



Estimados lectores,

Es un placer para nosotros presentarles el número más reciente de nuestra revista, Ingeniería Química y Desarrollo, que reúne una selección de artículos de investigación de alta calidad en diversas áreas de la ingeniería química y la producción.

En este número, abordamos temas de gran relevancia en la actualidad, tales como la degradación de microplásticos, la transesterificación y epoxidación del aceite de coco, la mejora de la productividad del maní, la rehabilitación de buses abandonados para la creación de un teatro, y la estimación de la eficiencia productiva en la extracción de aceite esencial a partir de la cáscara de la naranja mediante redes neuronales.

El primer artículo, "Fotodegradación de microplásticos", presenta una revisión de los procesos de degradación ambiental que sufren los plásticos en el medio ambiente, generando fragmentos de menor tamaño conocidos como microplásticos. Los autores describen los diversos mecanismos químicos mediante los cuales éstos microplásticos se pueden descomponer por efecto de la luz y el oxígeno ambiental (fotooxidación de polímeros), haciendo énfasis en el rol de la fotoquímica en los procesos de degradación de los microplásticos hasta transformarlos en compuestos inofensivos para el ambiente. Además, se presentan algunos avances en el desarrollo de fotocatalizadores heterogéneos basados en metales de transición, empleados en la degradación de los microplásticos, incluyendo un particular e interesante sistema de foto-catalizador microrobot autónomo basado en BiVO₄/Fe₃O₄, el cual ha demostrado ser efectivo en la degradación de microplásticos de poliláctico (PLA), policaprolactona (PCL), tereftalato de polietileno t (PET) y polipropileno (PP) a escala de laboratorio.

El segundo artículo, "Transesterificación y epoxidación del aceite de coco", presenta un estudio que busca obtener ésteres metílicos y ésteres epoxidados a partir del aceite de coco, mediante procesos de transesterificación y epoxidación, respectivamente. Los autores analizan los efectos de las variables de proceso, tales como la relación alcohol/aceite, la concentración de catalizador y la temperatura de reacción, en la producción de ésteres metílicos y ésteres epoxidados, y determinan las condiciones óptimas para maximizar el rendimiento del proceso. Este estudio es de gran relevancia debido al potencial de los ésteres metílicos y ésteres epoxidados como materias primas en la producción de biocombustibles y productos químicos de alto valor agregado.

El tercer artículo, "Mejora de la productividad del maní 'variedad Caramelo' (*Arachis hypogaea*) aplicando diferentes dosis de bioestimulante Evergreen", presenta un estudio que busca mejorar la productividad del maní mediante la aplicación de diferentes dosis de un bioestimulante comercial denominado Evergreen. Los autores analizan los efectos de la aplicación del bioestimulante en la producción de maní, y determinan la dosis óptima para maximizar la productividad del cultivo. Este estudio es de gran relevancia debido al potencial del

bioestimulante Evergreen como herramienta para mejorar la productividad de cultivos de importancia económica.

El cuarto artículo, "Proyecto integrador rehabilitación de buses abandonados para la creación de un teatro", presenta un proyecto integrador que busca la rehabilitación de buses abandonados para la creación de un teatro. Los autores describen el proceso de rehabilitación de los buses, desde la selección de los mismos hasta la puesta en marcha del teatro, y presentan un análisis económico y social del proyecto. Este estudio es de gran relevancia debido al potencial de la reutilización de buses abandonados como una alternativa sostenible y creativa para la creación de espacios culturales.

El quinto artículo, "Estimación de la eficiencia productiva en la extracción de aceite esencial a partir de la cáscara de la naranja mediante redes neuronales", presenta un estudio que busca estimar la eficiencia productiva en la extracción de aceite esencial a partir de la cáscara de la naranja mediante el uso de redes neuronales. Los autores analizan los datos experimentales obtenidos a partir de un proceso de extracción de aceite esencial, y desarrollan un modelo de redes neuronales capaz de estimar la eficiencia productiva en función de las variables de proceso. Este estudio es de gran relevancia debido al potencial del aceite esencial de naranja como producto de alto valor agregado en la industria alimentaria y cosmética.

En este número de la revista, hemos reunido una selección de artículos que abarcan diversos temas de interés en el campo de la ingeniería química y la producción. Esperamos que estos artículos sean de su interés y les brinden nuevas perspectivas en sus respectivas áreas de estudio.

Además, queremos invitar a todos los investigadores a enviar sus trabajos para su publicación en nuestra revista. Estamos comprometidos con la difusión del conocimiento científico de alta calidad, y nos enorgullece ser una plataforma para la publicación de investigaciones innovadoras y relevantes en el campo de la ingeniería química y la producción.

Sin más, les deseamos una feliz lectura y les agradecemos su apoyo a nuestra revista.

Atentamente,

Francisco Duque-Aldaz.
Director - Editor
Ingeniería Química y Desarrollo



Letter from the Editor

Dear readers,

It is a pleasure for us to present the latest issue of our journal, Ingeniería Química y Desarrollo, which features a selection of high-quality research articles in various areas of chemical engineering and production.

In this issue, we address topics of great relevance today, such as the degradation of microplastics, the transesterification and epoxidation of coconut oil, the improvement of peanut productivity, the rehabilitation of abandoned buses for the creation of a theater, and the estimation of productivity efficiency in the extraction of essential oil from orange peel using neural networks.

The first article, "Photodegradation of microplastics," presents a review of the environmental degradation processes that plastics suffer in the environment, generating smaller fragments known as microplastics. The authors describe the various chemical mechanisms by which these microplastics can be decomposed by the effect of light and ambient oxygen (photo-oxidation of polymers), emphasizing the role of photochemistry in the degradation processes of microplastics until they become harmless compounds for the environment. In addition, some advances in the development of heterogeneous photocatalysts based on transition metals, used in the degradation of microplastics, are presented, including a particular and interesting automated microrobot photocatalyst system based on BiVO₄/Fe₃O₄, which has proven to be effective in the degradation of microplastics of polylactic acid (PLA), polycaprolactone (PCL), polyethylene terephthalate (PET), and polypropylene (PP) at laboratory scale.

The second article, "Transesterification and epoxidation of coconut oil," presents a study that seeks to obtain methyl esters and epoxidized esters from coconut oil, through transesterification and epoxidation processes, respectively. The authors analyze the effects of process variables, such as the alcohol/oil ratio, catalyst concentration, and reaction temperature, on the production of methyl esters and epoxidized esters, and determine the optimal conditions to maximize the yield of the process. This study is of great relevance due to the potential of methyl esters and epoxidized esters as raw materials in the production of biofuels and high value-added chemical products.

The third article, "Improvement of the productivity of peanut 'variety Caramelo' (*Arachis hypogaea*) applying different doses of Evergreen bio-stimulant," presents a study that seeks to improve peanut productivity through the application of different doses of a commercial bio-stimulant called Evergreen. The authors analyze the effects of the application of the bio-stimulant on peanut production, and determine the optimal dose to maximize crop productivity. This study is of great relevance due to the potential of the bio-stimulant Evergreen as a tool to improve the productivity of economically important crops.

The fourth article, "Integrative project rehabilitation of abandoned buses for the creation of a theater," presents an integrative project that seeks the rehabilitation of abandoned buses for the creation of a theater. The authors describe the rehabilitation process of the buses, from their selection to the launch of the theater, and present an economic and social analysis of the project. This study is of great relevance due to the potential of the reuse of abandoned buses as a sustainable and creative alternative for the creation of cultural spaces.

The fifth article, "Estimation of productivity efficiency in the extraction of essential oil from orange peel using neural networks," presents a study that seeks to estimate productivity efficiency in the extraction of essential oil from orange peel using neural networks. The authors analyze the experimental data obtained from an essential oil extraction process, and develop a neural network model capable of estimating productivity efficiency as a function of process variables. This study is of great relevance due to the potential of orange essential oil as a high value-added product in the food and cosmetic industry.

In this issue of the journal, we have brought together a selection of articles covering various topics of interest in the field of chemical engineering and production. We hope that these articles will be of interest to you and provide new perspectives in your respective areas of study.

Furthermore, we would like to invite all researchers to submit their work for publication in our journal. We are committed to the dissemination of high-quality scientific knowledge and take pride in being a platform for the publication of innovative and relevant research in the field of chemical engineering and production.

Thank you for your support of our journal, and we wish you a happy reading.

Sincerely,

Francisco Duque-Aldaz.
Director - Editor
Chemical Engineering and Development



Fotodegradación de microplásticos *Photodegradation of microplastics*

Edgar Catarí¹, Franklin Ramón Vargas²* & Beatriz Celeste Angulo³

Recibido: 03/05/2023 – Recibido en forma revisada: 03/09/2023 – Aceptado: 03/12/2023 – Publicado: 19/03/2024

*Autor para la correspondencia.

Resumen: Se describen los procesos de degradación ambiental que sufren los plásticos en el medio ambiente generando así fragmentos de menor tamaño, conocidos como microplásticos. Se describirán los diversos mecanismos químicos mediante los cuales éstos microplásticos se pueden descomponer por efecto de la luz y el oxígeno ambiental (fotooxidación de polímeros). Se hace énfasis en el rol de la fotoquímica en los procesos de degradación de los microplásticos hasta transformarlos en compuestos inofensivos para el ambiente, es decir, hasta llevarlos a su mineralización (HCO_3 , CO_2 , etc.). Se presentan además algunos avances en el desarrollo de fotocatalizadores heterogéneos basados en metales de transición, empleados en la degradación de los microplásticos, incluyendo un particular e interesante sistema de foto-catalizador microrobot autónoma basado en $\text{BiVO}_4/\text{Fe}_3\text{O}_4$, el cual ha demostrado ser efectivo en la degradación de microplásticos de poliácido láctico (PLA), policaprolactona (PCL), tereftalato de polietileno (PET) y polipropileno (PP) a escala de laboratorio.

Palabras claves: Fotodegradación, microplásticos, fotoquímica, polímeros, fotooxidación.

Abstract: The environmental degradation processes that plastics suffer in the environment are described, thus generating minor fragments known as microplastics. The various chemical mechanisms by which these microplastics can be decomposed by the effect of light and environmental oxygen (photo-oxidation of polymers) will be described. Emphasis is placed on the role of photochemistry in the degradation processes of microplastics until they become compounds that are harmless to the environment, that is, until they are mineralized (HCO_3 , CO_2 , etc.). Some advances in the development of heterogeneous photocatalysts based on transition metals used in the degradation of microplastics are also presented, including a particular and interesting automated microrobot photocatalyst system based on $\text{BiVO}_4/\text{Fe}_3\text{O}_4$, which has proven to be effective in the degradation of polylactic acid (PLA), polycaprolactone (PCL), polyethylene terephthalate (PET) and polypropylene (PP) microplastics on a laboratory scale.

Key words: Photodegradation, microplastics, photochemistry, polymere, photooxidation.

1. Introducción

Hoy en día, los plásticos son unos de los materiales más versátiles y utilizados por el ser humano, sus dos principales componentes son una matriz de polímeros (macromoléculas) y cierta cantidad de aditivos (protectores UV, plastificantes, colorantes, otros polímeros, etc.). El primer polímero totalmente sintético fue obtenido a principios del siglo XX por Leo Baekeland, sin embargo, el verdadero inicio de la producción industrial de los polímeros ocurrió a comienzos de la década de 1950, desde entonces la fabricación de polímeros ha crecido exponencialmente llegando a las 380 toneladas métricas por año (2015) [1]. La mayoría de los polímeros producidos en el mundo son del tipo termoplástico, este tipo de materiales son de bajo costo, sus materias primas son de fuentes no renovables (petróleo) y comúnmente se les identifica simplemente como “plásticos”. Entre estos plásticos tenemos el polietileno (PE), polietileno tereftalato (PET), polietileno de alta, baja y lineal-baja densidad (HDPE, LDPE y LLDPE), cloruro de polivinilo (PVC), polipropileno (PP), policarbonato (PC), poliestireno (PS), etc. [2-5].

Los plásticos han permitido el desarrollo y evolución de diversas áreas tecnológicas, por ejemplo, el sector

automotriz, electrónica, alimentos, medicinas, aeroespacial, transporte marítimo, ropa, calzado, construcción, etc. La mayoría de los plásticos de uso común son muy duraderos debido a su inercia química y biológica la cual es el resultado de su alta masa molecular, hidrofobicidad y ausencia de grupos químicos funcionales susceptibles al ataque de microbios, enzimas, luz, agua, etc [6, 7]. La gran durabilidad, inercia e impermeabilidad de los plásticos los hacen materiales ideales para el envasado de alimentos, artículos médicos estériles, sector de la construcción, entre otros, sin embargo, estas características también hacen que los plásticos sean particularmente longevos cuando se descartan después de su vida útil. Ciertos aditivos incorporados a los plásticos, tales como los antioxidantes y estabilizadores, incrementan la vida útil de estos materiales ya que reducen su velocidad de su degradación en ambientes naturales [6-9].

La gran durabilidad, inercia e impermeabilidad de los plásticos los hacen materiales ideales para el envasado de alimentos, artículos médicos estériles, sector de la construcción, entre otros, sin embargo, estas características también hacen que los plásticos sean particularmente longevos cuando se descartan después de su vida útil. Ciertos aditivos incorporados a los plásticos, tales como los

¹ Laboratorio de Polímeros, Centro de Química “Dr. Gabriel Chuchani” Instituto Venezolano de Investigaciones Científicas – IVIC. <https://orcid.org/0000-0002-6558-9237>, ecatari@gmail.com; Caracas; Venezuela.

² Laboratorio de Fotoquímica, Centro de Química “Dr. Gabriel Chuchani” Instituto Venezolano de Investigaciones Científicas – IVIC. <https://orcid.org/0000-0001-8170-7793>, vargas2212@gmail.com; Caracas; Venezuela.

³ Laboratorio de Biogeoquímica, Centro de Ciencias Atmosféricas y Biogeoquímica, Instituto Venezolano de Investigaciones Científicas – IVIC. <https://orcid.org/0000-0002-7138-7797>, angulobcs@gmail.com; Caracas; Venezuela



antioxidantes y estabilizadores, incrementan la vida útil de estos materiales ya que reducen su velocidad de su degradación en ambientes naturales [6-9].

De acuerdo con la Organización para la Cooperación Económica y Desarrollo (OECD) [10], actualmente son comercializadas en el mundo más de 100.000 sustancias y compuestos químicos distintos incluyendo diversos tipos de plásticos. Muchas de estos plásticos, luego de su utilización o vida útil, terminan depositados en sistemas naturales (tierra, agua y aire), en donde lentamente comienzan a biodegradadas mediante diversos y complejos procesos químicos y biológicos que en muchos casos se inician o activan con la participación de la energía solar. Para comprender como ocurren estos procesos de foto-degradación de los plásticos, la fotoquímica brinda los conceptos básicos que los describen adecuadamente, y más específicamente las reacciones de fotooxidación de polímeros permiten dar explicaciones plausibles a dichos procesos de foto-degradación [5, 11, 12].

Los plásticos post-consumo pueden ser degradados mediante las siguientes vías: (1) fotooxidación, (2) térmica, (3) inducido por ozono, (4) mecano-químico, (5) catalítico y (6) biodegradación. A su vez, la velocidad de degradación de los plásticos depende de su composición química, masa molecular, carácter hidrofóbico, presencia de grupos funcionales, aditivos, tipos de enlace presentes en la cadena principal del polímero, método de síntesis del polímero, morfología del polímero, condiciones ambientales donde se coloca el plástico, tamaño y forma de la pieza plástica [13]. Durante la degradación de los plásticos, estos materiales experimentan fragmentación y consecuentemente una reducción de sus dimensiones llegando a adquirir tamaños micro (0.1–5000 μm) y nanométricos (1-100 nm) [12]. Hoy en día diversos estudios han encontrado micro/nanoplásticos en mares, ríos, océanos, hasta en las cimas de las montañas, incluso en los órganos internos de muchos organismos vivos, sorprendentemente existe evidencia de la presencia de micro/nanoplásticos en placenta humana [14]. Los micro/nanoplásticos presentes en mares y océanos pueden ser ingeridos por organismos tan pequeños como el zooplancton y transferidos a especies animales mayores, como los peces, cuando este zooplancton es ingerido por éstos. Diversas sustancias tóxicas presentes en el ambiente pueden adherirse a la superficie de los micro/nanoplástico siendo luego ingeridos y transportados por organismos vivientes.

El uso de fotocatalizadores para acelerar la degradación de los plásticos se muestra como una vía eficiente para reducir la cantidad de estos contaminantes ambientales. La fotocatalisis emplea una fuente de energía renovable e inagotable como lo es la luz del sol. Adicionalmente, la degradación de los plásticos, inducida por fotocatalizadores, puede generar productos intermediarios de menor masa molecular que en algunos casos pueden utilizarse como

materia prima para la industria química, síntesis orgánica y en la producción de nuevos productos químicos e inclusive nuevos plásticos [15].

En el presente capítulo se proporciona una visión general de los diversos procesos de foto-degradación de los plásticos en presencia de oxígeno, sus mecanismos de reacción, los factores que gobiernan sus velocidades de reacción y algunos sistemas foto-catalíticos que se investigan en la actualidad para la degradación de los micro/nanoplásticos presentes en el medio ambiente.

Los plásticos y su impacto en el ambiente

Los plásticos son materiales basados en matrices poliméricas mezclados homogéneamente con diversos tipos de aditivos, tales como: colorantes, antioxidantes, plastificantes, sílice, negro de humo, sulfato de calcio, carbonato de calcio, talco, etc. El uso de los plásticos se remonta al siglo XIX con el descubrimiento de la reacción de vulcanización del caucho natural por Charles Goodyear [4, 16]. Los polímeros pueden ser de origen natural o sintético, éstos últimos son fabricados a partir de compuestos químicos de baja masa molecular y de origen fósil (petróleo) denominados monómeros. En un polímero sintético, estos monómeros se encuentran unidos entre sí por enlaces covalentes conformando largas cadenas macromoleculares de formas y composiciones químicas muy diversas. A lo largo del siglo XIX se desarrollaron los primeros polímeros sintéticos, mientras que durante el siglo XX se produjo el desarrollo de una gran diversidad de materiales poliméricos, ver Tabla 1:

Tabla 1. Línea de tiempo del desarrollo de los plásticos [4].

En 1907 se sintetizó el primer polímero sintético: la baquelita, posteriormente en 1926 se desarrolló industrialmente el cloruro de polivinilo o PVC, seguido por el poliuretano (PUR) (1937), el poliestireno (1938), el polietileno de alta densidad (HDPE) y el polipropileno (PP) (1951). Recientes avances tecnológicos han logrado desarrollar polímeros a partir de la fermentación bacteriana de azúcares y lípidos, estos materiales obtenidos a partir de fuentes naturales se denominan biopolímeros e incluyen los polihidroxiclcanoatos (PHA), el poli(ácido láctico) (PLA), los poliésteres alifáticos y los polisacáridos [4]. Los polímeros de origen natural, como el poli(isopreno) (caucho natural), se utilizan para la fabricación de caucho vulcanizado empleado en la manufactura de neumáticos, otro biopolímero el poli(ácido láctico) es usado como material para empaque de alimentos, blísters o suturas en los sectores médicos y farmacéuticos, en impresiones 3D, etc. [17]. En general, los polímeros sintéticos o naturales pueden clasificarse en: (i) termoplásticos: materiales que se pueden moldear prácticamente en cualquier forma deseada a través de procesos térmicos como el moldeo por rotación, inyección, extrusión, compresión, soplado o termoforado. (ii) elastómeros: son materiales que poseen cadenas



macromoleculares unidas entre sí mediante puentes y puntos de entrecruzamiento ubicados aleatoriamente, esta particular estructura macromolecular permite que los elastómeros puedan deformarse sin romperse ante esfuerzos externos, y luego al cesar éste esfuerzo el material retorna a tu tamaño y forma original, a estos materiales elastoméricos se les denomina comúnmente como gomas o cauchos, (iii) termoestables: son materiales cuyas macromoléculas se encuentran unidas entre sí mediante múltiples puentes moleculares cuya composición química puede o no ser diferente a la de la cadena macromolecular principal, este tipo de materiales son en su mayoría sólidos rígidos muy resistentes al calor, una vez formados los polímeros termoestables no pueden ser fundidos de nuevo [9, 18, 19].

Para el año 2015, la demanda mundial de polímeros fue de 388 millones de toneladas de las cuales el 99,5 % eran polímeros a base de petróleo y solo el restante 0,5% eran biopolímeros [20]. El polipropileno (PP) representó el 16% de la demanda mundial, mientras que el polietileno de baja densidad (PEBD) abarcó el 12%, el poli (cloruro de vinilo) (PVC) un 11%, el polietileno de alta densidad (PEAD) un 10 %, el polietileno tereftalato (PET) un 5%, el poliestireno (PS) un 5 %, otros termoplásticos un 3 %, elastómeros no-neumáticos un 2% y polímeros termoestables el 9% [20]. Los usos que se dan a los plásticos son muy diversos, en la Tabla 2 se resumen algunas de las aplicaciones de los principales polímeros comerciales.

Tabla 2. Aplicaciones de los polímeros comerciales más populares [4].

Una vez que los plásticos han cumplido su vida útil, los mismo son descartados por empresas, establecimientos comerciales, hospitales, hogares y demás locales. La basura plástica puede tomarse un gran problema ambiental debido a la ausencia de políticas y/o estrategias de recolección, clasificación y reaprovechamiento de estos desechos plásticos. Cantidades importantes de desechos plásticos pueden llegar a vertederos municipales, al mar o al suelo en donde permanecen indefinidamente. Otra vía de introducción de plásticos post-consumo en el medio ambiente es mediante su erosión mecánica, este proceso genera partículas finas de plástico que pueden ser transportadas grandes distancias por el aire o el agua, ejemplos de esta forma de generación de partículas plástico es el desgaste de los neumáticos durante el rodamiento de vehículos, o los trabajos de torneado de piezas plásticas, entre otros. La manera en que los plásticos son transportados y depositados en el medio ambiente va a depender de la ubicación geográfica de la fuente, del tipo de actividad que genera dichos desechos plásticos y de la existencia o ausencia de infraestructura adecuada para coleccionar y procesar estos materiales. Por ejemplo, los vertederos municipales que carecen de una infraestructura sanitaria urbana adecuada son señalados como una fuente

importante de generación de desechos plásticos al ambiente. Un ejemplo de contaminantes plásticos intencionalmente colocados en desagües urbanos, son las perlas microscópicas de PE contenidas en los exfoliantes faciales, estas partículas plásticas probablemente estén presentes con mayor frecuencia en países desarrollados en donde este tipo de productos son masivamente utilizados. De manera general, la obtención de datos exactos de las fuentes de los desechos plásticos presentes en los diferentes ecosistemas se ve obstaculizada debido a la dificultad en determinar el tiempo que dichos desechos han permanecido tanto en los cuerpos de agua (océanos, mares, ríos, etc.) como en tierra [11, 16, 18, 21].

Meteorización de los plásticos en ambientes naturales

Los residuos plásticos se consideran peligrosos para el medio ambiente debido a su capacidad de permanecer por mucho tiempo en grandes masas de agua (ríos, mares, océanos), estos residuos pueden fragmentarse en pequeños trozos y ser ingeridos por organismos vivos causando su asfixia y/o intoxicación. La presencia de estos desechos plásticos representa una amenaza ambiental global con consecuencias nocivas para los ecosistemas y seres vivos. Potencialmente, la descomposición química de los plásticos puede generar compuestos tóxicos, tales como los bifenilos policlorados, el bisfenol A, retardantes de llama, perfluorados, los ftalatos, los bisfenoles, los nonilfenoles, entre otros, Figura 1 [15].

Luego de que los plásticos post-consumo son desechados, parte de ellos son descargados en el medio ambiente, éstos plásticos experimentan procesos de meteorización física, química y biológica lo cual supone una lenta descomposición de las grandes piezas plásticas obteniéndose en el proceso microplásticos y nanoplasticos [11, 22-24]. Los microplásticos se pueden clasificar en primarios y secundarios.

Los microplásticos primarios son aquellos plásticos microscópicos fabricados para uso industrial o doméstico, por ejemplo, micropartículas de tereftalato de polietileno (PET), polietileno (PE) o metacrilato de polimetileno (PMMA) se dispersan en productos cosméticos como pastas dentales, cremas corporales, champús, exfoliantes, cremas para quemaduras solares, maquillaje y productos de higiene, para aumentar el efecto abrasivo y mejoran sus desempeños. Otros productos como las toallitas húmedas para bebés, desmaquillantes, entre otros emplean micropartículas de poliéster (PES), polietileno (PE) y polipropileno (PP), una vez empleados estos productos industriales y domésticos, las micropartículas plásticas contenidas en ellos son liberadas en el agua de lavado tornándose un pasivo ambiental. Además, grandes cantidades de microplásticos primarios son generados por la abrasión de los neumáticos de los automóviles durante la conducción, también durante el lavado de textiles sintéticos [25]. Los microplásticos se

han tomado en un problema global, desde el año 2010 se han detectado microplásticos en más de 200 especies de especies animales comestibles (164 peces de mar, 23 moluscos, 7 crustáceos, 2 aves, 2 peces de agua dulce, 2 tortugas, pollo), algunos productos alimenticios (sardinas en conserva, sal, azúcar y miel), así como en cerveza y agua [15, 26].

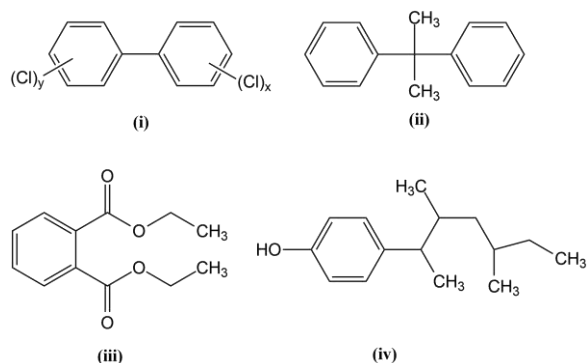


Figura 1. Algunos compuestos tóxicos generados por descomposición química de plásticos, (i) bifenilos policlorados, (ii) bisfenol A, (iii) ftalatos y (iv) nonilfenol.

Las micropartículas primarias sueltas en el ambiente pueden experimentar procesos de degradación causando así su fragmentación y generando microplásticos secundarios. Éstos son más reactivos y peligrosos para la fauna marina y los seres vivos que los microplásticos primarios. Los microplásticos secundarios se generan a partir del desgaste de redes de pesca, gránulos de resina industrial, artículos para el hogar y otros tipos de desechos plásticos. Diversos factores ambientales y químicos controlan los niveles de fragmentación (degradación) de los plásticos, por lo tanto, dependiendo del mecanismo de degradación que experimenten estos materiales podemos clasificar estos procesos de degradación en:

(i) biodegradación (acción de organismos vivos), (ii) fotodegradación (radiación de luz), (iii) degradación termo-oxidativa (descomposición oxidativa lenta a temperatura moderada), (iv) degradación térmica (alta temperatura), (v) hidrólisis (reacción con agua) [15, 26, 27].

Independientemente del proceso de degradación que experimenten los plásticos, los productos de degradación que se generan son incorporados al medio (agua, tierra, aire) aumentando así la concentración y variedad de las especies orgánicas disueltas, a su vez éste variado ambiente químico crea las condiciones adecuadas para que nuevos procesos degradativos tengan lugar hasta que las macromoléculas de polímeros llegan a su mineralización (formación de especies inorgánicas en CO₂, H₂O, N₂, H₂, CH₄, HCO₃⁻ sales y minerales).

Al llegar a mares y océanos, los microplásticos se distribuyen según su flotabilidad, la cual está determinada

por su densidad e interacción superficial (mojabilidad). Hoy en día existe una enorme cantidad de plástico post-consumo en el mar, y se ha reportado la formación de islas de plástico de hasta 3 km de longitud y de zonas del fondo marino con altas concentraciones de plástico sumergido de hasta 1,9 millones de piezas/m². A medida que el tamaño de la partícula plástica disminuye, estas pueden ser ingeridas por microalgas o invertebrados marinos causando su intoxicación e incluso su muerte, es por ello que se ha señalado a los microplásticos como agentes que incrementan la ecotoxicidad del medio y afectan la cadena trófica [11]. La meteorización del plástico se produce debido a muchos procesos diferentes, además causa alteraciones de las propiedades químicas de los contaminantes generados por el plástico [22]. Los efectos de la meteorización de los plásticos sobre el medio ambiente incluyen la aceleración de la liberación de plastificantes y aditivos tóxicos. La meteorización y sus consecuencias sobre los plásticos son: (1) la fragmentación de desechos plásticos más grandes aumentando así el área de superficie específica; (2) modulación de las propiedades de los polímeros (p. ej., cristalinidad); (3) los grupos funcionales que contienen oxígeno cambian las propiedades superficiales de los microplásticos al disminuir su hidrofobicidad; y (4) las biopelículas adheridas sobre los microplásticos aumentan su capacidad de adsorción de toxinas [15].

Degradación fotoquímica de los plásticos

Las reacciones fotoquímicas básicamente ocurren como resultado de la activación de una molécula desde su estado fundamental (S₀) hasta un estado electrónicamente excitado denominado singlete (S*) y/o triplete (T*), esta transición electrónica ocurre debido a la absorción de un fotón (luz). Si esta transición energética ocurre sin que se produzca un cambio de spin electrónico en la molécula, el estado electrónico excitado que se alcanza se denomina singlete (S₁), en el caso de que la molécula absorba energías mayores en las frecuencias apropiadas, entonces mayores estados excitados singletes podrán ser alcanzados (S₂, S₃, ..., S_i) [31]. Cuando la transición electrónica, causada por la absorción de un fotón, produce un cambio del spin electrónico en la molécula (desapareado de dos spines electrónicos), el estado excitado que se obtiene se denomina triplete (T₁), además, si la energía absorbida es lo suficientemente elevada, se podrán alcanzar estados energéticos tripletes mayores (T₂, T₃, ..., T_i).

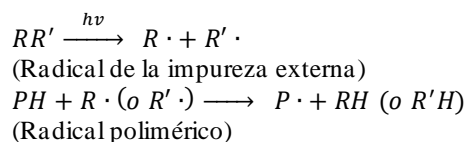
Cuando la reacción de degradación de un polímero se realiza en un ambiente libre de radiación (hν), bajo atmósfera inerte (vacío, nitrógeno o argón) y sin la intervención de otros mecanismos como mecánicos o biológicos, los únicos cambios en la microestructura del material que ocurren son la ruptura y entrecruzamiento de cadena. Por otro lado, cuando el proceso de degradación de un polímero se desarrolla en presencia de luz y bajo un



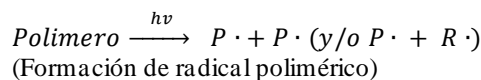
ambiente oxidante (aire, oxígeno), se produce entonces la degradación foto-oxidativa del material. En la degradación foto-oxidativa de casi todos los polímeros se pueden considerar los siguientes pasos [9, 19]:

Fotoiniciación

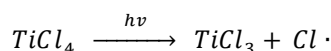
Los polímeros (PH) pueden contener impurezas intramoleculares como ciertos grupos cromóforos (grupos funcionales que absorben luz), tales como: C=O, C=C, ROOH y/o impurezas externas que absorben luz (RR') (impurezas intermoleculares), tales como: trazas de catalizador, solvente, aditivos, contaminantes atmosféricos, partículas metálicas, etc. Estas impurezas pueden generar radicales poliméricos (P) y hidroperóxido (HO₂ ·) en presencia de aire (oxígeno) y bajo los efectos de la radiación UV/VIS (visible), a continuación se muestra el esquema de reacción general de formación de estos radicales [19]:



Cuando la luz actúa sobre las impurezas intramoleculares en el polímero antes descritas, se produce la fragmentación de la cadena y la formación de radicales de diversos tamaños (R: metilo, etilo, etc.), el alcance de este tipo de reacciones dependerá de otros factores asociados a las propiedades del material.



Un contaminante muy comúnmente encontrado en polímeros son los residuos de catalizadores, estos pueden ser generadores de radicales iniciadores de reacciones de degradación de polímeros. Muchos polímeros comerciales contienen residuos de compuestos metálicos y determinadas cantidades de aditivos que son incorporados deliberadamente en el material, inclusive la presencia de partículas y trazas metálicas puede deberse al desgaste mecánico sufrido por los diferentes sistemas de producción de esos polímeros (paredes de reactores, aspas, tuberías, etc.). Catalizadores basados en metales de transición como el titanio o el circonio son ampliamente empleados en la síntesis de PE y el PP, luego de la síntesis del polímero, residuos de estos metales de transición pueden quedar ocluidos en el material en concentraciones de alrededor de 2-100 ppm. Estos residuos metálicos son asociados a problemas de estabilidad térmica y foto-degradación de los plásticos.

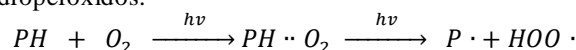


La generación de agentes fotosensibilizadores se inicia con absorción de un fotón de luz ($h\nu$) por el TiO₂ y la promoción de un electrón del metal de transición desde su banda de valencia (BV) hacia su banda de conducción (BC), formándose así un par positivo hueco-electrón.

La proporción relativa de las especies reactivas formadas en la fotosensibilización dependerá de la presencia de agua y oxígeno en el sistema de reacción, por lo tanto, el TiO₂ no promoverá fotosensibilización sin la presencia de oxígeno y agua. A continuación, la Tabla 3 muestra algunos compuestos foto-iniciadores de las reacciones de foto-degradación de polímeros:

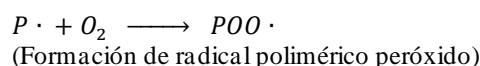
Tabla 3. Varios foto-iniciadores para acelerar la degradación de diferentes polímeros

A su vez, la radiación fotónica puede catalizar la formación de complejos de transferencia de carga (CTC) entre el oxígeno ambiental y el polímero (PH·O₂), este tipo de complejos son muy inestables y generalmente se descomponen fácilmente generando radicales poliméricos e hidroperóxidos:

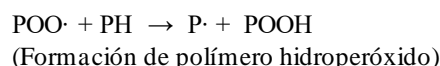


Propagación de cadena

La propagación de cadena es la reacción en donde se inserta un grupo radical peróxido (POO·) a la cadena principal del polímero, partiendo de un radical polimérico y de oxígeno atmosférico:



Esta reacción es muy rápida y propicia la formación de polímeros hidroperóxidos (POOH) y radicales (P·) a partir de abstracción de hidrógeno de una cadena polimérica (PH):



La abstracción de átomos de hidrógenos de las cadenas poliméricas, promovida por los radicales peróxidos (POO·), ocurre preferencialmente sobre los carbonos terciarios de la cadena, sin embargo, se ha reportado que esta abstracción de hidrógenos puede también darse sobre carbonos secundarios [19].

La abstracción de átomos de hidrógenos durante la prolongación de cadena puede también ocurrir de forma intramolecular, para ello debe existir el arreglo estereoquímico favorable entre el grupo peróxido (POO·) y el átomo de hidrógeno a ser abstraído.

Además de promover la formación de radicales poliméricos (P·), los radicales peróxidos (POO·) participan en las

reacciones de terminación, las cuales compiten con la propagación de cadena, formando en el proceso polímeros peróxidos (POOP), éteres poliméricos (POP) y liberan en el proceso de oxígeno molecular [31].

Reacciones Norrish del tipo I y II

Los polímeros que contienen grupos oxigenados del tipo cetónico pueden sufrir dos tipos de reacciones fotoquímicas:

a) Reacción Norrish del tipo I (radical), también conocida como reacción de α -escisión, genera radicales (P.) y monóxido de carbono (CO), Figura 2.

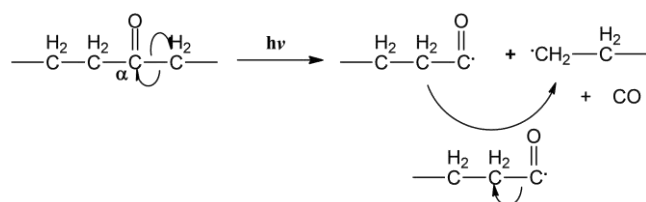


Figura 2. Reacción de Norrish tipo I

b) Reacción Norrish del tipo II (no radical), este tipo de ruptura de cadena involucra la abstracción de hidrógeno intermolecular mediante un intermediario cíclico de seis miembros el cual sufre un rearrreglo que da como resultado un grupo cetona sobre la cadena polimérica y una olefina de cadena corta, Figura 3.

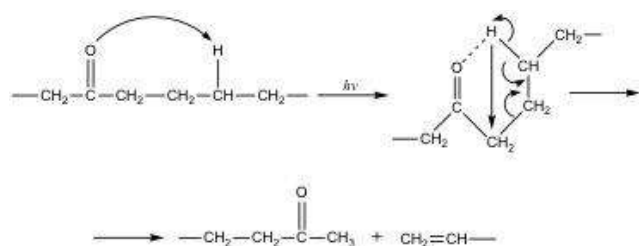


Figura 3. Reacción de Norrish tipo II

Las reacciones de Norrish del tipo I y II dependen de la estructura del polímero, por ejemplo, la reacción de ruptura de cadena Norrish del tipo I en polímeros de etileno y monóxido de carbono se produce en muy bajo rendimiento, ya que este tipo de polímeros posee un fuerte efecto jaula (protección de solvente) y una alta reactividad de los radicales primarios producidos en la reacción. Por otra parte, la reacción Norrish del tipo II en los copolímeros de etileno y monóxido de carbono no ocurren debido a la ausencia de γ -hidrógenos.

Debido a la rápida difusión del pequeño radical acetil ($\text{CH}_3\text{-}\dot{\text{C}}=\text{O}$), éste se aleja de radical (P.) recién formado, esta situación incrementa la efectividad de la fotólisis Norrish tipo I. La reacción Norrish tipo II depende del tiempo de vida del estado excitado triplete, además esta especie excitada debe ser lo suficientemente estable para permitir el

rearrreglo cíclico de la cadena, el cual puede ser un intermediario de seis o siete miembros. Los intermediarios cíclicos de seis miembros se forman en polímeros fenil vinil cetona (PPVK), mientras que los intermediarios cíclicos de siete miembros se producen en copolímeros metil metacrilato y metil vinil cetona (MVK-MMA).

El desarrollo de la foto-escisión Norrish tipo II de macromoléculas difiere significativamente de la foto-escisión de moléculas pequeñas. La difusión de pequeñas moléculas controla parcialmente el proceso de transferencia de energía, mientras que en un medio polimérico la migración de la energía de excitación depende enteramente de la viscosidad de la macromolécula. En macromoléculas, el desarrollo de las reacciones Norrish tipo I y tipo II es muy limitado cuando se realiza por debajo de la temperatura de transición vítrea del polímero (T_g), ya que a esta temperatura no hay movimiento molecular importante, mientras que por encima de T_g , los rendimientos cuánticos de las reacciones de Norrish en polímeros son casi idénticos a las reacciones realizadas en solución a la misma temperatura (aumento de la movilidad molecular) [19].

Foto-degradación de polímeros clorados

La deshidrocloración es la reacción más característica de polímeros clorados como el PVC durante la radiación UV, esta reacción conduce a la formación de secciones de cadena insaturadas ($-\text{CH}=\text{CH}-$) $_n$ en el polímero, n puede variar de 2 a 13. Estas reacciones de deshidrocloración son las responsables de la aparición de una coloración amarillo-roja en el PVC. Además de las reacciones de deshidrocloración, el PVC al ser sometido a irradiación UV ($h\nu$) en presencia de agua y humedad, puede sufrir reacciones típicas de fotooxidación con la formación de grupos carbonilos, ácidos carboxílicos, hidróxido e hidroperóxidos, tal y como ya ha sido descrito en secciones anteriores. En el caso específico del policloruro de vinilo clorado (CPVC), su foto-deshidrocloración induce la formación de secuencias de polienos clorados.

Los polímeros obtenidos de la deshidrocloración del CPVC pueden llegar a deshidroclorarse completamente cuando se emplea una radiación laser, generando de esta manera estructuras de grafeno.

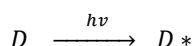
Foto-degradación de polímeros inducida por colorantes o tintes

Prácticamente todos los materiales plásticos comerciales poseen en su composición tintes o colorantes. La foto-degradación inducida por los tintes es un fenómeno que se encuentra comúnmente en diversos sectores industriales, tales como en el transporte terrestre, aéreo y marítimo, en el sector de la construcción, electrónica, y muchas más.

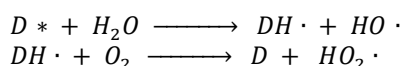
Una molécula de tinte (D) es capaz de absorber luz y activarse energéticamente hasta alcanzar un estado excitado



singlete (1D) y/o triplete (3D) (denotaremos ambos estados excitados como D*).

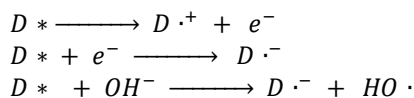


La molécula de tinte fotoactivada (D*) puede entonces abstraer un átomo de hidrogeno del polímero (PH) y producir un radical (P·) junto con un radical hidrogenado de tinte (DH·). En presencia de agua (humedad) y oxígeno molecular, o en el caso del uso de tintes húmedos, las moléculas de tinte fotoactivadas puede generar radicales hidróxidos (HO·) e hidroperóxidos (HOO·) y una especie radical hidrogenada del mismo tinte inicial (DH·).

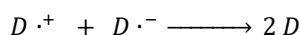


Los radicales hidróxidos (HO·) e hidroperóxido (HO₂·) son muy reactivos y abstraen rápidamente átomos de hidrogeno del polímero (PH) generando así radicales (P·) que posteriormente puede sufrir de reacciones de fotooxidación, tal y como de describió en la sección anterior.

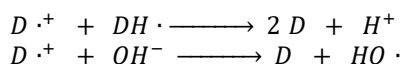
La desactivación de esta molécula de tinte fotoactiva (D*) puede generar un catión radical semi-oxidado (D^{·+}) o un anión radical semi-reducido (D^{·-}).



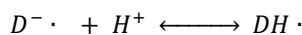
La reacción de desproporcionamiento de los dos iones de tinte (D^{·+} y D^{·-}), conduce a la regeneración de dos moléculas de tinte:



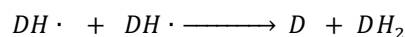
Ambos radicales de tinte pueden además participar en las siguientes reacciones:



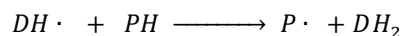
El anión radical del tinte (D^{·-}) frecuentemente posee una fuerte tendencia a tomar un protón del entorno y/o establecer un equilibrio químico con este.



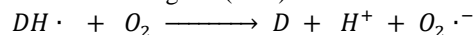
Ambas especies D^{·-} y DH·. representan formas semi-reducidas de la molécula de tinte en el estado fundamental (S0), el radical de tinte DH·. es una especie muy reactiva y genera un producto incoloro (DH₂) conocido como el leucoformo del tinte derivado su reacción de desproporcionamiento:



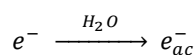
Este leucoformo también puede ser formado a partir de la abstracción de un átomo de hidrogeno del polímero:



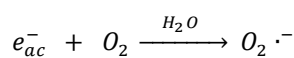
En un medio oxigenado el radical de tinte DH·. produce un ion radical oxígeno (O₂^{·-}).



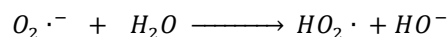
En presencia de agua, un electrón (e⁻) puede ser solvatado generando una especie (e_{ac}⁻) que puede reaccionar con el oxígeno molecular y el agua del entorno.



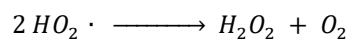
Solvatación de un electrón



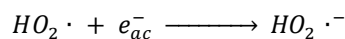
Formación del ion radical oxígeno



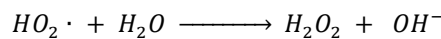
Radical hidroperóxido y anión hidróxido



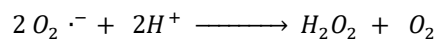
Peróxido de hidrogeno



Anión radical hidroperóxido

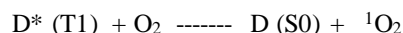


Peróxido de hidrogeno y anión hidróxido



Formación de peróxido de hidrógeno

Otra reacción que puede producirse es la transferencia de energía entre la molécula de tinte excitada con oxígeno molecular formando de esta manera oxígeno singlete (1O₂):



Formación de oxígeno singlete

A continuación, la Tabla 4 muestra diversos tipos de tintes comúnmente empleados en la industria del plástico y que producen oxígeno singlete (¹O₂) mediante transferencia de energía, las energías de sus estados tripletes (ET) están en el rango de 30-56 kcal mol⁻¹.

Tabla 4. Tintes que promueven la fotodegradación de plásticos [31]

Todas estas reacciones de fotoiniciación de tintes pueden causar la decoloración de los tintes contenidos en los plásticos. Los mecanismos de decoloración del tinte son complejos y a menudo dependen de la estructura del tinte y de la naturaleza química y/o física del polímero. El deterioro



de los plásticos por la fotosensibilización de los tintes ocurre cuando un tinte acelera el rompimiento de la estructura molecular de un polímero, todo ello en presencia de oxígeno molecular y agua. El grado de foto-degradación de los plásticos debido a los tintes puede ser disminuido mediante la adición de estabilizantes [33].

Degradación foto-catalítica de plásticos

La degradación foto-catalítica del plástico puede describirse como todo el conjunto de reacciones que sufren las cadenas de polímeros, promovidas por un catalizador fotosensibilizador, y que dan como resultado la descomposición o degradación del polímero junto con la generación de gases, minerales, monómeros, oligómeros y otros diferentes químicos [34]. La difusión de las especies reactivas, a través de la matriz del polímero, aumentan su degradación macromolecular, entre las reacciones que se producen están las reacciones de oxidación, ruptura de cadena y entrecruzamiento.

Los plásticos son difíciles de degradar debido a su pobre solubilidad en el agua, alta estabilidad estructural y carácter no-biodegradable. La fotocatalisis ha demostrado ser un método eficaz para la degradación del plástico. La fotosensibilización es el proceso en el cual una especie química absorbe un fotón de luz en presencia de agua y/o oxígeno, y forma en el proceso especies reactivas, tales como radical hidroxilo (HO.) y superóxido (HOO.), estas especies inician la degradación del plástico mediante reacciones de ruptura de la cadena, formación de ramificación, entrecruzamiento y finalmente la mineralización del polímero en forma de H₂O, CO₂ y otros compuestos. En la siguiente Tabla 5 se muestran algunos estudios de degradación foto-catalítica de plásticos [35].

Para que un catalizador sea activo en la foto-degradación de plásticos, este debe estar constituido por un metal semiconductor que absorbe energía radiante o luz (hv) tornándose así en una especie fotosensibilizadora que acelera la velocidad de la degradación del plástico. Un fotocatalizador ideal debería absorber luz a temperatura ambiente, ser altamente estable a la foto-corrosión y al mismo tiempo no debe ser tóxico para el ambiente ni los seres vivos. La efectividad de un fotocatalizador depende de su potencial de óxido-reducción, en este sentido se muestran a continuación los potenciales de óxido-reducción de diversos compuestos usados como fotocatalizadores en la degradación de plásticos. Los valores del potencial normal de oxidación están referenciados al potencial de oxidación normal del hidrógeno [36].

Si un fotocatalizador (semiconductor) posee una banda de valencia máxima (VBM) más positiva que 1,23 eV (del O₂/H₂O), significa que su capacidad de oxidación es suficiente para promover la oxidación del agua, por lo tanto,

a medida que el valor de VBM de determinado fotocatalizador es más positiva significa que la capacidad de oxidación de dicho fotocatalizador será mayor. Un orden en capacidad de oxidación de algunos fotocatalizadores estudiados sigue la siguiente tendencia: ZnS > ZnO - TiO₂ > WO₃ > CdS.

Por el contrario, si el semiconductor exhibe una banda de conducción mínima más negativa que el potencial normal de reducción de hidrógeno, significa que ese fotocatalizador será capaz entonces de promover la reducción del agua, y cuanto mayor sea el valor de esa banda de conducción, el foto-catalizador tendrá una mayor capacidad de reducción (ZnS - CdS - CdSe > ZnO > TiO₂ - Si) [36].

Uno de los fotocatalizadores más empleados en la reacción de degradación de plásticos es el TiO₂, este compuesto posee un elevado potencial de óxido-reducción, gran estabilidad química y térmica, bajo costo y es ambientalmente amigable (no tóxico). Por otra parte, el óxido de zinc (ZnO) posee una separación de bandas semejante a la del TiO₂ y a menudo es usado como alternativa al TiO₂. Otros semiconductores empleados como fotocatalizadores en la degradación de plásticos son: óxido de hierro (Fe₂O₃), Sulfuro de cadmio (CdS), sulfuro de zinc (ZnS), óxido de tungsteno (WO₃), óxido de estaño (SnO), vanadato de bismuto (BiVO₄), y nitruros de carbono no metálicos (N₃C₄) [36]. A continuación, la tabla 5 muestra un resumen de los distintos sistemas foto-catalíticos heterogéneos que se han estudiado en la degradación de diversos tipos de plásticos.

Tabla 5. Estudios de degradación foto catalítica de diversos tipos de plásticos [35].

Microrobots foto-catalíticos autónomos degradadores de microplásticos

Una de las características importantes que debe poseer un fotocatalizador es una gran área superficial, no obstante, los métodos de síntesis clásicos de fotocatalizadores heterogéneos involucran procesos de deposición física bajo una agitación constante, este tipo de métodos de síntesis son costosos y no generan partículas lo suficientemente pequeñas para alcanzar una gran área superficial por gramo de material. Adicionalmente, la mayoría de los fotocatalizadores son tóxicos y no se pueden reutilizar luego de su uso en la reacción de foto-degradación del plástico.

En el 2021, Pumera et al., [37] reportaron la síntesis de unos novedosos sistemas foto-catalíticos autómatas denominados por sus creadores como microrobots basados en vanadato de bismuto (BiVO₄), estos fotocatalizadores heterogéneos son capaces de desplazarse por ambientes acuáticos de forma automática, emplean poca energía e interactúan con los microplásticos del entorno para posteriormente foto-degradarlos en el interior de su



estructura. Estos microrobots nadadores pueden ser impulsados por campos magnéticos, eléctricos, ultrasonido y la luz del entorno, además, estos microrobots contiene óxido de hierro (Fe_3O_4) lo cual permite recuperar los microrobots del medio de reacción mediante el uso de un imán. Los aspectos resaltantes de este particular sistema foto-catalítico son los siguientes:

- I. Una separación de bandas de potenciales adecuada.
- II. Una baja velocidad de recombinación del par de carga.
- III. Una forma física asimétrica.
- IV. Fácil interacción con la luz visible.
- V. La foto-reacción con el agua del medio genera productos de forma desproporcionada, lo cual promueve su movimiento (autómata).

Los microrobots de $\text{BiVO}_4/\text{Fe}_3\text{O}_4$ se alojaron en el túnel de hospedaje junto con cierta cantidad de microplásticos, inicialmente los microrobots no estaban en contacto con los microplásticos, posteriormente el experimento se inicia permitiendo a los microrobots se muevan a lo largo del túnel huésped mientras se aplica luz solar al sistema. La luz promueve las foto-reacciones en el microrobots permitiendo que este se mueva hasta absorberse sobre la superficie de los microplásticos. Para confirmar la fuerza de adhesión de los microrobots sobre los microplásticos, se aplica un campo magnético (imán) al sistema para separar los microplásticos con microrobots adheridos de los microplásticos sin microrobots adheridos [37]. La adhesión de los microrobots sobre la superficie de los microplásticos se atribuye a mecanismos de adsorción/precipitación previamente observados en el anclaje de metales pesados y contaminantes orgánicos sobre microplásticos oceánicos.

Los microrobots utilizan H_2O_2 como combustible para generar asimétricamente productos como H^+ y O_2 , la formación de estos productos impulsa los microrobots en medio acuoso haciendo que éstos contacten los microplásticos iniciando de esta forma las reacciones de degradación de estos. Las reacciones de fotodegradación de los microplásticos involucran la formación de radicales libres, rompimiento de enlaces C-C y/o N-C y C-O, entre otras reacciones que ocurren simultáneamente.

Este estudio logro demostrar que los microrobots fotocatalíticos autómatas son capaces de degradar eficientemente diferentes tipos de microplásticos, en particular al ácido poliláctico (PLA), policaprolactona (PCL), esto debido a su capacidad de movimiento autómata el cual permite una interacción efectiva entre el microplásticos y el fotocatalizador sin necesidad de usar agitadores mecánicos externos. Estos microrobots fotocatalizadores autómatas han demostrado por primera vez que es posible foto-degradación eficientemente micropartículas de plástico en espacios complejos confinados, lo que puede impulsar notoriamente las investigaciones sobre tratamientos de microplásticos

ambientales en aras de reducir la cantidad de estos contaminantes en el medio ambiente.

Conclusiones

En los últimos 20 años, la detección de los microplásticos en ambientes acuáticos, terrestres y en el aire, ha encendido las alarmas del sector científico e industrial, los efectos nocivos de estos materiales micrométricos sobre la salud de los seres vivos han sido corroborados científicamente. Por lo tanto, se han iniciado importantes proyectos en el mundo para estudiar este fenómeno artificial creado para así minimizar sus efectos sobre los ecosistemas del planeta y los seres vivientes. La fotoquímica provee las herramientas conceptuales necesarias para entender y desarrollar estrategias tecnológicas mediante las cuales sería posible descomponer los microplásticos al grado de llevarlos a compuestos minerales inocuos. Las reacciones de fotodegradación de los plásticos dependen mayormente de la presencia de agua, luz solar, imperfecciones y/o contaminantes en el plástico y además de la composición química del polímero a ser degradado.

Los tiempos de las reacciones de foto-degradación de los plásticos son muy grandes, por lo que el uso de fotocatalizadores heterogéneos para acelerar estos procesos de foto-degradación constituye una estrategia tecnología con gran potencial de éxito a considerar en el futuro. Grandes avances se han realizado en el desarrollo de fotocatalizadores para la degradación de los microplásticos, se estima que dentro de pocas décadas estaremos en presencia del surgimiento de importantes tecnologías de descontaminación ambiental de los microplásticos, y sin duda la fotocatalisis tendrá un rol protagónico en la depuración de mares, ríos e incluso del aire y la tierra de nuestro planeta.

Referencias

- [1] Chamas, A., Moon, H., Zheng, J., Qiu, Y., Tabassum, T., Jang, J., Abu-Omar, M., Scott, S., Suh, S. ACS Sustainable Chemistry Engineering vol. 8, pp. 3494-3511, 2020.
- [2] Gewert, B., Plassmann, M., Macleod, M. Environmental Science Processes & Impact Vol. 17(9), pp. 1513-1521, 2015.
- [3] Sen, S. K., Raut, S. Journal Environmental Chemical Engineering vol. 3, pp.462-473, 2015.
- [4] Lambert, S. Environmental Risk of Polymer and their Degradation Products pp. 1-198, 2013.
- [5] Webb, H., Arnott, J., Crawford, R., Ivanova, E. Polymers. vol. 5, pp. 1-18, 2013.
- [6] Yousif, E., Haddad, R. Springerplus. vol. 2, pp. 1-32, 2013.
- [7] Niaounakis, M. Management Mar Plastic Debris. pp. 127-142, 2017
- [8] Daglen, B. C, Tyler, D. R. Green Chemistry Letters and Reviews. vol. 3, pp. 69-82, 2010.
- [9] Rabek, J. F. in Photodegradation of Polymers, Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg pp. 51-97. 1996.
- [10] OECD Environment Directorate. 168, 2021.
- [11] Andrady, A. Marine Pollution Bulletin. vol. 62(8), pp. 1596–1605, 2011.



- [12] Auta, H. S., Emenike, C., Fauziah, S. *Environment International*. Vol. 102, pp. 165-176, 2017.
- [13] Singh, B., Sharma, N. (2008) *Polymer Degradation and Stability*. vol. 93(3), pp. 561-584, 2008.
- [14] Ragusa, A., Svelato, A., Santacroce, C., Catalano, P., Notarstefano, V., Carnevali, O., Papa, F., Rongioletti, M. C. A., Baiocco, F., Draghi, S., D'Amore, E., Rinaldo, D., Matta, M., Giorgini, E. *Plasticenta: Microplastics in human placenta*, bioRxiv, DOI:10.1101/2020.07.15.198325. 2020.
- [15] Bratovic, A. *Journal of Nanoscience & Nanotechnology Applications*. vol. 3, pp. 304-312, 2019.
- [16] Crawford CB & B Quinn (2017) *Microplastic pollutants*. Amsterdam, Netherlands. Elsevier, 336.
- [17] Doble M & A Kumar (2005) in *Biotreatment of industrial effluents*, eds. M. Doble and A. Kumar. 101-110.
- [18] Webb, H. K., Arnott, J., Crawford, R. J., Ivanova, E. P. *Plastic degradation and its environmental implications with special reference to poly(ethylene terephthalate)*, *Polymers (Basel)*. vol. 5, pp. 1-18, 2013
- [19] Rabek, J. F. (1995) in *Polymer Photodegradation*, Chapman & Hill.
- [20] Ryberg, M. W., Laurent, A., Hauschild, M. *Mapping of global plastics value chain*. Vol. 96, 2018.
- [21] Fotopoulou, K. N., Karapanagioti, K. K. *Degradation of Various Plastics in the Environment*, *Handbook Environmental Chemistry* vol. 78, pp. 71-92, 2019.
- [22] Pickett, J. R. *Weathering of plastics*, Elsevier Inc., Third Edit, 2018.
- [23] Fabiyi J.S. & A.G. McDonald (2014) *Maderas, Ciencia y Tecnología*. 16:275–290.
- [24] Lambert, S., Sinclair, C. J., Bradley, E. L., Boxall, A. B. *Science Total Environmental*. Vol. 447, p.p. 225-234, 2013.
- [25] Crawford, C. B., Quinn, B. *Microplastic pollutants*. Amsterdam, Netherlands. Elsevier, pp. 336, 2017.
- [26] Wetherbee, G., Baldwin, A., Ranville, J. *It is raining plastic.: U.S. Geological Survey Open-File Report*. p.p. 1048, 2019. Disponible en <https://pubs.er.usgs.gov/publication/ofr2019104826/2020>.
- [27] Klein S, Dimzon I, Eubeler J & T Knepper (2018) *Analysis, Occurrence, and Degradation of Microplastics in the Aqueous Environment*. In: Wagner M., Lambert S. (eds) *Freshwater Microplastics. The Handbook of Environmental Chemistry* Springer, Cham, 58:302.
- [28] Menéndez-Pedriza, J. *Interaction of environmental pollutants with microplastics: A critical review of sorption factors, bioaccumulation and ecotoxicological effects*, 2020. DOI:10.3390/TOXICS8020040.
- [29] Fotopoulou, K. N., Karapanagioti, H. K. in *Hazardous Chemicals Associated with Plastics in the Marine Environment*, Springer International Publishing AG, 2017.
- [30] Canopoli, L., Coulon, F., Wagland, S. T. *Science Total Environmental* vol. 698, pp. 134125, 2020
- [31] Rabek, J. F. *Photodegradation of Polymers*, Springer International Publishing, Berlin, Heidelberg, 1996.
- [32] Niki, E., Yamamoto, Y., Kamiya, Y. *Oxidative Degradation of Polymers*. vol. III, pp. 78-95, 1978.
- [33] Rabek, J. F. *Polymer Photodegradation*. pp. 24–66, 1995.
- [34] Malhotra, S. K., Pisharody, L., Karim, A. V. *Journal of Materials Research*. vol. 99, pp. 163-178, 2021.
- [35] Ouyang, Z., Yang, Y., Zhang, C., Zhu, S., Qin, L., Wang, W., He, D., Zhou, Y., Luo, H., Qin, F. *Journal of Materials Chemicals A*. vol. 9, pp. 13402-13441, 2021.
- [36] Lee, Q. Y., Li, H. *Photocatalytic degradation of plastic waste: A mini review*, *Micromachines*, 2021. DOI:10.3390/mi12080907.
- [37] Beladi-Mousavi, S. M., Hermanová, S., Ying, Y., Plutnar, J., Pumera, M. *ACS Applied Materials & Interfaces*. 2021. DOI:10.1021/acsmi.1c04559.



Tabla 1. Línea de tiempo del desarrollo de los plásticos [4].

Siglo XIX		Siglo XX	
Año/Polímero	Desarrollador	Año/Polímero	Desarrollador
1839/Látex de Caucho Natural	Charles Goodyear	1909/Baquelita	Leo Hendrik Baekeland
1839/Poliestireno	Edward Simon	1926/PVC plastificado	Walter Semon
1862/Parkesina	Alexander Parkes	1933/Poli (cloruro de vinilideno)	Ralph Wiley
1865/Acetato de Celulosa	Paul Schützenberger	1935/Polietileno de baja densidad	Reginald Gibson y Eric Fawcett
1869/Celuloide	Jhon Wesley Hyatt	1936/Poli (metil metacrilato)	Reginald Gibson y Eric Fawcett
1872/Poli(cloruro de vinilo)	Eugen Baumann	1937/Poliuretanos	Otto Bayer
1894/Rayón viscoso	Charles Frederick Cross	1938/Poliestireno	Hecho en forma comercial
		1938/Polietileno Tereftalato	John Whinfield y James Dickson
		1942/Poliéster Insaturado	John Whinfield y James Dickson
		1951/Polipropileno	Paul Hogan y Robert Banks
		1953/Policarbonato	Hermann Schnell
		1954/Espuma de poliestireno	Ray McIntire
		1960/Poli (ácido láctico)	Patrick Gruber
		1978/Polietileno lineal de baja densidad	DuPont

Tabla 2. Aplicaciones de los polímeros comerciales más populares [4].

Tipo de Polímero	Usos y aplicaciones
Polietileno (PE) $\left(\begin{array}{c} \text{H} \quad \text{H} \\ \quad \\ -\text{C}-\text{C}- \\ \quad \\ \text{H} \quad \text{H} \end{array} \right)_n$	<i>PE de baja densidad:</i> botellas comprimibles, juguetes, bolsas de transporte, aislamiento eléctrico, revestimientos de tanques químicos, sacos de alta resistencia, empaques en general, tuberías de gas y agua. <i>PE de alta densidad:</i> bidones de productos químicos, juguetes, artículos de picnic, artículos para el hogar y la cocina, aislamiento de cables, bolsas de transporte y material para envolver alimentos.
Polipropileno (PP) $\left(\begin{array}{c} \text{H} \quad \text{H} \\ \quad \\ -\text{C}-\text{C}- \\ \quad \\ \text{H} \quad \text{CH}_3 \end{array} \right)_n$	Envases de alimentos, bandejas de comida para microondas y en la industria automotriz.
Poli (Cloruro de vinilo) (PVC) $\left(\begin{array}{c} \text{H} \quad \text{H} \\ \quad \\ -\text{C}-\text{C}- \\ \quad \\ \text{H} \quad \text{Cl} \end{array} \right)_n$	Aplicaciones de construcción, transporte, embalaje, sector eléctrico / electrónicas y sanitarias.
Polietileno Tereftalato (PET) $\left(\text{O}-\text{C}(=\text{O})-\text{C}_6\text{H}_4-\text{C}(=\text{O})-\text{O}-\text{C}(\text{H})_2-\text{C}(\text{H})_2 \right)_n$	Botellas de bebidas, forro de cables para bandejas de comida para el horno.



<p>Poliestireno (PS)</p> $\left(\begin{array}{c} \text{H} \quad \text{H} \\ \quad \\ \text{---C---C---} \\ \quad \\ \text{H} \quad \text{C}_6\text{H}_5 \end{array} \right)_n$	<p>Envases de comida, cajas para llevar, vasos de bebidas, cubiertos de plástico, embalaje protector y cajas de CD.</p>
<p>Poliuretano (PU)</p> $\left(\begin{array}{c} \text{O} \quad \quad \quad \text{H} \quad \quad \quad \text{O} \quad \quad \quad \text{H} \quad \text{H} \\ \quad \quad \quad \quad \quad \quad \quad \quad \quad \quad \\ \text{---C---N---C---C---N---C---O---C---C---O---} \\ \quad \quad \quad \quad \quad \quad \quad \quad \quad \quad \\ \text{H} \quad \quad \quad \text{H} \quad \quad \quad \text{H} \quad \quad \quad \text{H} \quad \text{H} \end{array} \right)_n$	<p>Rodillos de impresión, neumáticos macizos, ruedas, tacones de zapatos, para choques de automóviles, como espumas en colchones y asientos de automóviles, y en aplicaciones biomédicas.</p>
<p>Policarbonato (PC)</p> $\left(\begin{array}{c} \text{O} \quad \quad \quad \text{CH}_3 \quad \quad \quad \text{O} \quad \quad \quad \text{O} \\ \quad \quad \quad \quad \quad \quad \quad \quad \quad \\ \text{---O---C}_6\text{H}_4\text{---C---C}_6\text{H}_4\text{---O---C---} \\ \quad \quad \quad \\ \text{CH}_3 \quad \quad \quad \text{O} \end{array} \right)_n$	<p>Botellas, utensilios, contenedores, láminas, artículos eléctricos y aplicaciones médicas.</p>
<p>Poli(metilpenteno) (PMP)</p> $\left(\begin{array}{c} \text{H} \quad \text{H} \\ \quad \\ \text{---C---C---} \\ \quad \\ \text{H} \quad \text{CH}_2 \\ \\ \text{H}_3\text{C---CH---CH}_3 \end{array} \right)_n$	<p>Artículos médicos, jeringas, cubiertas de lámparas (buena resistencia al calor), aplicaciones de radar, encapsulación y envasado de alimentos para microondas.</p>
<p>Politetrafluoroetileno (PTFE)</p> $\left(\begin{array}{c} \text{F} \quad \text{F} \\ \quad \\ \text{---C---C---} \\ \quad \\ \text{F} \quad \text{F} \end{array} \right)_n$	<p>Revestimiento antiadherente, juntas, cojinetes, aplicaciones médicas y eléctricas de alta y baja temperatura, equipos de laboratorio, piezas de bombas y cinta de sellado de roscas.</p>
<p>Poli(Sulfuro de fenileno) (PPS)</p> $\left(\begin{array}{c} \text{C}_6\text{H}_4 \\ \\ \text{---S---} \\ \\ \text{C}_6\text{H}_4 \end{array} \right)_n$	<p>Aparatos eléctricos, automotrices, de cocina, equipos médicos, dentales y de laboratorio esterilizables, rejillas y componentes para secadores de cabello.</p>
<p>Poliisopreno (NR)</p> $\left(\begin{array}{c} \text{H}_2\text{C} \quad \quad \quad \text{CH}_2 \\ \quad \quad \quad \\ \text{---C=C---} \\ \quad \quad \quad \\ \text{H} \quad \quad \quad \text{CH}_3 \end{array} \right)_n$	<p>Guantes, llantas, botas de goma, gomas elásticas, borradores de lápiz, mangueras, cinturones, pisos y aplicaciones médicas.</p>
<p>Acrilonitrilo-butadieno-estireno (ABS)</p> $\left(\begin{array}{c} \text{H} \quad \text{H} \\ \quad \\ \text{---C---C---} \\ \quad \\ \text{H} \quad \text{CN} \end{array} \right)_m \left(\begin{array}{c} \text{CH}_2 \quad \quad \quad \text{CH}_2 \\ \quad \quad \quad \\ \text{---C=C---} \\ \quad \quad \quad \\ \text{H} \quad \quad \quad \text{H} \end{array} \right)_n \left(\begin{array}{c} \text{H} \quad \text{H} \\ \quad \\ \text{---C---C---} \\ \quad \\ \text{H} \quad \text{C}_6\text{H}_5 \end{array} \right)_o$	<p>Tuberías, instrumentos musicales, cabezas de palos de golf, automóviles, dispositivos médicos para el acceso a la sangre, dispositivos eléctricos, cascos de protección, canoas de aguas bravas, pequeños electrodomésticos de cocina y juguetes.</p>
<p>Polibutadieno</p> $\left(\begin{array}{c} \text{H}_2\text{C} \quad \quad \quad \text{CH}_2\text{---CH}_2 \\ \quad \quad \quad \\ \text{---C=C---} \\ \quad \quad \quad \\ \text{H} \quad \quad \quad \text{H} \end{array} \right)_n$	<p>Neumáticos, pelotas de golf y cámaras de aire.</p>

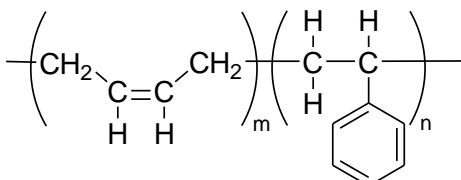
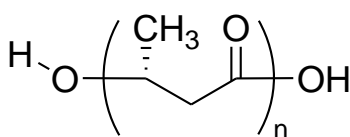
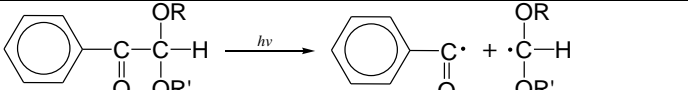
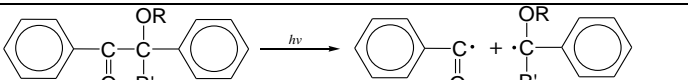
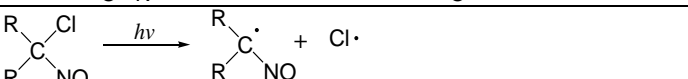
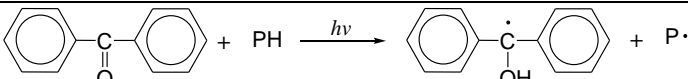
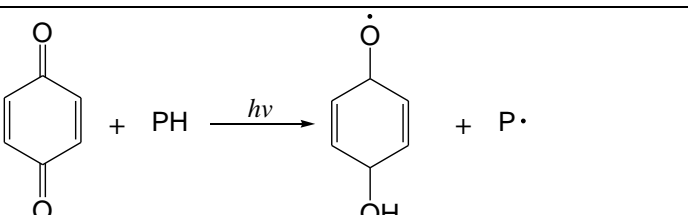
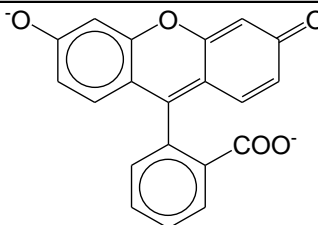
<p>Estireno-Butadieno (SBR)</p> 	<p>Neumáticos, calzado, aplicaciones de construcción y revestimiento de papel</p>
<p>Poli(hidroxicanoato) (PHA)</p> 	<p>Dispositivos médicos, como parches cardiovasculares, pasadores ortopédicos, barreras de adhesión, stents, dispositivos de reparación/regeneración de tejidos guiados, dispositivos de reparación de cartílago articular, material de implante óseo, sistema de liberación de fármacos, almacén para ingeniería de tejidos, agentes de carga y relleno.</p>

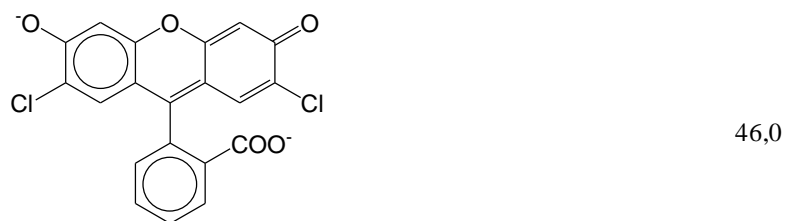
Tabla 3. Varios foto-iniciadores para acelerar la degradación de diferentes polímeros

Foto-iniciador	Reacción de fragmentación	Polímero
Derivador acetofenona		PE, EPDM B
Derivados benzoina		PE, PMMA, PVC, PS
Compuestos cloronitrosos		PI
Benzofenona		PE, PP, PS, PEP, PVAP, PEG, CA PAMS, PBD, EPDM B, PNR,
Quinonas		PE, PP, PVC, PS, PA, Celulosa

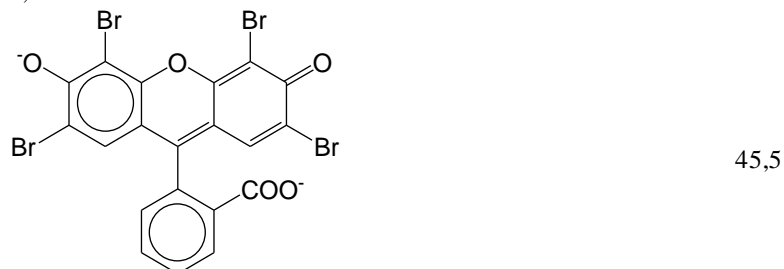
Nota: EPDM B: caucho de etileno-propileno-dieno tipo B, PE: polietileno, PMMA: polimetilmetacrilato, PVC: policloruro de vinilo, PS: poliestireno, PI: poli(isopreno), PEP: Poli(etileno-co-propileno), PVAP: Poli (vinil acetofenona), PEG: Poli(etileno-glicol), PAMS: Poli(□-metilestireno), PBD: polibutadieno, PNR: polinorborno, CA: celulosa, PA: poliamida.

Tabla 4. Tintes que promueven la foto degradación de plásticos [31]

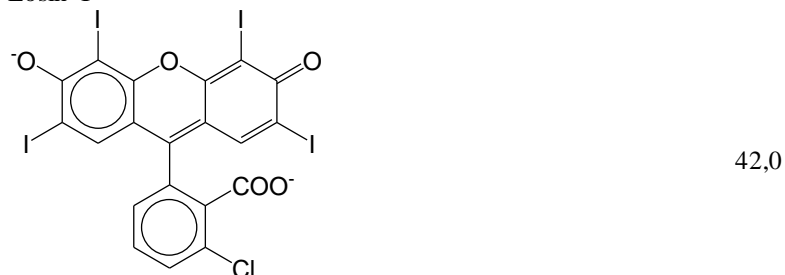
Tinte	Energía triplete (E _T) (kcal mol ⁻¹)
 <p>Fluoresceína</p>	47,2



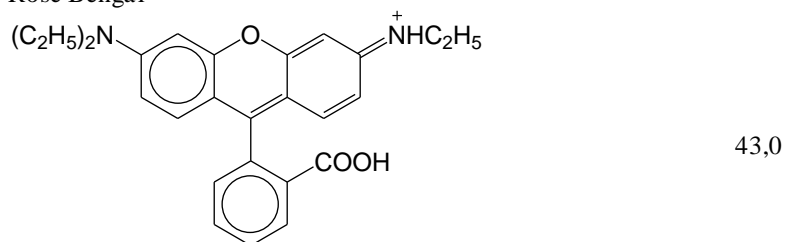
2,7-Diclorofluoresceína



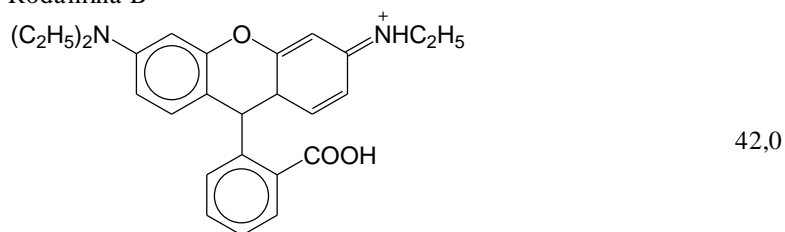
Eosin Y



Rose Bengal



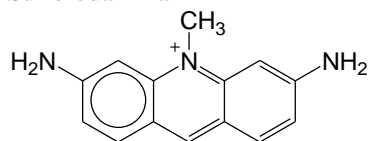
Rodamina B



Rodamina 6G

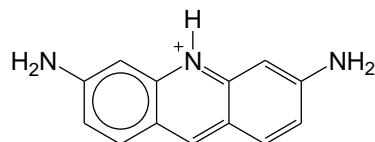


Sulforodamina B



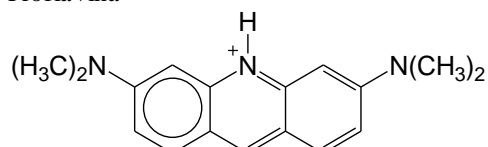
51,1

Acriflavina

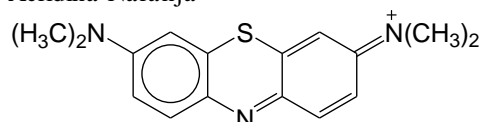


51,1

Proflavina

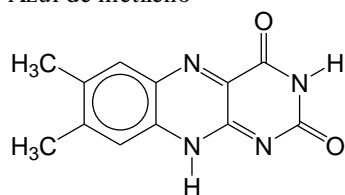


Acridina Naranja



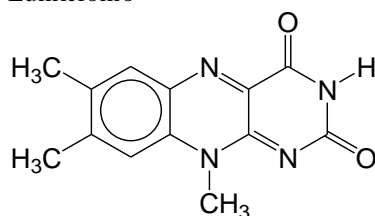
32,0

Azul de metileno



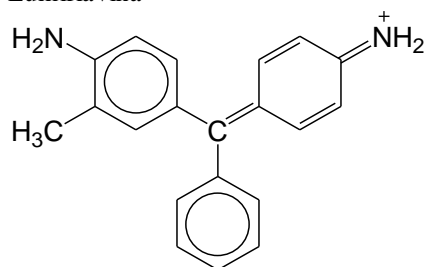
55,4

Lumicromo



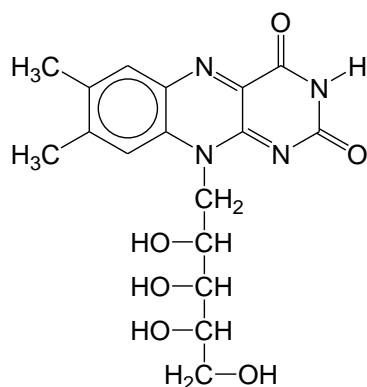
50,5

Lumiflavina



42,0

Violeta cristal



50,0

Riboflavina

Tabla 5. Estudios de degradación foto catalítica de diversos tipos de plásticos [35].

Polímero / Fotocatalizador	Detalles experimentales	Resultados experimentales
Residuos de micro plástico de PEBD / ZnO	Una lámpara halógena dicróica de 50 W en aire se empleó como fuente de luz visible ($\approx 60-70$ klux); 175 horas de iluminación; películas de tamaño 1 x 1 cm de PEBD y 20 mM de ZnO	El índice de carbonilos (CI) y el índice de vinilo (VI) mostraron un incremento del 30%; durante la fotodegradación se formaron nuevos grupos funcionales como hidropéroxido carbonilo y grupos insaturados, se observaron grietas y manchas en la película de PEBD luego de la foto-degradación.
Micro plástico de PEBD / Pt/ZnO	Una lámpara halógena dicróica de 50 W en aire generó la luz visible ($\approx 60-70$ klux); 175 horas de iluminación; se evaluó una película de PELD comercial con un espesor de 50 micras y dimensiones de 2,5 x 0,75 cm; sustratos de ZnO–Pt, con un diámetro y longitud promedio de 960 μ m se emplearon como fotocatalizador.	El VI y el IC aumentaron en un 15% y un 13% respectivamente; varias grietas, arrugas y cavidades de diferentes tamaños fueron detectadas en todas las películas fotodegradadas, a su vez se formaron compuestos orgánicos volátiles y grupos oxigenados.
Micro plástico de PEAD / C, N-TiO ₂	200 mg de microplásticos y 200 mg del fotocatalizador fueron añadido a 50 ml de una solución tampón por 50 h de agitación continua a 300 rpm; una lámpara LED de 50 W fue empleada como fuente de luz visible.	Una baja temperatura y pH tienen un efecto combinado sobre la degradación del microplástico. A pH = 3 y 0°C, la pérdida de masa, luego de las 50 h de irradiación, fue de 71%; la constante de velocidad de degradación, $k = 0,0237$.
Micro plástico de PEAD / N-TiO ₂	Se empleó una lámpara fluorescente de 27W como fuente de luz constante en el espectro de la luz visible durante 20 horas a temperatura ambiente.	La constante cinética de primer orden fue de $12,2 \times 10^{-4} \text{ h}^{-1}$ (medio sólido) y $38,2 \text{ h}^{-1}$ (medio acuoso).
Micro plástico de PE / película ultrafina de BiOCl rica en hidróxidos	Un sistema de circulación de agua bajo una lámpara Xe de 250 W; 1 g.L^{-1} de plástico grado micrométrico (PE-S) o 10 g.L^{-1} de plástico de grado milimétrico fueron dispersados en 100 mL de una solución acuosa; 1 g.L^{-1} de se fotocatalizador se agregó.	Los microplásticos de PE foto-degradados por BiOCl-1 mostraron una pérdida de masa del 5,38%, lo cual fue 134 y 24 veces mayor que la degradación obtenida solo con luz (0,04%) y BiOCl/luz (0,22%).
PE y PP / ZrO ₂ , TiO ₂	Se evaluó la degradación bajo un simulador de sol y bajo la luz solar real durante 20 horas; Películas de PE y PP de tamaño 1,5 x 1,5 cm; el fotocatalizador de ZrO ₂ , TiO ₂ en 10 000 ppm.	Los CI del PE original y PP fueron 0.0090 y 0.0072 respectivamente. Los IC promedio de PE y PP tratado con ZrO ₂ , bajo un simulador de sol y bajo la luz del sol real, fueron de 0.0244, 0.0382, 0.0149 y 0.0190 respectivamente. Los IC promedio de PE y PP tratado con TiO ₂ , bajo el simulador de sol y bajo la luz del sol real fueron de 0.0226, 0.0260, 0.0112 y 0,0124 respectivamente. El ZrO ₂ causar mayor efecto foto-catalítico sobre los polímeros.



PLA, PET y PUR / CdS/CdO _x	CdS de 0,5 μ M irradiados durante 4 h a 25°C con luz solar simulada (AM 1,5G, 100 mW cm ⁻²); el volumen de la solución fue de 2 ml de NaOH 10M en un foto-reactor sellado (volumen interno de 7,91 mL) en condiciones anaeróbicas; 50 mg mL ⁻¹ de PLA, 25 mg mL ⁻¹ de PET, 25 mg mL ⁻¹ de PUR.	Foto-reformado de PUR, PET y PLA generaron H ₂ con actividades de 0,85, 3,42 y 64,3 mmol H ₂ g.CdS ⁻¹ h ⁻¹ , respectivamente. PLA en NaOH(ac) hidrolizo a lactato de sodio, el cual fue oxidado formándose un compuesto basado en piruvato inducido alcalinamente. PET fue hidrolizado a tereftalato, etileno glicol e isoftalato, mientras que su fotooxidación produce formiato, glicolato, etanol, acetato y lactato. PUR primero hidrolizado a componentes alifáticos y aromáticos, donde el componente aromático permaneció intacto durante la foto-reforma, mientras que el componente alifático fue foto-oxidado a piruvato, acetato, formiato y lactato.
PE y PVC / Pt/TiO ₂	Lámpara Xe de 500 W, 10 h de irradiación; 300 mg Pt/TiO ₂ ; 150 mg de PE y PVC, 30 ml de agua desionizada	Foto-reformado de PE y PVC genero H ₂ con actividades de 0,015 y 0,031 mmol H ₂ g.cat ⁻¹ h ⁻¹ en NaOH al 5 M
PET /MoS ₂ /Cd _x Zn _{1-x} S	10 mg de MoS ₂ /Cd _x Zn _{1-x} S; 60 mL de la solución de sustrato de PET; se utilizó una lámpara Xe de 300 W con AM 1.5G como fuente de luz; en condiciones anaeróbicas.	4,3 % en peso de MoS ₂ en MoS ₂ /Cd _x Zn _{1-x} S exhibió la mejor tasa de evolución de H ₂ de 15,90 mmol.g ⁻¹ .h ⁻¹ . El PET finalmente se oxidó a compuestos orgánicos de molécula pequeña, como metanol, formiato, etanol y acetato.
PP, PEBD/ NiAl ₂ O ₄	Como fuente de luz visible se utilizó una lámpara de halogenuros metálicos de 350 W; una película de PP de tamaño 3 x 3 cm; 30 mg de NiAl ₂ O ₄ ; DMSO como solvente (20 mL)	La pérdida de peso del PP, PEBD fue 12,5% y 10% respectivamente con NiAl ₂ O ₄ (preparada vía síntesis hidrotermica) y NiAl ₂ O ₄ (preparada vía co-precipitación) respectivamente.
PE y PLA / CN _x /Ni ₂ P	2 % en peso (3,2 mg) CN _x /Ni ₂ P ultrasonificado, 50 mg de polímero, KOH(ac) (1M o 10M, 2 mL), foto-reactor sellado (volumen interno 7,91 mL); condiciones anaeróbicas, luz solar simulada (AM 1.5G, 100 mW cm ⁻² , 25°C).	La conversión de H ₂ alcanzó 6,7% para PLA y 24,5% para PET a pH más alto (KOH, 10 M); los resultados mostraron que el H ₂ se generó continuamente durante 6 días consecutivos, la actividad fotocatalítica alcanzó 4,13 mmol H ₂ g.CdS ⁻¹ h ⁻¹ , la conversión fue de 5,15% y el rendimiento cuántico externo fue 2,17% en la degradación de botellas de agua de PET del mundo real. El PET hidrolizo a sus monómeros (etilenglicol y tereftalato) o fragmentos de oligómeros solubles. El PLA hidrolizo a lactato durante el pretratamiento, y luego se oxidó principalmente a CO ₃ ⁻² y a pequeñas cantidades de acetato, formiato y otros productos no identificados.



Transesterificación y epoxidación del aceite de coco

Transesterification and epoxidation of coconut oil

Eduardo Patricio Gilces Zambrano ¹* ; Karen Estefanía Moreira Mendoza ² ; Segundo Alcides García Muentes ³ ;
Ramón Eudoro Cevallos Cedeño ⁴ & Ariana Milena García Bowen ⁵

Recibido: 23/07/2023 – Recibido en forma revisada: 12/09/2023 – Aceptado: 23/12/2023 – Publicado: 19/03/2024

*Autor para la correspondencia.

Resumen

Debido al avanzado incremento demográfico en el mundo, la contaminación y el aumento gradual del precio del petróleo por el agotamiento de las reservas naturales, provoca pensar y actuar de manera inmediata ante una solución para reemplazar dicho combustible en opciones rentables, productivas y amigables con el planeta; como lo es el biodiesel a partir de grasas animales y vegetales por medio de la transesterificación. También se prueban dichas materias primas en la epoxidación de la cual se obtienen productos como: elementos intermediarios para la producción de poliuretanos, lubricantes, cosméticos o bien como estabilizadores de PVC. Este artículo presenta una revisión bibliográfica ante similares estudios y de demostración a escala de laboratorio, donde se comprobó que el aceite de coco cumplió con la mayoría de los parámetros de la norma NTE INEN 24:1973 a excepción del porcentaje de acidez y humedad, haciéndolo óptimo para procesos de transesterificación y epoxidación respectivamente, cumpliendo también con la mayoría de los parámetros de la norma NTE INEN 2482:2009 a excepción del índice de yodo, siendo éste apto para el uso de energía alternativa. En cuanto a la epoxidación los valores variaron considerablemente categorizándolo en el grado 5 de viscosidad ISO para lubricante.

Palabras claves: demográfico, transesterificación, epoxidación, PVC

Abstract

Due to the advanced demographic increase in the world, pollution and the gradual increase in the price of oil due to the depletion of natural reserves, it causes us to think and act immediately in the face of a solution to replace said fuel with profitable, productive and eco-friendly options. planet; as is biodiesel from animal and vegetable fats through transesterification. Said raw materials are also tested in the epoxidation from which products are obtained such as: intermediate elements for the production of polyurethanes, lubricants, cosmetics or as PVC stabilizers. This article presents a bibliographical review of similar studies and demonstration on a laboratory scale, where it was verified that coconut oil complied with most of the parameters of the NTE INEN 24:1973 standard, except for the percentage of acidity and moisture, making it optimal. for transesterification and epoxidation processes respectively, also complying with most of the parameters of the NTE INEN 2482:2009 standard, with the exception of the iodine value, which is suitable for the use of alternative energy. Regarding epoxidation, the values varied considerably, categorizing it in ISO viscosity grade 5 for lubricant.

Keywords: demographic, transesterification, epoxidation, PVC

1. Introducción

El crecimiento poblacional mundial causa como efecto adverso la obligación de aumentar la demanda de energía, la cual, es producida mayormente por fuentes tradicionales no renovables como: metano, carbón y petróleo, aportando el incremento de emisiones de CO_x en donde este gas que es provocado por el hombre producto de la explotación de estos combustibles fósiles, genera el incremento efecto invernadero causante de varias consecuencias como la alteración del clima [1].

Debido a estas consecuencias inaceptables y a la rápida industrialización que acarrea la explotación, lleva consigo el agotamiento de las reservas naturales del planeta y contaminación del mismo. Por lo que, la exigencia ante todo esto lleva directamente a buscar alternativas factibles y aceptables que sean favorables como es la obtención de biodiesel a partir de aceites vegetales, grasas animales, aceites residuales, lodos de plantas de tratamiento de aguas residuales, entre otras fuentes [2].

Para la obtención del biodiesel, se utilizó el método más convencional que es la transesterificación para reducir la

viscosidad de la grasa o aceite, la cual consistió en que los triglicéridos contenidos en los aceites y las grasas se combinen con un alcohol de bajo peso molecular (metanol) para producir una mezcla de ésteres grasos y glicerina en presencia de un catalizador (hidróxido de sodio) [3].

Otro de los métodos empleados para dar un valor agregado a los aceites y grasas es la epoxidación, en el cual se funcionalizan los aceites vegetales o sus correspondientes ésteres metílicos a través de la incorporación de un átomo de oxígeno en la instauración de la cadena del ácido graso. Los obtenidos a partir de éster metílico de ácido graso FAME (Fatty Acid Methyl Ester) epoxidados han demostrado tener mejores propiedades para su aplicación industrial. Este método permite obtener una amplia gama de compuestos, ya que funcionan como intermediarios para la producción de poliuretanos, lubricantes, cosméticos o bien como estabilizadores de PVC [4].

En el presente trabajo, se utilizó aceite de coco rico en ácidos grasos saturados de longitud de cadena media. Dada su baja instauración, es una grasa muy estable químicamente -0.1% de su peso total- [5]; contiene 6% de

¹ Universidad Técnica De Manabí. <https://orcid.org/0009-0000-2571-7188> , egilces5229@utm.edu.ec ; Portoviejo; Ecuador.

² Universidad Técnica De Manabí. <https://orcid.org/0000-0002-6516-8336> , kmoreira4312@utm.edu.ec ; Portoviejo; Ecuador.

³ Universidad Técnica De Manabí. <https://orcid.org/0000-0002-8152-3406> , segundo.garcia@utm.edu.ec ; Portoviejo; Ecuador.

⁴ Universidad Técnica De Manabí. <https://orcid.org/0000-0002-8583-4674> , ramon.cevallos@utm.edu.ec ; Portoviejo; Ecuador.

⁵ Universidad Técnica De Manabí. <https://orcid.org/0009-0007-8887-9644> , agarcia4908@utm.edu.ec ; Portoviejo; Ecuador.

ácido oleico monoinsaturado, 2% de ácido linoleico polinsaturado, 2% de ácido esteárico saturado, 8% de ácido palmítico saturado, 7% de ácido cáprico saturado, 49% ácido laúrico saturado, 18% de ácido mirístico saturado, 8% de ácido caprílico saturado [6].

Por lo tanto, el objetivo fue transesterificar y epoxidar el aceite de coco a escala de laboratorio caracterizando el producto, referido a la norma NTE INEN 2482:2009 para biodiesel y NTE INEN 24:1973 para grasa de coco, para su posterior evaluación y categorizarlo como alternativa para lubricante o energía alternativa.

2. Materiales y métodos

Como materia prima se utilizó aceite previamente obtenido de la copra del coco seco. Las etapas experimentales se dividieron en: (i) caracterización (ii) transesterificación (iii) epoxidación [7].

2.1. Transesterificación

Antes de la transformación a su correspondiente éster epoxidado, los aceites vegetales fueron sometidos a un mecanismo de reacción de la transesterificación en donde la molécula pasó de tri a di y monoglicérido, respectivamente; dando como producto principal tres moléculas de ésteres metílicos de ácidos grasos (FAME) y una molécula de glicerol [4].

La técnica empleada, fue la descrita por [8]. La reacción de transesterificación se desarrolló en una proporción molar de alcohol a triglicérido de 3 a 1, reaccionando en la metanolisis 1 mol de triglicérido con 3 moles de alcohol, utilizando un exceso de alcohol. Sin embargo, esto pudo generar problemas de separación de las fases, disminuyendo el rendimiento y aumentando el coste de producción.

La relación molar óptima en catálisis básica es 6:1 (rendimientos > 93%) [9].

Según [10] se mezcló 27 ml de metanol GR con 1g de hidróxido de sodio GR (99,9% de pureza) como catalizador y se agregó 100 g de aceite de coco con agitación constantemente durante 1 hora. Finalmente, se dejó reposar la mezcla durante 24 horas para lograr la división de las dos fases: una fase de biodiesel y la otra de glicerol.

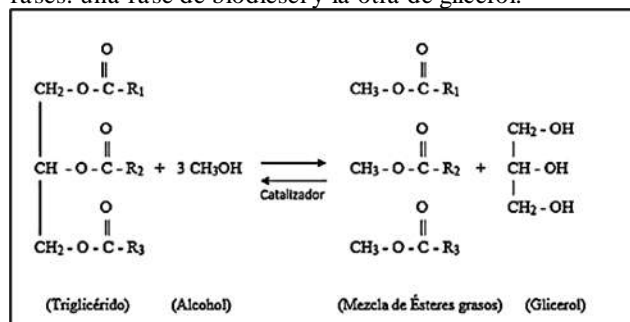


Figura 1. Transesterificación típica de un triglicérido con metanol para la producción de alquil ésteres de ácidos grasos y glicerol.
Fuente: [10]

2.2. Epoxidación

La epoxidación es un método que consiste en la funcionalización de los aceites vegetales o sus correspondientes ésteres metílicos a través de la incorporación de un átomo de oxígeno en la insaturación de la cadena del ácido graso [4].

En cuanto a la experimentación, en un matraz Erlenmeyer se mezclaron 150 g de aceite con 17 ml de ácido fórmico; posteriormente, se añadió 1 ml de ácido sulfúrico, hasta que la mezcla alcance un viraje de color amarillo a negro. Seguidamente, se añadieron 63 ml de peróxido de hidrógeno al 30% por goteo en un embudo separador, en un tiempo de 45 minutos.

Finalmente, se dejó calentar hasta una temperatura de 60 °C dejando reaccionar la mezcla durante 3 horas produciéndose una reacción exotérmica; el color amarillo desapareció paulatinamente hasta obtener un producto de color blanco. Neutralizada la reacción se desechó el agua y por lo consiguiente se midió el pH, el cual fue de 7 (neutro). Por último, se lavó la fase oleosa con agua destilada a 60°C, hasta que el agua presentase un color claro.

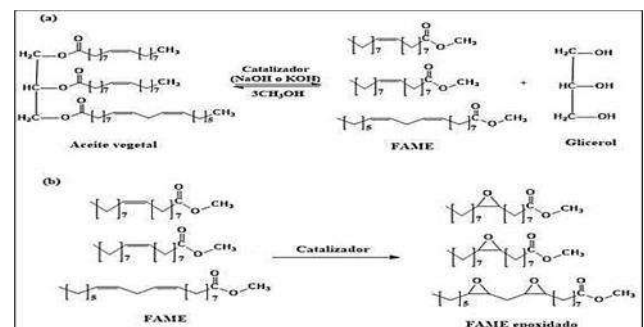


Figura 2. Esquema de reacción general para el proceso de obtención de FAMES epoxidados. (a) Transesterificación de aceites vegetales. (b) Epoxidación.
Fuente: [4]

2.3. Pruebas fisicoquímica

Las propiedades fisicoquímicas se determinaron mediante pruebas de laboratorio a partir de metodologías establecidas. A continuación, se detallan las especificaciones y las experimentaciones en base a las normas expuestas en la Tabla 1 para realizar el respectivo control de calidad del aceite, el biodiesel y el aceite - biodiesel epoxidado (lubricante). Cabe mencionar que las pruebas de cada uno de los parámetros físicos-químicos se realizaron por triplicado.



PROPIEDADES	Método de Ensayo
Índice de yodo	NTE INEN 37
Viscosidad cinemática 40°C	ASTM D 445-09
Densidad relativa, 25/25°C	NTE INEN 35
Acidez (como ácido láurico)	NTE INEN 38
Índice de saponificación	NTE INEN 40
Humedad	NTE INEN 39

Fuente: [11]; [12]

2.3.1. Índice de Yodo

Se colocaron aproximadamente 0.08 g de las muestras en un matraz Erlenmeyer. Seguidamente, se añadieron 10 ml de cloroformo para disolver la grasa y se añadieron 7.5 ml del reactivo de Wijs, se tapó y se agitó el contenido colocándolo en la oscuridad. Posteriormente, se mantuvo la mezcla en ausencia de luz durante 1 hora, para evitar la foto degradación. Seguidamente, se añadieron 10 ml de una disolución de yoduro de potasio y 25 ml de agua. Finalmente, se realizó una valoración con la disolución de tiosulfato de sodio hasta observar ausencia total del color amarillo producido por el yodo y dando lugar a la presencia de un color amarillo tenue. Por último, se agregó una pizca de almidón y se prosiguió hasta el momento exacto del viraje de color.

La fórmula para utilizar fue la siguiente:

$$\text{Ind } I_2 = \frac{(V - V_1) \times N \times 12.6}{m} \quad (1)$$

Siendo:

$\text{Ind } I_2$ = índice de yodo de la muestra, en g/g.

V = media aritmética de los volúmenes de solución de tiosulfato de sodio empleados en la titulación de los ensayos (blanco), en cm^3

V_1 = volumen de solución de tiosulfato de sodio empleado en la titulación de la muestra en, cm^3

N = normalidad de la solución de tiosulfato de sodio.

m = masa de la muestra analizada, en g.

2.3.2. Densidad

Para medir la densidad de las muestras se utilizó un picnómetro de 25 ml.

La densidad relativa será:

$$d_{25} = \frac{m_2 - m}{m_1 - m} \quad (2)$$

Siendo:

d_{25} = densidad relativa a 25/25°C.

m = masa del picnómetro vacío, en g.

m_1 = masa del picnómetro con agua destilada, en g.

m_2 = masa del picnómetro con muestra, en g.

2.3.3. Viscosidad cinemática

Se utilizó el viscosímetro de Oswald para medir la viscosidad de las muestras a 40°C. Su funcionamiento se basó en la medición del tiempo donde el fluido recorrió una distancia entre un espacio determinado.

La viscosidad cinemática viene dada mediante la siguiente expresión:

$$\eta = \eta_{H_2O} \frac{\rho_m * t'}{\rho_{H_2O} * t} \quad (3)$$

A continuación, se muestran los valores de la viscosidad del agua para varias temperaturas [13].

η_{H_2O} (millistokes)	1.793	1.522	1.311	1.142	1.006	0.893	0.800
T (°C)	0	5	10	15	20	25	30

Siendo:

η = viscosidad cinemática en mSt

η_{H_2O} = viscosidad dinámica del agua en mSt

ρ_m = densidad de la muestra

ρ_{H_2O} = densidad del agua

t' = tiempo de caída de la muestra

t = tiempo de caída del agua

2.3.4. pH

Es importante mantener un pH regulado para neutralizar la mezcla en la transesterificación y epoxidación de los esteres metílicos. Para esto, se emplearon tirillas de papel tornasol.

2.3.5. Humedad

Para la determinación de la humedad, se procedió a lavar los crisoles y se llevaron a la estufa por 90 minutos a una temperatura de 100°C. Una vez desecados, se pesaron los crisoles en la balanza y se agregó la muestra. Seguidamente, se volvió a pesar con la muestra y se lo llevó a la estufa durante 2 horas a una temperatura de 100°C. Finalmente, se retiró de la estufa el crisol con la muestra y se colocó en el desecador por 30 minutos. Por último, se pesaron los crisoles y se tomaron los datos correspondientes.

La fórmula empleada fue la siguiente:

$$\% \text{ de humedad} = [(B - C)/A] * 100 \quad (4)$$

Siendo:

B = masa de crisol con la muestra antes del calentamiento, en g.

C = masa de crisol con la muestra después del calentamiento, en g.

A = masa de crisol vacío, en g.



2.3.6. Índice de Saponificación

En un matraz Erlenmeyer de 250 ml, se pesaron 2 g de la muestra, en donde se agregaron 40 ml NaOH al 0.081 N; posteriormente, se calentó la muestra a 60 °C, y se agitó a 240 rpm por una hora hasta saponificación. Se realizó un ensayo en blanco similar en todos los aspectos. Una vez saponificada la muestra, se procedió a titular añadiendo 4 gotas de indicador fenolftaleína.

La fórmula empleada fue la siguiente:

$$\text{índice de saponificación} = \frac{40(V_1 - V_2)(N)}{m} \quad (5)$$

Siendo:

i = índice de saponificación del producto, en mg/g.

40 = Equivalente químico de NaOH

V_2 = volumen de solución de ácido clorhídrico o sulfúrico empleado en la titulación de la muestra, en cm^3 .

V_1 = volumen de solución de ácido clorhídrico o sulfúrico empleado en la titulación del ensayo en blanco, en cm^3 .

N = normalización de la solución de ácido clorhídrico o sulfúrico.

m = masa de la muestra analizada, en g.

2.3.7. Porcentaje de Acidez

Para la determinación del porcentaje de acidez, se realizó mediante valoración o titulación; se agregó en un matraz Erlenmeyer 2 g de la muestra con 10 mL de etanol; posteriormente, se añadieron 3 gotas de fenolftaleína. Se agitó constantemente hasta homogenizar la mezcla, y mediante valoración se añadió NaOH al 0.081 N gota a gota, hasta obtener un color rosado.

La fórmula empleada fue la siguiente:

$$\%A = \frac{M * V * N}{10 * m} \times 100\% \quad (6)$$

Siendo:

$\%A$ = acidez del producto, en porcentaje de masa.

M = masa molecular de ácido usado para expresar el resultado (200).

V = volumen de la solución de hidróxido de sodio o de potasio empleado en la titulación, en

N = normalidad de la solución de hidróxido de sodio o de potasio.

m = masa de la muestra analizada, en g.

2.3.8. Índice de Acidez

La fórmula empleada fue la siguiente:

$$IA = \frac{56,1 * V * N}{m} \quad (7)$$

Siendo:

IA = índice de acidez del producto, en mg/g.

56,1 = masa molar de Hidróxido de potasio

V = volumen de la solución de hidróxido de sodio o de potasio empleado en la titulación, en cm^3

N = normalidad de la solución de hidróxido de sodio o de potasio.

m = masa de la muestra analizada, en g.

3. Resultados

Tabla N° 2. Caracterización del aceite de coco.

Parámetros físicos químicos	Unidad	Parte experimental	Referencia	Especificación
Porcentaje de acidez	%	0.405	0 – 0.2	NTE INEN 38
Índice de acidez	mg KOH/g de grasa	1.14	2 máx	[14]
pH	-	6	-	-
Densidad relativa 25/25°C	-	0.9104	0.907 - 0.919	NTE INEN 35
Viscosidad cinemática a 40 °C	mm^2/s	22.69	21.84 - 27.23	[15] [16]
Humedad	%	0.07	0.05	NTE INEN 39
Índice de saponificación	mg NaOH/g de grasa	255	250-264	NTE INEN 40
Índice de yodo	$\text{gI}_2/100 \text{ g m}$	7.875	7.5 – 10.5	NTE INEN 37

Tal como muestra la tabla 2, se observa que la mayoría de los parámetros están dentro del rango permisible según la norma establecida para grasa de coco. Sin embargo, el porcentaje de acidez no se encuentra dentro del rango de la norma, pero, si su índice de acidez para ser utilizado como materia base de los aceites vegetales, tal como mencionan [14], que deben tener un índice de acidez menor que 2 mg KOH/g de grasa, la cual representa una acidez óptima para las etapas posteriores del proceso.

En cuanto al porcentaje de humedad existió un leve incremento a lo permitido del máximo de la norma, lo cual no varía mucho en el proceso para la transesterificación, ya que, según [17] es muy factible valores ligeramente superiores al máximo de la norma puesto que se disminuyen las probabilidades de saponificación, lo que fue comprobado con el índice de saponificación en el que indica una alta pureza en la grasa.



Tabla N°3. Caracterización del biodiesel.

Parámetros físicos químicos	Unidad	Parte experimental	Referencia	Especificación
Porcentaje de acidez	%	0.486	0 – 0.5	ASTM D664
pH	-	6	-	-
Densidad a 15°C	kg/m ³	703.2	880 máx.	ASTM D1298
Viscosidad cinemática a 40°C	mm ² /s	1.97	1.9- 6	ASTM D445
Humedad	%	0.048	0-0.05	ASTM D6751
Índice de saponificación	mg NaOH/g de grasa	257	370 máx.	ASTM D5558-95
Índice de yodo	gI ₂ /10g M	7.25	120 máx.	EN 14111

De acuerdo con los valores obtenidos en la tabla 3, el único valor relativamente bajo fue el índice de yodo en comparación con el máximo aceptable de 120 mgI₂/g para combustibles a utilizar en motores de combustión interna. Un valor bajo de yodo dará como resultado depósitos de carbón muy reducidos en las partes internas del motor y la tendencia a bloquear los orificios de los inyectores, por lo que no es recomendable ser usado como combustible para motores, pero, si como un combustible base a utilizar como energía alternativa en posteriores procesos de purificación y refinación que se dan para

incrementar su autonomía y hacerlo apto en posteriores usos; no obstante, esto también se debe a la estructura del aceite en la que el 92% son ácidos grasos saturados, siendo el ácido láurico el predominante, en un 49%, lo que concuerda con la teoría que a mayor porcentaje de ácidos grasos insaturados en la muestra, mayor yodo reaccionará con estos dobles enlaces, donde, finalmente da como resultado un índice mayor de yodo; esto se comprueba con la estructura del aceite de coco que su mayor porcentaje es de ácidos grasos saturados y es por esto que el índice de yodo es bajo ya que el 8% restante es de ácidos grasos insaturados.

Además, esta característica lo hace atractivo para la obtención de biodiesel, dado que, a menor índice de yodo en el aceite de partida, mejor será el combustible en términos de estabilidad oxidativa y aumento en la lubricación del motor, lo que concluye que es apto para un lubricante en su posterior proceso de epoxidación.

Tabla N°4. Caracterización del aceite epoxidado.

Parámetros físicos químicos	Unidad	Parte experimental	Referencia	Especificación
Porcentaje de acidez	%	0.702	0 – 0.5	ASTM D664
pH	-	3	-	-
Densidad relativa 15 °C	-	0.94	-	NTE INEN 35
Densidad a 15 °C	kg/m ³	940	880 máx.	ASTM D1298
Densidad relativa 40 °C	-	0.88	-	NTE INEN 35
Densidad a 40 °C	kg/m ³	880	-	-
Viscosidad cinemática a 40 °C	cSt	4.69	1.98-3520	[18]
Índice de yodo	gI ₂ /100g M	3.15	120 máx.	EN 14111

Como se muestra en la tabla 4, el porcentaje de acidez se elevó en comparación al transesterificado, que a su vez sobrepasa el límite de la norma; una de las causas que provoca esto es la oxidación del aceite debido a que en el proceso de epoxidación incorpora un átomo de oxígeno en la instauración del ácido graso, donde, esta degradación por oxidación aumentó y a su vez también aumentó el porcentaje acidez. Debido a esta adición de oxígeno en el proceso de epoxidación su densidad a 15°C aumentó considerablemente sobrepasando el límite de la norma; cabe destacar que también se realizó la caracterización de la densidad a 40°C para obtener una viscosidad cinemática a dicha temperatura, en donde se muestra que la densidad redujo por acción de la temperatura y que a su vez se ajusta al valor máximo de la norma de la densidad a 15°C. También se muestra que la viscosidad cinemática a 40°C estuvo dentro de la referencia mientras que el índice de yodo estuvo por debajo de la norma.

3.1. Discusión

El estudio fue realizado para comprobar la teoría de la epoxidación en la que incorpora un átomo de oxígeno a través de la cadena insaturada (dobles enlaces) y se decidió trabajar con el aceite o grasa de coco, que es muy rico en ácido láurico (saturado) y se afirmó esta teoría, ya que el aceite o grasa si epoxidó debido a que el menor porcentaje de este aceite (10%) está formado por ácidos insaturados, es decir que el 10% de este aceite epoxidó correctamente y se pudo categorizarlo como un lubricante de grado ISO 5. En cuanto a la transesterificación de acuerdo a los resultados sirve como base para ser utilizado como biocombustible, ya que debido a su bajo índice de yodo no puede ser usado directamente como biodiesel.

4. Conclusiones

Se obtuvo biodiesel a partir de grasa vegetal de coco en una etapa mediante el uso de hidróxido de sodio como



catalizador, presentando valores relativamente bajos requeridos por la norma como: el índice de yodo, lo que demuestra que este biodiesel no puede ser utilizado como combustible en motores de combustión pero si sirve como una materia prima para este, y en cuanto a la epoxidación se afirma con la teoría que debido al porcentaje bajo de ácidos grasos insaturados que tiene la grasa de coco, no se obtuvieron valores factibles para dicho proceso, pero este si sirve para materia prima de un lubricante de grado 5 según la viscosidad cinemática de la ISO.

El aceite, biodiesel y epoxidado obtenido a partir de grasa de coco cumple con la mayoría de los parámetros establecidos en las normas NTE INEN 2482:2009 para biodiesel y NTE INEN 24:1973 para grasa de coco, y que en cuanto a su calidad esta depende de estas normas.

El tiempo óptimo a una temperatura de 60 °C para el transesterificado se definió que a 60 min fue el mejor debido a que tuvo más tiempo de combustión en un ensayo de encender trozos de papel con el biodiesel y que en los otros tiempos de 35 y 45 min no tuvo una buena estabilidad de combustión.

De acuerdo con su viscosidad cinemática del epoxidado, este se categoriza en grado 5 de viscosidad ISO, lo cual sus límites van de 4.14 a 5.06 cSt [18] y donde este tipo de aceite lubricante de elevada fluidez y calidad superior está especialmente formulado para trabajar en sistemas de elevada velocidad y precisión [19].

Referencias.

- [1] A. Demirbas, «Biodiesel production from vegetable oils by supercritical methanol,» 2005. [En línea]. Available: <https://nopr.niscpr.res.in/bitstream/123456789/5379/1/JSIR%2064%2811%29%20858-865.pdf>.
- [2] J. L. Pulido, W. S. F. Moreno, M. J. A. Tapia, A. D. G. Delgado, V. O. C. Concha y J. R. Nunhez, «Estudio termoquímico asistido por computadora para la producción de biodiésel,» 2019. [En línea]. Available: http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0120-100X2019000200077.
- [3] E. Moron, «Transesterificación del aceite de coco para la producción de ésteres metílicos. Practica de laboratorio,» 2018. [En línea]. Available: <https://steemit.com/steemstem/@emiliomoron/transesterificaci-n--1554992889>.
- [4] A. Sustaita Rodríguez, B. Rocha Gutiérrez, A. García Triana, V. Ramos Sánchez, B. Beltrán Piña y D. & Chávez-Flores, «bajo la licencia CC BY-NC-ND (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>). TIP Revista Especializada en Ciencias PUBLICACIÓN CONTINUA. 22, 1–17.,» 2019. [En línea]. Available: <https://doi.org/10.22201/fesz.23958723e.2019.0.174>.
- [5] A. Zamora, «Grasas, Aceites, Ácidos grasos, Triglicéridos,» 2008. [En línea]. Available: <https://www.scientificpsychic.com/fitness/aceites-grasas.html>.
- [6] A. R. Estelrich, «PROPIEDADES DEL ACEITE DE COCO,» 2018. [En línea]. Available: <https://oushia.com/propiedades-del-aceite-de-coco-2/>.
- [7] J. G. Veas Coba y F. J. Duque-Aldaz, «Evaluación del potencial energético en distintos tipos pellets a partir de biomasa lignocelulósica raquis de banano (musa acuminata),» Universidad de Guayaquil, 2023.
- [8] BiodiSol, «La producción de Biodiésel,» s.f. [En línea]. Available: <https://www.biodisol.com/biodiesel-que-es-el-biodiesel-definicion-de-biodiesel-materias-primas-mas-comunes/la-produccion-de-biodiesel-materias-primas-procesos-calidad/>.
- [9] J. F. Pérez, M. D. Velázquez, F. L. Pérez y Y. S. Mora, «Epoxidación del aceite vegetal de *Jatropha curcas* L. con ácido peracético,» 2018. [En línea]. Available: http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2224-61852018000200015.
- [10] S. M. García, «SIMULACIÓN DEL PROCESO DE OBTENCIÓN DE BIODIÉSEL A PARTIR DEL ACEITE DE *JATROPHA CURCAS*...DE LA PROVINCIA DE MANBÍ, ECUADOR,» Universidad de Oriente, Facultad de Ingeniería Química y Agronomía, Departamento de Ingeniería Química, Santiago de Cuba, 2019.
- [1] INEN, «BIODIESEL. REQUISITOS NTE INEN 2482:2009,» 2009. [En línea]. Available: <https://www.normalizacion.gob.ec/buzon/normas/2482.pdf>.
- [2] INEN, «NTE INEN 24:1973,» 1973. [En línea]. Available: https://www.normalizacion.gob.ec/buzon/normas/nte_inen_24.pdf.
- [3] L. Mardones y S. Juanto, «PRÁCTICA 4: MEDIDA DE VISCOSIDADES Y DENSIDADES,» 2018. [En línea]. Available: <https://www.upo.es/depa/webdex/quimfis/docencia/basesFQ/Pract/cuatrocincos.pdf>.
- [4] G. B. Toala, P. B. Vivas y S. M. García, «Caracterización físico-química de la epoxidación de biodiesel obtenido a partir de grasa de pollo residual,» 2022. [En línea]. Available: http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1815-59012022000300031&lng=es&nrm=iso&tlng=es.
- [5] T. D. M. Velásquez, «El aceite de coco (*Cocos nucifera*) como estabilizante de asfaltenos en un crudo del Estado Monagas, Venezuela: efecto de la temperatura,» 2019. [En línea]. Available: http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0122-34612019000200289#B24.
- [6] E. Bello, I. Adekanbi y F. Akinbode, «Production and characterization of coconut (*Cocos nucifera*) oil and its methyl ester,» 2015. [En línea]. Available: <https://www.idpublications.org/wp-content/uploads/2015/02/Paper-to-Upload-Production-and-Characterization-of-Coconut.pdf>.
- [7] L. M. R. Santamaría y M. Á. Molano, «Transesterificación del aceite de palma con metanol por medio de una catálisis heterogénea empleando un catalizador ácido,» 2005. [En línea]. Available: http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0121-49932006000200006&lng=en&tlng=es.
- [8] SWISSOIL, «Grados de Viscosidad ISO,» 2001. [En línea]. Available: https://www.swissoil.com.ec/boletines/SO_Boletin05_viscosidad%20ISO.pdf.
- [9] Olipes, «Maxifluid VG5,» s.f. [En línea]. Available: <https://www.olipes.com/eu/es/lubricacion-por-aceite/167-maxifluid-vg5-8436044748080.html>.



Mejora de la productividad del maní “variedad Caramelo” (*Arachis hypogaea*) aplicando diferentes dosis de bioestimulante Evergreen

*Improvement of the productivity of "Caramelo variety" peanuts (*Arachis hypogaea*) applying different doses of Evergreen biostimulant*

Ámbar Yerely Macias Vera ¹ ; Álvaro Edmundo Saucedo Aguiar ² ; Ángel Lázaro Sánchez Iznaiga ³ * ; Edison Marcelo Pazmiño Muñoz ⁴ ; Luis Carlos Camacho Bustamante ⁵

Recibido: 29/08/2023 – Recibido en forma revisada: 25/10/2023 – Aceptado: 08/12/2023 – Publicado: 19/03/2024

* Autor para la correspondencia.

Resumen:

El objetivo de la presente investigación fue determinar el incremento de la productividad del cultivo de maní “variedad Caramelo” (*Arachis hypogaea*), mediante el uso de diferentes dosis de bioestimulante Evergreen. La investigación fue realizada en la provincia de Los Ríos. Para el cumplimiento de los objetivos propuestos se realizó un diseño experimental de bloques completos al azar, con cuatro tratamientos y cuatro repeticiones de 20 metros cuadrados cada repetición, con una distancia de 4x5 m. Para la recolección de la información fueron evaluados seis variables agronómicas, que se tomaron de cada repetición utilizando una muestra de 10 plantas de maní, y luego estos datos promediados fueron sometidos análisis estadístico ANOVA, y finalmente se aplicó una prueba de Tukey al 95% de probabilidad. Los resultados mostraron que el tratamiento 4 (Evergreen 2 L/ha) tuvo mejor efecto sobre las variables agronómicas evaluadas, donde la mayor altura de planta obtenida fue 32,3 cm, y el número de vainas por planta fue 42,20.

Palabras clave: Productividad, dosis, ingresos económicos, incremento, bioestimulante.

Abstract:

The objective of the present investigation was to determine the increase in the productivity of the peanut crop "Caramelo variety" (*Arachis hypogaea*), through the use of different doses of Evergreen biostimulant. The investigation was carried out in the Los Ríos province. In order to fulfill the proposed objectives, a randomized complete block experimental design was carried out, with four treatments and four repetitions of 20 square meters each repetition, with a distance of 4x5 m. For the collection of information, six agronomic variables were evaluated, which were taken from each repetition using a sample of 10 peanut plants, and then these averaged data were subjected to ANOVA statistical analysis, and finally a Tukey test was applied to 95% of probability. The results showed that treatment 4 (Evergreen 2 L/ha) had a better effect on the agronomic variables evaluated, where the highest plant height obtained was 32.3 cm, the number of pods per plant was 42.20, the production per plant was 151.43 g/plant, the root length was 21.38 cm, the weight of 100 grains was 85.25 g and the highest yield was 4,403.43 kg/ha.

Keywords: Productivity, doses, economic income, increase, biostimulant.

1. Introducción

El maní o cacahuete es una fuente importante de aceite vegetal y de proteína en las zonas tropicales y subtropicales [1]. Es originario de América del Sur de donde se distribuyó a otros países.

En el año 2019 fue reportada una producción de 44.041.913 toneladas de maní, donde China fue el mayor productor del mundo con un volumen de producción de 16.685.915 toneladas por año [2].

El cultivo de maní en el Ecuador ha representado una actividad de tipo familiar que no ha tenido un adecuado

desarrollo y por ende el rendimiento medio anual no supera los 1.000 kg/ha, el mismo que no alcanza a abastecer las necesidades de consumo interno, ocasionando un déficit para la industria del país [3].

En Ecuador las principales plantaciones de maní se concentran en los cantones Portoviejo, Tosagua, Chone, 24 de mayo y parte de Rocafuerte. En el país se siembran cada año 20.000 hectáreas: 9.000 están en Manabí, 7.500 en Loja y el resto en varios sectores del país, especialmente donde han emigrado agricultores manabitas [4].

¹ Instituto Superior Tecnológico Babahoyo; <https://orcid.org/0009-0004-6825-0177> ; maciasambar82@gmail.com, Babahoyo; Ecuador

² Instituto Superior Tecnológico Babahoyo; <https://orcid.org/0009-0002-5636-4164> ; asaucedo@istb.edu.ec, Babahoyo; Ecuador.

³ Instituto Superior Tecnológico Babahoyo; <https://orcid.org/0000-0003-0729-8340> ; asanchez@istb.edu.ec, Babahoyo; Ecuador.

⁴ Instituto Superior Tecnológico Babahoyo; <https://orcid.org/0009-0007-3055-2227> ; epazmino@istb.edu.ec, Babahoyo; Ecuador.

⁵ Instituto Superior Tecnológico Babahoyo; <https://orcid.org/0009-0009-1091-3819> ; lcamacho@istb.edu.ec, Babahoyo; Ecuador.



Entre las variedades de maní que se producen en el Ecuador se encuentra, el maní Caramelo (*Arachis hypogea*), es de origen sudamericano, ya que los exploradores españoles y portugueses encontraron a los indios cultivándolo en las costas noreste y este de Brasil, en todas las tierras bajas del Río de la Plata (Argentina, Paraguay, Bolivia, extremo sur oeste de Brasil) e intensivamente en el Perú. De estas regiones el maní fue diseminado a Europa, África, Asia y las Islas del Pacífico; eventualmente esta se diseminó hacia los Estados Unidos, pero el tiempo y el lugar de su introducción no está documentado [5].

Las principales características de esta variedad son: el crecimiento rastrero, los Días a floración son entre 33 y 36, los días a cosecha entre 130 y 140, las Vainas por plantas son de 14 a 28, los Gramos por planta son de 25 a 35, los Gramos por vainas se encuentran en 2, el Vaneamiento es de 4 a 8%, la Relación cascara/semilla está entre 25 y 35%, el peso de 100 granos está entre 50 y 60, y el rendimiento promedio es de 3341 kg-ha⁻¹ [6] [7].

Para la mejora de la producción de este cultivo se emplean insumos agrícolas, conocidos como bioestimulantes agrícolas. Estos bioinsumos, incluyen diversas formulaciones de compuestos, sustancias y otros productos, que se aplican a plantas o suelos para regular y mejorar los procesos fisiológicos del cultivo, haciéndolos más eficientes. Los bioestimulantes actúan sobre la fisiología de las plantas, a través de vías diferentes a la de los nutrientes, con el fin de mejorar el vigor del cultivo, incrementando el rendimiento y la calidad de la cosecha [8].

Por su parte, [9], plantean que los bioestimulantes son una herramienta que permite obtener beneficios como reducir el estrés, mejorar la calidad del producto cosechado y proveer mayor resistencia a plagas y enfermedades.

Los bioestimulantes vegetales contienen sustancias y/o microorganismos cuya función es estimular los procesos naturales para mejorar la captación, asimilación y eficiencia de los nutrientes, la tolerancia al estrés abiótico, y la calidad de los cultivos [10].

Para [11] los bioestimulantes son microorganismos diseñados para ser aplicados a plantas o suelos para incrementar el vigor de los cultivos, mejorar la calidad del producto resultante o aumentar la tolerancia de la planta ante los diferentes tipos de estrés abiótico (falta de agua, suelos con demasiadas sales, etc.) [12].

Para la aplicación de estos bioinsumos sugieren la aplicación combinada de los dos o más bioestimulantes porque incrementan el desarrollo vegetativo que cuando se aplican de forma individual [13].

Para dichos fines, se ha utilizado el bioestimulante Evergreen, para su aplicación ha sido recomendada la composición siguiente: contenido de Nitrógeno nítrico de 7.000%, el Fosforo asimilable (P₂O₅) de 7.000%, el Potasio soluble (K₂O) 7.000%, la Citoquininas de 90 ppm, las Giberelinas de 40 ppm, la Auxinas de 40 ppm, el Ácido húmico de 3.76%, el Boro de 0.0024%, el Cobre de 0.0013%, el Hierro EDTA de 0.050%, el Manganeso EDTA de 0.018%, la Colina 750 ppb, la Tiamina de 50 ppb, la Niacina de 90 ppb, el Ácido pantoténico de 12 ppb, el Ácido fólico de 1 ppb, la Nicotinamida de 2 ppb y la Riboflavina de 1.5 ppb [14].

Tomando en cuenta lo anterior, el presente trabajo tiene el objetivo de Evaluar el efecto del bioestimulante Evergreen sobre el desarrollo y producción del cultivo de maní “variedad Caramelo” (*Arachis hypogaea* L.).

2. Materiales y métodos

La presente investigación será realizada en la provincia de Los Ríos, y para cumplimentar el objetivo propuesto se empleará el método cuantitativo, y se utilizará el diseño experimental de bloques completos al azar, con cuatro tratamientos y cuatro repeticiones (Tabla 1). Para la recolección de la información, se evaluarán seis variables agronómicas que se tomarán de cada repetición, utilizando una muestra de 10 plantas. En el análisis estadístico de los promedios de los tratamientos, se utilizará la prueba de Tukey al 95% de probabilidad [15].

En la figura 1, se muestra el flujo del proceso empleado en la planificación y ejecución de las actividades experimentales [16].

En primer lugar, se realiza el manejo del ensayo, donde se planifican las diferentes pruebas a realizar y los materiales requeridos, para garantizar la obtención de los resultados esperados. Las variables productivas seleccionadas para la evaluación serán, variables dependientes: “Altura de planta” y “Vainas por plantas”, y la variable independiente es las diferentes dosis del bioestimulante Evergreen.

Para la realización del experimento se establecerá un total de cuatro tratamientos y cuatro réplicas cada uno. Los tratamientos serán: el testigo (T1) no se aplicará el producto; el segundo tratamiento (T2) consiste en aplicar una dosis de



0,5 L/ha del bioestimulante; el tercer tratamiento presentará una dosis de 1 L/ha, y el tratamiento cuatro (T4) tendrá una dosis de 2 L/ha del bioestimulante.

El establecimiento del cultivo requiere de la preparación del terreno, la cual se realizará de forma mecanizada con el uso de un tractor.

La siembra del cultivo se desarrollará de forma manual, y el control de malezas se realizará de forma manual y con machete.

El control fitosanitario se realizará con una mochila pulverizadora manual de 20 litros, y la cosecha se realizará de forma manual.

Para la evaluación de los datos será creada una base de datos con los resultados obtenidos en el experimento. Los resultados serán analizados mediante una prueba de Tukey al 95% de probabilidad, que permitirá comparar el efecto de cada dosis sobre las variables dependientes “Altura de planta” y “Vainas por plantas”.

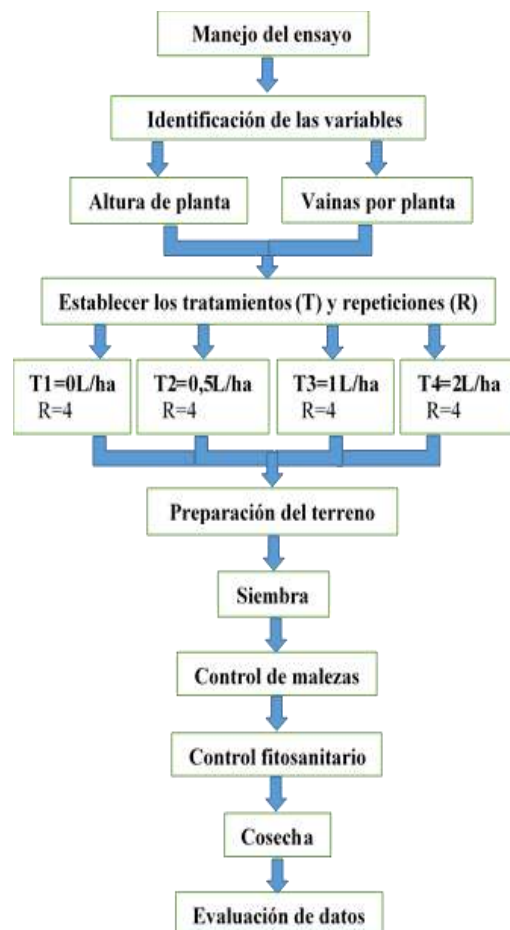


Figura 1. Diagrama de flujo del proceso utilizado para el experimento.

La tabla 1 muestra los diferentes tratamientos, la dosis que será utilizada en cada uno y la época de aplicación o fase del desarrollo del cultivo. El tratamiento testigo servirá como referencia del experimento y se utilizará para la comparación con los demás tratamientos. Los tratamientos serán aplicados en la fase de desarrollo y elongamiento del cultivo, correspondiente al inicio de la floración de la planta, debido al alto impacto que presenta esta fase en la productividad agrícola.

Las dosis del bioestimulante serán aplicadas a toda la superficie foliar de la planta, con el propósito de alcanzar el recubrimiento de producto en todo el ciclo del cultivo.



Tabla 1. Tratamientos, dosis de bioestimulante y época de aplicación en el cultivo de maní.

Tratamiento	Dosis L/ha	Época de aplicación
T1	0 L	Testigo
T2	0,5 L	Al desarrollo y elongamiento inicio de floración
T3	1,0 L	Al desarrollo y elongamiento inicio de floración
T4	2,0 L	Al desarrollo y elongamiento inicio de floración

En la figura 2 se muestra la distribución de los tratamientos y repeticiones planificadas en el experimento, de tal forma que se obtengan los datos requeridos [17].

En este estudio se utilizó el diseño experimental de Bloques completos al azar, con cuatro tratamientos y cuatro repeticiones. Para la comparación de los promedios de los tratamientos se utilizó la prueba de Tukey al 95% de probabilidad.

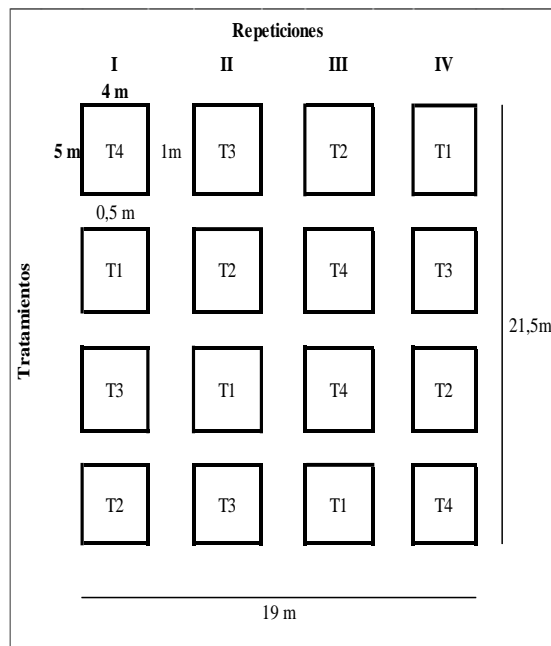


Figura 2. Distribución de los tratamientos y repeticiones en campo para la siembra del cultivo de maní.

3. Resultados

Altura de planta

En lo referente a esta variable, se puede apreciar que el tratamiento 4 (Evergreen 2 L/ha) alcanzó la mayor altura de planta (32,3 cm), siendo superior a los demás tratamientos; sin embargo, el tratamiento testigo fue inferior a todos los demás, alcanzando 24,3 cm de altura del tallo (Tabla 2). El análisis estadístico mostró que existen diferencias estadísticas con alta significancia al 99%, del tratamiento 4 con dosis de 2 L/ha con respecto al tratamiento 1 (testigo) con dosis de 0 L/ha. El coeficiente de variación obtenido fue 6,0%.

Los resultados de esta variable coinciden con los reportados por, quienes demuestran que los bioestimulantes mejoran las características agronómicas de los cultivos, incrementando sus rendimientos. Por su parte encontró que el uso de bioestimulantes estimulan la elongación de las células e incrementa la absorción de agua y nutrientes del suelo, convirtiéndolas más resistentes al ataque de plagas y enfermedades, generando un mayor rendimiento.

Tabla 2. Resultados de la medición de la variable altura de planta sometida a la prueba de Tukey 95% de probabilidad.

Tratamiento	Descripción	Dosis L/ha	Medias
1	Testigo	0	24,33 c
2	Bioestimulante Evergreen	0,5	28,10 b c
3	Bioestimulante Evergreen	1	31,68 a b
4	Bioestimulante Evergreen	2	32,30 a
CV			6,0
Promedio			29,1
Significancia			**
<i>Ns = No significancia</i>			
<i>* = Significancia (95%)</i>			
<i>** = Alta significancia (99%)</i>			



Número de vainas por planta

En la tabla 3, se puede observar que el tratamiento 4 (Evergreen 2 L/ha) alcanzó el mayor número de vainas por planta, siendo superior a los demás tratamientos, al igual que en el anterior, el tratamiento testigo fue inferior a todos los demás tratamientos.

El análisis estadístico del número de vainas por planta mostró que existe diferencias estadísticas con alta significancia al 99%, del tratamiento cuatro (T4) con dosis de 2 L/ha con respecto al tratamiento uno (testigo) con dosis de 0 L/ha. El coeficiente de variación obtenido fue 11,32%.

Los resultados de esta variable muestran similar tendencia a los obtenidos por [16], quien encontró que los bioestimulantes tienen un efecto positivo sobre las características agronómicas de los cultivos, mejorando los rendimientos. Estos resultados también coinciden con los reportados por [17], ya que al aplicar este tipo de bioestimulante aumenta el proceso de absorción de agua y nutrientes del suelo y genera mayor rendimiento del cultivo.

Tabla 3. Resultados de la medición del número de vainas por planta sometida a la prueba de Tukey 95% de probabilidad.

Tratamiento	Descripción	Dosis L/ha	Medias
1	Testigo	0	27,65 b
2	Bioestimulante Evergreen	0,5	33,48 a b
3	Bioestimulante Evergreen	1	37,93 a
4	Bioestimulante Evergreen	2	42,20 a
CV			11,32
Promedio			35,31
Significancia			**
Ns = No significancia			
* = Significancia (95%)			
** = Alta significancia (99%)			

Discusión

Una vez analizados los resultados de las dosis del bioestimulante Evergreen aplicadas, se pudo constatar lo planteado por [11] en su investigación, donde manifestó que los bioestimulantes vegetales, independientemente de su contenido de nutrientes, contienen sustancia(s), compuesto(s), y/o microorganismos, que mejoran el desarrollo de las plantas o la rizosfera, vigor, rendimiento y/o

la calidad, mediante la estimulación de procesos naturales que benefician el crecimiento y las respuestas a estrés biótico.

En la investigación se observó que la dosis más alta de bioestimulante dio mejores resultados, sin embargo, será objeto de nuevas investigaciones corroborar lo que precisa [13], [18], quienes manifiestan que el uso de los bioestimulantes Vitazyme, Bayfolan Forte y Enerplant produjo efectos positivos en la calidad y apariencia de los frutos al producir pimientos de mayor peso, diámetro y longitud. Estos parámetros demostraron una mejor eficiencia en el uso de la tierra y el aprovechamiento de los elementos nutritivos aplicados.

4. Conclusiones

- Las variables evaluadas Altura de plantas y Número de vainas por plantas presentaron diferencias estadísticas significativas al 99% con la aplicación del tratamiento 4 (dosis de 2 L/ha) con respecto a los demás tratamientos, evidenciando la efectividad de este.
- El tratamiento de bioestimulante Evergreen en dosis de 2 L/ha logró una Altura de plantas de 32,3 cm siendo superior al tratamiento testigo 0 L/ha (24,33 cm).
- El mayor Número de vainas por plantas indicó que la aplicación de bioestimulante Evergreen en dosis de 2 L/ha permite obtener hasta 42,2 cantidad de vainas en cada planta en comparación al tratamiento testigo 0 L/ha que obtuvo (27,65).

5. Referencias

- [1] L. Manyavilca Ayme, *Actividad antioxidante in vitro del aceite de dos variedades de Arachis hypogaea L. "maní", Ayacucho*, AYACUCHO, 2019.
- [2] Anónimo1, «Principales países productores de maní,» 27 febrero 2020. [En línea]. Available: <https://www.atlasbig.com/es-ar/paises-por-produccion-de-mani>.
- [3] J. L. Vargas Tello, *Influencia de la variedad del maní y operación de tostado en las características organolépticas de la mantequilla de maní*, Huánuco, 2019.
- [4] R. Guamán y C. Andrade, «INIAP 382-Caramelo: variedad de maní tipo Runner para zonas semisecas de Ecuador,» Guayas, Ecuador, 2010.
- [5] R. R. Alban Castro, *Estudio comparativo de líneas de maní (Arachis hypogaea L.) tipo Runner. Facultad de Ciencias Agrarias Universidad de Guayaquil.*, 2015.
- [6] M. E. Ibarra Velásquez y C. A. Kuffo Pacheco, *Periodo crítico de interferencia de malezas en la variedad de maní INIAP 382-caramelo en el campus de la ESPAMMFL*, Calceta, Manabí, 2018.
- [7] j. Montero Torres, «Importancia nutricional y económica del maní (Arachis hypogaea L.),» *evista de Investigación e Innovación*



Agropecuaria y de Recursos Naturales, vol. 7, n° 2, pp. 112-125, 2020.

- [8] E. Héctor Ardisana, A. Torres García, O. Fosado Téllez, S. Peñarrieta Bravo, J. Solórzano Bravo, V. Jarre Mendoza, F. Medranda Vera y J. Montoya Bazán, «Influencia de bioestimulantes sobre el crecimiento y el rendimiento de cultivos de ciclo corto en Manabí, Ecuador,» *Cultivos Tropicales*, vol. 41, n° 4, 2020.
- [9] B. S. Ovalle Torres, Ó. Barraza Torres y E. Peña Peña, «Producción y caracterización de bioestimulantes para la producción agrícola a partir de residuos locales,» *ANFEI Digital*, n° 11, pp. 1-9, 2019.
- [10] Anónimo2, «Infoagro,» 17 enero 2018. [En línea]. Available: <https://mexico.infoagro.com/los-bioestimulantes-y-su-uso-en-la-agricultura/>.
- [11] P. A. Palazón Monreal, «Bioestimulantes e inductores de resistencia en el control de las enfermedades de madera. Investigación y desarrollo de ensayos. Agroalimentarios,» Murcia, 2014.
- [12] M. E. Jácome Córdova, C. N. Pincay Moreira y F. J. Duque-Aldaz, «Desarrollo de modelo de negocio aplicando la metodología Canvas para bebida a base de quinoa,» Universidad de Guayaquil, 2019.
- [13] A. Calero H, E. Quintero, D. Olivera V y K. Peña, «Influencia de dos bioestimulantes en el comportamiento agrícola del cultivo de tabaco (*Nicotiana tabacum* L.)» *Facultad de ciencias*, pp. 31 - 42, 2018.
- [14] M. Pérez Espinoza, *Efecto de un bioestimulante en el cuajado de frutos, a través de injertos de varas con cojines florales del clon CCN-51 (Theobroma cacao L.), en Tingo María*, Tingo María, 2022.
- [15] X. E. Aguayo Morante, A. L. Bravo Córdova Adriana y F. J. Duque-Aldaz, «Modelo de negocio aplicando Lean Cavas para un licor artesanal a base de jengibre,» Universidad de Guayaquil, 2020.
- [16] J. G. Veas Coba y F. J. Duque-Aldaz, «Evaluación del potencial energético en distintos tipos pellets a partir de biomasa lignocelulósica raquis de banano (*musa acuminata*),» Universidad de Guayaquil, 2023.
- [17] E. A. López Bautista y B. H. González Ramírez, *Diseño y análisis de experimentos*, 2 ed., UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA, 2016, p. 280.
- [18] M. Cabrera Medina, Y. Borrero Reynaldo, A. Rodríguez Fajardo, E. M. Angarica Baró y O. Rojas Martínez, «Efecto de tres bioestimulantes en el cultivo de pimiento (*Capsicum annun*, L) variedad atlas en condiciones de cultivo protegido,» *Ciencia en su PC*, n° 4, pp. 32-42, 2011.



Proyecto integrador rehabilitación de buses abandonados para la creación de un teatro

Integratory project rehabilitation of abandoned buses for the creation of a theater

Richard Manolo Calero Villarreal^{1*}; Jorge Armando Jiménez. Fernández²; Jeremy Isaías Herrera Castillo³; Gerardo Javier Segovia Chilibingua⁴

Recibido: 03/06/2023 – Recibido en forma revisada: 13/09/2023 – Aceptado: 29/11/2023 – Publicado: 19/03/2024

*Autor para la correspondencia

Resumen

La presente investigación idealiza la creación y optimización de un espacio para un proyecto el cual fomentará la sostenibilidad ambiental y el patrimonio de la institución para así promover el enriquecimiento de cultura y fomentar las artes escénicas, con esto podemos decir que los proyectos creativos e innovadores fascinan el mundo del aprendizaje y el entretenimiento el teatro dará forma a la experiencia artística en el campus, ya que busca continuamente nuevas formas de involucrar a los estudiantes más allá de las barreras tradicionales de aprendizaje y entretenimiento. Esta creación surge de la necesidad de mejorar las habilidades rudimentarias de la parte del estudio, el aprendizaje y el entretenimiento, este teatro al aire libre o teatro con autobuses se presenta como una expresión artística que se desarrolla a cielo abierto en donde se podrán ejecutar presentaciones de libre expresión, ya sea por estudiantes o en conjunto con los maestros u otros entes particulares.

Palabras clave: proyecto, enriquecimiento de cultura, involucrar, habilidades rudimentarias, presentaciones de libre expresión

Abstract

The present investigation idealizes the creation and optimization of a space for a project which will promote environmental sustainability and the heritage of the institution in order to promote the enrichment of culture and promote the performing arts, with this we can say that creative and innovative projects fascinate the world of learning and entertainment theater will shape the arts experience on campus as it continually seeks new ways to engage students beyond the traditional barriers of learning and entertainment. This creation arises from the need to improve the rudimentary skills of the study, learning and entertainment part, this open-air theater or theater with buses is presented as an artistic expression that takes place in the open sky where presentations can be performed of free expression, either by students or in conjunction with teachers or other private entities.

Keywords: project, culture enrichment, involve, rudimentary skills, free expression presentations.

1. Introducción.

El aporte de las artes y la cultura a nivel institucional es un privilegio que permite desarrollar expresiones creativas, fortalecimiento de habilidades de los jóvenes. Este proyecto pretende recuperar el uso de vehículos en abandono, convirtiéndolo en espacios funcionales dedicados, a las actividades de lectura, al arte y cultura, para para la comunidad estudiantil.

1.1. Objetivo.

Proponer el diseño de un espacio Cultural y Artístico al aire libre, reutilizando buses abandonados, como parte de la infraestructura del Instituto Tecnológico en la ciudad de Babahoyo.

1.2. Antecedentes.

En Ecuador existen muy pocos espacios teatrales, según estudios hay un total de 61 teatros de los cuales 25 están en Quito otros 6, 4 en Riobamba, 2 en Ambato y el resto se reparte a lo largo del país en sus zonas más civilizadas [1]. De igual precedente la cantidad de buses abandonados que existen en Ecuador a más de notoria en

incontable, y gracias a estos los porcentajes de desechos por chatarra nuestra ciudad y país ha recibido un impacto ambiental considerable.

Mediante los estudios y cuestionamientos, se aclara que la cantidad de teatros que promuevan el reducir el impacto ambiental mediante la reutilización de buses o vehículos abandonados en la ciudad de Babahoyo son nulos, ya que solo se cuenta en la actualidad con la conocida plaza del artista, que para el actual 2023 está prácticamente en desuso, como lo indica (Al día el primer diario digital de los ríos 18 de febrero 2022) [2], esta plaza paso de ser bonita y llamativa a ser la plaza del olvido. Esta no cuenta con la presentación de artistas ni obras teatrales como se acostumbraba a ver en años anteriores.

Por antecedentes notables, los espacios teatrales en Babahoyo forman parte de unas cuantas instituciones educativas. Las cuales permiten un pequeño aforo de personas, pero ninguno de estos espacios a optado por la

¹ Instituto Superior tecnológico Babahoyo; rcalero@istb.edu.ec ; Babahoyo; Ecuador.

² Instituto Superior tecnológico Babahoyo; jjimenez@istb.edu.ec ; Babahoyo; Ecuador.

³ Instituto Superior tecnológico Babahoyo; mikeherreracastillo@gmail.com ; Babahoyo; Ecuador.

⁴ Instituto Superior tecnológico Babahoyo; rectorado@istb.edu.ec ; Babahoyo; Ecuador.



necesidad de promover que la sociedad conozca la forma de ayudar a reducir el impacto ambiental.

Por otro lado, se tiene como objetivo, promover de forma inmediata la parte cultural para así lograr promoverla e inculcarla a nuestras siguientes generaciones.

"Caminar por las calles de Babahoyo es respirar historia en cada rincón, recordar tradiciones que perduran a través del tiempo de generación en generación y es vivir el arte en su máxima expresión" (alcaldía de la ciudad de Babahoyo) [3] El impacto ambiental nos obliga a hacer conciencia que debemos buscar alternativas que ayuden a reducir el impacto ambiental, la iniciativa de rehabilitar aquello que se daba por chatarra y darle un giro, gracias a la creatividad, permitirá que se reconozca la labor generada por el ambiente en la ciudad de Babahoyo.

Por estas circunstancias se nos da a conocer que los teatros dentro de la ciudad de Babahoyo realmente son inexistentes, y el reciclado de los vehículos botados como chatarra también. En cuanto a los teatros son pocos los que tenemos, y pocas las instituciones que han decidido implementar estos espacios que, si les nombramos, estas serían; la universidad técnica de Babahoyo con su auditorio de artes y conferencias Bolívar Lupera; la unidad educativa Emigdio Esparza Moreno con su auditorio., pero lo que si tenemos en exceso son vehículos abandonado no solo en los canchones si no a la larga de las calles de la ciudad y más aún buses en desuso tanto dentro como fuera de las instituciones que componen a Babahoyo.

De misma manera denotamos que en estos sucesos nos damos cuenta que a ciencia exacta como tal los teatros son escasos dentro de nuestra ciudad y más aún la implementación de reutilizar buses en estos para reducir el impacto ambiental, no solo en nuestra ciudad sino también a nivel de nuestra provincia.

1.3. Significados básicos.

El teatro es una de las actividades culturales y artísticas más antiguas que conoce la humanidad. Es una de las artes escénicas, es decir, aquellas que tienen lugar sobre un escenario, y consiste en la recreación de una o varias historias de distinta índole mediante actores, discursos, música y escenografía.

La sostenibilidad ambiental representa una forma de convivir en equilibrio con nuestro entorno y prevenir una escasez que puede poner en riesgo la humanidad, lo cual hace de este tema algo necesario para cada persona, organización y gobierno dentro del planeta.

Además, es la que se centra en la preservación de la biodiversidad sin renunciar al progreso económico y

social. Las bases de la sostenibilidad ambiental son: cuidar el agua, ahorrar energía, reducir residuos, utilizar envases reciclables, limitar o eliminar el uso de plásticos, utilizar transporte sostenible, reutilizar el papel y cuidar la flora y la fauna. [4]

1.4. Procedimientos.

La creación del teatro empieza por la restauración, adaptación y ubicación de los buses para obtener un espacio totalmente funcional.

Estos seleccionados buses se transformarán y ubicarán cuidadosamente en forma de letra u, para conseguir un dotado espacio en el que se incluirá, en una parte de este, un escenario, el que contara con sistemas de iluminación y sonido. En la parte frontal, asientos o butacas para el público, espacios determinados para el elenco y el equipo técnico.

El interior del bus que se percibe detrás del escenario será diseñado y modificado de manera que puedan adaptarse según las necesidades de las futuras presentaciones.

Siendo los otros colocados a los laterales y transformados como parte del espacio destinado a los espectadores, implementando la adaptación de plataformas sobre estos para obtener una mejor convivencia del público hacia el espacio y las presentaciones.

1.5. A detalle.

El equipo de ingenieros especializados dentro del plantel, realizarán la planificación y adaptación de las estructuras existentes (los buses). Se encargarán de la rehabilitación de los autobuses en un teatro estático. Realizando modificaciones en el exterior para crear una fachada teatral llamativa y acorde con el entorno considerando la orientación del sol, y dirección de los vientos, se diseñará un espacio escénico dirigido a la realización de teatros u otras presentaciones y la zona destinada para el público. Dentro de uno de los buses se acondicionará la zona de camerinos, zona técnica, luces e iluminación con este diseño, se plantea considerar el espacio para expandirlo de tal manera que las personas que se encuentren fuera del área del diseño, puedan observar las presentaciones. El diseño consta de una plataforma en la cual estará montado el escenario, con techado ecológico y sobre cada bus se colocará cubiertas con la finalidad de crear protección contra la lluvia y el sol para mayor confort de quienes utilicen estas estructuras.

Se requiere que este espacio funcione no solo en el concepto teatral, sino que además se acople al concepto de que el espacio pueda ser utilizado más allá de un teatro, para eso se prevé crear una versatilidad de espacio en la que se lo utiliza para promover académicamente la prestación de las ideas de proyectos al público



estudiantes de parte de estos mismos. Por lo que también buscamos añadir de alguna manera una biblioteca o espacio de lectura para así promover las actividades que desarrollen la integridad cognitiva y aprendizaje de los jóvenes.

1.6. Versatilidad del espacio.

Se entiende por "versatilidad", la capacidad de un espacio de adaptarse a diferentes funciones con el menor cambio del sistema, minimizando la complejidad o esfuerzo. [5]

El espacio y su adecuada distribución es una de las mayores complicaciones a la hora de aprovechar y explotar una superficie. Es por eso que la coherencia entre diseño y función es uno de los temas más importantes a la hora de plantear una solución arquitectónica para un ambiente. [6]

Una de las ventajas claves de la ubicación de este proyecto será su capacidad para adaptarse a diversas situaciones en este entorno. Ya que este espacio no se creará para estar limitado a su uso específico, a esto lo que realmente se le puede abordar es comunicar y dar acceso a todo tipo de artes escénicas. Esto abre nuevas posibilidades para incentivar la creatividad, además, el teatro también puede servir como una plataforma para promover conferencias emergentes y necesarias fomentando así la información local y enriqueciendo el conocimiento.

Este espacio alargará no solo la vida del conocimiento como nuestra humanidad ha venido haciendo desde los tiempos de nuestra creación, si no también que nuestra cultura persista y se recre durante más generaciones, así como ya lo hicieron nuestros antecesores y lo proseguimos nosotros.

1.7. Diseño y planificación.

"La arquitectura es el arte de gastar el espacio". (Philip Johnson.)

"La alegría simple de tomar una idea en tus propias manos y darle la forma apropiada es emocionante". (George Nelson.) [7] [8]

La alegría simple de tomar una idea en tus propias manos y darle la forma apropiada es emocionante. [9]

En la planificación de un proyecto, lo ideal es que el diseño y la construcción funcionen como un sistema integrado. Los procesos de diseño y construcción guardan una estrecha relación y quienes se hagan cargo de su proyecto deberían darle la misma importancia. En términos generales, el diseño es un proceso de creación de la conceptualización de una nueva instalación en planos detallados y con sus propias especificaciones técnicas. [10]

Diseñamos este espacio ya que sentimos la necesidad de innovar en nuestros espacios socio recreativos. De igual manera optamos por restaurar los buses y mejorar el espacio para lograr una correcta ambientación y visualización de todo lo ya mencionado, ya que se busca no solo restaurar sino acoplar y acondicionar todo el espacio interno de los autobuses basándonos en diseños ya previstos para este espacio y a su vez expandiéndolo, para así mejorar de manera óptima todo el proyecto, adicionalmente, en algunas partes de este proyecto se introducirá algún espacio que mejore la práctica, y la sociabilidad con el ambiente estudiantil y académico siendo bibliotecas físicas o espacios de consulta general en términos de información académica o temas de conocimiento en masa, así con esto lograr cambiar el ambiente rudimentario que tiene esta institución

Los profesionales dentro del plantel encargados de este proyecto consideran que, para una buena planificación, hay que analizar mucho antes que todos los recursos para adaptarlos en base a las necesidades que requerimos, de igual manera optar por una óptima planificación de la implementación de las medidas antropométricas para así lograr distribuir todo el espacio correcta y óptimamente para lograr el mayor aforo de usuarios posibles.

1.8. Infraestructura y servicios.

La infraestructura es un conjunto de instalaciones, servicios y medios técnicos que soportan el desarrollo de actividades. [11]

Para garantizar el correcto funcionamiento del teatro estático, se realizarán las adecuaciones necesarias, en cuanto electricidad y sistema de seguridad se establecieron conexiones de energía eléctrica y se implementaron sistemas de ventilación y control de temperatura para asegurar la comodidad de los espectadores y el elenco.

De igual manera se utiliza la ciencia de la antropometría para lograr la mejor distribución de espacios acorde a las medidas del ente promedio, así en caso de catástrofes naturales como sismos o movimiento telúricos otros tipos de accidentes se logre una correcta y rápida evacuación.

De igual manera como método de seguridad, la utilización a simple vista de extintores en caso de fuego o cortos de circuitos, y ya previsto letreros, afiches y guías de seguridad tanto para la evacuación como para el correcto uso e higiene.

1.9. Contexto y desafío.

Un plantel con espacios teatrales limitados (nulo) y unos escasos de espacios culturales, el grupo de directores de esta prestigiosa institución se propuso crear una solución



que aprovechara los recursos disponibles. Identificaron una cantidad de buses en desuso debido a su antigüedad o retiro del servicio y optaron por la oportunidad de convertirlos en un teatro estático.

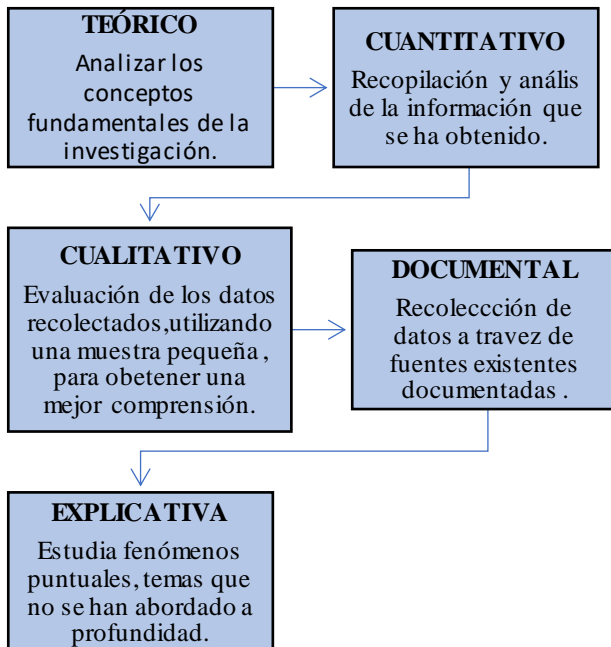
De misma manera este plantel no cuenta métodos notables que ayuden a reducir el impacto ambiental por medio de la restauración de recursos abandonados y mucho menos sistemas de concientización ambiental

2. Metodología y materiales utilizados.

A continuación, se detallarán los métodos que nos resultaron eficaces en esta investigación, consiguiente de los materiales previstos para crear este teatro al aire libre

2.1. Metodología.

Métodos usados en este trabajo de investigación:



2.2. materiales, equipos y etapas básicas.

- Limpieza y replanteo
Unidad. Metro cuadrado (m2).
Materiales mínimos. Tiras de 4 por 5 cm, clavos, piola
Equipo mínimo punto herramienta menor.
- Restauración de buses.
Unidad: Metro cuadrado (m2).
Materiales mínimos: Pintura esmalte, pintura anticorrosiva, disolvente, planchas de acero, soldadura 60.11.
Mínimo punto herramienta menor, eléctrica, cortadora, amoladora, compresor de aire.

- Plataforma y estructuras metálicas con cubierta puntos
Unidad: metro cuadrado (m2).
Materiales mínimos. Perfil g 150 por 15 por 2 mm. Suelda 60 11, pintura anticorrosiva, disolvente, plancha de acero (1.22 * 2.44 metros) (2.5 mm Sierra paréntesis (59,54 kg)
Equipo mínimo punto herramienta menor, soldadora eléctrica y cortadora de perfiles
- Suministro e instalación de cubierta galvalumen 0.30
Unidad. Metro cuadrado (m2)
Materiales mínimos punto plancha de galvalumen 0.30 l= 3.00 mm, cumbrera 0.30 y auto perforantes.
- Instalaciones eléctricas.
Unidad. Metro lineal.
Materiales mínimos. Cable powerflex (baja tensión hasta 1000 v. Libre de halógenos, Reflectores, reguladores comas Brackets,
- Iluminación básica
Materiales mínimos: (lámparas led coma lámparas de techo coma lámparas de pared y lámparas de techo coma y tiras led), aislantes básicos.
Equipo mínimo. Herramienta menor, detectores de tensión, multímetro, comprobador de resistencia, comprobador de lámparas, voltímetro [12].

3. Resultados.

Toda esta idea está basada en emplear todos los recursos posibles para lograr crearlo de la mejor manera posible. Se busca brindar toda una nueva actividad al plantel para así lograr incrementar los patrimonios culturales de esta Asia la sociedad.

3.1. Sostenibilidad de este proyecto.

Basamos la sostenibilidad de este ya mencionado espacio en la búsqueda de satisfacer esa sed de mejorar nuestras capacidades mediante la cultura e implementación de patrimonios Asia la cultura no solo la nuestra si no al de la ciudad de Babahoyo satisfaciendo así las generaciones actuales y manteniendo las futuras, así al mismo tiempo garantizar un considerable y notorio crecimiento en nuestro ambiente académico y social.

3.2. Sostenibilidad ambiental de este proyecto.

Creemos en el sostener este espacio con la necesidad de preservar el ambiente y reducir el impacto que este tiene por los desechos de chatarras y así también implementar el dotar de conocimientos a los jóvenes que ayuden a reducir la contaminación mediante reciclaje y reutilización.

3.3. Patrimonio.

La verdad, como el sol, no es patrimonio exclusivo de nadie, sino que pertenece a todos y para todos produce luz y Vida. “ (jerónimo Usera) [13]

Buscamos fuertemente que este teatro se vuelva un considerable a más de conocido patrimonio a la cultura académica de nuestro plantel, porque mediante el buscamos infundir todos esos conocimientos necesarios para el desarrollo académico y de futuros profesionales como lo serán nuestros estudiantes, así mismo como el reducir los residuos de chatarra en la ciudad.

3.4. Renderizado del proyecto.



Figura N°1: Vista general del proyecto el cual tiene capacidad para 100 personas para butacas y 10 personas de pie en planta baja y 15 personas de capacidad en planta alta

3.5. Ubicación satelital del proyecto.



Figura n°2: Vista aérea del lugar delimitando la Ubicación el proyecto

3.6. Plano arquitectónico del proyecto.

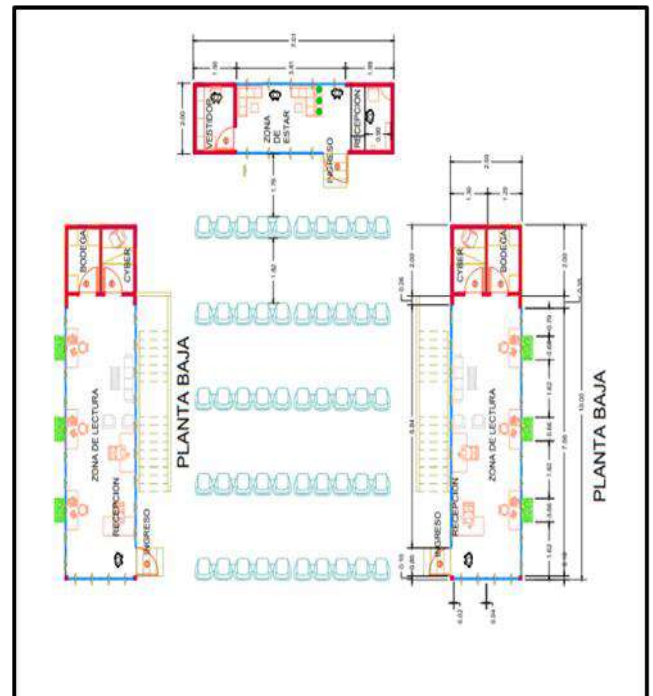


Figura No 3: Plano arquitectónico del proyecto, vista en planta.

Arco del espacio		
Espacio	Descripción	Área m2
Salón	100 pers.	150
Buses frontales	25 pers.	50
Bus posterior	25 pers.	50
Circulación	25 pers.	50
Total	175 pers.	300

3.7. Resultados.

A continuación, se presentan la aprobación del proyecto mediante porcentajes de la encuesta en 7 tablas.

Tabla 1: ¿Considera que el teatro aporte al desarrollo cultural, personal y profesional?

VARIABLE	PORCENTAJE
Si	92,9 %
No	0 %
Talvez	7,1 %
Total	100%

Estos datos ponen de manifiesto que la mayoría de la población encuestada considera que el teatro será un aporte para el desarrollo de la comunidad.

Por tal motivo existe la necesidad de la creación del teatro para tener un impacto significativo en el desarrollo cultural, personal y profesional de las personas.



Tabla 2: ¿Qué tan factible considera usted la idea de que exista un teatro dentro de la institución?

VARIABLE	PORCENTAJE
Buena	19 %
Muy buena	38,1 %
Excelente	21,4 %
Necesaria	21,4 %
Total	100%

Estos datos revelan que una mayoría relativa, aunque no abrumadora, consideran que sea factible que exista un teatro dentro de la institución. Este hallazgo destaca la necesidad de la construcción del teatro ya que este espacio puede ser diseñado para múltiples usos, como conferencias, presentaciones, eventos, etc.

Tabla 3: ¿Cómo considera usted la propuesta de implementar una biblioteca física (multidisciplinaria) dentro del espacio cultural?

VARIABLE	PORCENTAJE
Conveniente	38,1 %
Necesaria	38,1 %
Considerable	21,4 %
Para nada buena	0 %
Total	100%

Estos resultados señalan que una proporción significativa de encuestados, consideran que es factible la implementación de una biblioteca física dentro del espacio cultural ya que de esta manera se puede fortalecer la oferta educativa y cultural, proporcionar un lugar de encuentro para la comunidad y enriquecer la experiencia general del espacio.

Tabla 4: ¿Cómo considera usted la importancia e idea de implementar la restauración de autobuses para la creación de este espacio dentro del plantel?

VARIABLE	PORCENTAJE
Excelente	45,2 %
Muy buena	31 %
Buena	19 %
Mala	0 %
Total	100%

Estos datos muestran una condición positiva y homogénea a la disponibilidad en cuanto a la restauración de autobuses para la creación de un espacio dentro del plantel ya que puede tener varias ventajas y aportar significativamente a la institución educativa.

Tabla 5: Culturalmente te parece importante mantener el diseño original de los buses que son parte del diseño ambiental del teatro.

VARIABLE	PORCENTAJE
Si	79,3 %
No	20,7 %
Total	100%

Estos resultados destacan una fuerte percepción con una clara mayoría que reconoce la relevancia de mantener el diseño original de los buses que son parte del diseño ambiental del teatro. Mientras que la minoría no considera que sea necesario.

Tabla 6: ¿Considera usted que dentro de la institución haya espacios culturales que promuevan la reutilización de la chatarra?

VARIABLE	PORCENTAJE
Si	81 %
No	19 %
Total	100%

Estos datos resaltan que la mayoría de los encuestados consideran que es muy importante que dentro de la institución haya espacios culturales que promuevan la reutilización de la chatarra ya que al mantener espacios culturales que promuevan la reutilización de la chatarra no solo tiene beneficios ambientales, sino que también contribuye a la creatividad, la innovación y la identidad cultural de la institución educativa. Estas prácticas reflejan un compromiso con la sostenibilidad y pueden tener un impacto positivo en la comunidad educativa y más allá.

Tabla 7: ¿Considera buena idea ayudar a reducir el impacto ambiental por los desechos de chatarrización?

VARIABLE	PORCENTAJE
Si	74,47 %
No	25,53%
Total	100%

Estos datos señalan que la mayoría de los encuestados consideran que es buena idea ayudar a reducir el impacto ambiental por los desechos de chatarrización dado que al ayudar a reducir el impacto ambiental mediante la chatarrización es una idea positiva la cual contribuye a la sostenibilidad, la conservación de recursos y la promoción de prácticas responsables. Así que estas acciones pueden tener un impacto a largo plazo en la salud del planeta y en la conciencia ambiental de la sociedad.



4. Conclusiones.

Después de haber identificado los beneficios de este proyecto como parte de la infraestructura del instituto, se realizó investigaciones de modelos análogos que aporten ideas que permitan plasmarse dentro del diseño, concluyendo que la importancia del reciclaje de objetos no solo significa ayudar a disminuir el impacto ambiental, sino que también se puede dar paso a la creación de nuevos elementos que impulsen al desarrollo de actividades académicas o de índole social.

Se presentó el prototipo de diseño de los buses, mediante planos arquitectónicos, renderizado y una maqueta, con la finalidad de dar a conocer la distribución de los espacios, diseño de fachada y zonas de uso público, resaltando las partes importantes para la creación de este proyecto integrador como son el área de biblioteca, escenarios artísticos.

Una vez aprobado y concluido el proyecto, se pretende realizar el evento de inauguración, que dará a conocer a toda la comunidad estudiantil, las instalaciones diseñadas para el aprendizaje y el entretenimiento, a través del uso de la biblioteca, presentación de obras de teatro, danza, música, y todo tipo de evento que conlleve al sano esparcimiento.

Se concluye también que por medio de este proyecto se buscará la integración mediante alianzas con grupos locales, el conservatorio de arte y organizaciones comunitarias, promoviendo el crecimiento cultural, y la concientización del reciclar y crear nuevos usos de elementos que fueron destinados a chatarra.

Referencias.

- [E. T. -. N. d. E. y. d. mundo, 01 abril 2013. [En línea]. Available: 1 <https://www.eltelegrafo.com.ec/>.]
- [marlon, «aldía el primer diario digital de los ríos,» 18 febrero 2 2022. [En línea]. Available: www.aldia.com.ec/plaza-del-artista-paso-a-ser-la-plaza-del-olvido/.]
- [m. d. babahoyo, «alcaldía ciudad de babahoyo,» [En línea]. 3 Available: <https://babahoyo.gob.ec/historia>.]
- [S. Universidades, «Santander,» 9 marzo 2022. [En línea]. 4 Available: <https://www.becas-santander.com/es/blog/que-es-la-sostenibilidad.html>. [Último acceso: 26 agosto 2023].]
- [G. Valenciana, «Guía Verde,» 16 marzo 2020. [En línea]. 5 Available: <https://guiaverda.gva.es/es/versatilitat-i-convertibilitat-de-l-espai>. [Último acceso: 20 agosto 2023].]
- [T. Montes, «la versatilidad del espacio en el diseño,» 28 febrero 6 2018. [En línea]. Available: <https://decortips.com/es/casas/la-versatilidad-del-espacio-en-el-diseño/>.]
- [C. Mario, «"La arquitectura es el arte de gastar el espacio",» 19 7 septiembre 2022. [En línea]. Available:] <https://www.revistaad.es/decoracion/articulos/25-frases-inspiradoras/18182#:~:text=%22La%20alegr%C3%ADa%20sim>

ple%20de%20tomar,bien%20permanece%20en%20el%20tiempo%22.. [Último acceso: 2023].

- [A. Carlota, «La alegría simple de tomar una idea en tus propias 8 manos y darle la forma apropiada es emocionante,» 19 septiembre] 2022. [En línea]. Available: <https://www.revistaad.es/decoracion/articulos/25-frases-inspiradoras/18182#:~:text=%22La%20alegr%C3%ADa%20simple%20de%20tomar,bien%20permanece%20en%20el%20tiempo%22..> [Último acceso: 2023].]
- [C. Oscar, «"El teatro es poesía que se sale del libro para hacerse 9 humana.",» 18 septiembre 2017. [En línea]. Available:] <https://psicologiamente.com/reflexiones/frases-federico-garcia-lorca>. [Último acceso: 2023].]
- [M. Construcciones, «Aspectos para la planificación de diseño,» 1 1 julio 2020. [En línea]. Available:] <https://meprosaconstrucciones.mx/aspectos-para-la-planificacion-de-diseño-y-desarrollo-de-proyectos-de-construcción/>. [Último acceso: 20 agosto 2023].]
- [S. Ferroviario, «Ferroviario,» 10 febrero 2023. [En línea]. Available: 1 <https://www.ferroviario.com/es/recursos/infraestructura/>. [Último 1 acceso: 26 agosto 2023].]
- [u. p. s. ecuador, «universidad politécnica saleciana,» 11 abril 1 2023. [En línea]. Available: <https://www.ups.edu.ec/>.] 2]
- [J. Usera, Artist, *La verdad, como el sol, no es patrimonio 1 exclusivo de nadie, sino que pertenece a todos y para todos 3 produce luz y Vida.* ". [Art]. 2023.]



Estimación de la eficiencia productiva en la extracción de aceite esencial a partir de la cáscara de la naranja mediante redes neuronales

Estimation of production efficiency in the extraction of essential oil from orange peel using neural networks

Sandra Elvira Fajardo Muñoz¹; Anthony Josue Freire Castro²; Michael Isaac Mejía Garzón³

Recibido: 28 / 07 / 2023 – Recibido en forma revisada: 12 / 09 / 2023 -- Aceptado: 06 / 11 / 2023 – Publicado: 19/03/2024

*Autor para la correspondencia

Resumen

En este trabajo, se utilizó una Red Neuronal Artificial (RNA) feedforward con 9 capas ocultas y algoritmos de entrenamiento backpropagation (BP) y de ajuste de pesos Levenberg- Marquardt (LM) para la predicción del rendimiento de extracción de aceite a partir de la cáscara de naranja (*Citrus sinensis*), para el entrenamiento y validación, se emplearon los datos en cantidad de carga en gramos como variable de entrada y el rendimiento de aceite en porcentaje como variable de salida, los cuales se obtuvieron en la técnica de destilación por arrastre de vapor usando la trampa Clevenger. Se estudiaron distintas arquitecturas variando el número de neuronas en la capa oculta, encontrando que la RNA con 9 neuronas brindaba el mejor ajuste de los datos experimentales, lo que indica mayor eficacia y exactitud frente a las otras arquitecturas analizadas. Con respecto a los datos experimentales, se evaluó el error cuadrado medio porcentual (ECM%) y el coeficiente de determinación R^2 , encontrándose para la RNA valores de ECM%=0.0040 y $R^2=0.9929$, comprobando que la hipótesis de investigación es verdadera. Estos resultados muestran la eficacia y potencialidad del uso de las redes neuronales para el modelado y predicción del rendimiento de extracción de aceite de naranja dentro del dominio de los datos de entrenamiento.

Palabras Claves: Redes neuronales artificiales, algoritmo backpropagation, convergencia, topología, extracción, aceite esencial

Abstract

In this work, a feedforward Artificial Neural Network (ANN) with 9 hidden layers and backpropagation (BP) training algorithms and Levenberg-Marquardt (LM) weight adjustment algorithms were used for the prediction of oil extraction yield from the orange peel (*Citrus sinensis*). For training and validation, data were used in the amount of load in grams as an input variable and the oil yield in percentage as an output variable, which were obtained in the distillation technique by steam entrainment using the Clevenger trap. Different architectures were studied by varying the number of neurons in the hidden layer, finding that the ANN with 9 neurons provided the best fit of the experimental data, which indicates greater efficiency and accuracy compared to the other architectures analyzed. Regarding the experimental data, the percentage mean square error (MSE%) and the determination coefficient R^2 , were evaluated, finding for the ANN values of MSE%=0.0040 and $R^2=0.9929$, proving that the hypothesis research is true. These results show the efficacy and potential of using neural networks for modeling and prediction of orange oil extraction performance within the domain of training data.

Keywords: Artificial neural networks, backpropagation algorithm, convergence, topology, extraction, essential oil.

1. Introducción

La industria de los aceites esenciales ha experimentado un gran crecimiento gracias a los avances tecnológicos y las revoluciones industriales. El mercado de los jugos y néctares genera una gran cantidad de desechos provenientes de la pulpa de frutas, lo cual representa una carga para el medio ambiente. En el cantón Las Naves, provincia de Bolívar, la producción de naranjas es significativa, y los residuos generados pueden ser utilizados para obtener productos con valor agregado, como esencias, perfumes, champús, jabones, entre otros, a partir de los aceites esenciales presentes en la cáscara.

En la Ingeniería Química, es importante desarrollar modelos matemáticos para predecir la eficiencia de los procesos de separación físico o químico. En este sentido, las redes neuronales artificiales (RNAs) están ganando popularidad como herramientas de modelado debido a su

alta capacidad. Los investigadores están explorando cómo aplicar las RNAs para desarrollar nuevos controladores PID, inspirados en el funcionamiento de las neuronas biológicas en términos de aprendizaje y memoria. Las RNAs pueden aprender de ejemplos y generalizarse para resolver diversos problemas, incluso con datos incompletos o erróneos.

En este trabajo de investigación, se propone realizar un experimento a escala de laboratorio para obtener aceites esenciales de la cáscara de naranja, específicamente de la especie *Citrus Sinensis* L. Además, se utilizará la herramienta de programación y cálculo matemático Matlab para desarrollar un modelo de RNA que permita predecir de manera más precisa la eficacia del proceso.

En los últimos años, el crecimiento de la actividad tecnológica ha sido alarmante, ya que los seres humanos

¹ Universidad de Guayaquil; sandra.fajardom@ug.edu.ec ; Guayaquil; Ecuador.

² Universidad de Guayaquil; anthony.freirec@ug.edu.ec ; Guayaquil; Ecuador.

³ Universidad de Guayaquil; michael.mejia@ug.edu.ec ; Guayaquil; Ecuador.

necesitan recursos para satisfacer sus necesidades y deseos. La tecnología se refiere al conjunto de conocimientos técnicos y científicos que permiten la creación y diseño de objetos y servicios para satisfacer las necesidades humanas. En este contexto, surge el concepto de red, que se refiere a un conjunto de entidades interconectadas que permiten el flujo de elementos materiales y no materiales entre sus puntos de conexión [1].

En busca de mejoras, los humanos han mostrado interés en comprender las funciones del cerebro y han desarrollado herramientas tecnológicas para emular sus funciones. El cerebro es un procesador de información con características complejas y especiales. Su función principal es procesar grandes cantidades de información sensorial de manera inmediata, combinarla y compararla con la información almacenada, y responder adecuadamente ante nuevas situaciones [2].

En este estudio se desarrolla un modelo de red neuronal artificial para imitar las capacidades de procesamiento de información del cerebro. Las computadoras convencionales son limitadas en su capacidad para interactuar con datos complejos y entornos variables, lo que hace que las redes neuronales sean útiles para resolver problemas donde los algoritmos tradicionales no son efectivos. Estos modelos pueden aplicarse a operaciones unitarias de Ingeniería Química, como la extracción de aceites esenciales a partir de residuos de naranja [3].

En Ecuador, se generan grandes cantidades de residuos, incluyendo residuos orgánicos, y la cáscara de naranja representa una fuente potencial de productos de valor agregado, como los aceites esenciales. Estos aceites tienen aplicaciones en diversas industrias, como la farmacéutica, alimentaria y cosmética. La extracción de aceites esenciales se realiza mediante métodos como la destilación por arrastre de vapor con la trampa Clevenger [4].

En la industria alimentaria, se valora cada vez más el uso de aditivos naturales en lugar de aditivos sintéticos debido a preocupaciones por la salud. Los aromas naturales son especialmente apreciados, ya que pueden mejorar la experiencia sensorial de los alimentos. Los métodos de extracción de aceites esenciales permiten obtener fragancias naturales que pueden ser utilizadas como aditivos aromáticos [5].

En resumen, este estudio se centra en el desarrollo de un modelo de red neuronal artificial para predecir la efectividad de la extracción de aceites esenciales de la cáscara de naranja. Se destaca el potencial de los residuos de naranja como fuente de valor agregado y la importancia de los aditivos naturales en la industria alimentaria.

Además, se mencionan los métodos de extracción utilizados, como la destilación por arrastre de vapor.

El naranjo (*Citrus sinensis*) es un árbol frutal perteneciente a la familia Rutáceas. Su fruto es la naranja dulce, de forma globosa u ovalada con un diámetro de 6-9 cm. Tiene una corteza poco rugosa de color naranja y una pulpa sin vesículas oleosas, y sus semillas son blancas. El árbol alcanza una altura de tres a cinco metros, con copa redondeada y ramas regulares. Posee un solo tronco derecho y cilíndrico que cambia de color de verde a gris. Las hojas son perennes, de tamaño mediano y alargadas, con base redondeada y terminadas en punta. Las flores aparecen solitarias o en racimos en las axilas de las hojas [6].

El naranjo es originario de zonas tropicales y subtropicales de Asia y se ha extendido a través del norte de África, el sudeste de Europa y América debido a su introducción por los europeos en el siglo XVI. Las flores del naranjo son utilizadas para obtener aceites esenciales que se emplean en perfumería y también tienen aplicaciones medicinales.

En resumen, el naranjo es un árbol frutal con características específicas, cuyo fruto es la naranja dulce. Su distribución geográfica se ha expandido gracias a la intervención humana, y las flores de este árbol tienen usos importantes en la industria de la perfumería y la medicina [7].



Fig. 1. Naranjas (*Citrus sinensis*) en el cantón Las Naves provincia de Bolívar
Fuente: [8]

El nivel de carbohidratos en los residuos de la cáscara de naranja es del 80.8%. Según los carbohidratos identificados son pectinas del 30-50%, azúcares (sacarosa, fructosa, glucosa), hemicelulosa, del 10-20% y celulosa del 20-40% [9].

Tabla 1. Composición Físicoquímica de la cáscara de naranja

Componentes Principales	(%)
Materia Seca	90,00



Proteína	6,00
Carbohidratos	62,70
Grasas	3,40
Fibra	13,00
Cenizas	6,90
Minerales	(%)
Calcio	2,00
Magnesio	0,16
Fosforo	0,10
Vitaminas	(mg/Kg)
Niacina	22,00
Riboflavina	22,20
Aminoácidos	(%)
Arginina	0,28
Lisina	0,20
Triptófano	0,06

Fuente: [10]

En la tabla 1, se observa la composición fisicoquímica de la cascara de naranja, en el cual se analiza que los componentes principales, como la materia seca, proteína, carbohidratos, fibra y cenizas que se encuentran en mayor proporción y aquellos denominados trazas, como ciertos minerales, vitaminas y aminoácidos en menor proporción. Estos datos experimentales nos ayudaran a saber el rendimiento al momento de extraer el aceite esencial.

1.1. Usos y aplicaciones industriales

La naranja tiene varios usos industriales debido a sus propiedades beneficiosas. Reduce el colesterol de baja intensidad y posee bioflavonoides con propiedades anticancerígenas que ayudan a prevenir el cáncer de mama y colon. La cáscara de naranja contiene vesículas con aceites esenciales que proporcionan aromas característicos y actúan como defensa contra plagas [11].

1.2. Aceites esenciales

El aceite esencial de naranja se utiliza ampliamente en la fabricación de productos para consumo humano. Sus características fungicidas lo hacen útil en la fabricación de repelentes de insectos y plaguicidas. También se utiliza en la elaboración de bebidas no alcohólicas, jarabes, complejos vitamínicos, perfumes, aguas de colonia, jabones y otros productos [12].

Los aceites esenciales son compuestos orgánicos volátiles obtenidos de plantas, bacterias u hongos. Son utilizados en la industria cosmética, alimentaria, farmacéutica y otros procesos industriales que requieren aromas y esencias.

Tienen diversas propiedades biológicas, como antioxidantes, antiinflamatorios, antimicrobianos, anticancerígenos e hipolipemiantes. Se pueden extraer mediante métodos como la destilación, prensado en frío, hidro-difusión, líquidos supercríticos y radiación de microondas [13].

Los aceites esenciales son mezclas complejas de más de 100 componentes diferentes, que incluyen compuestos alifáticos, fenilpropanos, monoterpenos y sesquiterpenos.

En resumen, la naranja tiene usos industriales debido a sus propiedades beneficiosas, especialmente en la producción de aceites esenciales. Estos aceites se utilizan en diversos sectores industriales y tienen propiedades biológicas importantes [14].

1.3. Métodos de Extracción de Aceites Esenciales

Según Fennema [15], es importante definir el método de extracción ya que esto influirá directamente sobre la calidad y cantidad del aceite esencial obtenido.

Kirk Donald y Othmer, mencionados por Guevara [16], manifiestan que existen una gran cantidad de técnicas donde se logra la extracción de las esencias de las materias primas que los contienen. Su elección va a depender de característica como:

- Características de la materia prima.
- Volatilidad de la esencia.
- El porcentaje de esencia en la planta.
- Las características de pureza y calidad que se desea obtener.

1.4. Neuronas Artificiales

La neurona artificial fue diseñada para "emular" las características del funcionamiento básico de la neurona biológica. En esencia, se aplica un conjunto de entradas a la neurona, cada una de las cuales representa una salida de otra neurona. Cada entrada se multiplica por su "peso" o ponderación correspondiente análoga al grado de conexión de la sinapsis. Todas las entradas ponderadas se suman y se determina el nivel de excitación o activación de la neurona [17]. Una representación vectorial del funcionamiento básico de una neurona artificial se indica según la siguiente ecuación

$$NET = X * W \quad (1)$$

Donde:

- NET = La Salida
- X = El vector de Entrada
- W = El vector de Salida

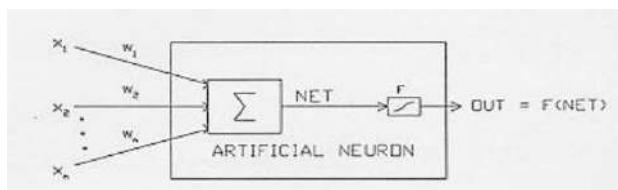


Fig. 2. Modelo de neurona artificial

Fuente: [18]

Las funciones de activación más utilizadas son la función Sigmoid y Tangente hiperbólica expresadas en la Tabla (3).

Tabla 2. Funciones de activación

Sigmoid	$OUT = 1/(1 + e^{-NET})$
Tangente Hiperbólica	$OUT = \tanh(NET)$

Fuente: Xabier Basogain Olabe, Redes Neuronales Artificiales y sus Aplicaciones, [19]

En la tabla 2, podemos observar las funciones F más utilizadas, son la función Sigmoid y Tangente hiperbólica ya que estas devuelven una salida que será generada por la neurona dada una entrada o conjunto de entradas, es decir cada una de las capas que conforman la red neuronal tienen una función de activación que permitirá reconstruir o predecir.

Este tipo de modelo de neurona artificial ignora muchas de las características de las neuronas biológicas. Entre ellas destaca la omisión de retardos y de sincronismo en la generación de la salida. No obstante, a pesar de estas limitaciones las redes construidas con este tipo de neurona artificial presentan cualidades y atributos con cierta similitud a la de los sistemas biológicos [20].

1.5. Estructura de las Redes Neuronales Artificiales (RNA)

Los sistemas neuronales artificiales imitan la estructura del hardware del sistema nervioso. Cada neurona realiza una función matemática. Las neuronas se agrupan en capas, constituyendo una red neuronal. Una determinada red neuronal está confeccionada y entrenada para llevar a cabo una labor específica. Finalmente, una o varias redes, más las interfaces con el entorno, conforman el sistema global [21].

En las redes neuronales biológicas, las neuronas corresponden a los elementos de proceso. Las interconexiones se realizan por medio de las ramas de salida (axones) que producen un número variable de conexiones (sinapsis) con otras neuronas o con otras partes como músculos y glándulas. Las redes neuronales son sistemas de elementos simples de proceso muy interconectados.

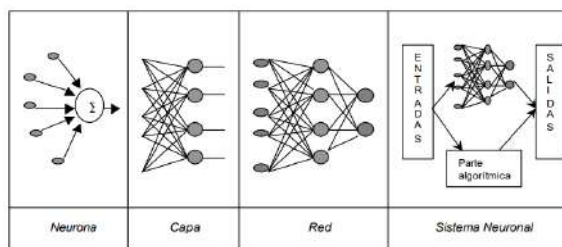


Fig. 3. Estructura jerárquica de un sistema basado en redes neuronales artificiales

Fuente: [22]

La figura 3 muestra la complejidad de un sistema neuronal, ya que la salida obtenida de la red es el resultado de abundantes lazos de realimentación junto con no linealidades de los elementos de proceso y cambios adaptativos de sus parámetros. [23].

Formalmente, un sistema neuronal o conexionista está compuesto de los siguientes elementos:

- Un conjunto de procesadores elementales o neuronas artificiales.
- Un patrón de conectividad o arquitectura.
- Una dinámica de activaciones.
- Una regla o dinámica de aprendizaje.
- El entorno donde opera.

2. Materiales y métodos

El naranjo Citrus Sinensis, se lo obtuvo en la provincia de Bolívar, cantón las Naves a 88 km del noroccidente de Guaranda. Esta región del país goza de un bosque tropical beneficioso para el desarrollo de esta especie. Se recolectó 3 sacos de este material cítrico, e inmediatamente se procedió al traslado a la ciudad de Guayaquil, provincia del Guayas para su reacondicionamiento y la posterior extracción del aceite esencial.



Fig. 4. Recepción de la materia prima.

2.1. Caracterización de la naranja especie Citrus sinensis.

1. **Grado de madurez:** Se evaluó el fruto pintón, determinándose el índice de madurez, que se expresa mediante la relación °Brix/Acidez valorable. Esto indica que mientras la razón °Brix/Acidez valorable aumente avanza directamente la maduración [24].

2. **Determinación biométrica:** Se tomaron al azar 10 naranjas medianas pintonas, y se procedió a calcular el porcentaje de cáscara y pulpa, se determinó pesando por separado la pulpa de la cáscara, y mediante las siguientes formulas, obtenemos el % cáscara y % pulpa.

$$\% \text{cáscara} = (W_c / W_t) * 100 \quad (2)$$

$$\% \text{pulpa} = \left(\frac{W_t - W_c}{W_t} \right) * 100 \quad (3)$$

Donde: W_t : peso total del fruto
 W_c : peso de la cáscara

2.2. Extracción por destilación con arrastre de vapor mediante la trampa Clevenger

La cáscara una vez pesada con cargas de 200 g, 300 g, 350 g, 400 g y 500 g se alimentaron al equipo, colocando 1,250 litros de agua destilada en el recipiente. El vapor que se genera va arrastrando todos los componentes volátiles que posee la superficie de la cáscara, para luego con ayuda del refrigerante condensarse en una mezcla de agua y aceite esencial. El tiempo que se estableció fue de 30 minutos de destilación una vez que ha caído la primera gota de condensado.

2.3. Diseño Experimental

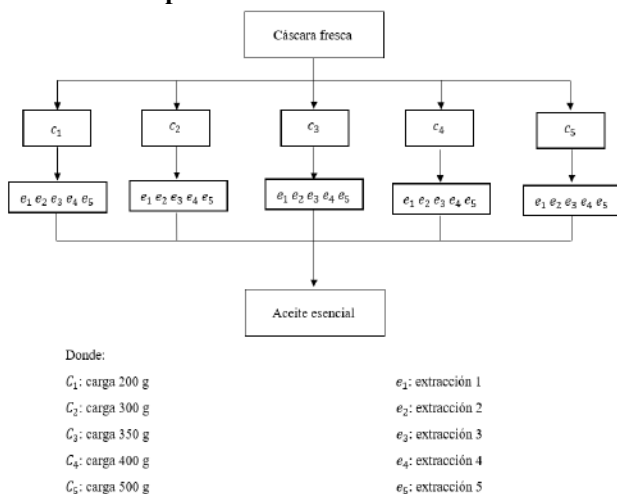


Fig. 5. Diseño experimental para la extracción de aceite esencial a partir de Cáscara de naranja por el método de destilación por arrastre de vapor con la trampa Clevenger

2.4. Prueba estadística

Como para cada carga inicial de cáscara se van a realizar un mínimo de 5 extracciones se considera un tamaño de

muestra pequeño ya que $n < 30$, por lo tanto, usaremos el estadístico t para construir los intervalos de confianza.

2.5. Construcción de los modelos matemáticos predictivos

Para modelar la relación entre la cantidad de carga inicial y el rendimiento del proceso de extracción de aceite esencial se procedió a realizar un diagrama de dispersión para analizar qué tipo de relación existe entre las 2 variables.

Con el programa de Matlab se procedió a revisar varias líneas de tendencia tales como: lineal, una polinómica de grado 2 y una logarítmica, donde posteriormente se evaluó su capacidad predictiva con la carga de verificación de 350 g.

2.6. Construcción de la red neuronal artificial (RNA)

Se implementó una red perceptrón multicapa para predecir el rendimiento del proceso de extracción de aceite esencial de la cáscara de naranja en función de la cantidad de carga inicial. Se consideraron dos factores importantes para asegurar el éxito del modelo neuronal: el número de capas ocultas y el número de neuronas por capa.

Se utilizó una capa oculta y una capa de salida en la red, con una función de activación sigmoidea para la capa oculta y una función lineal para la capa de salida. Se construyeron varias redes variando el número de neuronas en la capa oculta, entre 2 y 10, para encontrar la mejor arquitectura. Se empleó el algoritmo de backpropagation para el entrenamiento supervisado, debido a su rápido ajuste y fácil aplicación. El algoritmo de Levenberg-Marquardt se utilizó para ajustar los pesos de las conexiones entre las neuronas de cada capa.

El entrenamiento y la validación se realizaron utilizando diferentes cantidades de carga (200g, 300g, 400g y 500g) como variable de entrada, y los rendimientos promedios en porcentaje como variable de salida. El 70% de los datos se destinaron al entrenamiento, mientras que el 30% restante se utilizó para la validación. El entrenamiento continuó hasta que el error en los datos de validación alcanzó un valor mínimo. Para evaluar la capacidad predictiva de la red, se utilizó un punto medio dentro del rango de experimentación, en este caso, 350g.

La efectividad de la red neuronal se evaluó mediante dos indicadores: el error cuadrático medio porcentual (EMC%) y el coeficiente de determinación cuadrático (R^2). Estos indicadores se calcularon utilizando expresiones específicas y permiten medir la precisión de la red para estimar los valores de rendimiento del proceso en los datos de prueba.

En resumen, se utilizó una red neuronal para predecir el rendimiento del proceso de extracción de aceite esencial de

la cáscara de naranja. Se ajustaron los parámetros de la red y se utilizaron indicadores de precisión para evaluar su capacidad predictiva. Los resultados obtenidos permiten estimar con mayor precisión los rendimientos del proceso en función de la cantidad de carga inicial.

$$EMC\% = 100 * \left(\frac{\sum_{i=1}^N (m_i^{exp} - m_i^{pred})^2}{N} \right) \quad (4)$$

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (m_i^{exp} - m_i^{pred})^2}{\sum_{i=1}^N (m_i^{exp} - \bar{m}^{pred})^2} \quad (5)$$

Donde m_i^{exp} representa el valor experimental, m_i^{pred} representa el valor predicho por la red, \bar{m}^{pred} el valor de la respuesta promedio y N el número total de datos. A su vez estos dos parámetros son importantes para comprar el rendimiento de las diferentes arquitecturas de RNAs propuestas para estimar cual es la mejor.

3. Resultados

En la tabla 3, se muestra el indicador de madurez de la naranja que se seleccionó.

Tabla 3. Indicador del grado de madurez de la naranja especie Citrus sinensis

Color Fruta	pH	°Brix (%)	A.T(%)	I.M
Pintona (amarillenta)	4,84	1,9	0,81	2,35

A.T=Acidez Titulable
I.M= Índice de Madurez

A la relación entre los °Brix/Acidez titulable se le denomina índice de madurez, y para el desarrollo del presente trabajo, se utilizó la naranja pintona cuyo índice de madure fue de 2,35.

3.1. Análisis estadístico.

El comportamiento de los rendimientos de la extracción de aceite esencial (%), por la técnica de destilación por arrastre de vapor, con cantidades de carga (200, 300, 400, 500) gramos, se pueden apreciar en la tabla 4.

Tabla 4. Promedios del %rendimiento de aceite esencial en función de la carga (g)

Tamaño (cm ²)	Cantidades de carga (g)			
	200	300	400	500
1,5	0,0625	0,0971	0,1473	0,1674

Fuente: Elaboración propia

Como se muestra en la figura 6, para un tamaño establecido de cáscara a mayor cantidad de carga introducida al sistema, mayor será el rendimiento del proceso, siendo este un valor promedio de 0,1674% para una carga de 500 g.

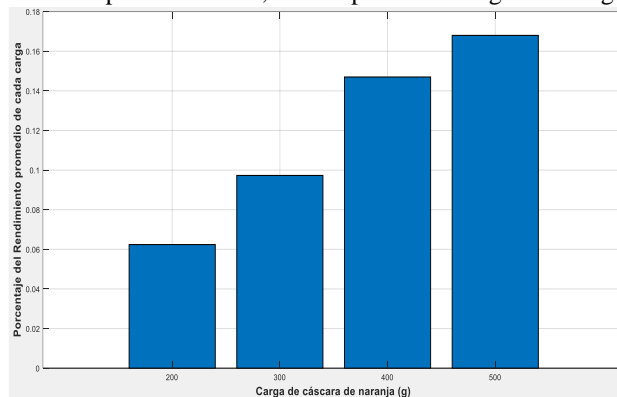


Fig. 6. Diagrama de barras de %Rendimiento Vs Cantidad de cáscara

3.2. Modelo matemático mediante la técnica de ajuste de curvas.

En la figura 7 se logra apreciar un diagrama de dispersión de los rendimientos obtenidos en la experimentación en función de la cantidad de cáscara (g) que se utilizó, esto nos ayudará para poder determinar qué tipo de relación existe entre estas dos variables. En la figura 9 se puede apreciar que se procedió a analizar los datos con 3 modelos matemáticos: lineal, polinómica de grado 2 y una logarítmica, junto con su coeficiente de determinación (R^2)

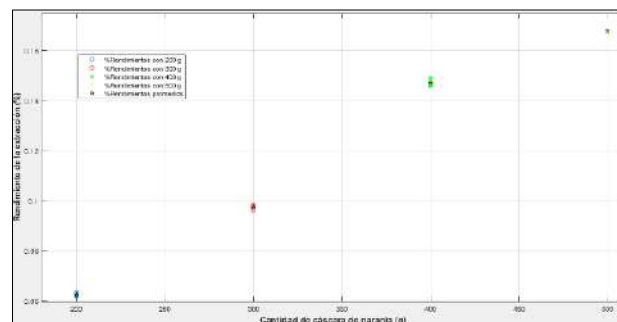


Fig. 7. Diagrama de dispersión del (%) Rendimiento vs Cantidad de cáscara (g)

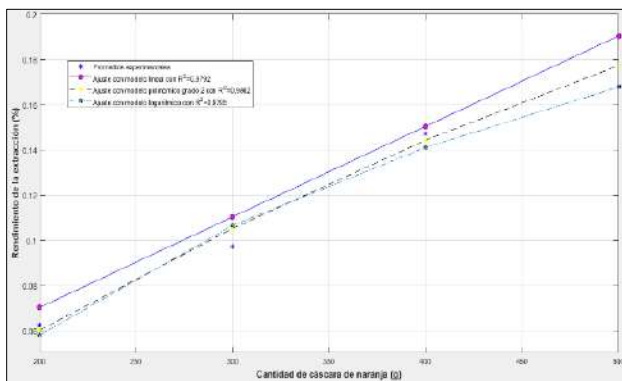


Fig. 8. Ajuste de los datos experimentales con diversos modelos matemáticos y la presentación de su R^2

En la tabla 5, se logra apreciar cada una de las ecuaciones de los 3 modelos matemáticos que se presentaron en la figura anterior con su respectivo R^2 , y logramos apreciar que el ajuste polinómico de grado 2 presenta el mayor coeficiente de determinación frente a los otros 2 ajustes realizados.

Tabla 5. Comparación predictiva del rendimiento de los diferentes ajustes realizados.

Ajuste	Ecuación	R^2	%Rendimiento predicho con una carga de 350 g
Lineal	$\%Rendimiento=0,0004*(carga (g))-0,0096$	0,9792	0,1304
Logarítmica	$\%Rendimiento=0,1196*\ln(carga (g))-0,5755$	0,9792	0,1251
Polinómica	$\%Rendimiento=-3 \times 10^{-7} * (carga (g))^2+0,0006*(carga (g))-0,0477$	0,9862	0,1255

Sin embargo, la tabla 6 se logra apreciar el error que existe entre el valor experimental del rendimiento y el valor predicho por cada uno de los modelos matemáticos con la carga de 350 g. El valor experimental promedio del rendimiento para esta carga fue del 0,1158%, y podemos darnos cuenta de que el modelo logarítmico es el mejor ya que presenta un error menor, aunque su R^2 es el segundo mejor.

Tabla 6. Comparación entre los diferentes modelos mediante el cálculo del error con el valor experimental obtenido

Ajuste	R^2	%Rendimiento predicho con una carga de 350 g	Error (%)
--------	-------	--	-----------

Lineal	0,9792	0,1304	12,6079
Logarítmica	0,9795	0,1251	8,0310
Polinómica	0,9862	0,1255	8,3765

3.3. Modelo de red neuronal artificial.

En la tabla 7, podemos observar la cantidad óptima de neuronas en la capa oculta que se determinó mediante un proceso de prueba y error, minimizando la diferencia entre los valores experimentales y los predichos por la red en el punto de verificación. También se logra apreciar los valores del ECM% y R^2 de cada una de las predicciones realizadas con distintos números de neuronas en la capa oculta.

Tabla 7. Capacidad predictiva de la eficiencia con diferentes números de neuronas en la capa oculta.

Número de neuronas en la capa oculta	Valor de rendimiento predicho	R^2	ECM (%)
2	0,0990	0,8522	0,0314
3	0,0941	0,5165	0,0503
4	0,1070	0,9452	0,0110
5	0,1634	0,7618	0,2295
6	0,0983	0,9528	0,0339
7	0,1170	0,9574	0,0034
8	0,1599	0,9806	0,1975
9	0,1187	0,9929	0,0040
10	0,1217	0,9984	0,0067

Se encontró que la RNA con una arquitectura de 9 neuronas en la capa oculta proporciona la mejor predicción.

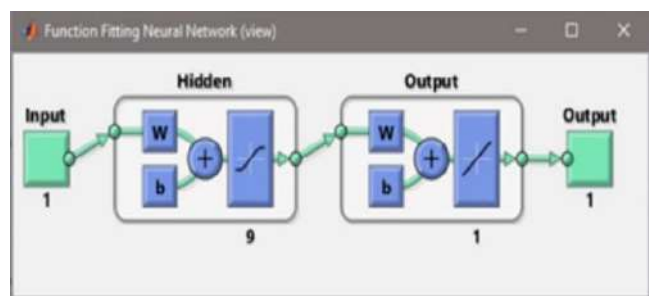


Fig. 9. Diagrama esquemático del modelo óptimo de RNA Fuente: Elaboración propia

3.4. Comparación de los valores predichos por el modelo matemático logarítmico, la RNA y experimentales.

La figura 10 muestra los datos de rendimientos de extracción de aceite esencial en función de la cantidad de cáscara de naranja, la curva de ajuste del modelo

matemático y los valores predichos por la RNA (red neuronal artificial).

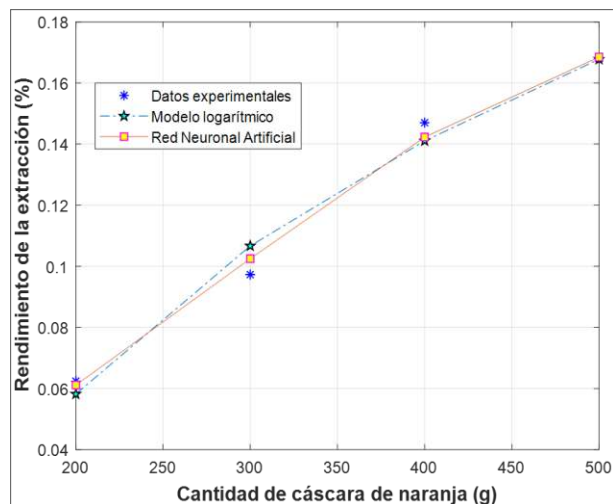


Fig. 10. Valores experimentales del Rendimiento (%), modelo logarítmico y la RNA

Además, se logra apreciar que los datos predichos por la red neuronal artificial presentan una elevada correspondencia con la curva de ajuste proporcionada por el modelo matemático, mostrando la capacidad de la red para captar interacciones lineales y no lineales asociado con el proceso de extracción.

Y como se muestra en la tabla 8, la red neuronal presenta una elevada capacidad predictiva en el punto de verificación frente a los demás modelos matemáticos.

Tabla 8. Demostración de la capacidad predictiva de la red neuronal frente a los demás modelos

Modelo	R ²	%Rendimiento predicho con una carga de 350 g	Error (%)
Lineal	0,9792	0,1304	12,6079
Logarítmica	0,9795	0,1251	8,0310
Polinómica	0,9862	0,1255	8,3765
Red Neuronal Artificial	0,9929	0,1187	2,4431

Fuente: Elaboración propia

4. Conclusiones

Se logró la caracterización de la cáscara de naranja en el laboratorio acreditado por la ISO 17025 Analytical Laboratories en sus parámetros físicos-químicos más importante tales como grado de madurez, humedad, contenido de cenizas, azúcares reductores- Los resultados obtenidos fueron de suma importancia ya que el proceso de extracción se lo desarrolló con ese tipo de materia prima, y el modelo predictivo de RNA solo funcionará para

extracciones realizadas con este tipo de cáscara bajo las condiciones físico-químicas establecidas en este trabajo.

La técnica de destilación por arrastre de vapor usando la trampa Clevenger permitió obtener un rendimiento promedio de extracción del 0.1680% para los 500 g de carga inicial. Por lo tanto, está dentro del rango de 0.5-0.8% de rendimientos con este tipo de materia prima, usando este método de extracción ya que pueden oscilar dependiendo de la variedad, estado de madurez de la fruta y método usado de extracción. El modelo de RNA óptimo desarrollado con el software Matlab R2019a fue el que tuvo 9 neuronas en la capa oculta, tuvo como variable de entrada la cantidad de carga en gramos y como variable de salida el rendimiento en porcentaje; este modelo mostró mayor exactitud frente a las otras arquitecturas analizadas. Esto se puede demostrar con los valores de los parámetros del coeficiente de determinación, $R^2 = 0.9929$ y el error cuadrático medio porcentual, $EMC\% = 0.0040$, por lo tanto, se comprobó que la hipótesis de investigación es verdadera.

Se pudo observar la capacidad predictiva de la red para relacionar las variables, demostrando su potencialidad de inteligencia artificial para el modelado y la predicción de procesos físicos, como se pudo observar en la aplicación que se le dio en el presente trabajo, sus resultados fueron mejores y más cercanos a los experimentales frente a los ajustes matemáticos que comúnmente se suelen realizar en la carrera de Ingeniería Química para relacionar las distintas variables de proceso.

Referencias

- [M. Moreno, «Redes Neuronales Artificiales aplicadas al Análisis de 1 Datos,» *tesisenred.net*, pp. 17-31, 2002.]
- [E. A. Heredia, «NARANJA ESTUDIO AGROINDUSTRIAL DEL 2 ECUADOR,» 4 Julio 2008. [En línea]. Available:] <https://issuu.com/mipro/docs/naranja>.
- [A. Badui, «APLICACIÓN DEL LECHO POR FUENTE- 3 FLUIDIZADO “SPOUT-FLUID BED” CON SÓLIDOS INERTES] A LA MICROENCAPSULACIÓN DE ACEITE ESENCIAL DE NARANJA,» *sappi.ipn.mx/*, pp. 1-45, 2008.
- [L. Balboa, «Obtención Experimental de aceite esencial y 4 subproducto a partir de la cáscara de naranja (Citrus Sinensis),»] *repositorio.umsa.bo*, pp. 1-10, 2019.
- [J. M. Huayta, «EFECTO HIPOLIPEMIANTE DEL ACEITE 5 ESENCIAL DE CÁSCARA DE NARANJA (Citrus sinensis) EN] RATTUS NORVEGICUS VARIEDAD WISTAR,» *repositorio.unsa.edu.pe*, pp. 1-25, 2017.
- [P. A. Reyes-Ortiz y Colaboradores, «1 PRODUCCIÓN DE 6 NARANJA (Citrus sinensis L. Osbeck) VARIEDAD VALENCIA] TARDÍA BAJO MANEJO ORGÁNICO EN SAN PABLO, PAPANTLA DE OLARTE; VERACRUZ.,» 13 Junio 2017. [En línea]. Available: https://www.researchgate.net/publication/320110143_PRODUCCI



- ON_DE_NARANJA_Citrus_sinensis_L_Osbeck_VARIEDAD_V
ALENCIA. 2
]
- [A. Contreras-Oliva y Colaboradores, «CALIDAD
7 FÍSICOQUÍMICA, SENSORIAL Y NUTRICIONAL DE
] NARANJAS CV. VALENCIA RECUBIERTAS CON
QUITOSANO.» 15 Agosto 2012. [En línea]. Available:
http://www.scielo.org.mx/pdf/agro/v46n5/v46n5a2.pdf. 2
]
- [Mejía y Freire, «La naranja está barata.» *El Diario Comercio*
8 *Ecuador*, vol. 1, n° 1, p. 1, 2021. 2
]
- [A. C. Trejo y A. C. Krauser, «Química de los carbohidratos.» 16
9 Enero 2013. [En línea]. Available:
] https://www.researchgate.net/publication/286640492_Quimica_de_los_Carbohidratos. 2
- [A. Germán, «Producción de enzimas pectinasas por actinomicetos
1 en cultivo sumergido utilizando pectina y cáscara de naranja.»
0 *sisbib.unmsm.edu.pe*, pp. 4-6, 2014. 4
-] 1
- [A. E. Q. Valle, «UTILIZACIÓN DE RESIDUOS DE CÁSCARA
1 DE NARANJA PARA LA PREPARACIÓN DE UN
1 DESENGRASANTE DOMÉSTICO E INDUSTRIAL.»
] *repositorio.uisek.edu.ec*, pp. 13-22, 2009. 2
- [A. Castañeda, «Actividad antimicrobiana del aceite de naranja
1 residual.» *SciELO*, pp. 1-6, 2018. 2
2
]
- [L. Mancilla, «Estudio del aceite esencial de la cáscara de la naranja
1 dulce (*Citrus sinensis*, variedad Valenciana) cultivada en Labateca
3 (Norte de Santander, Colombia).» *Redalyc.org*, pp. 4-7, 21 Febrero
3 2007. 4
- [D. Nuñez, «OBTENCIÓN DE ACEITES ESENCIALES A PARTIR
1 DE CORTEZA DE NARANJA "CITRUS SINENSIS" VARIEDAD
4 VALENCIANA.» *Researchgate.net*, pp. 6-13, Julio 2019. 5
]
- [O. Fennema, «Introducción a la Química de los Alimentos.»
1 *ceqa.files.wordpress.*, pp. 504-798, 2014. 5
5
]
- [O. Guevara, «Obtención de aceite esencial de citronela
1 (*Cymbopogon winterianus*) extraído por arrastre con vapor a escala
6 piloto: estudio de la influencia de variables en el rendimiento y la
] calidad del aceite.» *ria.utn.edu.ar*, pp. 62-82, Marzo 2014. 7
- [J. T. Barrera, «Redes Neuronales.» *cucei.udg.mx*, pp. 3-6, 2012.
1
7
]
- [J. Marshall, «Redes Neuronales.» *avellano.fis.usal.es*, pp. 1-3, 2013.
1
8
]
- [X. B. Olabe, «Redes Neuronales Artificiales y sus Aplicaciones.»
1 *ocw.ehu.es*, pp. 18-20, 2016. 9
9
]
- [E. C. A. Tepán, «Estudio de los Principales tipos de Redes
2 Neuronales y las Herramientas para su aplicación.»
0 *dspace.ups.edu.ec*, pp. 15-16, Febrero 2013. 10
]
- [H. G. Asensio, «Inteligencia artificial. Redes neuronales y
2 aplicaciones.» *it.uc3m.es*, pp. 2-6, 2011. 11
1
]
- [V. B. Pardo, «Machine Learning con TensorFlow.» *oa.upm.es*, pp.
2 1-16, 15 Enero 2017. 12