cycle assessment of wastewater treatment in Denmark including sensitivity and uncertainty analysis. *J. Clean. Prod.* **2014**, *68*, 25–35.
- Zhou, W.; Guan, K.; Peng, B.; Margenot, A.; Lee, D.; Tang, J.; Jin, Z.; Grant, R.; DeLucia, E.; Qin, Z.; et al. How does uncertainty of soil organic carbon stock affect the calculation of carbon budgets and soil carbon credits for croplands in the U.S. Midwest? *Geoderma* **2023**, *429*, 116254.
- Rodríguez-García, G.; Molinos-Senante, M.; Hospido, A.; Hernández-Sancho, F.; Moreira, M.; Feijoo, G. Environmental and economic profile of six typologies of wastewater treatment plants. *Water Res.* **2011**, *45*, 5997–6010.

23. Idrees, M.; Akbar, A.; Saeed, F.; Gull, M.; Eldin, S.M. Sustainable production of Low-Shrinkage fired clay bricks by utilizing waste plastic dust. *Alex. Eng. J.* **2023**, *68*, 405–416.
24. Bošković, I.; Radivojević, A. Life cycle greenhouse gas emissions of hemp-lime concrete wall constructions in Serbia: The impact of carbon sequestration, transport, waste production and end of life biogenic carbon emission. *J. Build. Eng.* **2023**, *66*, 105908.
25. Wang, C.-Q.; Chen, S.; Huang, D.-M.; Huang, Q.-C.; Li, X.-Q.; Shui, Z.-H. Safe environmentally friendly reuse of red mud modified phosphogypsum composite cementitious material. *Constr. Build. Mater.* **2023**, *368*, 130348.
26. Menghini, M.; Pedrazzani, R.; Feretti, D.; Mazzoleni, G.; Steimberg, N.; Urani, C.; Zerbini, I.; Bertanza, G. Beyond the Black Box of Life Cycle Assessment in the Wastewater Treatment Plants: Which Help from the Bioassays? *Water* **2023**, *15*, 960.
27. Renou, S.; Thomas, J.; Aoustin, E.; Pons, M. Influence of impact assessment methods in wastewater treatment LCA. *J. Clean. Prod.* **2008**, *16*, 1098–1105.
28. Owsianiak, M.; Laurent, A.; Bjørn, A.; Hauschild, M.Z. IMPACT 2002+, ReCiPe 2008 and ILCD's recommended practice for characterization modelling in life cycle impact assessment: A case study-based comparison. *Int. J. Life Cycle Assess.* **2014**, *19*, 1007–1021.

Disclaimer/Publisher's Note: The statements, opinions and data contained in all publications are solely those of the individual author(s) and contributor(s) and not of MDPI and/or the editor(s). MDPI and/or the editor(s) disclaim responsibility for any injury to people or property resulting from any ideas, methods, instructions or products referred to in the content.

5. A Comparative analysis of brewery effluents in Africa.

Análisis comparativo de los efluentes de la industria cervecera en África

A comparative analysis of brewery effluents in Africa

■ ■ ■ ■ ■
Nicolau Penicela-Chirinha¹, Paulino-Vasco Mariano-Muguirrima¹, Federico León-Zerpa^{2*}, Carlos-Alberto Mendieta-Pino²
¹ UniZambeze (Mozambique)
² IUNAT, ULPGC (Spain)

DOI: <https://doi.org/10.52152/D11361>

Las aguas residuales producidas por la industria cervecera presentan características complejas, lo que plantea importantes retos a los ingenieros medioambientales a la hora de buscar métodos eficaces para su tratamiento y reutilización. El objetivo principal de este estudio es comparar las propiedades fisicoquímicas de las aguas residuales de cervecerías de Mozambique y Sudáfrica. Esta selección se basa en el importante consumo de agua que conllevan los procesos de fabricación de cerveza, así como en la necesidad crítica de adoptar prácticas adecuadas de gestión de efluentes. Para esta investigación se recogieron muestras y se analizaron sus parámetros físicos y químicos. Los resultados fueron comparados con datos de cervecerías de otros países de la región, con la legislación vigente en Mozambique y con valores reportados en diversos estudios encontrados en la literatura [1] y detallados en la Tabla 1.

El cuadro 2 presenta una evaluación numérica comparativa de los datos obtenidos a partir de diversos análisis de laboratorio de las muestras recogidas en la fábrica de cerveza de Mozambique para este estudio. Estos resultados se comparan con

Parámetro	Análisis de muestra	Malteado	Oxidación-Reducción
pH	5.1 – 6.4	3 – 12	4.4. – 12.2
Temperatura (°C)	18 – 20	18– 40	25.3 – 37
Alcalinidad (mg/l)	240 – 265	–	–
Conductividad (µS/cm)	2120 – 3480	–	1893 – 6017
TDS (mg/l)	2335 – 3246	2020 – 5940	1043 – 2572
Turbidez (NTU)	53.42 – 349.92	187 – 2000	303 – 1039
Fosfato (mg/l)	15.12 – 37.22	10 – 50	–
Nitrógeno (mg/l)	22.03 – 35.09	25 – 80	13.7 – 106
DBO (mg/l)	1490 – 3241	1200 – 3600	–
DQO (mg/l)	2670 – 3798	2000 – 6000	3447 – 11813

Cuadro 2: Datos comparativos de los distintos parámetros de subproductos en los procesos de malteado [2] y de las reacciones de oxidación-reducción [3].

los de estudios anteriores realizados por diferentes investigadores.

El efluente presenta un perfil ácido variable con una ligera tendencia a la acidez, como indican sus valores de pH. Esta débil característica ácida de las aguas residuales de la cervecería mozambiqueña puede atribuirse a la utilización de ácidos fuertes y moderados, como el ácido nítrico y el ácido fosfórico, durante los procesos de limpieza e higienización, que luego son neutralizados por el vertido de una base fuerte (sosa cáustica) utilizada durante el proceso de llenado.

En conclusión, la DQO analizada en Mozambique se sitúa en el mismo rango que las referencias, aunque ligeramente por debajo. Del mismo modo, la DBO se encuentra dentro del mismo rango que otros estudios. La turbidez, aunque inferior a la de otras referencias [2,3], se

mantiene dentro de un rango aceptable. Los niveles de fosfato y nitrógeno también se encuentran dentro del rango esperado para las aguas residuales de cervecería.

REFERENCIAS

[1] N. Chirinha et al, "Characterisation of wastewater from the Mozambican brewery: characteristic comparison with brewery effluents from other countries." DYNA Energía y Sostenibilidad, Jan.-Dec. 2024, vol. 13, n. 1, DOI: <https://doi.org/10.52152/DES11189>.
[2] A. Karlović, A. Jurić, N. Čorić, K. Habschied, V. Krstanović, and K. Mastanjević, "By-products in the malting and brewing industries-re-usage possibilities," Fermentation, vol. 6, no. 3. MDPI AG, 2020. doi: 10.3390/ FERMENTATION6030082.
[3] S. M. Khumalo, B. F. Bakare, S. Rathilal, and E. K. Tetteh, "Characterisation of South African Brewery Wastewater: Oxidation-Reduction Potential Variation," Water (Switzerland), vol. 14, no. 10, May 2022, doi: 10.3390/w14101604.
[4] A. G. Rao, T. S. K. Reddy, S. S. Prakash, J. Vanajakshi, J. Joseph, and P. N. Sarma, "pH regulation of alkaline wastewater with carbon dioxide: A case study of treatment of brewery wastewater in UASB reactor coupled with absorber," Bioresour Technol, vol. 98, no. 11, pp. 2131-2136, Aug. 2007, doi: 10.1016/j.biortech.2006.08.011.

AGRADECIMIENTOS

Artículo cofinanciado por el proyecto MITIMAC (MAC2/1.1a/263).

Parámetro	Malteado	Oxidación-Reducción	Dióxido de carbono
pH	4- 12	4.4. – 12.2	3 – 12
Temperatura (°C)	24- 30	25.3 – 37	18 – 40
Alcalinidad (mg/l)	–	–	–
Conductividad (µS/cm)	–	1893 – 6017	–
TDS (mg/l)	2020 – 5940	1043 – 2572	2020 – 5940
Turbidez (NTU)	187 – 2000	303 – 1039	2901- 3000
Fosfato (mg/l)	2 – 43	–	10 -50
Nitrógeno (mg/l)	16 – 67	13.7 – 106	25 – 80
DBO (mg/l)	1600 – 4000	–	1200 – 3600
DQO (mg/l)	1000 – 6000	3447 – 11813	2000 – 6000

Tabla 1: Representación de las características de los subproductos de las aguas residuales del malteado [2], de los procesos redox [3] y de la generación de dióxido de carbono [4].

6. Caracterización de las aguas residuales de la cervecería mozambiqueña: comparación de características con efluentes de cervecerías de otros países

 Energía y Sostenibilidad	CARACTERIZACIÓN DE LAS AGUAS RESIDUALES DE LA CERVECERÍA MOZAMBIQUEÑA: COMPARACIÓN DE CARACTERÍSTICAS CON EFLUENTES DE CERVECERÍAS DE OTROS PAÍSES	Disciplina UNESCO 3308.06
ARTICULO DE INVESTIGACIÓN	Nicolau Penicela-Chirinza, Paulino-Vasco Mariano-Muguirrima, Federico León-Zerpa*, Carlos-Alberto Mendieta-Pino	

CARACTERIZACIÓN DE LAS AGUAS RESIDUALES DE LA CERVECERÍA MOZAMBIQUEÑA: COMPARACIÓN DE CARACTERÍSTICAS CON EFLUENTES DE CERVECERÍAS DE OTROS PAÍSES

CHARACTERISATION OF WASTEWATER FROM THE MOZAMBIKAN BREWERY: CHARACTERISTIC COMPARISON WITH BREWERY EFFLUENTS FROM OTHER COUNTRIES

Nicolau Penicela-Chirinza¹, Paulino-Vasco Mariano-Muguirrima¹, Federico León-Zerpa^{2*}, Carlos-Alberto Mendieta-Pino²

1 Universidad de Zambeze (UniZambeze), Mozambique.

2 Instituto de Estudios Ambientales y Recursos Naturales (iUNAT), Universidad de Las Palmas de Gran Canaria (ULPGC).

* federico.leon@ulpgc.es

Recibido: 12/feb./2024 – Revisando: 12/Mar./2024 - Aceptado: 11/sep./2024 - DOI: <https://doi.org/10.52152/DES11189>

To cite this article: LEON-ZERPA, Federico, CHIRINZA, Nicolau Penicela, MUGUIRRIMA, Paulino Vasco et al. CHARACTERISATION OF WASTEWATER FROM THE MOZAMBIKAN BREWERY: CHARACTERISTIC COMPARISON WITH BREWERY EFFLUENTS FROM OTHER COUNTRIES. DYNA Energía y Sostenibilidad, Jan.-Dec. 2024, vol. 13, n. 1, DOI: <https://doi.org/10.52152/DES11189>

ABSTRACT:

Wastewater from the brewery industry has complex characteristics and is a challenge for environmental engineers in their search for treatment and reuse. The main objective of this study is to compare the physicochemical characteristics of wastewater from the brewery industry in Mozambique and South Africa. The choice is due to the large volumes of water used by the brewery industry in its production processes, as well as the effluent management model that must be adopted. For this study, samples were collected and their physical and chemical parameters analysed. The results were compared with different breweries industries in other countries in the area, the legislation in force in Mozambique and the values estimated in the different articles considered in the literature. With the results obtained, it was possible to characterise the wastewater from the brewery industry in Mozambique in order to find the best method of treating these effluents in a more environmentally friendly way.

Keywords: Environmental management, brewery industries, wastewater, treatment systems.

RESUMEN:

Las aguas residuales de la industria cervecera tienen características complejas y constituyen un reto para los ingenieros medioambientales en su búsqueda de tratamiento y reutilización. El principal objetivo de este estudio es comparar las características fisicoquímicas de las aguas residuales de la industria cervecera de Mozambique y Sudáfrica. La elección se debe a los grandes volúmenes de agua utilizados por la industria cervecera en sus procesos de producción, así como al modelo de gestión de efluentes que debe adoptarse. Para este estudio se recogieron muestras y se analizaron sus parámetros físicos y químicos. Los resultados se compararon con diferentes industrias cerveceras de otros países de la zona, con la legislación vigente en Mozambique y con los valores estimados en los diferentes artículos considerados en la bibliografía. Con los resultados obtenidos, fue posible caracterizar las aguas residuales de la industria cervecera en Mozambique para encontrar el mejor método de tratamiento de estos efluentes de forma más respetuosa con el medio ambiente.

Palabras clave: Gestión medioambiental, industrias cerveceras, aguas residuales, sistemas de tratamiento.

1.- INTRODUCCION

En los últimos años, con el desarrollo de la economía mundial, la escasez de energía y la contaminación ambiental se han convertido en dos de los principales problemas a los que se enfrenta la humanidad. El desarrollo de una combustión eficiente y limpia de la energía fósil, la utilización integral de combustibles renovables y la reducción de la contaminación ambiental se han convertido en requisitos ineludibles para el desarrollo social sostenible [1,2]. La contaminación del agua es uno de los principales problemas a los que se enfrentan las sociedades, que llevan varias décadas degradando el medio ambiente a un ritmo cada vez mayor [3,4]. Las aguas residuales industriales constituyen una presión medioambiental, a pesar de que, en algunos casos, estas aguas son recogidas por una red de alcantarillado local, tratadas en una estación depuradora de aguas residuales urbanas (EDAR) y posteriormente vertidas al medio ambiente [3]. Cabe señalar que la degradación ambiental causada por el vertido de efluentes industriales ha aumentado considerablemente en África y en todo el mundo [4].

La legislación mozambiqueña (Ley nº 18/91) en su Capítulo IV, Sección I, Artículo 51, establece que la contaminación del agua consiste en la acción y el efecto de introducir materiales, formas de energía o la creación de condiciones que, directa o indirectamente,

	CARACTERIZACIÓN DE LAS AGUAS RESIDUALES DE LA CERVECERÍA MOZAMBIQUEÑA: COMPARACIÓN DE CARACTERÍSTICAS CON EFLUENTES DE CERVECERÍAS DE OTROS PAÍSES	Disciplina UNESCO 3308.06
ARTICULO DE INVESTIGACIÓN	Nicolau Penicela-Chirinza, Paulino-Vasco Mariano-Muguirrima, Federico León-Zerpa*, Carlos-Alberto Mendieta-Pino	

impliquen una alteración perjudicial de su calidad en relación con usos posteriores o con su función ecológica. El principal objetivo y novedad de este estudio es comparar las características fisicoquímicas de las aguas residuales de la industria cervecera de Mozambique y Sudáfrica. La industria cervecera, a pesar de ser una parte vital de la economía del país productor, consume grandes volúmenes de agua durante los procesos de producción, y posteriormente libera alrededor del 70% de la misma como aguas residuales [1]. La producción de 1 litro de cerveza consume 10 litros de agua y unos 7 litros acaban como aguas residuales. La cantidad de agua utilizada puede ser inferior a las cifras mencionadas en las cervecerías más grandes o si se utiliza tecnología avanzada (2,2-3,3 hL de agua por 1 hL de cerveza), pero la eliminación de las aguas residuales de las fábricas de cerveza sigue siendo un reto importante [5]. Los componentes de las aguas residuales de cervecería, como los granos de levadura sobrantes, producidos en dos etapas principales de la producción de cerveza (elaboración y envasado), son los que más contribuyen a la contaminación ambiental cuando se mezclan con los efluentes [3,4,6]. En términos de composición, las aguas residuales de las fábricas de cerveza tienen una elevada demanda química de oxígeno (DQO), junto con una demanda bioquímica de oxígeno de 5 días, sólidos totales, contaminantes de nitrógeno y fósforo, ácidos grasos volátiles, etc. Sin embargo, las concentraciones de nitrógeno y fósforo dependen del tipo de productos químicos utilizados en la fábrica de cerveza, así como de la cantidad de levadura utilizada en el efluente [7].

Sin embargo, los estudios demuestran que este efluente es peligroso cuando se expone al medio ambiente sin tratamiento previo. Este fenómeno apunta a la necesidad de encontrar mecanismos de tratamiento que conduzcan no sólo a la reducción de estos residuos, sino también a la devolución de agua más pura al medio ambiente, combinada con la reutilización del agua en diversas aplicaciones [8,9]. Los principales problemas medioambientales que plantean las operaciones de las fábricas de cerveza son el consumo de agua, las aguas residuales, la generación de residuos sólidos y subproductos, el uso de energía y las emisiones atmosféricas. Este fenómeno provoca problemas ambientales como la escasez de agua, el crecimiento excesivo de microbios indeseables que causan la pérdida de formas de vida acuática y problemas relacionados con la salud en las comunidades próximas a las zonas de vertido [1,8,9]. Como forma de minimizar la carga contaminante, existen dos tipos de sistemas de tratamiento de aguas residuales, los convencionales y los no convencionales [10]. En el sistema no convencional podemos encontrar la digestión anaerobia [1,10]. La investigación sistemática y un conocimiento más profundo del proceso anaerobio han dado lugar a la digestión anaerobia (DA), un proceso biológico en el que la materia orgánica se convierte en CH_4 y CO_2 se ha convertido en una tecnología más atractiva para el tratamiento de aguas residuales debido a sus bajos costes de capital y de explotación en comparación con otras tecnologías disponibles en las últimas décadas [3,11]. Hoy en día, las técnicas anaerobias se utilizan generalmente en industrias con un alto nivel de materia orgánica soluble y fácilmente biodegradable [3]. Este trabajo pretende aportar nuevos conocimientos sobre las características de las aguas residuales generadas en una fábrica de cerveza de Mozambique. Sin embargo, la caracterización ayudará en el desarrollo y diseño de un sistema óptimo de tratamiento de aguas residuales capaz de reducir significativamente los contaminantes.

El proceso de elaboración de la cerveza emplea una serie de operaciones por lotes para procesar las materias primas hasta el producto final y produce grandes cantidades de aguas residuales [12]. El agua está presente en todas las fases del proceso de producción [5,13]. La producción de 1 litro de cerveza consume 10 litros de agua y unos 7 litros acaban como aguas residuales. La cantidad de agua utilizada puede ser inferior a las cifras mencionadas en las cervecerías más grandes o si se utiliza tecnología avanzada (2,2-3,3 hL de agua por 1 hL de cerveza). La calidad de los efluentes de las fábricas de cerveza depende de varios procesos que tienen lugar en ellas [12]. La mayor cantidad de agua utilizada en las cervecerías se destina a la limpieza y desinfección de la industria cervecera (48%) [5]. Las aguas residuales de las cervecerías tienen un alto contenido de DQO procedente de materia orgánica como azúcares, almidón soluble, etanol, ácidos grasos volátiles, etc. Los estudios realizados sobre las aguas residuales de las cervecerías indican que suelen tener temperaturas que oscilan entre 25 C y 38 C, pero ocasionalmente alcanzan temperaturas mucho más elevadas, los niveles de pH varían entre 2 y 12 y están influidos por la cantidad y el tipo de productos químicos utilizados en la limpieza e higienización, que suelen ser sosa cáustica, ácido fosfórico y ácido nítrico [1,4,5]. Los efluentes de las fábricas de cerveza pueden caracterizarse por las propiedades antes mencionadas, así como por la cantidad de SST, DBO, DQO y la concentración de nitrógeno y fósforo [4].

	CARACTERIZACIÓN DE LAS AGUAS RESIDUALES DE LA CERVECERÍA MOZAMBIQUEÑA: COMPARACIÓN DE CARACTERÍSTICAS CON EFLUENTES DE CERVECERÍAS DE OTROS PAÍSES	Disciplina UNESCO 3308.06
ARTICULO DE INVESTIGACIÓN	Nicolau Penicela-Chirinza, Paulino-Vasco Mariano-Muguirrima, Federico León-Zerpa*, Carlos-Alberto Mendieta-Pino	

Tabla 1: Representación característica de las aguas residuales por diferentes fuentes subproductos en el malteado [5], oxidación-reducción [7] y dióxido de carbono [12].

Parámetro	Subproductos del malteado	Oxidación-Reducción	Dióxido de carbono
pH	4- 12	4.4 - 12.2	3 - 12
Temperatura (°C)	24- 30	25,3 - 37	18 - 40
Alcalinidad (mg/l)	_ _ _		
Conductividad (µS/cm)	_	1893 - 6017	_
TDS (mg/l)	2020 - 5940	1043 - 2572	2020 - 5940
Turbidez (NTU)	187 - 2000	303 - 1039	2901- 3000
Fosfato (mg/l)	2 - 43	_	10 -50
Nitrógeno (mg/l)	16 - 67	13,7 - 106	25 - 80
DBO (mg/l)	1600 - 4000	_	1200 - 3600
DQO (mg/l)	1000 - 6000	3447 - 11813	2000 - 6000

Conociendo el nivel de producción de aguas residuales en las fábricas de cerveza y lo peligrosas que son, las estrictas leyes que exigen una eliminación adecuada de las aguas residuales de las fábricas de cerveza y las elevadas tasas por verter aguas residuales al alcantarillado sin tratamiento previo han obligado a la industria cervecera a encontrar nuevas formas de utilizar las aguas residuales [5,12]. Se han incorporado las siguientes medidas:

1. Reducir el uso de agua en el proceso de producción o introducir nuevas tecnologías;
2. Redirigir el agua utilizada para otras actividades;
3. Tratamiento adecuado antes de su vertido al sistema de aguas residuales o al medio ambiente.

Para reducir el consumo de agua, el Instituto Europeo de Prevención y Control Integrados de la Contaminación (IPPC) ha elaborado varias directrices para las fábricas de cerveza [5,14]:

1. Reutilización del agua caliente obtenida del enfriamiento del mosto - el agua caliente se almacena en recipientes aislados térmicamente.

y pueden utilizarse para diversos fines (limpieza, aclarado o calefacción);

2. Reutilización de las aguas residuales del filtro;
3. Reutilización del agua utilizada en el embotellado para la pasteurización;
4. Uso de filtración de flujo cruzado.

En Mozambique hay dos fábricas de cerveza, una en Maputo, la capital del país, y otra en La Riba (centro), ambas propiedad de Cervezas de Mozambique (CDM), filial de SABMILLER, South African Breweries/Miller (SAB Miller), la mayor cervecera de África y la cuarta del mundo. La fábrica de Beira suministra a las provincias del norte y el centro del país las cervezas 2M, Manica, Laurentina Preta y Raiz en botellas de 550 ml. En Beira también se producen 2M y Laurentina Preta de barril. Laurentina era, hasta marzo de 2002, la fábrica de la marca de cerveza más famosa, Laurentina. En mayo de 2002, CDM adquirió Laurentina. Posteriormente se cerró la fábrica de Laurentina, y toda la fabricación, preparación, envasado y distribución de los productos pasó a manos de la fábrica de cerveza Mahon, en Maputo.

2.- MATERIALES Y MÉTODOS

El proceso de toma de muestras de las aguas residuales de la cervecera se basó en la identificación de un punto convergente (tanque INLET SUMP 100-TK-101) donde se encuentran las aguas en estado bruto, procedentes de las diversas etapas y actividades, entre las que destacan los procesos de fabricación, llenado y logística [15-19]. Las muestras se tomaron durante varios días con el fin de proporcionar una mejor caracterización, y las mismas muestras se analizaron en el laboratorio, seguido de análisis de los principales

	CARACTERIZACIÓN DE LAS AGUAS RESIDUALES DE LA CERVECERÍA MOZAMBIQUEÑA: COMPARACIÓN DE CARACTERÍSTICAS CON EFLUENTES DE CERVECERÍAS DE OTROS PAÍSES	Disciplina UNESCO 3308.06
ARTICULO DE INVESTIGACIÓN	Nicolau Penicela-Chirinza, Paulino-Vasco Mariano-Muguirrima, Federico León-Zerpa*, Carlos-Alberto Mendieta-Pino	

parámetros estándar, a saber: pH, Temperatura, Alcalinidad, Conductividad, TDS, Turbidez, Fosfato, Nitrógeno, DBO y DQO. El análisis de pH, conductividad y TDS se basó en el uso del equipo HQ40d, y los parámetros de temperatura y alcalinidad se analizaron mediante la técnica de valoración [20-27]. El turbidímetro 2100 se utilizó para analizar la turbidez y, por último, los parámetros Fosfato, Nitrógeno, DBO y DQO se analizaron utilizando el equipo DR6000.

La fábrica de cerveza mozambiqueña visitada dispone de un sistema de tratamiento de aguas residuales como el que se muestra en la figura 1:

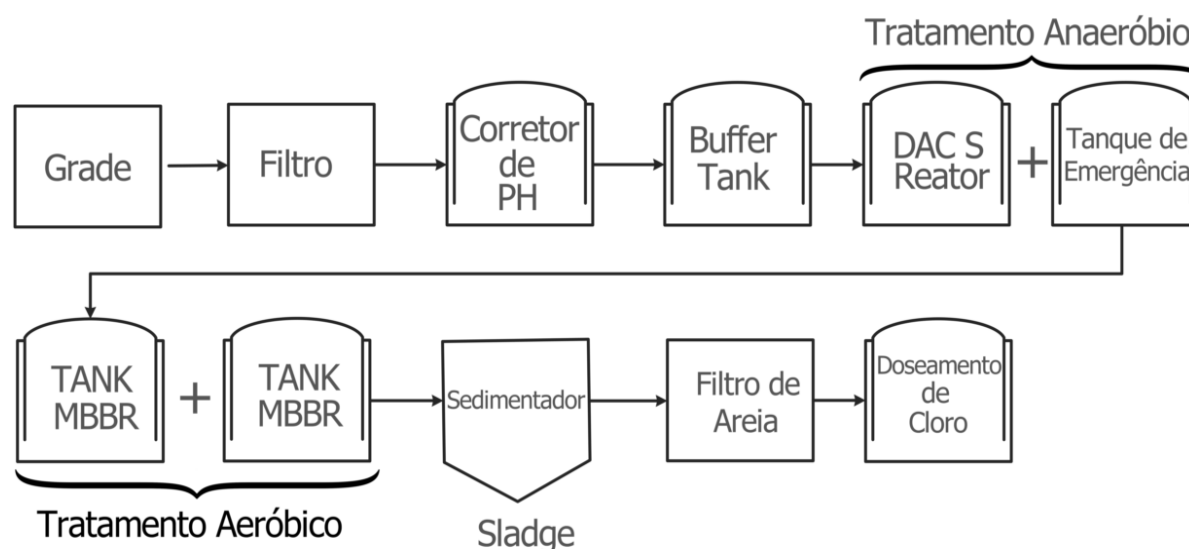


Figura 1 Representación esquemática de una planta de tratamiento de aguas residuales en una fábrica de cerveza mozambiqueña.

El agua procedente de las distintas actividades desemboca en un depósito formado por una rejilla para eliminar los sólidos gruesos, tras lo cual pasa por un depósito filtrante para eliminar algunos sólidos cuya granulometría no les permite atravesar los poros. A este tanque filtrante se acopla un contenedor para depositar los sólidos retenidos en el filtro. El sistema dispone de varias válvulas automáticas de control, una de las cuales controla el nivel de pH del agua tras el proceso de filtración, y cuando es elevado dispone de un tanque denominado de calamidad que corrige el pH añadiendo un ácido específico para estabilizarlo. Además de los tanques mencionados, existe un tanque posterior denominado tanque pulmón, seguido de dos tanques con bacterias anaerobias (tanque de emergencia y reactor DACS) donde se realiza el tratamiento biológico anaerobio. El sistema también tiene dos tanques con bacterias aerobias en secuencia (MBBR1 y MBBR2), un decantador con fondo para eliminar los lodos. Tras la sedimentación hay un filtro de arena y un tanque de dosificación de cloro.

	CARACTERIZACIÓN DE LAS AGUAS RESIDUALES DE LA CERVECERÍA MOZAMBIQUEÑA: COMPARACIÓN DE CARACTERÍSTICAS CON EFLUENTES DE CERVECERÍAS DE OTROS PAÍSES	Disciplina UNESCO 3308.06
ARTICULO DE INVESTIGACIÓN	Nicolau Penicela-Chirinza, Paulino-Vasco Mariano-Muguirrima, Federico León-Zerpa*, Carlos-Alberto Mendieta-Pino	

3.- RESULTADOS

La tabla 2 presenta una evaluación numérica comparativa de los datos obtenidos a partir de los diferentes análisis de laboratorio de las muestras tomadas en la cervecería mozambiqueña para el presente estudio y comparados con los resultados obtenidos en estudios anteriores por diferentes autores.

Cuadro 2: Datos comparativos de los distintos parámetros subproductos en el malteado [5] y la oxidación-reducción [7]

Parámetro	Muestra	Análisis	Subproductos del malteado	Oxidación-Reducción
pH	5,1 - 6,4	3- 12	4,4 - 12,2	
Temperatura (°C)	18 - 20	18- 40	25,3 - 37	
Alcalinidad (mg/l)	240 - 265	___		
Conductividad (µS/cm)	2120 - 3480	_ 1893 - 6017		
TDS (mg/l)	2335 - 3246	2020 - 5940	1043 - 2572	
Turbidez (NTU)	53,42 - 349,92	187 - 2000	303 - 1039	
Fosfato (mg/l)	15,12 - 37,22	10 - 50	_	
Nitrógeno (mg/l)	22,03 - 35,09	25 - 80	13,7 - 106	
DBO (mg/l)	1490 - 3241	1200 - 3600	_	
DQO (mg/l)	2670 - 3798	2000 - 6000	3447 - 11813	

Según los resultados de laboratorio de las diferentes muestras tomadas en la cervecería mozambiqueña, el efluente presenta un nivel ácido variado con tendencia débil, en referencia a los valores de pH. La variación ácida débil característica de las aguas residuales de la cervecería mozambiqueña tiene su origen en el uso de ácidos fuertes y moderados (ácido nítrico y fosfórico) en el proceso de limpieza e higienización, y se amortigua a partir del drenaje de una base fuerte (sosa cáustica) utilizada en el proceso de llenado.

En cuanto al parámetro de la alcalinidad, cabe destacar que representa la capacidad cuantitativa del ácido para ser absorbido sin alterar el pH. Según los datos de la muestra relativos a este parámetro, presenta una gran capacidad de amortiguación y se ve menos afectada cuando se añade algo ácido. En cambio, se resiste a modificar el pH cuando se añade una pequeña cantidad de un ácido o una base fuerte.

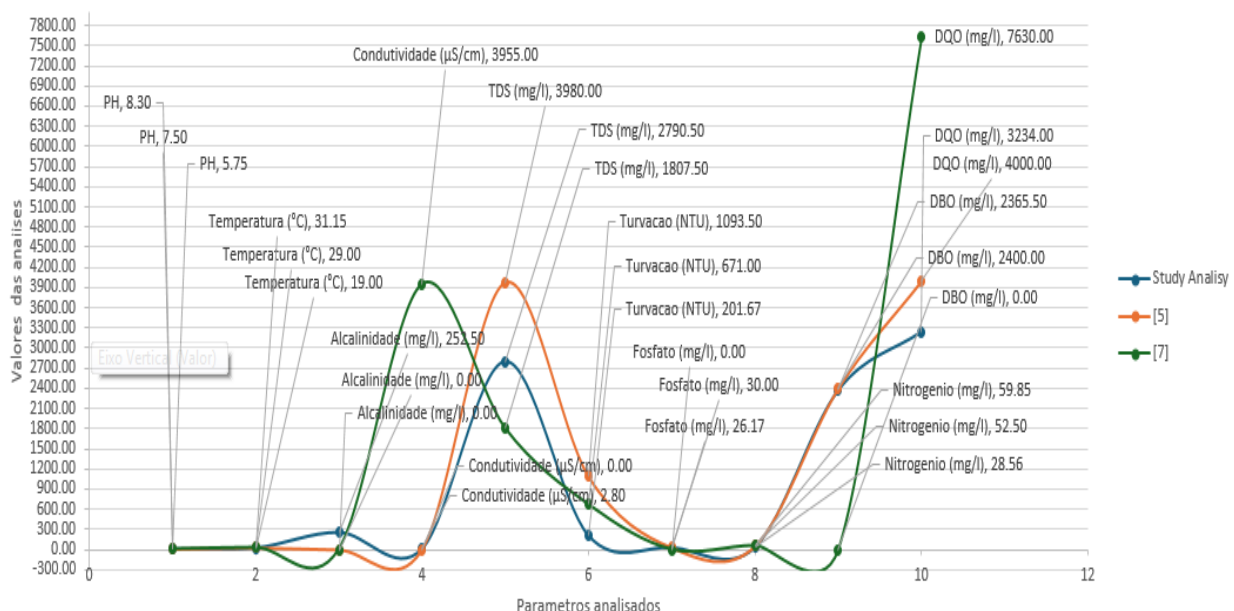
En cuanto a la conductividad, el afluente analizado presenta un menor contenido en sales disueltas, aunque éste es directamente proporcional a su conductividad.

En cuanto a los sólidos disueltos, los valores obtenidos indican un índice elevado. Las aguas residuales presentan una elevada concentración de Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO) debido a la presencia de carbohidratos y proteínas utilizados en la producción de cerveza.

En este estudio se han comparado las aguas residuales de la industria cervecera de Mozambique con otras referencias [5] y [7]. Se muestra que la DQO analizada en Mozambique está en el mismo intervalo que las otras, un poco más baja que ellas. La DBO también se encuentra en el mismo intervalo que las demás. La turbidez es inferior a la de las otras referencias [5, 7], pero sigue dentro del intervalo. En el caso del fosfato y el nitrógeno, también se encuentran en el intervalo de las aguas residuales de la industria cervecera (figura 2).

	CARACTERIZACIÓN DE LAS AGUAS RESIDUALES DE LA CERVECERÍA MOZAMBIQUEÑA: COMPARACIÓN DE CARACTERÍSTICAS CON EFLUENTES DE CERVECERÍAS DE OTROS PAÍSES	Disciplina UNESCO 3308.06
ARTICULO DE INVESTIGACIÓN	Nicolau Penicela-Chirinza, Paulino-Vasco Mariano-Muguirrima, Federico León-Zerpa*, Carlos-Alberto Mendieta-Pino	

Figura 2: Evaluación comparativa de los datos medios de los distintos parámetros



En todos los casos, los valores obtenidos por los diferentes autores y el presente estudio son coherentes. No hay grandes discrepancias en los valores, lo que significa que, en lo que se refiere al proyecto de trabajo y a los productos utilizados, existe una gran aproximación.

4.- CONCLUSIONES

Las principales preocupaciones medioambientales que suscitan las operaciones cerveceras son el consumo de agua, las aguas residuales, los residuos sólidos y la generación de subproductos, el uso de energía y las emisiones atmosféricas.

Los componentes de las aguas residuales de las fábricas de cerveza, como los granos de levadura sobrantes, producidos en dos etapas principales de la fabricación de la cerveza (elaboración y envasado), son los que más contribuyen a la contaminación del medio ambiente cuando se mezclan con los efluentes.

En este trabajo, tras estudiar todos los datos tomados y compararlos con las aguas residuales de la industria cervecera de Mozambique y otras referencias [5] y [7], se demuestra lo siguiente:

- La DQO analizada en Mozambique se sitúa en el mismo rango que las demás referencias, un poco por debajo de ellas.
- La DBO también está en el mismo rango que las demás.
- La turbidez es inferior a la de las otras referencias [5, 7], pero sigue estando dentro del intervalo.
- Fosfato y Nitrógeno, también se encuentran en el intervalo de las aguas residuales de la industria cervecera.

REFERENCIAS

- [1] D. K. Amenorfenyo et al, "Microalgae brewery wastewater treatment: Potentials, benefits and the challenges," Int J Environ Res Public Health, vol. 16, no. 11, Jun. 2019, doi: 10.3390/ijerph16111910.
- [2] Z. Luo, D. Xu, Y. Ma, and Q. Cheng, "Experimental study on co-firing of coal and brewery wastewater sludge," Applied Sciences (Switzerland), vol. 10, no. 21, pp. 1-11, Nov. 2020, doi: 10.3390/app10217589.
- [3] M. Vítězová, A. Kohoutová, T. Vítěz, N. Hanišáková, and I. Kushkevych, "Methanogenic microorganisms in industrial wastewater anaerobic treatment," Processes, vol. 8, no. 12, MDPI AG, pp. 1-27, Dec. 01, 2020, doi: 10.3390/pr8121546.
- [4] K. P. Shabangu, B. F. Bakare, and J. K. Bwapwa, "The Treatment Effect of Chemical Coagulation Process in South African Brewery Wastewater: Comparison of Polyamine and Aluminum-Chlorohydrate coagulants," Water (Switzerland), vol. 14, no. 16, Aug. 2022, doi: 10.3390/w14162495.
- [5] A. Karlović, A. Jurić, N. Čorić, K. Habschied, V. Krstanović, and K. Mastanjević, "By-products in the malting and brewing industries-re-usage possibilities," Fermentation, vol. 6, no. 3, MDPI AG, 2020, doi: 10.3390/fermentation6030082.

	CARACTERIZACIÓN DE LAS AGUAS RESIDUALES DE LA CERVECERÍA MOZAMBIQUEÑA: COMPARACIÓN DE CARACTERÍSTICAS CON EFLUENTES DE CERVECERÍAS DE OTROS PAÍSES	Disciplina UNESCO 3308.06
ARTICULO DE INVESTIGACIÓN	Nicolau Penicela-Chirinza, Paulino-Vasco Mariano-Muguirrima, Federico León-Zerpa*, Carlos-Alberto Mendieta-Pino	

- [6] P. Thanekar and P. Gogate, "Application of hydrodynamic cavitation reactors for treatment of wastewater containing organic pollutants: Intensification using hybrid approaches," *Fluids*, vol. 3, no. 4. MDPI AG, Dec. 01, 2018. doi: 10.3390/fluids3040098.
- [7] S. M. Khumalo, B. F. Bakare, S. Rathilal, and E. K. Tetteh, "Characterisation of South African Brewery Wastewater: Oxidation-Reduction Potential Variation," *Water (Switzerland)*, vol. 14, no. 10, May 2022, doi: 10.3390/w14101604.
- [8] G. Salbitani and S. Carfagna, "Ammonium utilisation in microalgae: A sustainable method for wastewater treatment," *Sustainability (Switzerland)*, vol. 13, no. 2. MDPI, pp. 1-17, Jan. 02, 2021. doi: 10.3390/su13020956.
- [9] A. Chakraborty, A. Pal, and B. B. Saha, "A Critical Review of the Removal of Radionuclides from Wastewater Employing Activated Carbon as an Adsorbent," *Materials*, vol. 15, no. 24. MDPI, Dec. 01, 2022. doi: 10.3390/ma15248818.
- [10] C. A. Mendieta-Pino, T. Garcia-Ramirez, A. Ramos-Martin, and S. O. Perez-Baez, "Experience of Application of Natural Treatment Systems for Wastewater (NTSW) in Livestock Farms in Canary Islands," *Water (Switzerland)*, vol. 14, no. 14, Jul. 2022, doi: 10.3390/w14142279.
- [11] S. M. Khumalo, B. F. Bakare, S. Rathilal, and E. K. Tetteh, "Characterisation of South African Brewery Wastewater: Oxidation-Reduction Potential Variation," *Water (Switzerland)*, vol. 14, no. 10, May 2022, doi: 10.3390/w14101604.
- [12] A. G. Rao, T. S. K. Reddy, S. S. Prakash, J. Vanajakshi, J. Joseph, and P. N. Sarma, "pH regulation of alkaline wastewater with carbon dioxide: A case study of treatment of brewery wastewater in UASB reactor coupled with absorber," *Bioresour Technol*, vol. 98, no. 11, pp. 2131-2136, Aug. 2007, doi: 10.1016/j.biortech.2006.08.011.
- [13] F. Younas et al, "Current and emerging adsorbent technologies for wastewater treatment: Trends, limitations, and environmental implications," *Water (Switzerland)*, vol. 13, no. 2. MDPI AG, Jan. 02, 2021. doi: 10.3390/w13020215.
- [14] G. G. Santonja, P. Karlis, K. R. Stubdrup, and T. Brinkmann, "Best Available Techniques (BAT) Reference Document for the Food, Drink and Milk Industries," 2010.
- [15] Pradeep K. Poddar, Omprakash Sahu. Quality and management of wastewater in sugar industry. *Water Sci* 2 November 2014.
- [16] Ana Marszałek and Ewa Puszczalo. Effect of Photooxidation on nanofiltration membrane fouling during wastewater treatment from the confectionary Industry. *Water* 2020,12,793, doi:3390/w12030793/ 12 march
- [17] Abou-Elala, S.I.; Nasr, F.A.; El-Shafai, S.A. Wastewater management in small- and medium-size enterprises: Case studies. *Environmentalist* 2008, 28, 289-296 [Google Scholar] [CrossRef]
- [18] Ozgun, H.; Karagul, N.; Dereli, R.K.; Ersahin, M.E.; Coskuner, T.; Ciftci, D.I.; Ozturk, I.; Altinbas, M. Confectionery industry: A case study on treatability-based effluent characterisation and treatment system performance. *Water Sci. Technol.* 2012, 66, 15-20 [Google Scholar] [CrossRef] [PubMed].
- [19] Sahu, O.P.; Chaudhari, P.K. Electrochemical treatment of sugar industry wastewater: COD and colour removal. *J. Electroanal. Chem.* 2015, 739, 122-129 [Google Scholar] [CrossRef]
- [20] Yotamo, A. F. D., Energy Balance of Boilers and Steam Lines, Monograph, 2009.
- [21] Marques, António E.C. Efficient Steam Generation from Bagasse, Internship Report, December 2014.
- [22] Abdoul Wahab Nouhou Moussa; Boukary Sawadogo; Yacouba Konate; Sayon dit Sadio Sidibe; and Marc Heran. Critical State of the Art of Sugarcane Industry Wastewater Treatment Technologies and Perspectives for Sustainability. *Membranes* 2023, 13, 709. <https://doi.org/10.3390/membranes13080709>.
- [23] José M. F. de Andrade; Kátia M. Diniz. Environmental Impacts of the Sugarcane Agroindustry: Subsidies for Management. Piracicaba September 2007
- [24] Nilton Bruno Silva Batista, André Aguiar, Study of physicochemical parameters and their correlations for dairy effluents in the state of Minas Gerais. XXII Latin American Scientific Initiation Meeting, XVIII Latin American Postgraduate Meeting and VIII Teaching Initiation Meeting - Vale do Paraíba University, 2018;
- [25] Apoorva D, Chandrashekar B. Treatment of Sugar Industry Wastewater by Adsorption method, *International Research Journal of Modernisation in Engineering Technology and Science*. Volume:04/Issue:08/August-2022;
- [26] Muguirrima, P.V.M.; Chirinza,N.P.; Grande,S.C; Mendieta Pino, C. A;León Zerpa,F; Pérez Báez,S.O; Martín, A. R. Tratamiento de efluentes domésticos mediante métodos biofiltro sostenibles. X Jornadas Iberoamericanas de Innovación Educativa en el ámbito de las TIC y las TAC Las Palmas de Gran Canaria, 16 and 17 November 2023.
- [27] Matos,M.P.Effect of Binomial Time-Temperature of sample incubation on Biochemical Oxygen Demand diffusion of wastewater. Master's dissertation. Federal University of Viçosa, Minas Gerais 2012.

AGRADECIMIENTOS

Este proyecto es financiado a cargo de fondos propios de la Universidad de Las Palmas de Gran Canaria de 2023, con título PIE "Aplicación de técnicas de aprendizaje activo y colaborativo en laboratorios como entornos de trabajo. Diseño, desarrollo y adaptación de equipos para su aplicación en sesiones de prácticas" y código PIE 2023-60 de la Universidad de Las Palmas de Gran Canaria. Esta investigación ha sido cofinanciada también por el programa de Cooperación INTERREG V-A, España-Portugal MAC (Madeira-Azores-Canarias) 2014-2020, proyecto MITIMAC (MAC2/1.1a/263).

7. Extracto de semilla de moringa oleífera como coagulante en el tratamiento de agua potable

Extracto de semillas de moringa oleifera como coagulante en el tratamiento del agua potable

Moringa oleifera seed extract as a coagulant in the treatment of drinking water

Nicolau Penicela Chirinza¹, Paulino Vasco Mariano Muguirrima¹, Federico León Zerpa², Carlos Alberto Mendieta Pino²
¹ UniZambeze (Mozambique)
² IUNAT, ULPGC (España)

DOI: <https://doi.org/10.52152/D11359>

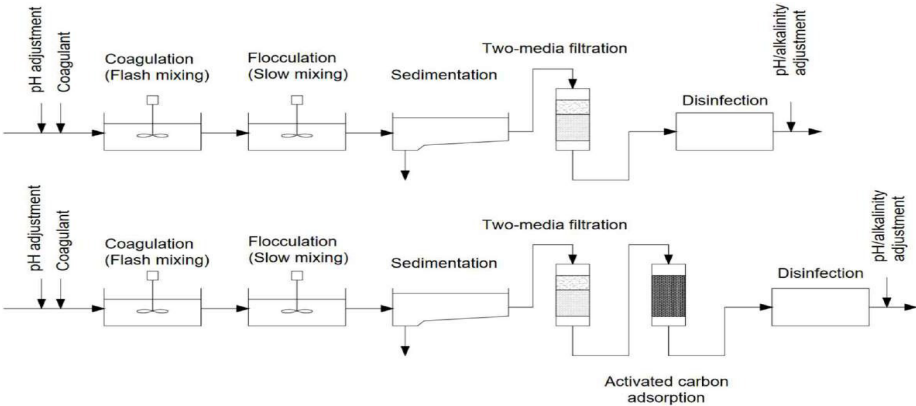


Figura 1: Sistema convencional de tratamiento del agua

El objetivo de este estudio es proponer la utilización del extracto de semillas de *Moringa oleifera* como coagulante en el tratamiento del agua, evaluando su eficacia en la eliminación de los parámetros clave requeridos para alcanzar las normas mínimas de potabilidad del agua, y comparando su rendimiento con el del sulfato de aluminio como coagulante. El extracto de semillas de *Moringa oleifera* es fácilmente accesible y, cuando se prepara de forma optimizada, cumple las directrices recomendadas para el agua potable. Desde el punto de vista medioambiental, su uso es ventajoso, ya que no produce subproductos nocivos que puedan afectar negativamente a los ecosistemas [1].

El mecanismo de coagulación empleado por la *Moringa oleifera* para la eliminación de contaminantes se basa en una combinación de procesos de coagulación y neutralización de cargas, que funcionan de forma similar al mecanismo del sulfato de aluminio. Las semillas de *Moringa oleifera* contienen cantidades significativas de proteínas catiónicas solubles, y cuando se muelen en un polvo fino y se introducen en agua turbia, estas proteínas liberan cargas positivas. Estas cargas atraen y se unen eficazmente a partículas cargadas

negativamente, como barro en suspensión, arcilla, bacterias y otras partículas que se encuentran en el agua [2].

Las fuentes de aguas superficiales constituyen el suministro primario de numerosos sistemas de distribución de agua en todo el mundo, suministrando agua potable a muchas comunidades. La calidad de

las aguas superficiales es de vital importancia, sobre todo por su amplio uso como principal fuente de agua potable para poblaciones de todo el mundo (figura 1).

Tras la recogida de muestras, se realizó un análisis de varios parámetros de calidad del agua, como la turbidez, los sólidos disueltos totales (TDS), la temperatura, el pH, el aluminio, el hierro y el manganeso, antes de realizar la prueba del tarro. Esto permitió comparar estos parámetros antes y después del tratamiento del agua bruta.

El coagulante derivado de las semillas de *Moringa oleifera* suele dar resultados satisfactorios en la reducción de la turbidez. Aunque la eficacia de eliminación de la turbidez del extracto de semillas de *Moringa oleifera* es algo inferior a la del sulfato de aluminio, los resultados de las pruebas realizadas siguen cumpliendo los umbrales establecidos por el Reglamento sobre la Calidad del Agua de Consumo Humano. A la vista de los resultados obtenidos, el uso de *Moringa oleifera* como coagulante es muy recomendable, sobre todo desde el punto de vista de la protección del medio ambiente y de la salud pública.

Las ventajas de emplear *Moringa oleifera* como coagulante, en comparación con el sulfato de aluminio, son sustancia-

les. Entre estas ventajas cabe citar los menores costes de adquisición, la facilidad de manipulación y la ausencia de subproductos contaminantes que puedan dañar el medio ambiente. En el caso concreto de las plantas de tratamiento de agua potable de Mozambique, la adquisición de sulfato de aluminio es especialmente costosa debido a su dependencia de los mercados internacionales.

En cambio, el coagulante de *Moringa oleifera* no sólo es económicamente viable, sino también sostenible desde el punto de vista medioambiental. Puede prepararse con un mínimo de insumos tecnológicos y energéticos sin dejar de cumplir las normas exigidas para la potabilidad del agua. Los análisis de laboratorio de varios parámetros, realizados a lo largo de tres pruebas, demostraron resultados satisfactorios con una eliminación eficaz de contaminantes. Por consiguiente, la propuesta de adoptar la *Moringa oleifera* como coagulante cuenta con un fuerte respaldo. Desde el punto de vista medioambiental, el uso de este coagulante es ventajoso, ya que no aporta subproductos nocivos al medio ambiente ni supone riesgo alguno de contaminación del agua tratada.

REFERENCIAS

- [1] N. Chirinza et al, " Propuesta de uso de extracto de semilla de moringa oleifera como coagulante en el tratamiento de agua potable".
- [2] DYNA Energía y Sostenibilidad, Ene.-Dic. 2024, vol. 13, n. 1, DOI: <https://doi.org/10.52152/DES11244>
- [3] Urrea-Florián, S. y Torres-Benitez, A., "Evaluación de Semillas de Moringa oleifera Lam. Present in Urban Forests as a Coagulant-Flocculant for Water Treatment", 5 febrero 2021, 1, MDPI AG.
- [4] Elsergany, M., "The Potential Use of Moringa peregrina Seeds and Seed Extract as a Bio-Coagulant for Water Purification", Water (Suiza) 15(15) (2023).
- [5] Thanekar, P. y Gogate, P., "Aplicación de reactores de cavitación hidrodinámica para el tratamiento de aguas residuales que contienen contaminantes orgánicos: Intensificación mediante enfoques híbridos", Fluids 3(4) (2018).

AGRADECIMIENTOS

Artículo cofinanciado por el proyecto MITIMAC (MAC2/1.1a/263).

8. Proposal for the use of moringa oleifera seed extract as a coagulant in the treatment of drinking water

	PROPOSAL FOR THE USE OF MORINGA OLEIFERA SEED EXTRACT AS A COAGULANT IN THE TREATMENT OF DRINKING WATER	UNESCO Discipline 3308.06
RESEARCH	Nicolau Penicela Chirinzá, Paulino Vasco Mariano Muguirrima, Federico León Zepa*, Alejandro Ramos Martín, Carlos Alberto Mendieta Pino	

PROPOSAL FOR THE USE OF MORINGA OLEIFERA SEED EXTRACT AS A COAGULANT IN THE TREATMENT OF DRINKING WATER

Nicolau Penicela-Chirinzá¹, Paulino-Vasco Mariano-Muguirrima¹, Federico León-Zepa^{2*}, Alejandro Ramos-Martín², Carlos-Alberto Mendieta-Pino²

1 Universidad de Zambeze (UniZambeze), Mozambique.

2 Instituto de Estudios Ambientales y Recursos Naturales (iUNAT), Universidad de Las Palmas de Gran Canaria (ULPGC).

* federico.leon@ulpgc.es

Received: 11/Mar/2024 – Reviewing: 12/Mar./2024 - Accepted: 11/Sep./2024 - DOI: <https://doi.org/10.52152/DES11244>

To cite this article: LEON-ZERPA, Federico, CHIRINZA, Nicolau Penicela, MUGUIRRIMA, Paulino Vasco et al. PROPOSAL FOR THE USE OF MORINGA OLEIFERA SEED EXTRACT AS A COAGULANT IN THE TREATMENT OF DRINKING WATER. DYNA Energía y Sostenibilidad, Jan.-Dec. 2024, vol. 13, n. 1, DOI: <https://doi.org/10.52152/DES11244>

ABSTRACT:

The aim of this study is to propose the use of Moringa oleifera seed extract as a coagulant in water treatment, with a reference to its efficiency in removing various parameters considered to be the minimum necessary for water potability, compared to the use of aluminium sulphate as a coagulant. The Moringa oleifera seed extract coagulant is easy to acquire and use, and prepared in an optimised way, it complies with the recommended standards for water potability. In environmental terms, its use is recommended because it does not transmit harmful by-products to the environment.

Keywords: Coagulant, Moringa oleifera seed, Aluminium sulphate.

RESUMEN:

El objetivo de este estudio es proponer la utilización del extracto de semillas de Moringa oleifera como coagulante en el tratamiento del agua, haciendo referencia a su eficacia en la eliminación de diversos parámetros considerados como mínimos necesarios para la potabilidad del agua, en comparación con la utilización de sulfato de aluminio como coagulante. El coagulante a base de extracto de semillas de Moringa oleifera es fácil de adquirir y utilizar y, preparado de forma optimizada, cumple las normas recomendadas para la potabilidad del agua. En términos medioambientales, se recomienda su uso porque no transmite subproductos nocivos al medio ambiente.

Palabras clave: Coagulante, semilla de Moringa oleifera, sulfato de aluminio.

1. - INTRODUCTION

Water treatment is a process in which the aim is to remove or eliminate organic matter, sludge, sand and analyse the physico-chemical and microbiological characteristics through regulations to make it ideal for human consumption¹.

The coagulation process is an essential stage in water purification. This depends on converting suspended particles into larger flocs that can settle or be easily filtered out of the water. This process involves the addition of certain chemicals called coagulants, which have the ability to help flocculate suspended particles in water. Moringa is sometimes used in the coagulation process in water treatment, where it is known to have certain proteins that are positively charged in solutions and can bind to negatively charged particles to remove turbidity from water treatment^{2,3}.

The use of Moringa oleifera seed as a coagulant presents some challenges to overcome, as the unfractionated seed also has other compounds that are released along with the cationic proteins of interest that can cause undesirable results, such as residual organic carbon and cytotoxicity after water treatment⁴. The core of Moringa oleifera seeds contains approximately 36.7% protein, 34.6% lipids and 5.0% carbohydrates (w/w), and as an undesirable consequence, these compounds (organic matter) can facilitate the new growth of microorganisms and lead to the formation of disinfection by-products^{2,4}. Natural organic polymers have been used for more than 4,000 years in India, Africa and China as efficient coagulants and as coagulation aids for high turbidity water for domestic use in rural areas. Beginning in the 19th century, chemical coagulants such as iron chloride III ($FeCl_3$) and aluminium sulphate $Al_2(SO_4)_3$ where they came to be used all over the world to treat water for human consumption, which left the use of coagulants in the background, except in rural areas and developing countries that still use them. However, chemical coagulants have an impact on the environment and human health due to their composition and higher cost¹. It is therefore extremely important to use natural products in order to minimise the environmental impact and unnecessary cost increases in water treatment^{5,6}.

The general aim of this article is to propose the use of Moringa oleifera seed extract as a coagulant in the treatment of drinking water, comparing its efficiency with aluminium sulphate as a coagulant.

As for the target audience, the proposed innovation is generally aimed at students of process engineering, chemical engineering, higher education courses related to the environment and, lastly, courses aimed at the treatment of wastewater.

	PROPOSAL FOR THE USE OF MORINGA OLEIFERA SEED EXTRACT AS A COAGULANT IN THE TREATMENT OF DRINKING WATER	UNESCO Discipline 3308.06
RESEARCH	Nicolau Penicela Chirinzá, Paulino Vasco Mariano Muguirrima, Federico León Zepa*, Alejandro Ramos Martín, Carlos Alberto Mendieta Pino	

water. It should be noted that in terms of the level of students on the courses mentioned, the innovation covers all levels, from 1st year undergraduates to PhD students.

The previous level of understanding of the subject prior to the application of this work was basic knowledge of coagulants used in water treatment in general, instrumental techniques for extracting chemical compounds from plants and basic chemical engineering operations.

The learning objective is to understand the method of extracting the coagulant from the plant and to understand how to apply the coagulant in drinking water treatment systems and measure its effectiveness.

The subsequent level of understanding of the subject after applying this work is to gain an understanding of the extraction method and the efficiency of coagulation in drinking water quality. The learning outcomes are an understanding of the use of coagulants as a way of treating drinking water and an understanding of extraction techniques from natural sources.

2.- THEORETICAL BACKGROUND

Water is one of the fundamental components of sustainable development and its conservation is essential for the preservation of biodiversity on our planet. Urbanisation, changes in production and consumption patterns in industrialised and developing nations provide new issues for water cycle management; wastewater sanitation is one of them posing a double threat to public health and environmental protection⁷. However, it is extremely imperative to adopt techniques aimed at treating water in order to meet the quality requirements of potability and environmental standards. The coagulation process is widely used in water and sewage treatment, as it is effective at removing suspended solids, turbidity, organic matter, oil, chemical oxygen demand (COD) and colour. The coagulation process is mainly conducted by adding a coagulant that allows small agglomerated particles (unstable fine particles) to form into larger flocs that can settle. Coagulation and flocculation are interlinked. Coagulation is the process of grouping under high-speed mixing, while flocculation is the process of sedimentation under gentle mixing. Colloidal particles are generally negatively charged particles. Therefore, coagulation is a chemical process involving the neutralisation of these particles in water and wastewater, while flocculation is a physical process involving the formation of flocs from particles neutralised during the coagulation process. Thus, large flocs form during coagulation, and they aggregate and sediment during flocculation^{5,6}.

Coagulation sedimentation is widely used in water treatment due to its ease of maintenance and low operating cost. Drinking water processing relies heavily on coagulation sedimentation, which accounts for approximately 5% of the total cost of operating water treatment facilities⁷⁻⁹.

2.1 Moringa oleifera as a coagulant

The coagulation mechanism using Moringa oleifera to remove pollutants from water is due to the combination of the coagulation and charge neutralisation mechanisms. This is similar to the coagulation mechanism of aluminium sulphate¹¹. Moringa oleifera seeds contain significant amounts of soluble cationic proteins, and when they are ground into powder and added to turbid water, they release positive charges, attracting negatively charged particles such as mud, clay, bacteria and other particulates present in the water. Coagulation occurs when the cationic proteins bind to the negative particles, forming flakes.¹⁰ Moringa oleifera can clarify high, medium and low turbidity water^{2,12}. While aluminium-based coagulants are efficient in a restricted range of pH levels in water treatment, the use of Moringa oleifera seeds is independent of the pH of the water to be treated for its efficiency. Another beneficial effect that should be noted when Moringa oleifera is used as a coagulant is the effect of biological water treatment, which occurs concomitantly with coagulation. This effect is due to the fact that Moringa oleifera contains an antimicrobial substance that acts on the microorganisms that are found in the particles suspended in the water and end up being eliminated along with the sludge^{7,9,13}. The use of Moringa oleifera seeds and pods together with filtration in water treatment shows good results and reduces the use of non-biodegradable chemical coagulants, as well as having the advantages of less sludge generation, the production of biodegradable sludge, good removal of turbidity and colour, removal of almost 90% of bacteria and maintaining the pH of the water. Other advantages of the moringa seed extract are that it is easy to handle, involves simple technologies that unskilled professionals can operate, and is a biodegradable extract^{14,15}.

2.2 Quality of drinking water

A significant number of water supply systems that provide drinking water to local people and communities around the world are fed by surface water sources^{1,13}.

The quality of surface water is important, among other concerns, due to its widespread use as the main source of drinking water for countless communities around the world.

	PROPOSAL FOR THE USE OF MORINGA OLEIFERA SEED EXTRACT AS A COAGULANT IN THE TREATMENT OF DRINKING WATER	UNESCO Discipline 3308.06
RESEARCH	Nicolau Penicela Chirinza, Paulino Vasco Mariano Muguirrima, Federico León Zepa*, Alejandro Ramos Martín, Carlos Alberto Mendieta Pino	

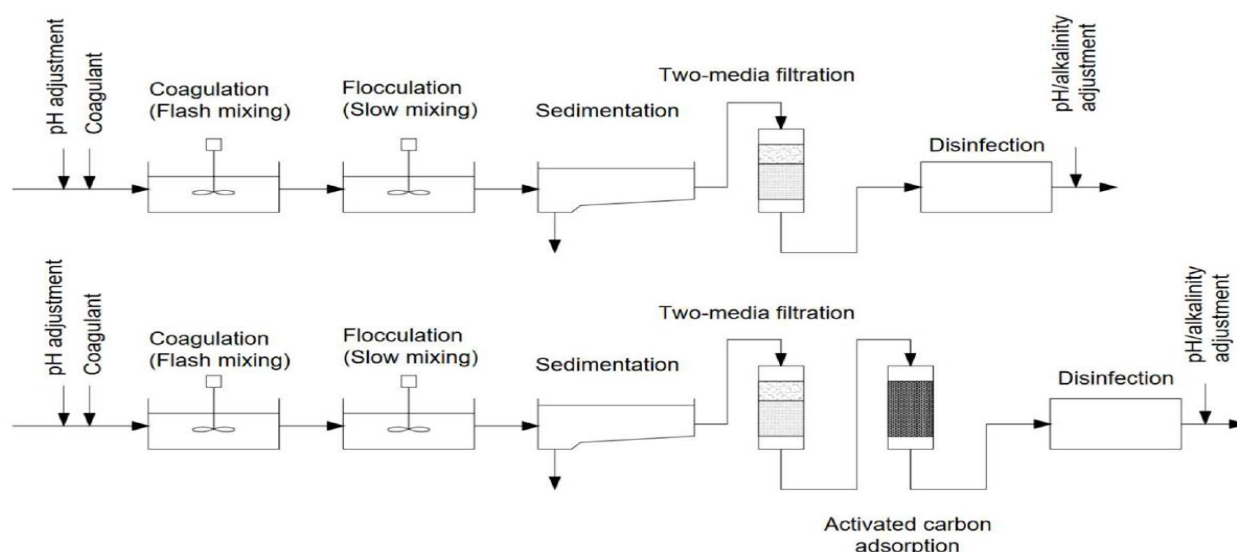


Figure 1: Conventional water treatment system (adapted by Takaara).

Although the specific targets for surface water treatment can vary depending on the source, water quality and regulatory standards, the parameters that usually require reduction are the same for most surface waters and include turbidity, colour and organic matter content. Current surface water purification methods include adsorption, membrane filtration, ion exchange, advanced oxidation processes and biological processes. However, traditional coagulation is still the most prevalent ¹². The conventional water treatment system consists of coagulation followed by sedimentation, filtration and often activated carbon adsorption (Figure 1) ^{10,12}.

3.- MATERIAL & METHODS

Preparation of the coagulating solution from Moringa oleifera seed extract

For the preparation of the bio-coagulant solution, the ideology of the various authors was followed (Alam et al., 2020; Alazaiza et al., 2022a). According to the authors, for an initial turbidity of 50 NTU, the best dosage for the aqueous bio-coagulant would be at a concentration of 2%, with 2 g of the ground sample of Moringa oleifera seeds in 100 ml of distilled water. The procedure used was as follows:

- a) Figure 2 shows the Moringa Oleifera seeds in two scenarios: first, the seeds in their shells, and second, the seeds peeled with a knife.



Figure 2: Ground Moringa seed.

In order to improve contact between the particles, it was necessary to reduce the particle size of the seeds using a knife mill.

- b) The active compound was extracted as follows:
 - Using a spatula and an analytical balance, 2 g of Moringa oleifera seed powder was weighed;
 - A 100 ml beaker was used to measure 100 ml of distilled water;

	PROPOSAL FOR THE USE OF MORINGA OLEIFERA SEED EXTRACT AS A COAGULANT IN THE TREATMENT OF DRINKING WATER	UNESCO Discipline 3308.06
RESEARCH	Nicolau Penicela Chirinzá, Paulino Vasco Mariano Muguirrima, Federico León Zepa*, Alejandro Ramos Martín, Carlos Alberto Mendieta Pino	

- III. 2 g of Moringa oleifera seed powder was added to a 600 ml beaker and then 100 ml of distilled water was added to the same beaker.
- IV. The mixture was placed on a magnetic stirrer for high agitation for 4 minutes. The solution obtained under these conditions corresponds to a concentration of ground Moringa oleifera seeds of 20 g/l.

The mixture of ground Moringa oleifera seeds and distilled water results in a whitish liquid with an intense odour. Its shelf life is limited due to its biodegradation. For this reason, the Moringa oleifera seed extract solutions were prepared on the days of the Jar Test.

3. - RESULTS AND DISCUSSION

After collecting the samples, it was necessary to carry out an analysis of the different parameters including turbidity, total dissolved solids, temperature, pH, aluminium, iron and manganese before the Jar Test, so that a comparison could then be made of the parameters analysed before and after the treatment of the raw water. It should be noted that Table 1 shows the values for the analyses of the aforementioned raw water parameters.

Table 1: Results of the analyses of the various parameters in the raw water.

Raw water	Turbidity (NTU)	TDS (mg/l)	Temperature (°C)	pH	Al (mg/l)	Fe (mg/l)	Mn (mg/l)
Sample 1	44	89,9	34,0	7,54	0,095	1,500	0,8
Sample 2	30	84,3	35,6	7,61	0,082	0,101	0,5
Sample 3	57	86,2	33,2	7,43	0,109	1,520	0,3

Evaluation of the efficiency of Moringa Oleifera coagulant Vs Aluminum Sulphate coagulant. In terms of turbidity removal, the following results stood out in three trials analysed separately using the two types of coagulant (Moringa Oil and Aluminum Sulphate). This information is shown in table 2 and table 3.

Jar test using coagulant solution from Moringa oleifera seed extract

Table 2: Turbidity results in jar tests using the Moringa oleifera seed extract coagulant solution.

Volume (ml)	4	5	6	7	8
Turbidity after test 1 (NTU)	10,4	8,6	6,8	4,9	6,2
Turbidity after test 2 (NTU)	6,6	6,0	5,9	5,6	4,4
Turbidity after test 3 (NTU)	5,8	5,4	6,1	16,15	15,1

Jar test using aluminium sulphate coagulant solution

Table 3: Results of jar tests using the aluminium sulphate coagulant solution.

Volume (ml)	4	5	6	7	8
Turbidity after test 1 (NTU)	29,0	11,2	9,1	3,9	3,4
Turbidity after test 2 (NTU)	27,6	17,0	5,84	3,9	3,0
Turbidity after test 3 (NTU)	8,81	4,2	4,8	5,9	6,0

After the Jar Tests using the Moringa oleifera seed extract coagulant solution and the aluminium sulphate coagulant solution, the samples with the best turbidity were kept. Then the parameters (turbidity, total dissolved solids, temperature, pH, aluminium, iron and manganese) were analysed. More information is shown in table 4, 5 and 6.

Table 4: Results of the parameter analyses after treating the raw water with the coagulating solution from the Moringa oleifera seed extract.

	Turbidity (NTU)	TDS (mg/l)	Temperature (°C)	pH	Al (mg/l)	Fe (mg/l)	Mn (mg/l)
Test 1	4,9	89,8	34,0	7,76	0,034	0,23	0,3
Test 2	4,4	89,9	33,3	7,74	0,047	0,10	0,3
Test 3	5,4	80,2	33,8	7,32	0,008	0,15	0,3

	PROPOSAL FOR THE USE OF MORINGA OLEIFERA SEED EXTRACT AS A COAGULANT IN THE TREATMENT OF DRINKING WATER	UNESCO Discipline 3308.06
RESEARCH	Nicolau Penicela Chirinzá, Paulino Vasco Mariano Muguirrima, Federico León Zepa*, Alejandro Ramos Martín, Carlos Alberto Mendieta Pino	

Table 5 Results of the parameter analyses after treating the raw water with the Aluminium Sulphate coagulant solution.

	Turbidity (NTU)	TDS (mg/l)	Temperature (°C)	pH	Al (mg/l)	Fe (mg/l)	Mn (mg/l)
Test 1	3,4	97,5	34,3	6,51	0,108	0,27	0,5
Test 2	3,0	101,1	32,6	6,73	0,102	0,51	0,5
Test 3	4,2	94,4	32,9	6,70	0,115	0,18	0,7

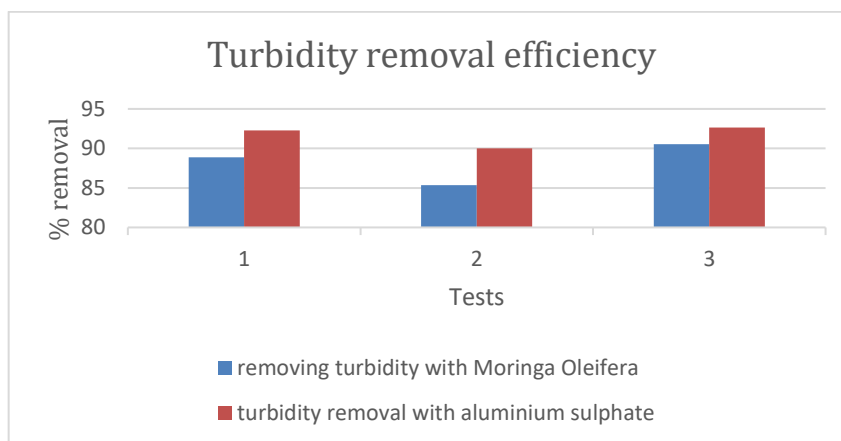
Comparative evaluation of parameter concentration removal efficiency in raw water treatment using Moringa oleifera extract coagulant Vs Aluminium sulphate coagulant.

Turbidity

Table 6: Turbidity removal efficiency at the end of the tests using the Moringa oleifera seed extract coagulant solution and the aluminium sulphate coagulant solution.

	Turbidity removal efficiency with Moringa oleifera (%)	Turbidity removal efficiency with aluminium sulphate (%)
Test 1	88,86364	92,27273
Test 2	85,33333	90
Test 3	90,52632	92,63158

Figure 3. Comparative evaluation of turbidity removal efficiency at the end of the tests using the Moringa oleifera seed extract coagulant solution and the aluminium sulphate coagulant solution.



The use of the Moringa Oleifera extract coagulant obtained inferior results in relation to the removal efficiency using the Aluminium Sulphate coagulant, but according to ^{16,17}However, at the end of the tests, the use of the Moringa oleifera seed extract coagulant solution achieved up to 90.52632% removal in test 3, and in tests 1 and 2 it removed 88.86364 and 85.33333% respectively.

Total dissolved solids

Table 6 shows the total dissolved solids removal efficiency values after the tests using the Moringa oleifera seed extract coagulant solution and the aluminium sulphate coagulant solution.

	PROPOSAL FOR THE USE OF MORINGA OLEIFERA SEED EXTRACT AS A COAGULANT IN THE TREATMENT OF DRINKING WATER	UNESCO Discipline 3308.06
RESEARCH	Nicolau Penicela Chirinzá, Paulino Vasco Mariano Muguirrima, Federico León Zepa*, Alejandro Ramos Martín, Carlos Alberto Mendieta Pino	

Table 6: Comparative evaluation of total dissolved solids removal efficiency at the end of the tests using the Moringa oleifera seed extract coagulant solution and the aluminium sulphate coagulant solution.

	TDS removal efficiency with Moringa oleifera (%)	TDS removal efficiency with aluminium sulphate (%)
Test 1	0,11123	-8,4538
Test 2	-6,6429	-19,929
Test 3	6,96056	-9,5128

The results for total dissolved solids removal efficiency showed low removal efficiency for both the treatment with the Moringa oleifera seed extract coagulant solution and the aluminium sulphate coagulant solution, but the use of the Moringa oleifera seed extract coagulant solution proved to be more efficient at removing total dissolved solids, with up to 6.96056% removal for trial 3. For the treatment with aluminium sulphate, the results were not satisfactory, obtaining negative values, i.e. increasing the concentration of total dissolved solids in all tests.

Temperature

Table 7 shows the temperature variation values after the tests using the Moringa oleifera seed extract coagulant solution and the aluminium sulphate coagulant solution.

Table 7. 1Temperature variation at the end of the tests using the Moringa oleifera coagulant solution and the aluminium sulphate coagulant solution.

	Temperature variation with Moringa oleifera	Temperature variation with aluminium sulphate
Test 1	0	0,3
Test 2	-2,3	-3
Test 3	0,6	-0,3

Table 7 shows that there were small variations in temperature at the end of the tests. The temperature values at the end of the tests remained close to the raw water value for each sample, with a maximum variation of 3 °C more for test 2 using the aluminium sulphate coagulant solution and a minimum variation of 0 °C for test 1 using the Moringa oleifera seed extract coagulant solution.

Hydrogen potential

Table 8 and Graph 4 show the pH variation values after the tests using the Moringa oleifera seed extract coagulant solution and the aluminium sulphate coagulant solution.

Table 8: pH variation at the end of the tests using the Moringa oleifera seed extract coagulant solution and the aluminium sulphate coagulant solution

	pH variation with Moringa oleifera	pH variation with aluminium sulphate
Test 1	0,22	-1,03
Test 2	0,13	-0,88
Test 3	-0,11	-0,73

Several studies that have used aluminium sulphate to treat water point to a decrease in pH in relation to its initial value ¹⁸⁻²⁰. During the coagulation/flocculation and sedimentation tests, this drop was seen in the pH values of the tests using the aluminium sulphate coagulant solution, and when using the Moringa oleifera seed extract coagulant solution, there was a slight increase in values in tests 1 and 2, and a slight drop in test 3 in relation to the initial values. Table 8 and Graph 4 show that there were greater variations in pH in the tests using the aluminium sulphate coagulant solution. The pH values at the end of the tests showed that the use of the Moringa oleifera seed extract coagulant solution was more satisfactory than those obtained using the aluminium sulphate coagulant solution, with the smallest variation being 0.11 units less in test 3 using the Moringa oleifera seed extract coagulant solution and the largest variation being 1.03 units less in test 1 using the aluminium sulphate coagulant solution.

	PROPOSAL FOR THE USE OF MORINGA OLEIFERA SEED EXTRACT AS A COAGULANT IN THE TREATMENT OF DRINKING WATER	UNESCO Discipline 3308.06
RESEARCH	Nicolau Penicela Chirinza, Paulino Vasco Mariano Muguirrima, Federico León Zepa*, Alejandro Ramos Martín, Carlos Alberto Mendieta Pino	

Aluminium

Table 9 shows the aluminium removal efficiency values after the tests using the Moringa oleifera seed extract coagulant solution and the aluminium sulphate coagulant solution.

Table 9: Aluminium removal efficiency at the end of the tests using the Moringa oleifera seed extract coagulant solution and the aluminium sulphate coagulant solution

	Aluminium removal efficiency with Moringa oleifera (%)	Aluminium removal efficiency with aluminium sulphate (%)
Test 1	64,21053	-13,6842
Test 2	42,68293	-24,3902
Test 3	92,66055	-5,50459

Aluminium removal in the treatment with the Moringa oleifera seed extract coagulant solution showed better efficiency, reaching up to 92.66055% in trial 3, and was more efficient in all trials, with trials 1 and 2 removing up to 64.21053 and 42.68293%. With the use of the aluminium sulphate coagulant solution, the results were negative in terms of removal, with an increase in the concentration of aluminium of up to 24.3902% in the treatment of sample 2, with samples 1 and 3 having an increase of 13.6842% and 5.50459% in relation to the raw water for both samples.

Iron

Table 10 shows the iron removal efficiency values after the tests using the Moringa oleifera seed extract coagulant solution and the aluminium sulphate coagulant solution.

Table 10. Iron removal efficiency at the end of the tests using the Moringa oleifera seed extract coagulant solution and the aluminium sulphate coagulant solution

	Iron removal efficiency with Moringa oleifera (%)	Iron removal efficiency with aluminium sulphate (%)
Test 1	84,6667	82
Test 2	90,099	49,505
Test 3	90,1316	88,1579

For iron removal, the treatment with the Moringa oleifera seed extract coagulant solution showed better efficiency, reaching up to 90.1316% in trial 3, and was more efficient in all trials, with trials 1 and 2 removing up to 84.6667 and 90.099%. With the use of the aluminium sulphate coagulant solution, the results were lower than those obtained with the use of the Moringa oleifera seed extract coagulant solution, but satisfactory, achieving a maximum removal efficiency of 88.1579% in test 3, with tests 1 and 2 having reduced it by 82 and 49.505% compared to the raw water for both samples.

Manganese

Table 11 shows the manganese removal efficiency values after the tests using the Moringa oleifera seed extract coagulant solution and the aluminium sulphate coagulant solution.

Table 11: Manganese removal efficiency at the end of the tests using the Moringa oleifera seed extract coagulant solution and the aluminium sulphate coagulant solution

	Manganese removal efficiency with Moringa Oleifera (%)	Emotional manganese removal efficiency with aluminium sulphate (%)
Test 1	62,5	37,5
Test 2	40	0
Test 3	0	-133,333

For manganese removal, treatment with the Moringa oleifera seed extract coagulant solution showed better efficiency, reaching up to 62.5% in trial 1, and was more efficient in all trials, with trials 2 and 3 reducing 40 and 0% of manganese. With the use of the aluminium sulphate coagulant solution, results were lower than those obtained with the use of the Moringa oleifera seed extract coagulant solution, achieving a maximum removal efficiency of 37.5% in trial 1, with trial 2 maintaining the same concentration in relation to the raw water and trial 1 increasing 133.333% in relation to the raw water.

	PROPOSAL FOR THE USE OF MORINGA OLEIFERA SEED EXTRACT AS A COAGULANT IN THE TREATMENT OF DRINKING WATER	UNESCO Discipline 3308.06
RESEARCH	Nicolau Penicela Chirinzá, Paulino Vasco Mariano Muguirrima, Federico León Zepa*, Alejandro Ramos Martín, Carlos Alberto Mendieta Pino	

The article has focused on test 2, seeking the most appropriate data to reduce coagulation and improve cleaning. Regarding turbidity removal, the use of the aluminum sulphate coagulant solution proved to be more efficient, achieving 92.63158 % removal in test 3, with better results for tests 1 and 2, with 92.27273 and 90%, respectively.

The coagulant extracted from Moringa oleifera seeds usually gives satisfactory results in terms of turbidity removal, achieving reductions of 80 to 99% for this parameter^{6,11}. At the end of the trials, the use of the Moringa oleifera seed extract coagulant solution achieved up to 90.52632% removal in trial 3, with trials 1 and 2 having removed 88.86 and 85.33% respectively.

Although the removal efficiency when using the Moringa oleifera seed extract coagulant solution is lower than the removal efficiency when using the aluminium sulphate coagulant solution, the results achieved in tests 1 and 2 meet the limits set by the Regulations on the Quality of Water for Human Consumption. In view of the results obtained, the use of Moringa oleifera coagulant is highly recommended in terms of environmental quality and human health.

The advantages of using Moringa oleifera as a coagulant compared to aluminium sulphate coagulant are extremely visible, from the low cost of acquisition to the ease of handling without the possibility of contaminating by-products in the environment. In the specific case of a Mozambican drinking water treatment plant, obtaining aluminium sulphate is very expensive because it depends on the international market. It is also easy to prepare this organic material as a coagulant, without the need for cutting-edge technology. Its observation has been taken into account and experiments are carried out with several different quantities of water in order to rule out the hypothesis that the results may vary in other conditions. A study has been conducted on the prices of moringa internationally. It can be found in different forms, with varying prices. In Spain, for instance, moringa powder costs approximately €65 per kilo, while the whole dried leaves can cost up to €118 per kilo in the European Union. It is evident that these prices are considerably lower in countries of origin, such as Mozambique, where prices can be as low as half of the European Union average. Furthermore, prices in the rest of the African continent and South America are also similar.

4. - CONCLUSIONS

The use of Moringa oleifera coagulant is highly recommended because it is optimally prepared and meets the required standard for water potability. In terms of economic evaluation and environmental quality, the use of Moringa oleifera coagulant is also very valuable, as its acquisition and preparation does not require a great deal of technology or energy. The results obtained in the laboratory analyses of the various parameters in three tests showed satisfactory results and perfect removal efficiency, although the use of the coagulant in the proposal is recommended. With regard to environmental quality, it does not contribute contaminating by-products to the environment or the possibility of contaminating the treated water.

REFERENCES

- [1] Urrea-Florián, S. and Torres-Benítez, A., "Evaluation of Seeds Moringa oleifera Lam. Present in Urban Forests as a Coagulant-Flocculant for Water Treatment," 5 February 2021, 1, MDPI AG.
- [2] Elsergany, M., "The Potential Use of Moringa peregrina Seeds and Seed Extract as a Bio-Coagulant for Water Purification," Water (Switzerland) **15**(15) (2023).
- [3] Thanekar, P. and Gogate, P., "Application of hydrodynamic cavitation reactors for treatment of wastewater containing organic pollutants: Intensification using hybrid approaches," Fluids **3**(4) (2018).
- [4] Chales, G. G., Tihameri, B. S., Milhan, N. V. M., Koga-Ito, C. Y., Antunes, M. L. P. and Reis, A. G. Dos., "Impact of Moringa oleifera Seed-Derived Coagulants Processing Steps on Physicochemical, Residual Organic, and Cytotoxicity Properties of Treated Water," Water (Switzerland) **14**(13) (2022).
- [5] Piñero, J. C., Souder, S. K., Smith, T. R. and Vargas, R. I., "Attraction of Bactrocera cucurbitae and Bactrocera dorsalis (Diptera: Tephritidae) to beer waste and other protein sources laced with ammonium acetate."
- [6] Rodrigues, A. C., Moreira, P., Oliveira, J. A., Oliveira, J. M., Melo, L. and Brito, A. G., "LIQUID EFFLUENT TREATMENT IN THE FOOD INDUSTRY: THE CASE OF THE WINE AND BEER SECTORS."
- [7] Hadadi, A., Imessaoudene, A., Bollinger, J. C., Assadi, A. A., Amrane, A. and Mouni, L., "Comparison of Four Plant-Based Bio-Coagulants Performances against Alum and Ferric Chloride in the Turbidity Improvement of Bentonite Synthetic Water," Water (Switzerland) **14**(20) (2022).
- [8] Alazaiza, M. Y. D., Albahnasawi, A., Ali, G. A. M., Bashir, M. J. K., Nassani, D. E., Al Maskari, T., Abu Amr, S. S. and Abujazar, M. S. S., "Application of Natural Coagulants for Pharmaceutical Removal from Water and Wastewater: A Review," Water (Switzerland) **14**(2) (2022).
- [9] Alam, M. W., Pandey, P., Khan, F., Souayah, B. and Farhan, M., "Study to investigate the potential of combined extract of leaves and seeds of moringa oleifera in groundwater purification," Int J Environ Res Public Health **17**(20), 1-13 (2020).
- [10] Takaara, T. and Kurumada, K., "Optimum Conditions for Enhancing Chitosan-Assisted Coagulation in Drinking Water Treatment," Sustainability **15**(19), 14197 (2023).
- [11] Alazaiza, M. Y. D., Albahnasawi, A., Ali, G. A. M., Bashir, M. J. K., Nassani, D. E., Al Maskari, T., Abu Amr, S. S. and Abujazar, M. S. S., "Application of Natural Coagulants for Pharmaceutical Removal from Water and Wastewater: A Review," Water (Switzerland) **14**(2) (2022).
- [12] Knap-Baldyga, A. and Żubrowska-Sudoł, M., "Natural Organic Matter Removal in Surface Water Treatment via Coagulation-Current Issues, Potential Solutions, and New Findings," Sustainability **15**(18), 13853 (2023).
- [13] Ribeiro, T., Ladeia Janz, F. J., Vizibelli, D., Borges, J. C. Â., Borssoi, J. A., Fukumoto, A. A. F., Bergamasco, R., Ueda Yamaguchi, N. and Pereira, E. R., "Magnetic Natural Coagulants for Plastic Recycling Industry Wastewater Treatability," Water (Switzerland) **15**(7) (2023).
- [14] Khumalo, S. M., Bakare, B. F., Rathilal, S. and Tetteh, E. K., "Characterisation of South African Brewery Wastewater: Oxidation-Reduction Potential Variation," Water (Switzerland) **14**(10) (2022).

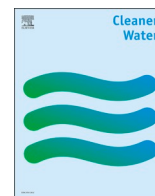
	PROPOSAL FOR THE USE OF MORINGA OLEIFERA SEED EXTRACT AS A COAGULANT IN THE TREATMENT OF DRINKING WATER	UNESCO Discipline 3308.06
RESEARCH	Nicolau Penicela Chirinzá, Paulino Vasco Mariano Muguirrima, Federico León Zepa*, Alejandro Ramos Martín, Carlos Alberto Mendieta Pino	

- [15] Kesarwani, S., Panwar, D., Mal, J., Pradhan, N. and Rani, R., "Constructed Wetland Coupled Microbial Fuel Cell: A Clean Technology for Sustainable Treatment of Wastewater and Bioelectricity Generation," *Fermentation* **9**(1) (2023).
- [16] Naz, I., Ahmad, I., Aslam, R. W., Qudoods, A. and Yaseen, A., "Integrated Assessment and Geostatistical Evaluation of Groundwater Quality through Water Quality Indices," *Water (Basel)* **16**(1), 63 (2023).
- [17] Periyasamy, A. P., "Recent Advances in the Remediation of Textile-Dye-Containing Wastewater: Prioritising Human Health and Sustainable Wastewater Treatment," *Sustainability (Switzerland)* **16**(2) (2024).
- [18] Ramsuroop, J., Gutu, L., Ayinde, W. B., Basitere, M. and Manono, M. S., "A Review of Biological Processes for Dairy Wastewater Treatment and the Effect of Physical Parameters Which Affect Their Efficiency," *Water (Basel)* **16**(4), 537 (2024).
- [19] Naz, I., Ahmad, I., Aslam, R. W., Qudoods, A. and Yaseen, A., "Integrated Assessment and Geostatistical Evaluation of Groundwater Quality through Water Quality Indices," *Water (Basel)* **16**(1), 63 (2023).
- [20] Sanciolo, P., Sharma, A. K., Navaratna, D. and Muthukumaran, S., "Stormwater Treatment Using Natural and Engineered Options in an Urban Growth Area: A Case Study in the West of Melbourne," *Water (Switzerland)* **15**(23) (2023).

APPRECIATIONS

This project is financed by the University of Las Palmas de Gran Canaria's own funds for 2023, with the title PIE 'Application of active and collaborative learning techniques in laboratories as work environments. Design, development and adaptation of equipment for its application in practical sessions' and PIE code 2023-60 of the University of Las Palmas de Gran Canaria. This research has also been co-funded by the INTERREG V-A, Spain-Portugal MAC (Madeira-Azores-Canary Islands) 2014-2020, project MITIMAC (MAC2/1.1a/263).

9. Resources optimization using Pareto analysis for sea water desalination plants



Resources optimization using Pareto analysis for sea water desalination plants

Nicolau Chirinza^a, Paulino Muguirrima^a, Federico A. Leon Zerpa^{b,*}, Alejandro Ramos Martin^b, Carlos A. Mendieta Pino^b

^a Zambezi University (Unizambeze) - Faculty of Science and Technology, City of Beira, Mozambique

^b University of Las Palmas de Gran Canaria - Institute of Environmental Studies and Natural Resources, (IUNAT), Spain

ARTICLE INFO

Keywords:

Resources
Energy consumption
Desalination plants
Pareto analysis

ABSTRACT

This study examines the potential of implementing a systematic approach to piloting desalination plants, with the objective of evaluating energy improvements in water desalination processes. The introduction of new reverse osmosis membranes is imperative at the small-scale level. The findings can be extrapolated to inform the operation of large-scale desalination plants. The objective of this approach is to achieve the optimal water quality standard at the lowest possible cost. In this manner, pilot tests are being conducted prior to the determination of whether to alter the reverse osmosis membranes, as this represents a substantial investment. The objective of these tests is to minimise the risk of making an erroneous decision and to ensure optimal results in terms of energy consumption, operating costs and reduction of environmental impact, while complying with the requisite water quality standards. In this instance, the Pareto analysis is utilised to ascertain the two or three most significant causes whose treatment affects more than 80 % of the potential energy savings to be implemented. This article introduces a novel approach to studying a total of 180 desalination plants at the territorial level in the Canaries.

1. Introduction

This study can be used for decision-making in processes related to improving energy efficiency in seawater reverse osmosis plants. Improvements in seawater desalination are studied, based on the reduction of energy consumption in the production of fresh water.

The global scarcity of freshwater resources has significantly influenced the development of desalination technologies, with reverse osmosis emerging as one of the most prevalent and highly regarded methods.

The objective is to introduce improvements to the energy efficiency of reverse osmosis (RO) processes for seawater desalination plants, with the intention of establishing a globally applicable procedure.

The desalination of seawater in water treatment plants has evolved a lot in the last five decades, in which the desalination process and its technology has changed and has become more and more cost-effective and efficient. Initially, the desalination process was a thermal process that has been changing with scientific and technological advances (Liao and Li, 2024; Gabriel Anghel and Ilinca, 2023; Wang, 2022; Dariane,

2021; Kong, 2021; Shi, 2022). It is interesting to consider the design and implementation of pilots in desalination plants, in a systematic way, to evaluate energy improvements in water desalination processes. In this sense, it is proposed to carry out tailor-made pilots according to the situation to make the right decision and execute the investment with the minimum risk. Therefore, in these pilots, an assessment of boron, water quality, a diagnostic analysis of energy, carbon footprint, ecological footprint, environmental sustainability and operation and maintenance costs are carried out (Ruiz et al., 2017; Leon et al., 2021; Kurihara, 2021; Caudle et al., 1966).

Membrane ageing is a decisive factor regarding the energy consumed in the plant, the permeate flow rate and the emissions produced. Therefore, a study methodology is established to make decisions about it. The decision to change membranes is very important for the lifetime of the plant and many variables must be considered, such as working pressure, feed and permeate water quality of the reverse osmosis system, conversion, temperature, etc. With the introduction of state-of-the-art membranes with low energy consumption and high salt rejection, we can produce water of the required quality under more efficient and

* Corresponding author.

E-mail address: federico.leon@ulpgc.es (F.A. Leon Zerpa).

<https://doi.org/10.1016/j.clwat.2024.100054>

Received 10 October 2024; Received in revised form 11 November 2024; Accepted 11 November 2024

Available online 15 November 2024

2950-2632/© 2024 The Author(s). Published by Elsevier Ltd. This is an open access article under the CC BY license (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

sustainable conditions than with commercial reverse osmosis membranes for sea water desalination (Almadani, 2003; López et al., 2004; Porada et al., 2013; Lee et al., 2006; Li et al., 2008). The primary objective of the improvements studied in seawater desalination is based on the reduction of energy consumption in the production of fresh water. Consequently, reverse osmosis is the most suitable process due to its lower energy consumption per cubic meter of product water, which is why it occupies a privileged position in the sector (Biesheuvel and van der Wal, 2009; Kim and Choi, 2010; Biesheuvel et al., 2011; Bouhadana et al., 2011).

Moreover, it is studied the operation, maintenance, and handling of membranes in detail, due to their importance in energy saving, showing how to optimize all the processes where they are involved with the aim of continuously improving their efficiency (Demirer et al., 2013; Dlugolecki and van der Wal, 2013; Suss et al., 2012; Bouhadana et al., 2011; Jeon et al., 2013; Blair and Murphy, 1960).

The energy efficiency of desalination plants is directly correlated with the quality of the permeate water that is required. In Spain, Royal Decree 140/2003 identifies boron as a significant challenge in the production of drinking water, stipulating a maximum concentration of 1 ppm. This necessitates either a second purification step, which would require the doubling of the number of membranes in the plant, or the use of a more expensive, high-rejection membrane in a single step, but with boron rejection lower than 1 ppm, which would consume more energy. The implementation of a novel reverse osmosis refining process, which is characterised by high costs, or the deployment of high rejection membranes in a single step but with elevated pressures, thus necessitating greater energy consumption, represents a significant variable cost for the installation (Arnold and Murphy, 1961; Murphy et al., 1969; Murphy and Caudle, 1967; Evans and Hamilton, 1966).

The WHO, however, is more flexible with boron requirements for drinking water and allows a maximum of 2.4 ppm. This international regulation is followed in many countries in the world where water desalination is very important and among others we can mention Chile where the plant designs consume less energy because they work at lower pressures since the boron does not have to be less than 1 ppm but less than 2.4 ppm; or in other areas of the planet such as North Africa, the Middle East, etc., where they are also adapting to this regulation. The main objective of this study can be considered for the decision making of actions associated with Energy Efficiency. This article introduces a novel approach to studying a total of 180 desalination plants, at the territorial level in the Canary Islands, specified in annex 1 (Evans et al., 1969; Reid et al.; Washington, 1997; Zubieta and Bonert, 2000; Lasia et al.; York, 1999).

The present study is concerned with seawater reverse osmosis desalination plants in the Canary Islands. This manuscript aims to optimize the operation of these plants with a view to reducing their environmental impact, namely their energy consumption, water quality, costs, and emissions. The objective is to make this process more efficient and sustainable. It is essential to assess the energy efficiency of desalination plants in terms of the emissions generated the carbon and ecological footprint of the system.

2. Methods

The two most important parameters for describing the separation performance in reverse osmosis processes are the permeate flow rate and the salt rejection. Both quantities are mainly influenced by the following parameters: pressure, temperature, recovery and salt concentration in the feed (Schiller, 1997; EN 62391-1, 2006; EN 62391-2-1, 2006; EN 62391-2, 2006). In annex 1 is shown the real-field data.

2.1. Pressure

The permeate flow rate increases with increasing feed pressure. However, the concentration of salts in the permeate decreases with

increasing feed pressure. This corresponds to an increase in the rejection coefficient. The high-pressure pump is the highest energy consumption of the sea water reverse osmosis desalination plant. Due to this is very important to control this. A feed salinity increase affects directly increasing the feed pressure and the energy consumption of the installation. The same occurs when decreases the feed temperature or the plant is dirty due to the bad quality of the feed water and pretreatment. Therefore, all these issues have to be in account to avoid any increase in the energy consumption and due to this in the economic and environmental costs of the installation (EN 62576, 2010; Gualous et al., 2003; Brouji et al., 2008; Conway and Pell, 2001; Fabregat et al., 2003; Burke and Miller, 2009).

2.2. Temperature

Temperature is another very important factor because it directly affects the operation of the RO system. When the temperature drops there is a decrease in the permeate flow rate and conversely when the temperature rises there is an increase in permeate production. The rejection coefficient, R , however, decreases with increasing temperature. This means that more dissolved substances pass through the membrane (Martín, 2014; Texas Instruments, 2018; Arduino, 2018; Arduino, April 2018).

2.3. Pilots

The implementation of pilot tests with the latest generation of reverse osmosis membranes in large desalination plants is becoming increasingly prevalent. This is due to the fact that preliminary experiments are being conducted on the functionality of these new generation membranes, which exhibit enhanced salt rejection and reduced energy consumption. This is done in order to achieve the optimal water quality standard at the lowest possible cost. In this way, pilot tests are being carried out before the decision is made whether or not to change the reverse osmosis membranes, as this represents a significant investment and minimizing the risk of errors in order to ensure the best results in terms of energy consumption, operating costs and reducing the environmental impact while complying with the required water quality (Spark Fun Electronics, 2018; Adafruit, 2018; Texas Instruments, 2018; Adafruit, 2018; Texas Instruments, 2018).

2.4. Use of pilots

The energy consumption is the highest operation cost of the desalination system so we would like to reduce it through the reverse osmosis process which is the most efficient. Due to this, it is mandatory the introduction of RO piloting in a seawater desalination plant for testing and to decrease the energy consumption. This is essential to optimize its resources.

Pilot plant could be equipped with a vessel and the following elements to a full monitoring and control of the operational conditions (pressure and flows of the seawater, brine and permeate flows).

- Feed seawater flow: a control valve at the HPV inlet for the water flow and pressure control, a pressure transmitter, a drop pressure transmitter.
- Permeate flow: a flow meter, a pressure transmitter (the one of the full scale rack).
- Brine flow: three valves, in order to control the brine flow and appropriately make the brine discharge from 65 bars to atmospheric pressure, a flowmeter.

The implementation of reverse osmosis (RO) piloting in a seawater desalination plant, which is characterised by a high energy consumption, could prove advantageous in optimising the utilisation of its

resources. In the absence of a pilot plant, there is a risk of failing to capitalise on the opportunity to test a membrane that optimises energy consumption and improves the quality of the water produced. The selection of the feed water intake is of significant importance, as an open intake is prone to greater contamination than a well intake. Additionally, the temperature range is higher in an open intake, which directly impacts energy consumption. The accumulation of fouling and the reduction in temperature increase the operational pressure required to maintain permeate flow. Furthermore, the use of high rejection membranes increases the operational pressure and consequently influences energy consumption. Therefore, it is essential to utilize low energy consumption membranes if the quality requirements of the client can be met.

Not having a pilot plant can have a very high opportunity cost, as it is not possible to test a membrane that optimises energy consumption and improves the quality of the water produced. This makes it possible to test its operation on a small scale and then take it to a large scale in the plant, minimising the risk of not meeting the planned objectives. If we do not have such a pilot plant, the cost of which for large seawater plants is not significant compared to the investment that would have to be made in membranes in the installation, we can make a mistake if we choose the wrong membrane for our type of water without first having tested it in situ and lose a large amount of money (Analog Devices, 2018; Texas Instruments, 2018; Zhao et al., 2012; Texas instruments, 2018; Song et al., 2015).

Therefore, having the appropriate tests and the necessary instrumentation in a plant of this type to carry out pilot tests has a direct impact on the energy efficiency of the system. In this sense, different types of tests can be carried out: membrane ageing, piloting or collection depth, among others. In the first of these tests, the membranes are operated in a pressure pipe, in parallel to the rest of the train, and under the same operating conditions as the plant. In this way, the membranes age and we can pilot them a posteriori in more real working conditions, not only in start-up conditions where it is more difficult to find problems. The second test is the actual piloting, where we vary the working conditions of the membrane as we wish to obtain results in different scenarios. Finally, a test of the catchment depth helps to characterise the feed water to the installation in terms of temperature, water quality, etc (Dimitriou et al., 2015a, 2015b).

It is therefore proposed to carry out pilot tests to experiment on a small scale with the operation of new generation membranes with high rejection, but also with low energy consumption, looking for the one that considerably reduces, depending on the type of water in each plant, energy, economic and environmental consumption while complying with the required water quality. Once the best membrane has been chosen for each plant, through the introduction of these pilot tests, the energy, economic and environmental improvement that has been chosen will be carried out on an industrial scale of the entire plant, frame by frame. These economic, energy and environmental assessments are shown in the diagram and are also included earlier in this chapter (García Latorre et al., 2015; Kherjl et al., 2015; Schallenberg-Rodriguez et al., 2014).

If these periodic pilot tests are not carried out with the membranes that are coming onto the market and partial replacements are not made of the membranes that are operating in the plant, over time, these will age and not only will water production decrease, but it will also be of poorer quality and the working pressure will increase, which means higher energy consumption and operating costs for the plant. Therefore, it will be more expensive not to carry out pilot tests than to carry them out with membranes that the manufacturers do not normally leave at zero cost for them to have real information on their operation. Continuing to work with membranes that consume more and more energy to produce the same amount of water or less with worse quality, will also have an environmental cost, represented in an increase in the carbon footprint and the planet's ecological footprint as will be calculated later in chapter 4 of the results (Dow et al., 2016; Mazlan et al.,

2016; Walton, 1989; Boerlage, 2015).

Likewise, working with ERI, DWEER, OSMOREC, etc. energy recovery systems will reduce the energy consumption of the installation compared to working with Pelton or Francis turbines and therefore it is also advisable to rely on these systems that will reduce the environmental cost of the system, the ecological and carbon footprint of the plant.

In this sense, the main factor to comply with, depending on the geographical and political location where we are, will be the drinking water regulations if it is a desalination plant for human consumption, which is the majority of cases throughout the world. If we are in Spain, it is the Royal Decree 140/2003 of 7 February that we must comply with, where the biggest bottleneck is to ensure that the boron rejection of RO elements is sufficiently loose so that the total permeate is below 1 ppm. This is the main factor to meet, water quality. For this it is studied how boron and hence water quality can vary depending on the use of different RO membranes. This will be carried out later with real data at the Alicante 1 desalination plant (Bilstad et al., 2015; Gude, 2016; Leon and Ramos, 2017).

Therefore, the demand of water quality requires us to work with membranes with high salt rejection and particularly boron to achieve this value, and when it is not possible to do a second osmosis step where we treat the permeate from the first step again with brackish water membranes partially or totally and often incurring the cost of chemical products to raise the pH. We do this so that the boron, which is mainly boric acid, becomes borate, which is a salt, so the membrane is more likely to reject it, as it is designed to reject salts.

Once we meet the water quality, if possible, in one step only, so as not to make the plant more expensive with a second osmosis step in terms of membranes, pressure pipes, pumps, piping, valves and energy consumption; secondly, we seek to keep the pressure required in our system as low as possible by using state-of-the-art membranes with low energy consumption and working at not too low temperatures.

Therefore, we relate water quality to a high salt rejection which means high energy consumption, so we introduce the latest generation membranes to reduce the energy required while maintaining the necessary quality. The pilot tests carried out at the Carboneras desalination plant are along these lines and, using different membranes from various manufacturers, we were able to choose the best one that firstly met the water quality requirements and secondly did so with reverse osmosis membranes at the lowest possible energy consumption (Mahboubeh and Vijay, 2024; Kalhori et al., 2023).

In this sense the water quality is directly linked to the energy consumption of the plant which is also a function of the water temperature. It introduces the necessary tools to identify what energy is needed in our process and calculate it (Khorsandi et al., 2022; Parisa-Sadat and Loáiciga, 2021).

Similarly, we also relate water quality and the energy consumption of the desalination plant to the economic and environmental dimension of the system, since the lower our energy consumption, the lower the monetary and environmental costs of our installation (Parisa-Sadat and Loáiciga, 2015). This methodology is applicable to all seawater desalination plants, which is why we are also going to extend the study to all these installations in the Canary Islands and to the studies carried out in Alicante 1 and Carboneras, as will be seen later. Similarly, the Pareto diagram tool is used to identify which aspects of the desalination plant are the most significant, linked in Fig. 1, and they have the greatest impact on its energy consumption. Therefore, Fig. 1 shows the most important elements to be considered in the installation.

3. Results

3.1. Pareto analysis

Pareto analysis is used to identify the 2 or 3 most significant causes which affect to more than 80 % of the costs. In this sense, Fig. 2 below

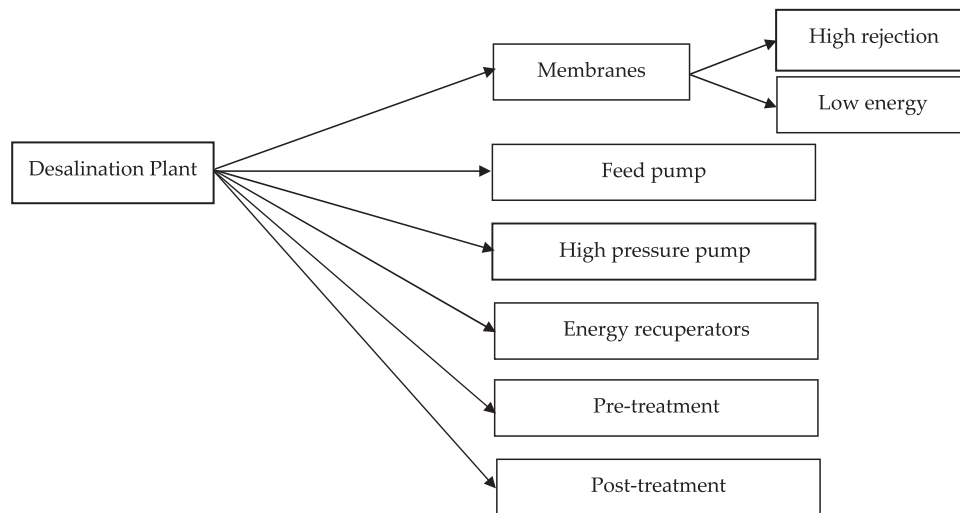


Fig. 1. Most significant elements of the desalination plant.

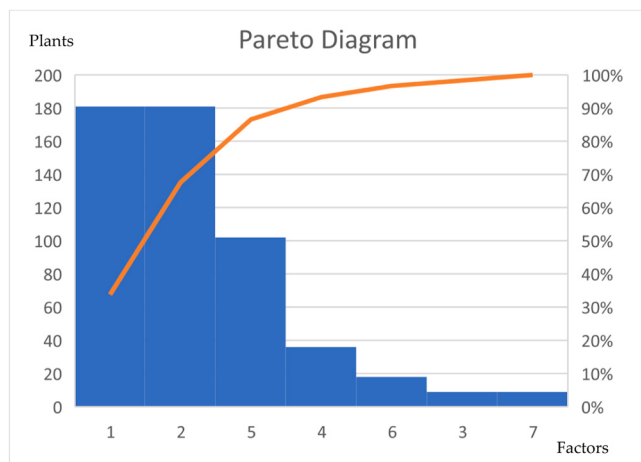


Fig. 2. Desalination plant Pareto diagram.

shows the Pareto diagram for the energy improvement of 180 plants in a given territory. A series of factors that can affect this energy improvement have been numbered from 1 to 7, such as the seawater intake, the decision on the membranes, the energy recuperators, the high-pressure pump, the decisions on the pre-treatment, the feed pump or the post-treatment.

The aim is to determine which would be the most significant effects. In this example, it can be seen how the most important decisions are based on factors 1, 2 and 3, which influence 90 % of the possible energy improvement of the system. In this sense, the first two elements will be mainly studied in terms of the decision making on factors 1 and 2 for the installation, which represents between 70 % and 80 % of the influence on the proposed energy improvement. The third factor is also considered, although to a lesser extent, to reach 90 % of the effects on the energy improvement of the desalination plants in the territory to be considered.

Membrane decisions can be made on the basis of a pilot test in the plant, with the specific type of water to be treated, or directly based on the supplier's projections and guarantees. In this sense, the technical specifications of the manufacturer Toray show how, in the case of a desalination plant, an uncertainty of around 20 % in water quality can be expected, due to the safety factors of the very conservative manufacturer's specifications and even more so the system guarantees that may be requested a posteriori depending on each particular project. This

demonstrates the need for piloting in a desalination plant to eliminate this uncertainty at virtually no cost to the operator, as the membranes for these tests are normally supplied free of charge by the supplier avoiding the risk of making a mistake with the membranes, with all the costs that this entails, and are tested in a prepared pipe that is released from the plant for this test. Depending on the size of the plant, we can make a colour coded classification according to the incidence of piloting as shown in Table 1. For example, level 1, green, refers to desalination plants with a production of less than 100 tCO₂/day, with a very slight impact, as the percentage of salt rejection and energy consumption is very similar per m³ of product water, as it is a small amount of permeated water, this value is low, but as the product flow of the installation increases, this product shoots up to multiply by a thousand in the case of level 5, red, with a very serious impact on the energy efficiency of the installation, economic and environmental cost (Table 1).

3.2. Territorial Pareto diagram

The Pareto diagram, already discussed before, has been studied at territorial level for the Canary Islands, where a total of 180 seawater desalination plants have been included for this study. Fig. 3 shows the corresponding Pareto diagram.

The most important decision making is based on the decision on the collection of feed water, the membranes and the energy recovery units, which influence 90 % of the possible energy improvement of the system. In this sense, the first two elements will be mainly studied in terms of decision-making on seawater collection and the type of membranes to be chosen for the installation, which represent between 70 % and 80 % of the influence on the proposed energy improvement. The third aspect, energy recovery, is not the subject of this study because it is not subject to possible pilots in the plant, but rather to the installation or not of these, whose operation has been demonstrated in seawater plants. In any case, it is advisable whenever possible to introduce energy recovery equipment of the Dweer or ERI type that makes maximum use of the pressure energy of the brine.

Decisions on membranes can be made based on a pilot test in the plant, with the specific type of water to be treated, or based directly on the projections and guarantees of the supplier. It is demonstrated the need to carry out a pilot test in a desalination plant to eliminate this uncertainty at practically no cost to the operator, as the membranes for these tests are normally supplied free of charge by the supplier, avoiding the risk of making a mistake with the membranes, with the costs of all kinds that this entails, and are tested in a prepared pipe that is released from the plant for this test.

Table 1
Incidence of not using plant pilots.

Production (m ³ /day)	Advocacy	Colour
<100	Very Slight	1
100-1000	Slight	2
1000-10000	Moderate	3
10000-100000	Serious	4
>100000	Very Serious	5

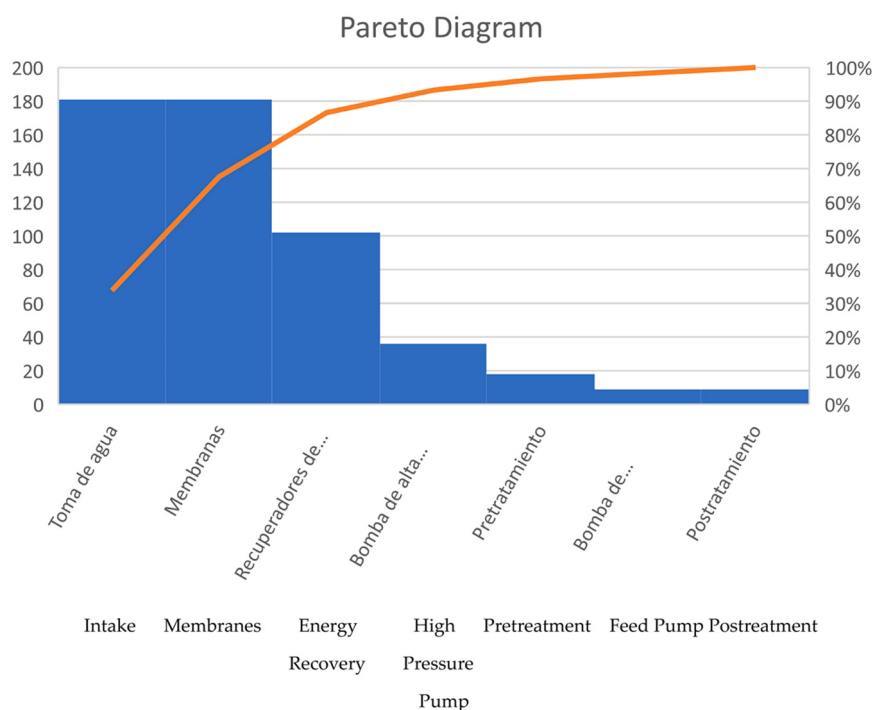


Fig. 3. Pareto diagram of the desalination plant.

Regarding the decision to take decisions on the collection of feed water, if possible, we recommend taking the water from a beach well or borehole to take advantage of the filtration of the ground and improve the quality of the feed water, which is cleaner and less polluted. If this is not possible due to the size of the plant, we would opt for an open intake and in both cases at the appropriate depth to stabilize the working temperature as much as possible. Similarly, the greater the depth, the lower the salinity of the seawater, which reduces the osmotic pressure and consequently the energy consumption of the installation.

In this sense, a deeper intake stabilizes the temperature and reduces its value in the summer- autumn periods when it is higher in the water, improving boron rejection in the most critical months. This helps us, by confirming pilots, to opt for membranes with low energy consumption as opposed to those with high rejection which consume much more. Increasing the depth of the intake also means an economic cost based on the cost of the GRP pipe of around 35 EUR/m and, if necessary, a higher-pressure pump, which in the case of Grundfos means 5.5 % more cost, although normally the same pump is enough. Even so, these costs are quickly amortized against the large energy and economic savings that can be obtained per cubic meter of water produced. This also justifies the importance of the feed water intake.

Energy consumption is calculated multiplying the desalination capacity of each island times the consumption per kWh/m³ of permeate

water. This consumption (kWh/m³) is obtained studying the characteristics and different energy recovery systems installed in the desalination plants of each island (<http://www.fcca.es>).

In this sense, it can be confirmed that for an annual production of desalinated water in the Canary Islands of approximately 660,000 m³/day and considering an average energy consumption of 3.04 kWh/m³, introducing equipment to recover energy from brine, we have a carbon footprint of 1203.84 tCO₂/day, which means that there are 439,402 tCO₂ per year, as commented on in Section 3. On the other hand, following this same criterion and using a global coefficient of the ecological footprint to calculate it (Suss et al., 2012; Bouhadana et al., 2011; Jeon et al., 2013; Blair and Murphy, 1960), a value of 219701 ha/year of surface area is obtained to compensate for the ecological footprint that we have due to the production of desalinated water in the Canary Islands. This ecological footprint per person divided by the population of Canary Islands (2207,225 habitants), supposes a value of 0.1 ha/person/year and consequently the emissions per inhabitant and year are 0.2 tCO₂/person/year.

The carbon and ecological footprints calculated before are only for the desalination in Canary Islands. If we extend this calculation to the total annual consumption in all the sectors of the archipelago in 2019 of 8878271 MWh and considering an average value of 0.6 tCO₂/MWh obtained (Blair and Murphy, 1960), it is estimated that 5326,963

tCO₂/year can be emitted. It represents 2.4 tCO₂/person/year.

A general analysis of energy consumption by plant components reveals that if membrane replacement is not carried out, energy consumption increases progressively. This phenomenon can be observed in Table 2, which was constructed on the basis of the calculations and design specifications of the Toray membrane manufacturers. It is estimated that the average operating flow is 16 LMH, with a beach well intake or pre-treatment with ultrafiltration membranes, along with a recovery rate of 45 % and a feed salinity of 39 g/l, which is typical of the area.

Software Toray DS2 software was employed to run hypothetical projections under different scenarios, utilizing a calculator tool to obtain all the requisite parameters. The most unfavorable scenario in terms of energy consumption was based on the lowest feedwater temperature observed in the Canary Islands (17°C) and the TM820K-440 membrane. This element exhibited high salt rejection (99.86 %) and a permeate flow of 24.2 m³/d under the test conditions of 55.2 bar, a recovery rate of 8 % and feedwater characteristics of 32,000 ppm NaCl. The other element used in the projections, the TM820V-440, resulted in lower energy consumption, with 99.80 % of salt rejection and 37.5 m³/d of permeate flow under the same test conditions. The pore size of the flat sheet membrane in the TM820K-440 is smaller than in the TM820V-440. Consequently, the former produces permeate water of a higher quality, while the latter has a lower energy consumption.

It can be seen from Tables 2 and 3 that, in 5 years of operation, the working pressure is considerably higher at the lowest feedwater temperature (17°C) than at the highest (27°C) and that consequently the energy consumption is also higher. In the lower energy consumption case (with the TM820V-440 element), the calculations incorporated an energy recovery system (ERS) to further reduce energy consumption at the highest temperature of around 27°C (Table 3).

Thus, Table 2 shows, at the lowest temperature (17°C) and after 5 years of operation, the highest energy consumption (6.274 kWh/m³) with the high salt rejection element (TM820K-440), and Table 3 shows, at the highest temperature (27°C) and at start-up, the lowest energy consumption (2.200 kWh/m³) with the low energy consumption element (TM820V-440).

4. Conclusions

The novelty of this article is to apply Pareto diagram to a study of a total of 180 seawater desalination plants at territorial level in Canary Islands. The introduction of RO piloting in a seawater desalination plant, whose energy consumption is very high, could be beneficial in optimizing its resources. Without a pilot plant, there is a risk of missing out on the opportunity to test a membrane that optimizes energy consumption and improves the quality of the water produced.

The Pareto analysis is used to highlight the 2 or 3 most significant causes whose treatment affects more than 80 % of the possible energy improvement to be implemented.

In this example, it can be seen how the most important decisions are based on factors 1, 2 and 3, which influence 90 % of the possible energy improvement of the system. In this sense, the first two elements will be mainly studied in terms of the decision making on factors 1 and 2 for the installation, which represents between 70 % and 80 % of the influence

Table 3

Pressure, power and energy consumption values at 27°C with the TM802V-440 membrane element.

Year	Pressure (bar)	High Pressure Pump Power (kW)	ERS Power (kW)	Booster (kW)	Energy (kWh/m ³)
0	57.69	9168.26	7908.69	479.10	2.200
1	58.07	9226.44	7962.37	480.20	2.214
2	58.45	9285.33	8016.83	481.30	2.229
3	58.77	9334.34	8062.14	482.10	2.240
4	59.06	9378.71	8103.15	482.90	2.251
5	59.34	9420.35	8141.62	483.70	2.261

on the proposed energy improvement. The third factor is also considered, although to a lesser extent, to reach 90 % of the effects on the energy improvement of the desalination plants in the territory to be considered.

The cost and energy required in the process depend on the quality of water required and the type of membrane used. It is confirmed the importance of operational efficiency and cost reduction, due to the highest cost of the installation is the electrical consume of the high-pressure pump. To reduce the feed pressure influences directly in the highest economical cost of the sea water reverse osmosis desalination plant. Feed water collection is important due to an open intake could increase the dirty on the surface of the reverse osmosis membranes and it increases the energy consumption. Moreover, to use high rejection membranes increase the operation pressure and it influences directly in the energy consumption and in the economic cost of the installation. Therefore, it is mandatory to use low energy consumption membranes to get a cost reduction in the operation of the plant.

The study of standard RO elements for a seawater desalination plant helps to choose a reverse osmosis element that lowers the energy consumption, and therefore the operating costs of the plant as energy is the most expensive part of the plant.

Within the total cost of water production, the most important influences are the energy consumed and the type of RO element chosen.

Author statement

The statements, opinions and data contained in all publications are solely those of the individual author(s) and contributor(s) and not of MDPI and/or the editor(s). MDPI and/or the editor(s) disclaim responsibility for any injury to people or property resulting from any ideas, methods, instructions or products referred to in the content.

Funding

This research was co-funded by the INTERREG V-A Cooperation, Spain–Portugal MAC (Madeira-Azores-Canaries) 2014–2020 programme, MITIMAC project (MAC2/1.1a/263).

CRediT authorship contribution statement

Federico Antonio Leon Zerpa: Writing – original draft, Validation, Software, Project administration, Investigation, Formal analysis, Conceptualization. **Alejandro Ramos Martin:** Writing – review & editing, Visualization, Supervision, Resources, Methodology, Funding acquisition, Data curation. **Carlos Alberto Mendieta Pino:** Writing – review & editing, Visualization, Validation, Resources, Project administration, Investigation, Funding acquisition, Conceptualization. **Nicolau Chrinza:** Writing – original draft, Validation, Software, Project administration, Investigation, Formal analysis, Conceptualization. **Paulino Muguirrima:** Writing – review & editing, Visualization, Supervision, Resources, Methodology, Funding acquisition, Data curation.

Table 2

Pressure, power and energy consumption at 17°C with the TM820K-440 membrane element.

Year	Pressure (bar)	Power (kW)	Energy consumption (kWh/m ³)
0	71.11	23,511.23	5.643
1	72.77	24,060.57	5.775
2	74.56	24,650.69	5.916
3	76.13	25,171.11	6.041
4	77.62	25,662.76	6.159
5	79.06	26,140.34	6.274

Declaration of Competing Interest

The authors declare that they have no known competing financial interests or personal relationships that could have appeared to influence the work reported in this paper.

Appendix A. Supporting information

Supplementary data associated with this article can be found in the online version at doi:10.1016/j.clwat.2024.100054.

Data availability

Data will be made available on request.

References

- Adafruit, ADS1115 16-Bit ADC - 4 Channel with Programmable Gain Amplifier, (On Line). (<https://www.adafruit.com/product/1085>). [June 2018].
- Adafruit, MCP4725 Breakout Board - 12-Bit DAC w/I2C Interface, (On Line). (<https://www.adafruit.com/product/935>). [June 2018].
- Almadani, H.M.N., Renewable Energy, 1915-1924., 2003.
- Analog Devices, ADM3260, (On Line). <http://www.analog.com/en/products/interface-isolation/isolation/isopower/adm3260.html#product-overview>. [June 2018].
- Arduino, Arduino Nano, [On Line]. (<https://store.arduino.cc/usa/arduino-nano>). March 2018.
- Arduino B.Q., Arduino Nano Pinout, (On Line). (<https://www.bq.com/es/>). 2018.
- Arnold, B.B., Murphy, G.W., 1961. Studies on electrochemistry of carbon and chemically modified carbon surfaces. *J. Phys. Chem.* (65), 135-138.
- Biesheuvel, P.M., van der Wal, A., 2009. Membrane capacitive deionization. *J. Membr. Sci.* (346), 256-262.
- Biesheuvel, P.M., Zhao, R., Porada, S., van der Wal, A., 2011. Theory of membrane capacitive deionization including the effect of the electrode pore space. *J. Colloid Interface Sci.* (360), 239-248.
- Bilal, Protasova, Simonova, Stornes, I., Yuneizi, 2015. Wind-powered RO desalination. *Desalin. Water Treat.* 55, 3106-3110.
- Blair, J.W., Murphy, G.W., 1960. Electrochemical demineralization of water with porous electrodes of large surface area. *Saline Water Conversion. American Chemical Society*, pp. 206-223.
- Boerlage, Nada, 2015. Algal toxin removal in seawater desalination processes. *Desalin. Water Treat.* 55, 2575-2593.
- Bouhadana, Y., Avraham, E., Noked, M., Ben-Tzion, M., Soffer, A., Aurbach, D., 2011. «Capacitive deionization of NaCl solutions at non-steady-state conditions: inversion functionality of the carbon electrodes». *J. Phys. Chem. C.* (115), 16567-16573.
- Bouhadana, Y., Ben-Tzion, M., Soffer, A., Aurbach, D., 2011. A control system for operating and investigating reactors: the demonstration of parasitic reactions in the water desalination by capacitive de-ionization. *Desalination* (268), 253-261.
- Brouji H.E., Vinassa J.-M., Briat O., Woïrgard N.B.A.E., Ultracapacitors self discharge modelling using a physical description of porous electrode impedance, *IEEE*, 2008.
- Burke A., Miller J., Testing of electrochemical capacitors: capacitance, Nantes, 2009.
- Caudle D.D., Tucker J.H., Cooper J.L., Arnold B.B., Papastamatakis A., Electrochemical Demineralization of Water with Carbon Electrodes, U.S. Dept. of the Interior, Washington, 1966.
- Conway B., Pell W., «Analysis of power limitations at porous», 2001.
- Darlane, Alireza B., et al., 2021. Integrated operation of multi-reservoir and many-objective system using fuzzified hedging rule and strength Pareto evolutionary optimization algorithm (SPEA2). *Water* 13 (15), 1995. <https://doi.org/10.3390/w16070995>.
- Demirer, O.N., Naylor, R.M., Rios Perez, C.A., Wilkes, E., Hidrovo, C., 2013. Energetic performance optimization of a capacitive deionization system operating with transient cycles and brackish water. *Desalination* (314), 130-138.
- Dimitriou, E., Mohamed, E., Kyriakarakos, G., Papadakis, G., 2015. Experimental investigation of the performance of a reverse osmosis desalination unit under full- and part-load operation. *Desalin. Water Treat.* 53, 3170-3178.
- Dimitriou, E., Mohamed, E., Karavas, C., Papadakis, G., 2015. Experimental comparison of the performance of two reverse osmosis desalination units equipped with different energy recovery devices. *Desalin. Water Treat.* 55, 3019-3026.
- Đlugolecki, P., van der Wal, A., 2013. Energy recovery in membrane capacitive deionization. *Environ. Sci. Technol.*
- Dow, N., Gray, S., Li, J., Zhang, J., Ostarcovic, E., Liubinas, A., Atherton, P., Roeszler, G., Gibbs, A., Duke, M., 2016. Pilot trial of membrane distillation driven by low grade waste heat: membrane fouling and energy assessment. *Desalination* 391, 30-42.
- EN 62391-1:2006, Condensadores eléctricos fijos de doble capa para su uso en equipos electrónicos. Parte 1: Especificación genérica (IEC 62391-1:2006) (Ratificada por AENOR en septiembre de 2006), 2006.
- EN 62391-2:2006, Condensadores eléctricos fijos de doble capa para su uso en equipos electrónicos. Parte 2: Especificación intermedia: Condensadores eléctricos de doble capa para aplicación de potencia (IEC 62391-2:2006) (Ratificada por AENOR en septiembre de 2006), 2006.
- EN 62391-2-1:2006, Condensadores eléctricos fijos de doble capa para su uso en equipos electrónicos. Parte 2-1: Especificación marco particular: Condensadores eléctricos de doble capa para aplicación de potencia. Nivel de evaluación EZ (IEC 62391-2-1:2006), 2006.
- EN 62576:2010, Condensadores eléctricos fijos de doble capa para vehículos eléctricos híbridos. Métodos de ensayo de las características eléctricas. (Ratificada por AENOR en febrero de 2011), 2010.
- Evans, S., Hamilton, W.S., 1966. The mechanism of demineralization at carbon electrodes. *J. Electrochem Soc.* (113), 1314-1319.
- Evans, S., Accomazzo, M.A., Accomazzo, J.E., 1969. Electrochemically controlled ion exchange. *J. Electrochem Soc.* (116), 307-309.
- Fabregat F., Mora G.G.I., Bisquert J., Cyclic voltammetry studies, *J. Phys. Chem.* 2003.
- Gabriel Anghel, Cristian, Ilinca, Cornel, 2023. Evaluation of various generalized pareto probability distributions for flood frequency analysis. *Water* 15 (8), 1557. <https://doi.org/10.3390/w15081557>.
- García Latorre, F.J., Pérez Báez, S.O., Gómez Gotor, A., 2015. Energy performance of a reverse osmosis desalination plant operating with variable pressure and flow. *Desalination* 366, 146-153.
- Gualous, H., Bouquain, D., Berthon, A., Kauffmann, J.M., 2003. Experimental study of supercapacitor serial resistance and capacitance variations with temperature. *J. Power Sources*.
- Gude, Gnaneswar, 2016. Desalination and sustainability – an appraisal and current perspective. *Water Res* 89, 87-106.
- Jeon, S.-I., Park, H.-R., Yeo, J.-G., Yang, S., Cho, C.H., Han, M.H., et al., 2013. Desalination via a new membrane capacitive deionization process utilizing flow electrodes. *Energy Environ. Sci.*
- Kalhari, M., Ashofteh, P.-S., Moghadam, S.H., 2023. Development of the multi-objective invasive weed optimization algorithm in the integrated water resources allocation problem. *Water Resour. Manag.* 37, 4433-4458. <https://doi.org/10.1007/s11269-023-03564-3>.
- Kherji, J., Mnif, A., Bejaoui, I., Humrouni, B., 2015. Study of the influence of operating parameters on boron removal by a reverse osmosis membrane. *Desalin. Water Treat.* 56, 2653-2662.
- Khorsandi, M., Ashofteh, P.-S., Azadi, F., Singh, V.P., 2022. Multi-objective firefly integration with the K-nearest neighbor to reduce simulation model calls to accelerate the optimal operation of multi-objective reservoirs. *Water Resour. Manag.* 36, 3283-3304. <https://doi.org/10.1007/s11269-022-03201-5>.
- Kim, Y.-J., Choi, J.-H., 2010. Improvement of desalination efficiency in capacitive deionization using a carbon electrode coated with an ion-exchange polymer. *Water Res* (44), 990-996.
- Kong, Yanjun, et al., 2021. Multi-objective Optimization Based on Simulation Integrated Pareto Analysis to Achieve Low-carbon and Economical Operation of A Wastewater Treatment Plant. *Water* 13 (8), 1046. <https://doi.org/10.3390/w13081046>.
- Kurihara, Masaru, 2021. Seawater reverse osmosis desalination. *Membranes* 11 (4), 243. <https://doi.org/10.3390/membranes11040243>.
- Lasia B.E.C.A., Bockris J., White R., Electrochemical impedance spectroscopy and its applications, modern aspects of electrochemistry, New.
- Lee, J.-B., Park, K.-K., Eum, H.-M., Lee, C.-W., 2006. Desalination of a thermal power plant wastewater by membrane capacitive deionization. *Desalination* (195), 125-134.
- Leon, F., Ramos, A., Vaswani, A., Mendieta, C., Brito, S., 2021. Climate change mitigation strategy through membranes replacement and determination methodology of carbon footprint in reverse osmosis ro desalination plants for islands and isolated territories. *Water* 13, 293. <https://doi.org/10.3390/w13030293>.
- Leon, F.A., Ramos, A., 2017. Analysis of high efficiency membrane pilot testing for membrane design optimization. *Desalin. Water Treat.* 73, 208-214.
- Li, H., Gao, Y., Pan, L., Zhang, Y., Chen, Y., Sun, Z., 2008. Electrosorptive desalination by carbon nanotubes and nanofibres electrodes and ion-exchange membranes. *Water Res* (42), 4923-4928.
- Jianbo Liao, Shuang Li et al. Multi-objective optimization based on simulation integrated pareto analysis to achieve low-carbon and economical operation of a wastewater treatment plant. *Water* 2024, 16(7), 995; <https://doi.org/10.3390/w16070995>.
- López, María del Pilar Mier, Raquel Ibáñez Mendizábal, Inmaculada Ortiz Uribe, María José Rivero Martínez, 2004. Electrodialisis con membranas bipolares: fundamentos y aplicaciones. *Ing. ia química* (418), 166-182.
- Mahboubeh, Parisa-Sadat, Vijay, 2024. Development of a multi-objective reservoir operation model for water quality-quantity management. *J. Contam. Hydrol.* 265, 104385.
- Martín, Hernández, Análisis, modelado e identificación de los Condensadores Electroquímicos de Doble Capa, 2014.
- Mazlan, N.M., Peshev, D., Livingston, A.G., 2016. Energy consumption for desalination – a comparison of forward osmosis with reverse osmosis, and the potential for perfect membranes. *Desalination* 377, 138-151.
- Murphy, G.W., Caudle, D.D., 1967. Mathematical theory of electrochemical demineralization in flowing systems. *Electrochim. Acta* (12), 1655-1664.
- Murphy G.W., Cooper J.L., Hunter J.A., Activated carbon used as electrodes in electrochemical demineralization of saline water, U.S. Dept. of the Interior, Washington, 1969.
- Parisa-Sadat, Bozorg-Haddad, Loáiciga, 2015. Evaluation of climatic-change impacts on multiobjective reservoir operation with multiobjective genetic programming. *J. Water Resour. Plan. Manag.* 141, 11.
- Parisa-Sadat, Bozorg-Haddad, Loáiciga, 2021. Application of bi-objective genetic programming for optimizing irrigation rules using two reservoir performance criteria. *Int. J. River Basin Manag.* 19, 1.
- Porada, S., Zhao, R., Van del Wal, A., Presser, V., Biesheuvel, P.M., 2013. Review on the science and technology of water desalination by capacitive deionization. *Prog. Mater. Sci.* 58, 1388-1442.

- Reid G.W., Townsend F.M., Stevens A.M., Filed Operation of a 20 gallons per day pilot plant unit for electrochemical desalination of brackish water.
- Ruiz, Alejandro, Melian-Martel, Noemi, Nuez, Ignacio, 2017. Short review on predicting fouling in RO desalination. *Membranes* 7 (4), 62. <https://doi.org/10.3390/membranes7040062>.
- Schallenberg-Rodriguez, J., Veza, J.M., Blanco-Marigorta, A., 2014. Energy efficiency and desalination in the Canary Islands. *Renew. Sustain. Energy Rev.* 40, 741–748.
- Schiller C., Main Error Sources at AC Measurements, 1997.
- Shi, Jihong, et al., 2022. Study of the seawater desalination performance by electrodialysis. *Membranes* 12 (8), 767. <https://doi.org/10.3390/membranes12080767>.
- Song, D., Wang, Y., Xu, S., Gao, J., Ren, Y., Wang, S., 2015. Analysis, experiment and application of a power-saving actuator applied in the piston type energy recovery device. *Desalination* 361, 65–71.
- Spark Fun Electronics, MCP4725, (On Line). (<https://www.sparkfun.com/datasheets/BreakoutBoards/MCP4725.pdf>). [April 2018].
- Suss, M.E., Baumann, T.F., Bourcier, W.L., Spadaccini, C.M., Rose, K.A., Santiago, J.G., et al., 2012. Capacitive desalination with flow-through electrodes. *Energy Environ. Sci.* (5), 9511–9519.
- Texas instruments, LMx58-N Low-Power, Dual-Operational Amplifiers, (On Line). LMx58-N Low-Power, Dual-Operational Amplifiers. February 2018.
- Texas Instruments, High Accuracy INSTRUMENTATION AMPLIFIER, (On Line). (<http://www.ti.com/lit/ds/sbos133/sbos133.pdf>). March 2018.
- Texas Instruments, OPA548 High-Voltage, High-Current Operational Amplifier, (On Line). (<http://www.ti.com/lit/ds/symlink/opa548.pdf>). May 2018.
- Texas Instruments, ADS111x Ultra-Small, Low-Power, I2C -Compatible, 860-SPS, 16-Bit ADCs With Internal Reference, Oscillator, and Programmable Comparator, (On Line). (<http://www.ti.com/lit/ds/symlink/ads1115.pdf>). May 2018.
- Texas Instruments, OPA549 High-Voltage, High-Current Operational Amplifier, (On Line). (<http://www.ti.com/lit/ds/symlink/opa548.pdf>). June 2018.
- Walton, 1989. Electrical conductivity and total dissolved solids – what is their precise relationship. *Desalination* 72, 275–292.
- Wang, Zhiqi, et al., 2022. Optimization of the anaerobic-anoxic-oxic process by integrating ASM2d with Pareto analysis of variance and response surface methodology. *Water* 14 (6), 940. <https://doi.org/10.3390/w14060940>.
- Washington: U.S. Dept. of the Interior, 1968. C. B.E. y i. S. W. N. M. W.G. Pell, In: Proceedings of the Seventh International Seminar on Double Layer, de Florida Educational Seminars: Boca, 1997.
- York: Kluwer Academic/Plenum Publishers, 1999. E. Karde, S. Buller y R. D. Doncker, *Electrochim*, 2002.
- Zhao, R., Biesheuvel, P.M., Van der Wal, A., 2012. Energy consumption and constant current operation in membrane capacitive deionization. *Energy Environ. Sci.* (5), 9520–9527.
- Zubieta, L., Bonert, R., 2000. Characterization of double-layer capacitors for power electronics applications. » IEEE.

10. Resumen de artículos

10.1 Life-Cycle Analysis of Natural Treatment Systems for Wastewater (NTSW) Applied to Municipal Effluents

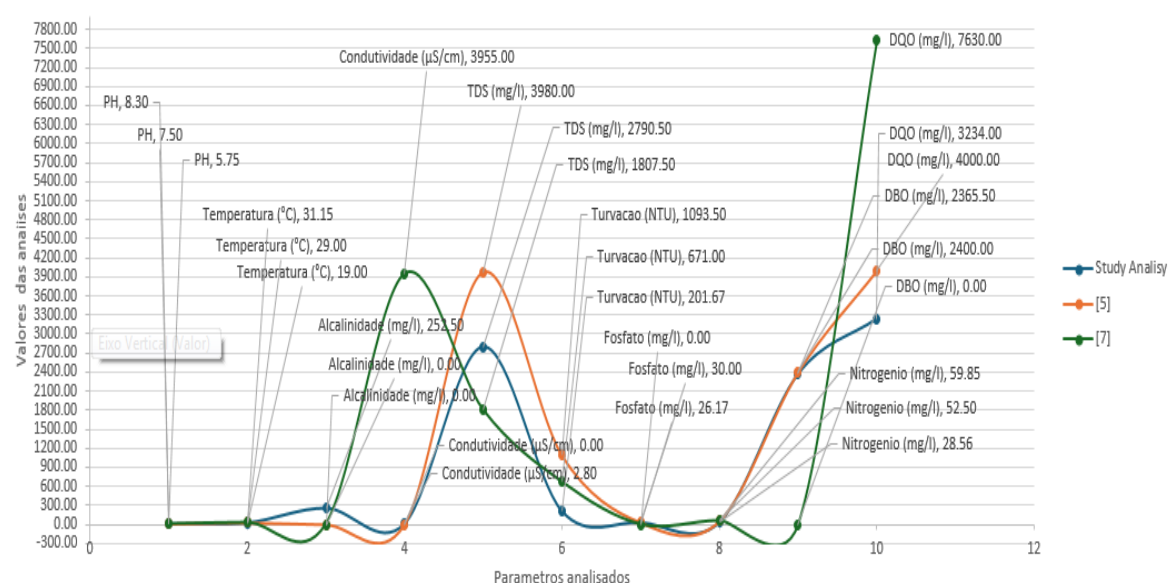
Resumen. En respuesta a las demandas globales respecto de la introducción de tecnologías para mitigar la degradación ambiental, están surgiendo ideas para implementar sistemas de tratamiento de aguas residuales tanto a nivel doméstico como industrial. Sin embargo, esta práctica debe ser reparada en términos de su viabilidad económica, eficiencia del tratamiento, vida útil, capacidad de emisión de carbono, uso del agua, uso del suelo, impactos en el ecosistema, efectos en la salud humana y otros criterios para elegir un sistema de tratamiento particular. El objetivo principal de este artículo referenciado en este punto es analizar el ciclo de vida de los sistemas naturales de tratamiento de aguas residuales aplicados en el tratamiento de efluentes municipales.

En términos metodológicos, el análisis se realizó a través de visitas de rutina y consultas a documentos relacionados con el proyecto del sistema en cuestión, donde fue posible obtener diversos datos, a saber: (a) Análisis del inventario de la fase de construcción, que implica la evaluación de entradas y salidas asociadas a la construcción del (NTSW), incluyendo materiales, consumo de energía, transporte y generación de residuos. Luego se evalúan las fases de mantenimiento y operación, centrándose en las actividades de mantenimiento y operación en curso requeridas para el NTSW, incluido el consumo de energía, el uso de agua, los insumos químicos (si los hay), la mano de obra y el mantenimiento del equipo. (b) Finalmente, se evaluaron los impactos de los NTSW en relación con los impactos ambientales, sociales y económicos generados por los NTSW. Los resultados indican que el impacto de la instalación no es excesivamente elevado en comparación con las plantas de tratamiento acreditadas en la categoría convencional. En cuanto a la ubicación de la planta de tratamiento de efluentes municipales analizada, la misma se encuentra en la Isla de Santiago, en la localidad de Achada Galego en Cabo Verde, donde el país está adoptando ideas de reutilización de aguas residuales tratadas en un sistema de tratamiento natural con fines de riego agrícola. De manera detallada, la visión para la elaboración del artículo también fue posible a partir de la observación de datos de algunas plantas de tratamiento de efluentes municipales a nivel de Canarias, con

el objetivo final de proporcionar a los académicos, a la sociedad en general, a los funcionarios gubernamentales y a otras entidades herramientas científicas para elegir el mejor sistema de tratamiento de efluentes municipales a nivel de un grupo de islas. En conclusión, los resultados indican que el impacto de la instalación no es excesivamente elevado en comparación con las plantas de tratamiento acreditadas en la categoría convencional y, en particular, para el sistema analizado, los valores de impacto ambiental más visibles se dieron durante la fase de construcción. Por tanto, es posible mejorar el rendimiento medioambiental del proceso de construcción utilizando materiales menos perjudiciales para el medio ambiente.

10.2 A Comparative analysis of brewery effluents in Africa

Resumen. La actividad industrial ha producido una cantidad importante de aguas residuales, una sustancia en ocasiones peligrosa que degrada la calidad del medio ambiente. Sin embargo, es esencial caracterizar un agua determinada para definir perfectamente su destino final. El artículo al que se hace referencia en este punto tiene como objetivo comparar los diferentes parámetros analizados en las aguas residuales de algunas industrias cerveceras africanas. En general, las aguas residuales producidas por la industria cervecera tienen características complejas, lo que plantea desafíos importantes para los ingenieros ambientales en la búsqueda de métodos efectivos para su tratamiento y reutilización. Metodológicamente, la comparación se realizó con base en datos obtenidos de análisis de laboratorio de muestras recolectadas en una cervecería de Mozambique y con datos encontrados en algunos artículos científicos publicados en revistas de renombre.



En el caso específico de las aguas residuales de una cervecería mozambiqueña, que fue el estudio desarrollado por el autor, ésta presenta un perfil ácido variable con una ligera tendencia a la acidez, como lo indican sus valores de pH. Esta característica débilmente ácida de las aguas residuales de la cervecería de Mozambique se puede atribuir al uso de ácidos fuertes y moderados, como el ácido nítrico y el ácido fosfórico, durante los procesos de limpieza y desinfección, que luego se neutralizan mediante la fuga de una base fuerte (sosa cáustica) utilizada durante el proceso de llenado. En conclusión, la DQO analizada en Mozambique se encuentra en el mismo rango que las referencias, aunque

ligeramente inferior. Asimismo, la DBO se encuentra dentro del mismo rango que otros estudios. La turbidez, aunque inferior a otras referencias, se mantiene dentro de un rango aceptable. Los niveles de fosfato y nitrógeno también están dentro del rango esperado para las aguas residuales de la cervecería.

10.3 Caracterización de las aguas residuales de la cervecería mozambiqueña: comparación de características con efluentes de cervecerías de otros países

Resumen. El artículo tiene como objetivo caracterizar las aguas residuales producidas en una determinada cervecería de Mozambique y compararlas con los resultados de las características de las aguas residuales de las cervecerías de algunos países del mundo. Cuando surgen preocupaciones respecto a la calidad ambiental, exigencias regulatorias respecto a tecnologías de mitigación de la degradación, es importante incrementar los aportes en materia de conocimiento científico utilizado como base para la estabilidad de la salud ambiental.

Cabe señalar que, para alcanzar los objetivos planteados, metodológicamente se utilizaron fundamentalmente visitas rutinarias a la fábrica de la Industria Cervecera de Mozambique, donde se recolectaron varias muestras en diferentes días. Y para el ejercicio de los análisis de laboratorio, se buscó definir los principales parámetros necesarios en el proceso de remoción en términos de tratamiento de aguas residuales, donde posterior a esta definición, se realizaron las actividades utilizando algunas técnicas y equipos.

1. Equipos utilizados en el proceso de análisis para caracterizar las aguas residuales de Cerveceara Mozambicana:

El análisis de pH, conductividad y TDS se basó en el uso del equipo HQ40d.



Imagen 1: Equipo HQ40d (autor, 2023).

Especificación del equipo HQ40d: Suministrado por VWR.É un multímetro resistente para testes de agua de campo excelentes e flexivas.

- Es un multímetro robusto para pruebas de agua en campo excelentes y flexibles.

- Cuenta con canales de entrada duales para mediciones flexibles sin la necesidad de múltiples instrumentos, para pH, conductividad, resistividad, sólidos disueltos totales (TDS), oxígeno disuelto óptico (OD), demanda bioquímica de oxígeno (DBO), potencial de reducción de oxidación (ORP), amoníaco, amonio, fluoruro, cloruro, sodio y temperatura: conéctese a cualquier electrodo, sensor o sonda inteligente Intellical Interfaz de usuario intuitiva para una operación sencilla, resultados confiables y precisos.
- La calibración guiada y la verificación de rutinas estándar reducen los errores de calibración, mientras que las alertas de estabilización y el bloqueo de la medición visual garantizan una precisión confiable de los resultados. El indicador de estado de calibración y las alertas de calibración personalizadas garantizan resultados precisos.
- Confíe en sus mediciones: las sondas inteligentes Intellical almacenan todas las calibraciones en la sonda. El historial de calibración permite un cambio rápido y sencillo de la sonda sin necesidad de recalibración. El sistema inteligente HQD registra automáticamente números de serie, datos de calibración actuales, ID de usuario, ID de muestra, hora y fecha en el registro de datos para una trazabilidad completa de Buenas Prácticas de Laboratorio (BPL).
- Todas las conexiones entre el medidor y la sonda son seguras e impermeables. Los conectores pueden codificarse por colores para una rápida identificación. La información se muestra claramente en una pantalla retroiluminada para condiciones de poca luz. Es posible ampliar los resultados de la visualización. Diseñado para condiciones de operación en campo.

Procedimiento:

- Se encendió el equipo y se corrigieron inmediatamente las sondas y se procedió a la lectura de las mismas eligiendo el método. Una vez elegido el método, se introdujo la sonda en la muestra y se realizó la lectura de manera secuenciada, siguiendo el mismo procedimiento para todos los análisis referenciados anteriormente.

Para el análisis de turbidez el equipo utilizado fue: 2100Q.



Imagen 2: Equipo 2100Q (autor,2023)

Especificación del equipo: Fabricado en Australia – empresa Hach.

- El medidor de turbidez portátil 2100Q es ideal para usar en el campo o alrededor de la planta.
- Es fácil de transportar y tomar múltiples mediciones desde múltiples puntos de recolección en su proceso de tratamiento. Con su interfaz de usuario intuitiva, el 2100Q facilita la medición, la calibración y la verificación. Almacenar y transferir datos desde un turbidímetro portátil nunca ha sido tan fácil.
- El turbidímetro portátil 2100Q cumple con los criterios de diseño del Método 180.1 de USEPA. Fácil calibración y verificación en pantalla.
- Transferencia de datos sencilla.
- Preciso para muestras de decantación rápida.
- . Registro de datos conveniente.
- Hach 2100Q01 - Turbidímetro portátil 2100Q, suministrado con cuatro baterías alcalinas AA, un estuche de transporte con inserto, estándares de calibración primarios en 1 vial sellado (20, 100, 800 NTU), estándar de verificación primario de 10 NTU, 6 celdas de muestra con tapa de rosca, manual del instrumento (impreso y en CD-ROM), guía de inicio rápido, aceite de silicona y paño lubricante.

Material:

2 cubetas marcadas a 10 ml.

Nicolau Chirinza R.P

2025

1 pipeta.

Procedimiento:

Material:

2 cubetas marcadas a 10 ml.

1 pipeta.

Procedimiento:

- a) Se introdujeron 10 ml de la muestra en una de las cubetas y 10 ml de agua destilada en otra cubeta, para asegurar la precisión del dispositivo.
- b) Se encendió el dispositivo, luego se agitó la cubeta que contenía el agua destilada y luego se colocó en el dispositivo unos minutos después y se tomó la lectura. Luego se agitó la cubeta de muestra y luego se colocó dentro del dispositivo para medir la turbidez.

Los análisis de los parámetros de temperatura y alcalinidad se analizaron mediante la técnica de titulación, y finalmente, los análisis de los parámetros Fosfato, Nitrógeno, DBO y DQO fueron la base para la utilización del equipo DR6000.

En conclusión, cabe señalar que los componentes de las aguas residuales de las cervecerías, como los residuos de granos de levadura, producidos en las dos etapas principales de la producción de cerveza (elaboración y envasado), son los que más contribuyen a la contaminación ambiental cuando se mezclan con los efluentes. La DQO analizada en las aguas residuales de la cervecería de Mozambique está en el mismo rango que las otras referencias, ligeramente por debajo de ellas, la DBO también está en el mismo rango que las otras, la turbidez es inferior a otras referencias, pero todavía dentro del rango y también se encuentran fosfato y nitrógeno en las aguas residuales de la industria cervecera.

10.4 Extracto de semilla de moringa oleífera como coagulante en el tratamiento de agua potable

Resumen. Entre las más variadas tecnologías de tratamiento de agua cruda a adoptar, siempre existe la tendencia a que surjan estudios respecto a la elección de la alternativa que tenga gran poder en la remoción de diferentes parámetros, con facilidad de implementación y pocos recursos, así como requerimientos para su manejo. El artículo refleja un análisis respecto al uso del extracto de semilla de Moringa Oleífera como coagulante en el proceso de tratamiento de agua cruda con el propósito de transformarla en agua potable. El mecanismo de utilización del extracto de la semilla referenciada en cuanto al proceso de remoción de contaminantes destaca en una combinación de procesos de coagulación y neutralización de carga, que funcionan de manera similar al mecanismo del sulfato de aluminio (coagulante que destaca a nivel mundial en materia de tratamiento de aguas). Las semillas de Moringa Oleífera contienen cantidades significativas de proteínas catiónicas solubles y cuando se muelen hasta obtener un polvo fino y se introducen en agua turbia, estas proteínas liberan cargas positivas. Estas cargas atraen y se unen eficazmente a partículas cargadas negativamente, como lodo suspendido, arcilla, bacterias y otras partículas que se encuentran en el agua. Metodológicamente, para realizar el trabajo se recolectaron muestras de agua cruda y, con la ayuda de un documento detallado referente al tema de normas para los principales parámetros necesarios para la potabilidad utilizados en la empresa pública responsable de la distribución de agua potable en la ciudad de Beira en Mozambique, se definieron los parámetros analizados, destacando: Turbidez, sólidos disueltos totales (TDS), temperatura, pH, aluminio, hierro y manganeso. Respecto a los resultados obtenidos en laboratorio, se incentiva el uso del extracto de semilla de Moringa Oleífera como coagulante en el tratamiento de agua ya que aporta el poder de remoción al nivel requerido.

10.5 Proposal for the use of moringa oleifera seed extract as a coagulant in the treatment of drinking wáter

Resumen. El agua es un bien preciado que debe ser preservado y tratado para el bienestar de la sociedad en general. Esta sustancia también es considerada por muchos como un vector de muchas enfermedades transmitidas por el agua cuando se expone al medio ambiente o se consume sin cumplir estrictamente las normas de potabilidad del agua. En cuanto a la metodología utilizada para alcanzar los objetivos planteados, en primer lugar se identificó un punto convergente para la recolección de agua cruda, para ser tratada en la Planta de Tratamiento de Agua Potable provista por la Empresa de Aguas de la Región Centro, donde fue posible tomar determinadas muestras en diferentes días. Luego, en un laboratorio, se preparó una solución coagulante a partir del extracto de la semilla de Moringa Oleífera. Esta preparación siguió la ideología de varios autores, entre los que destacan (Alam et al., 2020; Alazaiza et al., 2022a), quienes aconsejan que para una turbidez inicial de 50 NTU, la mejor dosis del biocoagulante acuoso es una concentración del 2%, con 2 g de la muestra molida de semillas de Moringa oleífera en 100 ml de agua destilada. El procedimiento utilizado fue el siguiente: Primero se pelaba la semilla de Moringa Oleífera con ayuda de un cuchillo, se lavaba y se trituraba hasta convertirla en polvo.



Figura 8: Tratamiento de semillas de Moringa Oleífera (Autor, 2023).

Proceso de extracción del compuesto activo:

Utilizando una espátula y una balanza analítica se pesaron 2 g de polvo de semilla de Moringa oleífera y se midieron 100 ml de agua destilada utilizando un vaso de precipitados volumétrico. Donde posteriormente se añadieron 2 g de polvo de semilla de Moringa oleífera a un vaso volumétrico de 600 ml donde también se añadió al mismo vaso el agua destilada previamente medida (100 ml).

La mezcla se colocó en un agitador magnético para agitación alta durante 4 minutos, obteniendo una solución en una condición correspondiente a una concentración de semillas de Moringa oleífera molidas de 20 g/l.

La mezcla de semillas molidas de Moringa oleífera y agua destilada da como resultado un líquido blanquecino con un olor intenso. Su vida útil es limitada debido a su biodegradación. Por este motivo, durante los días del Jar Test se prepararon soluciones de extracto de semilla de Moringa oleífera.

Los números obtenidos del análisis del agua tratada utilizando el extracto biocoagulante de Semilla de Moringa Oleífera son bastante alentadores porque demostraron eficiencia en la remoción de los diferentes parámetros, alcanzando los estándares estandarizados recomendados para los parámetros mínimos necesarios para la potabilidad del agua. En términos de evaluación económica y calidad ambiental, el uso del coagulante de Moringa oleífera también es muy valioso, ya que su adquisición y preparación no requiere de mucha tecnología ni energía contaminante para el medio ambiente o con posibilidad de contaminar el agua tratada.

10.6 Resources optimization using Pareto analysis for sea water desalination plants

Resumen. Dado que el agua es un recurso vital para el planeta Tierra, se debaten diversos planteamientos para preservar este preciado líquido. En este contexto de preservación surgen las diversas ideologías para diseñar distintos tipos de sistemas de tratamiento del agua. El artículo de esta sección tiene como único objetivo la optimización de recursos mediante la herramienta de análisis de Pareto para una planta desalinizadora de agua de mar. Según [52], el diagrama de Pareto es una herramienta de calidad que permite identificar y clasificar los problemas más importantes y puede utilizarse en diversos procesos de producción de una empresa. El proceso de desalinización de agua de mar es una tecnología exigente y es importante desarrollar herramientas técnicas orientadas a minimizar y hacer un uso racional de los diferentes recursos necesarios para el funcionamiento de una planta desalinizadora de agua de mar. Metodológicamente, para alcanzar este objetivo, se han obtenido datos sobre los recursos utilizados en un universo de 180 desaladoras repartidas por todo el archipiélago canario, a partir de visitas y consultas a diversos documentos explícitos sobre el funcionamiento de las desaladoras. El análisis se realizó utilizando la herramienta del diagrama de Pareto, que arrojó los resultados que se muestran en el siguiente gráfico:

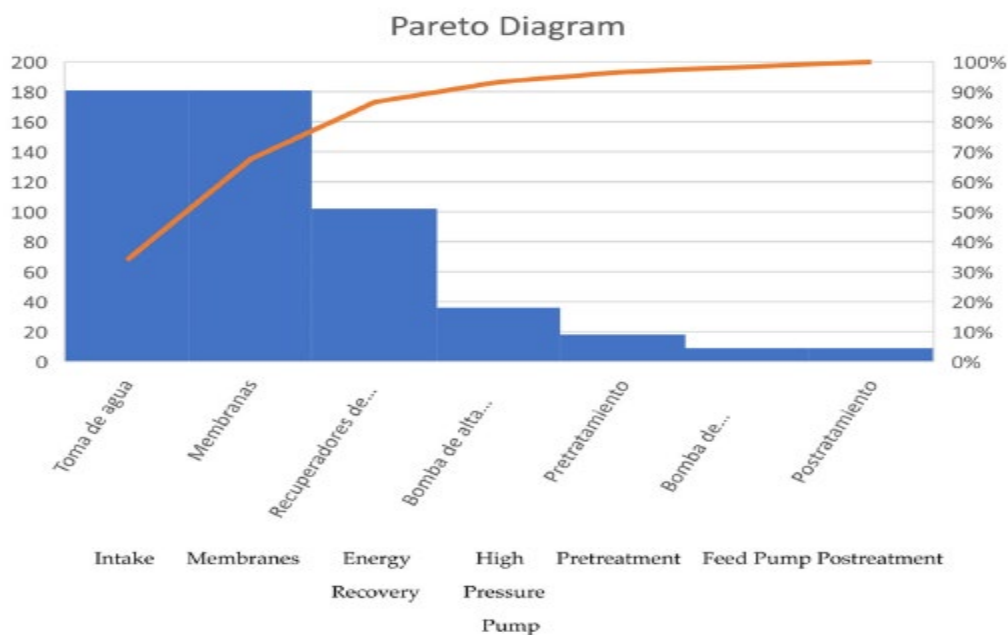


Gráfico 2: Valoración del impacto de los distintos recursos utilizados en la planta desaladora de agua de mar (Autor, 2024).

La descripción del gráfico en términos porcentuales muestra que los recursos de captación de agua y membranas suponen en conjunto un porcentaje del orden del 70 %, por lo que su contribución al consumo energético es muy significativa. Teniendo esto en cuenta, es importante centrarse en estos dos recursos como forma de minimizar los costes totales en el proceso de desalación de agua de mar.

Parte IV

Consideraciones finales

11. Conclusiones y recomendaciones

11.1 Conclusiones

El trabajo realizado con los objetivos principales de contribuir a los enfoques sobre el tratamiento del agua, el ahorro de energía en el proceso de tratamiento del agua y también en cuestiones relacionadas con el ciclo de vida de un sistema de tratamiento del agua permite concluir que el agua, en sus variadas características, ha sido un vector de diversos acontecimientos, por ejemplo como responsable de la aparición de diversas enfermedades transmitidas por el agua y de la degradación del medio ambiente en situaciones en las que las aguas residuales están expuestas sin tratamiento previo. El mundo en su conjunto se esfuerza por mantener la calidad del medio ambiente y conservar una amplia gama de recursos naturales existentes, y se están elaborando y presentando diversos estudios y contribuciones para el consumo global. Para los países más desarrollados, estas prácticas de preservación del bienestar ambiental se han convertido en una preocupación desde hace muchos años, trayendo una visión general de que todos los países están llamados a esta causa, por lo que hoy en día en los países menos desarrollados ya podemos ver el ejercicio de la práctica antes mencionada.

Entre las diversas alternativas de tecnologías de tratamiento de agua existentes en el mundo, la elección será definida a partir de la caracterización del agua a ser tratada como necesidad primaria y de la evaluación económica de la energía a ser consumida en el proceso de tratamiento.

Existen tipos convencionales y no convencionales de sistemas de tratamiento de aguas. A medida que el mundo se fue desarrollando, se optó por el tipo convencional hasta que surgió la idea racional de utilizar un sistema optimizado en cuanto al consumo de diversos recursos materiales, con potencial para eliminar diferentes parámetros y fácil de manejar. Teniendo esto en cuenta, la elección actual para muchos es el sistema no convencional, en el que el agua se depura de forma natural.

Uno de los estudios realizados fue el uso de extracto de semillas de Moringa oleífera como coagulante en el tratamiento de agua cruda, lo que llevó a la conclusión de que es una técnica de tratamiento de agua que no requiere tantos recursos y es fácil de implementar, la sustancia es muy eficaz en la eliminación de diferentes parámetros y el

agua así tratada no contiene ningún producto nocivo para la salud humana, por lo que se recomienda utilizar esta técnica en zonas remotas donde haya pocas posibilidades de disponer de una depuradora y se disponga de conocimientos científicos profundos sobre el tratamiento local del agua.

Y en los casos en los que la situación geográfica y otros factores no afecten a la implantación de un sistema de depuración natural, la herramienta del diagrama de Pareto resulta muy útil en el proceso de optimización de los recursos que deben emplearse en el tratamiento del agua mediante un sistema convencional con el fin de minimizar el coste total de una planta depuradora. Para el caso concreto de la planta desaladora de agua de mar desarrollada en el artículo incluido en esta tesis, el diagrama de Pareto muestra que los recursos de toma de agua y membrana suponen en conjunto un porcentaje cercano al 70%, por lo que su contribución al consumo energético es muy significativa.

Continuando con la adopción de medidas para mitigar la degradación de la calidad ambiental y preservar los recursos naturales, el análisis del ciclo de vida de un sistema de tratamiento de agua puede ayudar a identificar la fase que más contribuye a la emisión de determinadas sustancias nocivas para el medio ambiente. sistemas de tratamiento aplicados al tratamiento de efluentes municipales en este trabajo de tesis concluyó que los resultados indican que el impacto de la instalación no es excesivamente elevado si se compara con las depuradoras acreditadas en la categoría convencional y, en particular para el sistema analizado, los valores de impacto ambiental más visibles se encontraban en la fase de construcción. Por lo tanto, es posible mejorar el rendimiento ambiental del proceso de construcción utilizando materiales menos nocivos para el medio ambiente

11.2 Recomendaciones

Para un mejor estudio sobre la elección del tipo de sistema de tratamiento del agua, debería darse prioridad a la definición de los distintos parámetros mínimos necesarios para su eliminación o control, con referencia a documentos explícitos sobre normas internacionales o nacionales para el tratamiento del agua.

Los académicos de las universidades mozambiqueñas deberían trabajar más en el tema del tratamiento del agua, haciendo más hincapié en las aguas residuales industriales, ya que los diversos descubrimientos de diferentes recursos minerales podrían aumentar la industrialización y la posibilidad de un aumento de la producción de aguas residuales industriales. Tener estudios preparados podría ayudar significativamente a las industrias a darse cuenta de la importancia de instalar una EDAR y de su contribución al mantenimiento del bienestar medioambiental.

A. SIMBOLISMO

Simbolismo

ETAR - Planta de tratamiento de aguas residuales;

ETA – Planta de tratamiento de agua;

ETARU – Planta de tratamiento de aguas residuales urbanas;

pH – Potencial de hidrógeno;

DBO - Demanda Bioquímica de Oxígeno;

DQO – Demanda química de oxígeno;

CWs - Humedales construidos;

CWsFS - Humedales de flujo superficial construidos;

WCFVS - Humedales construidos de flujo vertical subterráneo;

TSS – Sólidos suspendidos totales;

Qr - Caudal del cuerpo de agua, aguas arriba de la descarga;

Qe - Caudal de aguas residuales;

ODr - Oxígeno disuelto en el cuerpo de agua, aguas arriba de la descarga;

ODe - Oxígeno disuelto en aguas residuales;

K1 - Coeficiente de desoxigenación;

K2 - Coeficiente de reaireación;

V - Velocidad de desplazamiento del cuerpo de agua;

t - Tiempo de viaje;

CS - Concentración de saturación de oxígeno disuelto;

ODmin- Oxígeno disuelto mínimo permitido.