



INFORMADOR TÉCNICO

ASTIN
CENTRO NACIONAL DE ASISTENCIA
TÉCNICA A LA INDUSTRIA

SENNOVA
Sistema de Investigación,
Desarrollo Tecnológico e Innovación

ISSN 0122-056X
e-ISSN 2256 - 5035
DOI: <https://dx.doi.org/10.23850/issn.2256-5035>
Tarifa Postal Reducida No. 2019 - 179 4-72,
vence 31 de Dic. 2019



INFORMADOR TÉCNICO

Informador Técnico
Título Abreviado: Inf. Téc.
ISSN 0122 - 056X
ISSN 2256 - 5035 (en línea)
Periodicidad: semestral
Enero - Junio 2019

Servicio Nacional de Aprendizaje SENA, Regional Valle
Centro Nacional de Asistencia Técnica a la Industria - ASTIN

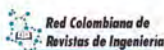
Calle 52 # 2Bis - 15 Cali, Valle del Cauca, Colombia
Teléfonos: 57 (2) 431 5800 ext. 22694
Email: revistaitastin@sena.edu.co
http://revistas.sena.edu.co/index.php/inf_tec



DOI: <https://doi.org/10.23850/issn.2256-5035>

<http://revistas.sena.edu.co>

Indexada en:



Equipo Editorial

Director General

José Antonio Lizarazo Sarmiento, MSc
Servicio Nacional de Aprendizaje SENA

Director Regional Valle (e)

Alex Amed Valencia Rojas, Ing
Servicio Nacional de Aprendizaje SENA

Coordinador SENNOVA

Emilio Eliecer Navia Zúñiga
Servicio Nacional de Aprendizaje SENA

Subdirector (e) Centro Nacional de Asistencia Técnica a la Industria (ASTIN)

Director (e) Informador Técnico
Paulo César Ramírez Quintero, MSc
Servicio Nacional de Aprendizaje SENA

Editor

Miguel Ángel Solís Molina
PhD en Administración, MSc en Ingeniería Industrial
Servicio Nacional de Aprendizaje SENA

Editores de sección

Andrés Felipe Torres
MSc en Ingeniería de Materiales
Investigador SENNOVA
Servicio Nacional de Aprendizaje SENA

Lina Marcela Crespo

MSc en Ingeniería de Materiales
Investigador SENNOVA
Servicio Nacional de Aprendizaje SENA

Jorge Enrique Moreno Serrano

MSc en Ingeniería con énfasis en Automática
Investigador SENNOVA
Servicio Nacional de Aprendizaje SENA

Aura María Rosero Arteaga

MSc en Entornos Virtuales de Aprendizaje
Investigador
Servicio Nacional de Aprendizaje SENA

Gestora Editorial

María Andrea Benítez de la Ossa
Profesional en Finanzas y Relaciones Internacionales
Servicio Nacional de Aprendizaje SENA

Diagramación Editorial

Elizabeth Enriquez Quintero
Diseñadora Gráfica
Servicio Nacional de Aprendizaje SENA

Auxiliares de Edición

Ana María Cortés Rosero
Profesional en Comercio Exterior
Servicio Nacional de Aprendizaje SENA

Elizabeth Cárdenas Berrio

Profesional en Administración de Empresas
Servicio Nacional de Aprendizaje SENA

Juan Camilo Saldaña

Practicante de Tecnología para Comunicación Gráfica
Servicio Nacional de Aprendizaje SENA

Comité Científico/Editorial

Eric Campos Cantón

PhD en Matemáticas Aplicada
Instituto Potosino de Investigación Científica y Tecnológica A.C.
San Luis Potosí, S.L.P., México

Gilberto Bejarano Gaitán

PhD en Ingeniería de Materiales
Universidad de Antioquia, Medellín, Colombia

Henry A. Colorado Lopera

PhD en Ingeniería de Materiales
Universidad de Antioquia, Medellín, Colombia

Héctor Fabio Zuluaga Corrales

PhD en Química.
Universidad del Valle, Cali, Colombia

José Luis Munuera Alemán

PhD en Ciencias Económicas y Empresariales
Universidad de Murcia, España

José Ignacio Huertas

PhD en Ingeniería Mecánica
Instituto Tecnológico y Estudios Superiores
de Monterrey, México

Juan Muñoz Saldaña

PhD en Ciencias de Materiales
Unidad Querétaro, México

Pedro José Arango Arango

PhD en Ingeniería y Tecnología de Materiales
Universidad Nacional
de Colombia, Sede Manizales, Colombia

Roberto Briones Gallardo

PhD en Ciencias Fisicoquímicas del Medio Ambiente
Universidad Autónoma de San Luis Potosí, México

Ruby Mejía de Gutiérrez

PhD en Ciencias Químicas
Universidad del Valle, Cali, Colombia

Corrección de estilo e Impresión

Ingeniería Gráfica S.A.S

Tiraje: 40 ejemplares
Enero - Junio de 2019

Servicio Nacional de Aprendizaje SENA

ISSN: 0122-056X

e-ISSN: 2256-5035

DOI: <https://dx.doi.org/10.23850/issn.2256-5035>

Comité Evaluador Volumen 83 No. 1

El Informador Técnico agradece a los investigadores que actuaron como revisores del Volumen 83, Número 1.

Álma Delia Hernández Fuentes

PhD en Ciencias Agrícolas
Centro de Investigación en
Ciencia y Tecnología de los Alimentos -
Instituto de Ciencias Agropecuarias
México

Ángela Marcela Mejía Fajardo

PhD Ingeniería Eléctrica - PhD Telemática
Universidad Militar
Colombia

Benjamín Zuluaga Díaz

PhD Ingeniería de Materiales y Procesos
Universidad Nacional de Colombia
Colombia

César Andrés Amaya Hoyos

PhD Ingeniería de Materiales
Servicio Nacional de Aprendizaje Sena
Colombia

Claudia Lorena Delgadillo Aya

MSc Ingeniería de Hidrocarburos
Ecopetrol
Colombia

Darío Alonso Martín Gordo

MSc Química
Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia
Colombia

Diego Alonso Cardona Arbeláez

MSc Administración de Empresas
Universidad Libre
Colombia

Diego Pérez Muñoz

MSc Ingeniería Mecánica
Universidad Tecnológica de Pereira
Colombia

Eduar Ernesto Pérez Rojas

MSc Ingeniería Mecánica
Universidad del Norte
Colombia

Eduin Yesid Mora Mendoza

PhD Ingeniería y Ciencias de los Materiales
Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia
Colombia

Erik Giovany Montes Páez

MSc Ingeniería de Hidrocarburos
Universidad Industrial de Santander
Colombia

Esteban Correa Bedoya

PhD Ingeniería
Universidad de Medellín
Colombia

Faber Correa Ballesteros

PhD Materiales
Universidad Autónoma de Occidente
Colombia

Guillermo Monrós Tomás

PhD Química Inorgánica Medioambiental y Materiales
Universitat Jaume I
España

Hugo Alexander Vega Riaño

PhD Psicología Social y Antropología de las Organizaciones
Universidad de Pamplona
Colombia

Jairo Acosta Solano

MSc Análisis y Visualización de Datos Masivos
Corporación Universitaria Rafael Núñez
Colombia

Jairo Rafael Montoya Torres

PhD Genie Industriel
Universidad de La Sabana
Colombia

Johan Manuel Redondo Ortegón

PhD Ingeniería
Universidad Católica de Colombia
Colombia

Jorge Antonio González Sánchez

PhD Filosofía
Universidad Autónoma de Campeche
México

Jorge Enrique Otálora Luna

PhD Ingeniería de Software
Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia
Colombia

José Luddey Marulanda Arévalo
PhD Química Avanzada
Universidad Tecnológica de Pereira
Colombia

Julián Arnaldo Avila Díaz
PhD Ingeniería Mecánica
Universidad Estatal Paulista
Brasil

Lesly Patricia Tejeda Benítez
PhD Toxicología Ambiental
Universidad de Cartagena
Colombia

Luis Alberto Laguado Villamizar
MSc Ingeniería de Materiales
Unidades Tecnológicas de Santander
Colombia

Luis Eduardo Díaz Barrera
PhD Ciencias Químicas
Universidad de La Sabana
Colombia

María Antonia Murazzo
PhD Redes y Seguridad
Universidad Nacional de San Juan
Argentina

Mario Fernando Muñoz Vélez
PhD Ciencias de los Materiales Poliméricos
Universidad Autónoma de Occidente
Colombia

Marlon José Bastidas Barranco
PhD Ingeniería
Universidad de La Guajira
Colombia

Matteo Radice
PhD en Ingeniería
Universidad Tecnológica Nacional
Argentina

Miguel Méndez-Garabetti
MSc Química
Universidad Nacional de Colombia
Colombia

Norma Constanza López Ortiz
MSc Química
Universidad Nacional de Colombia
Colombia

Rafael Andrés Robayo Salazar
PhD Ingeniería de Materiales
Universidad del Valle
Colombia

Ricardo Antonio Torres Palma
PhD Ciencias Químicas
Universidad de Antioquia
Colombia

Roberto Carlos Hincapié Reyes
PhD Ingeniería Área Telecomunicaciones
Universidad Pontificia Bolivariana
Colombia

Sandra Natalia Correa Torres
PhD Química Aplicada
Universidad Pontificia Bolivariana
Colombia

INFORMADOR TÉCNICO

Volumen 83 • Número 1 • Enero-Junio 2019 • ISSN 0122-056X • e-ISSN 2256-5035

TABLA DE CONTENIDO

Editorial	5
 ARTICULOS DE INVESTIGACIÓN	
Análisis del caudal en un disco de freno automotriz con álabes de ventilación tipo NACA 66-209, utilizando velocimetría por imágenes de partículas	6
<i>Analysis of the flow on an automotive brake disc with NACA 66-209 type ventilation alabs, using particle image velocimetry</i> Ricardo García-León; Jesús Rivera-López; Abner Quintero-Orozco; Guadalupe Gutiérrez-Paredes	
Sustitución de nitritos en un producto cárnico embutido por nabo (<i>Brassica rapa</i>) y sustitución parcial de harina de papa (<i>Solanum tuberosum</i>) por harina de cáscara de mango (<i>Mangifera indica</i>) para la evaluación del desarrollo de color y textura	19
<i>Substitution of nitrites in a meat product stuffed with turnip (<i>Brassica rapa</i>) and partial replacement of potato flour (<i>Solanum tuberosum</i>) by mango peel meal (<i>Mangifera indica</i>) for the evaluation of the development of color and texture</i> Bernardo Carvajal-Macías; Seleny Pérez-Ramírez; Yhoan Gaviria-Gaviria; Juan Alzate-Agudelo	
Aplicación de FeO, ZnO y CuO como pigmentos en compuestos cerámicos <i>FeO, ZnO and CuO application as pigments in ceramic compounds</i>	30
Karol Roa-Bohórquez; Ricardo Paredes-Roa; Luis Lara-González; Gabriel Peña-Rodríguez.....	
Caracterización fisicoquímica de biodiésel derivado de grasa de pollo como alternativa de producción limpia en la Sabana de Túquerres-Nariño	41
<i>Physicochemical characterization of biodiesel derived from chicken fat as an alternative of clean production in sabana of Túquerres-Nariño</i> José Mera-Ayala; Danilo Revelo-Vargas; Milton Mora-Martínez; Jonathan Pérez-Barón; Yuliana Areiza-Rico	
Integración de la impresión 3D en el proceso de cera perdida para la producción de joyas, con fines de estandarización	51
<i>Integration of 3D printing in the process of lost wax for the production of jewelry, for standardization purposes</i> Leidy Yaneth Vega-Rodríguez; Laura Muñoz-Mesa	
Evaluación del perfil de ácidos grasos de <i>Isochrysis galbana</i> mediante el uso de métodos ácidos y alcalinos de transesterificación	66
<i>Fatty acid profile evaluation of <i>Isochrysis galbana</i> through the use of acid and alkaline transesterification methods</i> Elena Medina-Pérez; María Ruíz-Domínguez; Juan Morales-Espinoza; Pedro Cereza-Mezquita	
Inoculación de nanopartículas de TiO₂-Ag en semillas de espinaca	76
<i>Inoculation of TiO₂-Ag nanoparticles in spinach seeds</i> Fernando Gordillo-Delgado; Jakeline Zuluaga-Acosta; Benyi-Juliana Marín-Gallego	
Índice de autores	86
Directrices para autores	88

Editorial

Las revistas científicas utilizan el factor h para evidenciar el impacto de sus publicaciones en la comunidad científica. En este sentido, el Informador Técnico se ha enfocado en mejorar su visibilidad adoptando los requisitos exigidos por los Sistemas de Indexación y Resumen (SIREs) y la convocatoria de medición de revistas científicas de Publindex-Colciencias, para incrementar su factor de citación. Para el Informador Técnico es de vital importancia publicar artículos, en temas de interés para la comunidad científica, académica y empresarial. En una encuesta realizada a nuestros suscriptores el 33% manifestó que le ha permitido desarrollar innovaciones de producto y proceso, y en un 19% de organización.

En la presente edición, última en publicarse en medio físico, se han seleccionado artículos relacionados con la mejora de la eficiencia y la sostenibilidad aplicadas a productos y procesos. El primer artículo, examina los sistemas de frenos para automóviles, que ayudan a optimizar el flujo de aire con resultados que permiten mejorar la velocidad, la eficiencia y la seguridad de los sistemas de frenado, a partir de cambios en el diseño de la geometría del disco de frenos. El segundo artículo, aborda la sustitución de nitritos sintéticos en los productos cárnicos, mediante la utilización de vegetales como el nabo para la obtención del color característico de las salchichas. Asimismo, analiza la sustitución de la harina de papa por harina de cáscara de mango, evaluando la textura. Los resultados apuntan a una disminución en el uso de nitritos sintéticos y a la necesidad de un incremento del nabo para la obtención de la concentración deseada. En cuanto a la cáscara de mango, se evidencia que afecta la textura final del producto. El tercer artículo, se enfoca en la aplicación de pigmentos como el FeO, ZnO y el CuO, en compuestos cerámicos para ser utilizados en la industria alfarera. Los resultados apuntan a la viabilidad del uso de los óxidos propuestos para ser aplicados como pigmentos termoestables en productos cerámicos tales como tejas, tabletas y baldosas.

El cuarto artículo, se centra en la generación de biocombustibles amigables con el ambiente, a partir de subproductos de la agroindustria avícola. Los resultados sugieren que el combustible derivado de la grasa de pollo puede ser utilizado en motores de combustión diésel, dando cumplimiento a la norma NTC 5444 y generando combustibles con menor contenido de azufre. El quinto artículo, analiza la utilización de la impresión 3D para el desarrollo de prototipos en aplicaciones de joyería mediante el proceso de cera perdida. Como resultado se obtuvieron cuatro curvas de quemado para dos tipos de resinas, evaluando la calidad de la pieza. El sexto artículo, examina el potencial de las microalgas marinas para su uso en la acuicultura o como fuente alternativa de combustible. Los hallazgos obtenidos sugieren los métodos más eficientes en la transesterificación para la medición de perfiles de contenidos de ácidos grasos. El séptimo artículo, explora la inoculación de nanopartículas de TiO₂-Ag en las semillas de espinaca, con tratamientos que permiten mejorar el crecimiento de las plantas sin alterar su capacidad fotosintética.

Para finalizar, el equipo editorial del Informador Técnico agradece a los autores y revisores por elegir y colaborar en los procesos editoriales de la revista. De igual forma, agradecemos a SENNOVA por los recursos aportados e invitamos a nuestros lectores, académicos, empresarios, profesionales, tecnólogos y técnicos, a visitar el portal web donde podrán consultar la versión digital de la revista.

PAULO CÉSAR RAMÍREZ QUINTERO
Subdirector (e) ASTIN
SENA Regional Valle
Director (e) de la revista

Análisis del caudal en un disco de freno automotriz con álabes de ventilación tipo NACA 66-209, utilizando velocimetría por imágenes de partículas

Analysis of the flow on an automotive brake disc with NACA 66-209 type ventilation alabs, using particle image velocimetry

Ricardo García-León¹
Jesús Rivera-López²
Abner Quintero-Orozco³
Guadalupe Gutiérrez-Paredes⁴

¹Universidad Francisco de Paula Santander, Ocaña (Colombia); Instituto Politécnico Nacional (México); correo: ragarcial@ufps.edu.co

²Instituto Politécnico Nacional (México); correo: eduardo_rivera@hotmail.com

³Universidad Francisco de Paula Santander, Ocaña (Colombia); Instituto Politécnico Nacional (México); correo: aquintero@ufps.edu.co

⁴Instituto Politécnico Nacional (México); correo: ggutierrez@ipn.mx

Recibido: 06-09-2018 Aceptado: 22-02-2019

Cómo citar:

García-León, Ricardo; Rivera-López, Jesús; Quintero-Orozco, Abner; Gutiérrez-Paredes, Guadalupe (2019). Análisis del caudal en un disco de freno automotriz con álabes de ventilación tipo NACA 66-209, utilizando velocimetría por imágenes de partículas. *Informador Técnico*, 83(1), 6-18.
doi: <https://doi.org/10.23850/22565035.1785>

Resumen

El sistema de frenos de un automóvil debe satisfacer un conjunto complejo de requerimientos importantes, tales como la seguridad vial, la cual se basa en función del arreglo geométrico y el tipo de material. El objetivo de este trabajo es proponer un nuevo arreglo geométrico para la optimización del flujo de aire en un disco de freno automotriz, teniendo en cuenta pilares de ventilación fundamentados en perfiles aerodinámicos tipo NACA 66-209. Para sustentar esta propuesta de diseño, se llevó a cabo la construcción de un prototipo a escala 1:1 por medio de manufactura aditiva y al igual que el diseño de una instalación que permite el montaje del disco para medir el campo de velocidades generado en la zona de succión y descarga mediante el uso de la Velocimetría por Imágenes de Partícula (VIP). La validación del arreglo geométrico se efectuó bajo cinco (5) condiciones de velocidad angular: 541, 641, 741, 841 y 941 rpm. Los resultados obtenidos muestran la optimización de la velocidad del aire en la zona de descarga de 0,1151 y 0,2317 m/s a 35 rpm por evidenciar la importancia de diseños experimentales con los cuales se pueda mejorar la geometría de los frenos de disco, autoventilados y de esta manera garantizar la eficiencia y seguridad del sistema.

Palabras clave: velocimetría por imágenes de partículas; disco de freno; NACA; velocidad; geometría; automotriz; análisis de caudal; NACA 66-209; álabes de ventilación.

Abstract

The automotive braking system must meet a complex set of requirements, among which safety is the most important, which is based on the function of the geometric arrangement and the type of material. The objective of this work is to propose a new geometric arrangement for the optimization of the air flow in an automotive brake disc, considering ventilation pillars founded on aerodynamic profiles type NACA 66-209. To support this design proposal, a 1: 1 scale prototype was made by means of additive manufacturing and an installation was also designed, which allows the assembly of the disk to measure

the velocity field generated in the suction and discharge zone through the use of the Velocimetry by Particle Images (VPI). Validation of the geometric arrangement was performed under five (5) angular velocity conditions: 541, 641, 741, 841 and 941 rpm. The results obtained from the optimization of air velocity in the discharge zone of 0.1151 and 0.2317 m/s at 35 rpm. The results show the importance of experimental designs with which the geometry of self-ventilated disc brakes can be improved, thus guaranteeing the efficiency and safety of the system.

Keywords: particle image velocity; disc brakes; NACA; velocity; geometry; automotive; air flow analysis; NACA 66-209; Fan blades.

Introducción

El sistema de frenos es sin duda el componente más importante para la seguridad vial del automóvil, pues de éste depende la detención total o parcial del vehículo y, en consecuencia, la integridad de sus pasajeros. Generalmente, el 70 % de la energía cinética producida en el movimiento es absorbida por el freno de disco delantero y el restante 30 % por el freno trasero, que suele ser de tambor. Durante las repeticiones en el proceso de frenado, la energía cinética se transforma en energía térmica, debido a la fricción generada entre la pista de frenado y la pastilla donde se alcanzan temperaturas de hasta 900 °C según, Talati y Jalallifar (2018), el 90 % del calor es distribuido y absorbido por el freno de disco y el restante 10 % por la pastilla.

El principio de funcionamiento de estos sistemas se basa en la fricción para detener el movimiento del vehículo, con la presión hidráulica que empuja las pastillas de freno contra el disco de fundición gris nodular (García-León; Acosta-Pérez; Flórez-Solano, 2015). Como consecuencia de este fenómeno, se genera un calor considerablemente alto durante el frenado debido a la absorción de la energía cinética, aumentando la temperatura por fricción. Este calor se disipa rápidamente con el medio ambiente (aire circundante) por medio del fenómeno de convección, el cual se define como la transferencia de calor que se produce entre masas a diferente temperatura (García-León *et al.*, 2015). Es importante mencionar que los factores ambientales también cumplen un papel importante para que la etapa de transferencia de calor se produzca. Además, cuando la temperatura alcanza valores elevados se da el fenómeno de transferencia de calor por radiación, que también ayuda a disipar la energía en forma de calor almacenada en el disco (García-León *et al.*, 2015; Hirasawa; Kawanami; Shirai, 2014; Porta; Echeverría; Cardoso; Stern, 2016).

El mantenimiento de los frenos de disco es más económico en comparación a los frenos de tambor, por ello, las características geométricas de los discos dependen de la capacidad de carga y funcionamiento, lo cual es un factor importante en la fase de diseño inicial. En la mayoría de los casos, los diseños deben evitar el sobrecalentamiento que surge entre el freno y la pastilla por el efecto de la fricción, teniendo en cuenta, además, las propiedades físicas, mecánicas y químicas de los materiales utilizados en el sistema de frenado (Bocii, 2011; García-León; Pérez-Rojas, 2016). En la etapa de diseño de frenos de disco ventilados, es muy importante analizar el comportamiento de los termo-fluidos asociados (aire circundante), en donde se puedan observar las características y operación de los fluidos sobre la superficie del disco, garantizando siempre la efectividad del proceso de frenado y de disipación de calor por la superficie y los canales de ventilación (Yan; Feng; Yang; Lu, 2015; García-León; Flórez-Solano, 2017; García-León; Flórez-Solano; Acevedo-Peñaloza, 2018).

El calor de disipación térmica y el rendimiento de los frenos de discos ventilados dependen en gran medida de las características aerodinámicas del flujo de aire, a través de los canales de ventilación y las configuraciones de geometría del freno disco, los cuales se comprueban mediante la implementación de un software de diseño CAD, que incluya la biblioteca de la Dinámica de Fluidos Computacionales (CFD, por sus siglas en inglés) (Chi; He; Naterer, 2009; Ho; Athavale; Forry; Hendricks; Steinetz; García-León, 2017).

En una investigación realizada por Jiménez-García *et al.* (2015), se propone un nuevo arreglo geométrico para la optimización del flujo de aire en un disco de freno automotriz. En esta propuesta, se utilizaron pilares de ventilación tipo NACA (4418 y 66-219), con la finalidad de realizar el análisis por velocímetro de partículas y, de esta manera, optimizar las condiciones de succión (Rivera López; Arciniega Martínez; Gutiérrez Paredes, 2018; García-León; Echavez-Díaz; Flórez-Solano, 2018).

Teniendo en cuenta lo anterior, en la presente investigación se estudió el comportamiento de las partículas de aire en un freno de disco automotriz con pilares de ventilación tipo NACA 66-209 a través de Velocimetría por Imágenes de Partícula (VIP), evaluando los comportamientos y condiciones de los elementos, con la finalidad de optimizar los sistemas que incurran en cualquier área de la ingeniería (Senatore; Wulfmeier; Vlahinić; Andrade; Iagnemma, 2013; Hu; Tomg; Liu, 2007; Huang; Hwung; Hsiao; Chang, 2010; Echavez-Díaz; Quintero-Orozco, 2017).

Materiales y métodos

Para realizar una propuesta geométrica con canales de ventilación tipo NACA 66-209, se debe tener en cuenta el borde de entrada, es decir, el ángulo de ataque β_1 puede ser modificado para que permita el flujo del volumen de aire máximo necesario para evitar que el disco se sobrecaliente, como se muestra en la Figura 1, en donde se inició con un valor de $\beta_1=63^\circ$ debido al número de álabes que harían parte de la geometría del freno de disco. Asimismo, se presenta de forma general el procedimiento del trazo geométrico de la curvatura de un impulsor centrífugo radial, teniendo en cuenta el método del triángulo de error de Kaplan, el cual considera el total desarrollo del pilar de ventilación en toda su longitud, ángulos y espesores, con la finalidad de establecer las consideraciones matemáticas del flujo circundante en el disco de freno. La curvatura obtenida es utilizada como guía para la ubicación de los álabes dentro del disco de freno ventilado, como se indica en la Figura 2 con un número mayor de álabes y un valor de $\beta_1=59,3^\circ$ y, de esta manera, obtener una geometría adecuada para este tipo de frenos.

Para realizar un estudio geométrico más detallado sobre la cantidad de álabes que deben ser puestos en las curvas guía del disco, se realizaron tres propuestas con tres diferentes densidades de álabes, debido a que no se cuenta con una norma estandarizada sobre la cantidad adecuada de álabes en el interior de un disco. Teniendo en cuenta lo anterior, se realizaron experimentos numéricos con la propuesta de tres densidades de álabes de 10, 15 y 20 álabes como se muestra en la Figura 3.

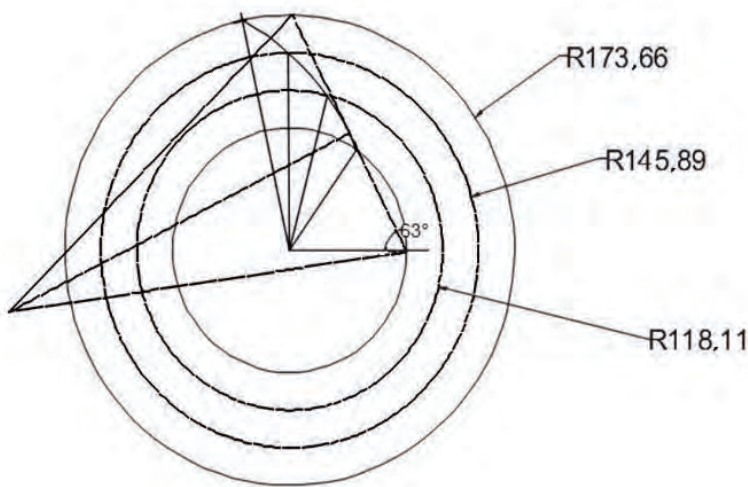


Figura 1. Procedimiento geométrico para el trazo de curvatura
Fuente: elaboración propia

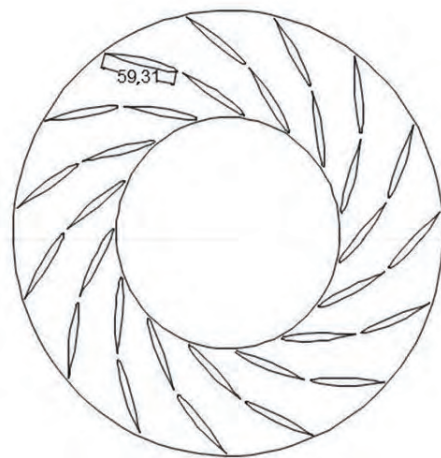


Figura 2. Ejemplo de colocación de los perfiles
Fuente: elaboración propia

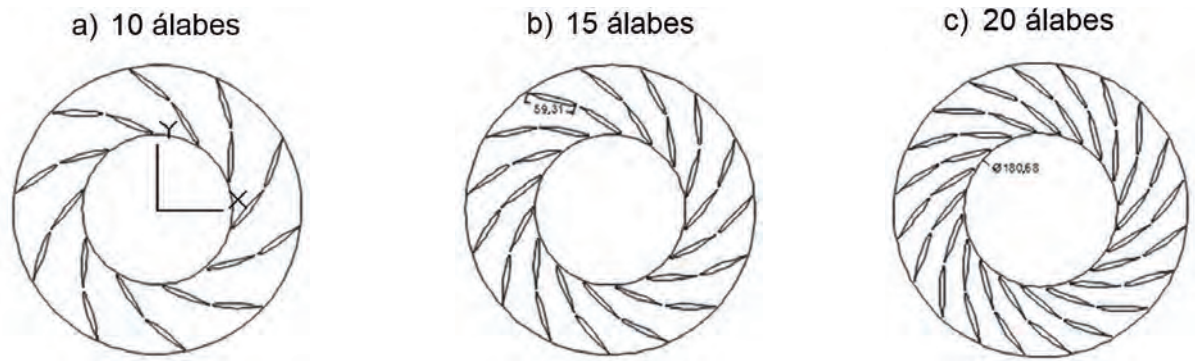


Figura 3. Diseño para diferentes configuraciones
a) 10 álabes. b) 15 álabes y c) 20 álabes
Fuente: Elaboración propia

A través del análisis realizado en ANSYS se obtuvieron las Tablas 1, 2 y 3, las cuales expresan la velocidad tangencial del flujo de aire circulando por el disco en función de la velocidad angular para cada número de alabes.

Tabla 1.
Velocidad tangencial (m/s)

No. Álabes	541 rpm	641 rpm	741 rpm	841 rpm	941 rpm
10	5,2373	7,2849	8,4055	9,7725	10,7309
15	5,8038	7,2182	9,1452	9,7071	11,6690
20	6,8575	7,3590	9,4147	10,4296	11,3071

Fuente: elaboración propia

Tabla 2.
Cambio de presión (Pa)

No. Álabes	541 rpm	641 rpm	741 rpm	841 rpm	941 rpm
10	93,5014	124,1076	146,1193	175,2459	201,1593
15	95,3727	124,8873	155,0286	177,2354	215,8230
20	110,4992	119,3752	157,0354	185,3101	209,8072

Fuente: elaboración propia

Tabla 3.
Flujo másico (kg/s)

No. Álabes	541 rpm	641 rpm	741 rpm	841 rpm	941 rpm
10	4,2018	3,6156	4,2018	4,5196	5,2844
15	4,2019	3,5879	4,2019	4,5196	5,2866
20	3,0594	4,3110	4,2019	4,5196	5,2845

Fuente: elaboración propia

Con los resultados obtenidos y la ecuación de Euler para las turbomáquinas, se calculó el término $\rho (U_2 V_{t2})$, donde U_2 es la componente tangencial de la velocidad a la salida de las pistas del disco y V_{t2} es la velocidad absoluta de la partícula en el mismo punto, la densidad del aire es $\rho=1,20 \text{ kg/m}^3$ y la velocidad $U=2\pi NR_D/60$, donde "N" son las revoluciones por minuto del disco y " R_D " es el radio de descarga del disco de freno. Asimismo, con los resultados de cambio de presión ΔP (ver Tabla 2) se procedió a calcular la eficiencia aerodinámica " ψ " para los tres diseños propuestos, utilizando la siguiente ecuación 1:

En la Figura 4 se muestra la variación de los resultados en función del flujo másico (ver Tabla 3) y la eficiencia aerodinámica:

$$\psi = \frac{\rho U_2 V_{t2}}{\Delta P} \quad (1)$$

Como se observa en la Figura 4, la eficiencia aerodinámica depende de los incrementos del flujo másico, los cuales se puede obtener con la siguiente ecuación 2:

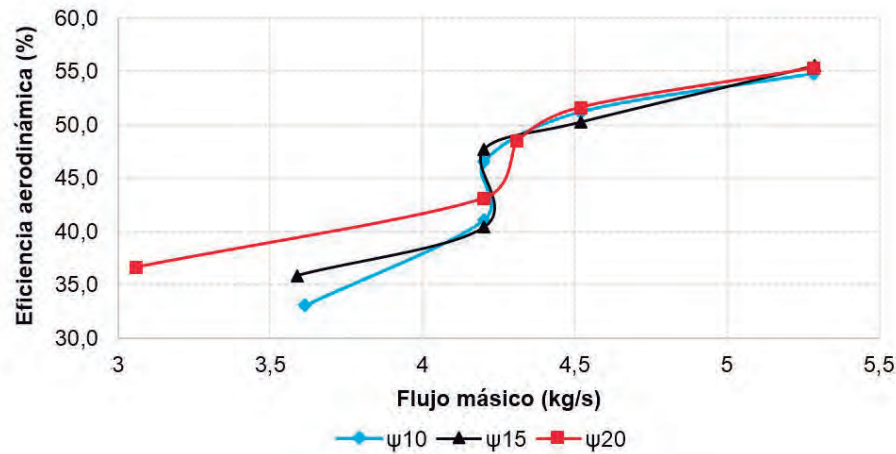


Figura 4. Variación de la eficiencia aerodinámica de los tres diseños propuestos
Fuente: elaboración propia

Por otra parte, como “ ψ ” es para $N = 541$ rpm, la densidad de álabes igual a 20 tiene un valor de $\psi_{20} = 36,66$ %, esto representa una diferencia de $\psi_{20} - \psi_{15} = 0,74$ % y $\psi_{20} - \psi_{10} = 3,6$ % mayor respecto a las otras dos propuestas de diseño.

$$\psi = \psi \dot{m} \quad (2)$$

Sin embargo, para esta misma velocidad de rotación, se tiene un flujo másico ($\dot{m}_{20}=3,06$ kg/s)) menor comparado con las densidades de 10 ($\dot{m}_{10}=3,61$ kg/s) y 15 álabes ($\dot{m}_{15}=3,06$ kg/s). De tal manera, se considera la existencia de efectos de bloqueo o estrangulación del flujo visible para el disco con 20 álabes a velocidades de rotación baja (Rivera-López *et al.*, 2018).

Finalmente, se concluye que el disco con densidad de 15 álabes es la mejor opción de diseño, debido a que no tiene efectos de bloqueo a bajas velocidades y, además, la aerodinámica presenta energéticamente un mejor comportamiento respecto a las otras dos propuestas.

Resultados

Se seleccionó un diseño óptimo del frenado de disco con pilares de ventilación tipo NACA 66-209, en donde posteriormente se realizó el análisis experimental de Velocimetría por Imágenes de Partículas (VIP), llevando a cabo las siguientes actividades para el diseño geométrico del disco de freno:

Corte del disco por medio de grabadora y cortador láser

Para la manufactura del disco diseñado en Solidworks, fue necesario adquirir una lámina de acrílico de espesor de 3 mm. Asimismo, el uso de una grabadora y un cortador láser, donde se cortó el disco como se muestra en la Figura 5.

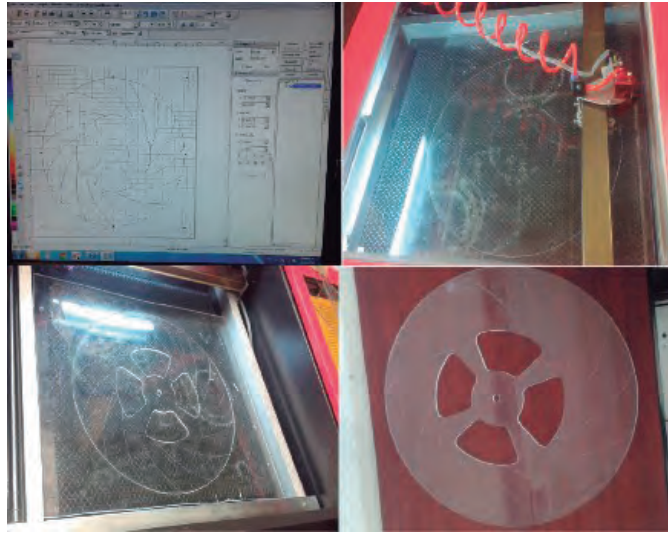


Figura 5. Corte del disco
Fuente: elaboración propia

Fabricación de pilares en impresora 3D

Luego de tener la base y la tapa del freno de disco para las pruebas en agua, se procedió a fabricar los pilares de ventilación tipo NACA 66-209, que fue de material ABS, por medio de impresión 3D, como se muestra en la siguiente Figura 6.



Figura 6. Impresión de álabes
Fuente: elaboración propia

Ensamble del disco de freno

Luego de tener la base, la tapa y los pilares de ventilación tipo NACA 66-209, se fijaron los componentes, que fueron ajustados con un eje roscado de 3/8" como se muestra en la Figura 7 (a). Como se mencionó anteriormente, el disco fue corregido con la finalidad de evitar turbulencias en la zona de succión, quedando finalmente como lo muestra la Figura 7 (b).



Figura 7. Discos ensamblados
a) Disco ensamblado. b) Disco ensamblado corregido
Fuente: elaboración propia

Evaluación fluido-dinámica del campo de velocidades en la succión y descarga del disco de freno por medio de VIP (Velocimetría por Imágenes de Partículas)

En esta fase se llevaron a cabo las pruebas de velocidad para el diseño geométrico del disco de freno propuesto y se analizaron las imágenes obtenidas. Para el análisis se utilizaron: 1) una pecera de 1,50 m de largo, 1,50 m de ancho y 0,60 m de alto; 2) un taladro donde se ajustó el disco de freno diseñado - las revoluciones del taladro se controlaron por medio de un variador de voltaje, dichas revoluciones se midieron usando un tacómetro y el taladro se ajustó utilizando un soporte de madera en el centro de la pecera 3) una cámara rápida Red Lake Motion Xtra Modelo HG-100K; 4) el software Motion Central que se utilizó para visualizar las grabaciones y 5) dos lámparas reflectoras de 2000 W para dar mayor iluminación a las pruebas y semillas de mostaza que representan las partículas moviéndose en el agua. Teniendo en cuenta lo anterior, se llevó a cabo el siguiente procedimiento experimental:

Grabación con cámara rápida Red Lake Motion Xtra Modelo HG-100K. En la configuración de la cámara rápida se usó el software Motion Central para apuntar a los álabes, tener buena visibilidad, ajustar el zoom, la resolución y el enfoque necesario para que se pudieran visualizar las partículas con claridad. La configuración del programa para la grabación fue establecida de la siguiente manera:

Modo: normal
Resolución: 1024x768
Exposición: normal
Longitud de sección: 5000
Rango: 60 fotogramas por segundo (FPS)

Procesamiento de imágenes por medio del programa Motion Central y seguimiento de la partícula en ImageJ. El análisis se realizó usando el agua como fluido de operación para facilitar el seguimiento de las partículas en su paso por el interior del disco y de esta forma observar su comportamiento desde que entran a la zona de succión hasta la salida. Para esto

fue necesario hacer una equivalencia entre las características del agua y del aire, debido a que este último pertenece a las condiciones reales a las que se va a operar el disco. Lo anterior se realizó con el fin de encontrar una equivalencia entre las velocidades del disco en aire y las que se usaron en la prueba del disco en agua suponiendo que el Número de Reynolds para ambos casos (agua y aire) debe ser el mismo, por lo que se utilizaron las siguientes ecuaciones 3 y 4:

$$Re_{\text{agua}} = \frac{V_{\text{agua}} * \rho_{\text{agua}}}{\mu_{\text{agua}}} \quad (3)$$

$$Re_{\text{aire}} = \frac{V_{\text{aire}} * \rho_{\text{aire}}}{\mu_{\text{aire}}} \quad (4)$$

Donde:

Re = Número de Reynolds

V = Velocidad de rotación del disco (rpm)

ρ = Densidad (kg/m³)

μ = Viscosidad dinámica

Al igualar las ecuaciones 3 y 4, se despeja la variable V_{agua} obteniendo la ecuación 5:

$$\begin{aligned} \frac{V_{\text{agua}} * \rho_{\text{agua}}}{\mu_{\text{agua}}} &= \frac{V_{\text{aire}} * \rho_{\text{aire}}}{\mu_{\text{aire}}} \\ V_{\text{agua}} &= \frac{(V_{\text{aire}})(\rho_{\text{aire}})(\mu_{\text{agua}})}{\rho_{\text{agua}} \mu_{\text{aire}}} \\ V_{\text{agua}} &= \frac{\rho_{\text{aire}}}{\rho_{\text{agua}}} \frac{\mu_{\text{agua}}}{\mu_{\text{aire}}} * V_{\text{aire}} \quad (5) \end{aligned}$$

Los datos para las condiciones de aire y agua son extraídos de Cengel (2007), a una temperatura ambiente de 22 °C.

$$\rho_{\text{aire}} = 1.196 \text{ kg/m}^3$$

$$\mu_{\text{aire}} = 1,82 \times 10^{-5} \text{ Pa/s}$$

$$\rho_{\text{agua}} = 997,6 \text{ kg/m}^3$$

$$\mu_{\text{agua}} = 9.684 \times 10^{-4} \text{ Pa/s}$$

Los valores de la velocidad de rotación del disco (condiciones de frontera) son 541, 641, 741 y 841 rpm, equivalentes a las velocidades lineales del vehículo a 60, 70, 80 y 90 km/h. Para efectuar el cálculo de las rpm del disco a partir de la velocidad del automóvil, se asumió un valor promedio del radio de la rueda de 29 cm, por lo que el factor de conversión de km/h a rpm quedó de la siguiente manera:

$$1 \frac{\text{km}}{\text{h}} \left(\frac{1000 \text{ m}}{1 \text{ km}} \right) \left(\frac{1 \text{ h}}{60 \text{ min}} \right) \left(\frac{1}{0.29 \text{ m}} \right) \left(\frac{1 \text{ rev}}{2\pi \text{ rad}} \right) = 9.147$$

$$1 \frac{\text{km}}{\text{h}} = \frac{\text{rpm}}{9.147}$$

La comprobación para las rpm mencionadas anteriormente se realizó de la siguiente manera:

$$\frac{541 \text{ rpm}}{9.147} = 59.2 \approx 60 \frac{\text{km}}{\text{h}}$$

$$\frac{641 \text{ rpm}}{9.147} = 70.07 \approx 70 \frac{\text{km}}{\text{h}}$$

$$\frac{741 \text{ rpm}}{9.147} = 81.01 \approx 80 \frac{\text{km}}{\text{h}}$$

$$\frac{841 \text{ rpm}}{9.147} = 91 \approx 90 \frac{\text{km}}{\text{h}}$$

Luego de tener las rpm de un disco en una prueba de aire, se calcularon las velocidades para la prueba de agua y de esta forma se obtuvo la equivalencia entre datos, utilizando la ecuación 5:

$$V_{\text{agua}} = 0,064 * V_{\text{aire}}$$

$$V_{\text{agua}} = 0,064 * 541 = 35 \text{ rpm}$$

$$V_{\text{agua}} = 0,064 * 641 = 41 \text{ rpm}$$

$$V_{\text{agua}} = 0,064 * 741 = 48 \text{ rpm}$$

$$V_{\text{agua}} = 0,064 * 841 = 54 \text{ rpm}$$

Las velocidades para la prueba en agua equivalentes a la prueba en aire son 35, 41, 48 y 54 rpm, respectivamente. Para mayor relevancia de los datos, se realizó la prueba de dos formas. En la primera se depositaron las partículas (semillas de mostaza) en la zona de succión del disco y posterior a esto se inició el movimiento del taladro. Este movimiento se describió como “sumergida”. La segunda forma fue primeramente accionar el taladro para iniciar el movimiento rotativo y luego de algunos segundos se arrojaron las partículas. A este movimiento se llamó “en rotación”.

En la Figura 8 se detalla el seguimiento de una partícula y su trayectoria total mientras atraviesa la zona de álabes para cada velocidad anteriormente descrita.

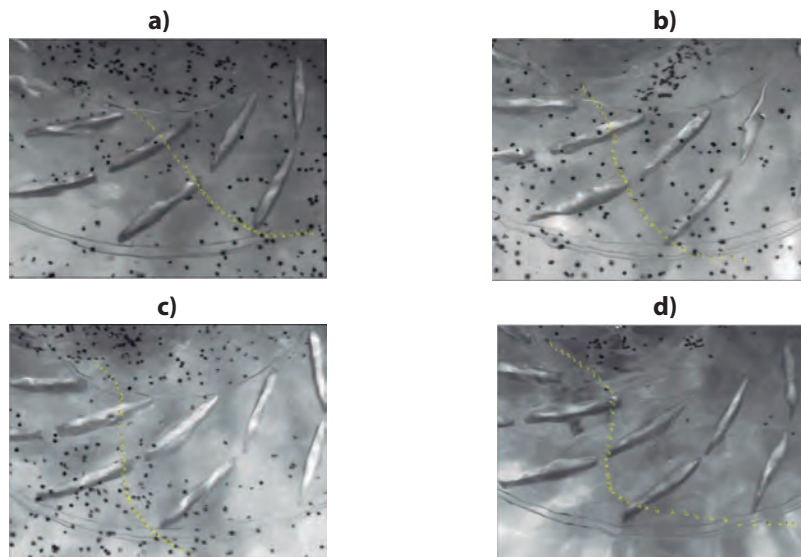


Figura 8. Trayectoria de las partículas a diferentes velocidades

a) Trayectoria total 35 rpm en rotación. b) Trayectoria total 41 rpm en rotación.
c) Trayectoria total 48 rpm en rotación. d) Trayectoria total 48 rpm en rotación

Fuente: elaboración propia

En la Figura anterior se muestra el movimiento general de la partícula a su paso por el interior de las pistas del disco. Cada punto mostrado en la secuencia anterior de imágenes está representado en esta imagen, de modo que se puede apreciar el comportamiento general. Cabe resaltar que cuanto más vertical sea el movimiento, mayor es la velocidad de la partícula.

Análisis de resultados

Luego de procesadas las imágenes en ImageJ se obtuvieron los valores de las coordenadas de cada partícula a lo largo de su trayectoria a través del disco de freno. Las coordenadas fueron dadas por el software en píxeles y posteriormente convertidas a milímetros. La conversión se obtiene de la medida de un álabe en píxeles y su medida real y, de esta manera, se llega al factor de conversión. La medida del álabe en píxeles es 381,2151623 px y en milímetros es 59,24. Estos valores nos dan una relación de 0,155397806 mm por cada pixel. Teniendo las posiciones de la partícula en milímetros se determinó su velocidad calculando el desplazamiento y tiempo transcurrido entre cada imagen, de donde se obtuvieron las Figuras 9, 10 y 12):

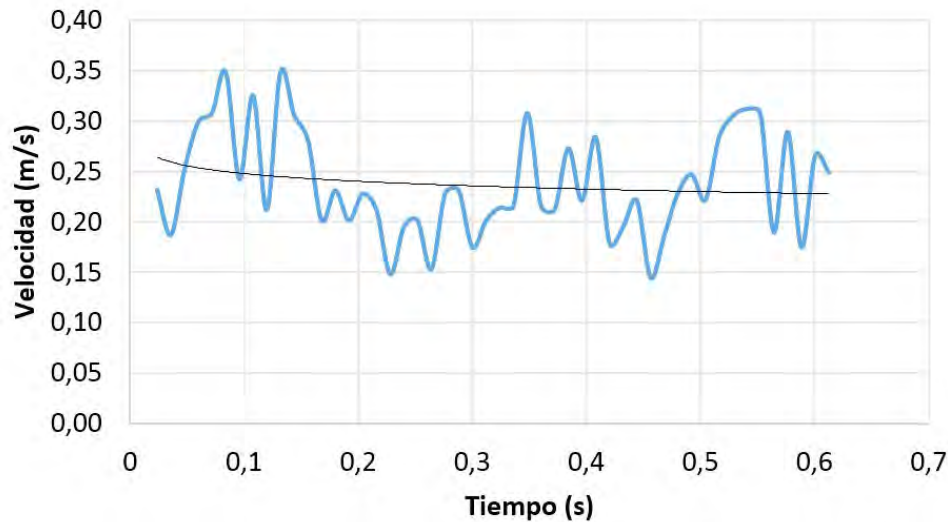


Figura 9. Velocidad radial a 35 rpm en rotación
Fuente: elaboración propia

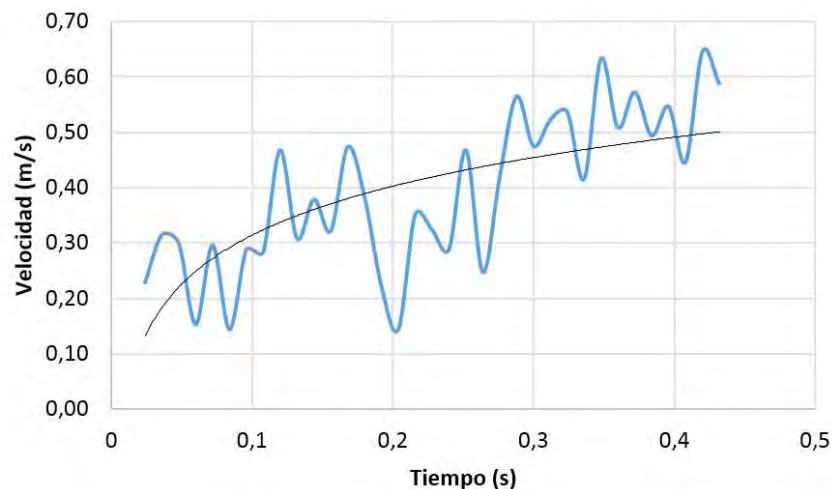


Figura 10. Velocidad radial a 41 rpm en rotación
Fuente: elaboración propia

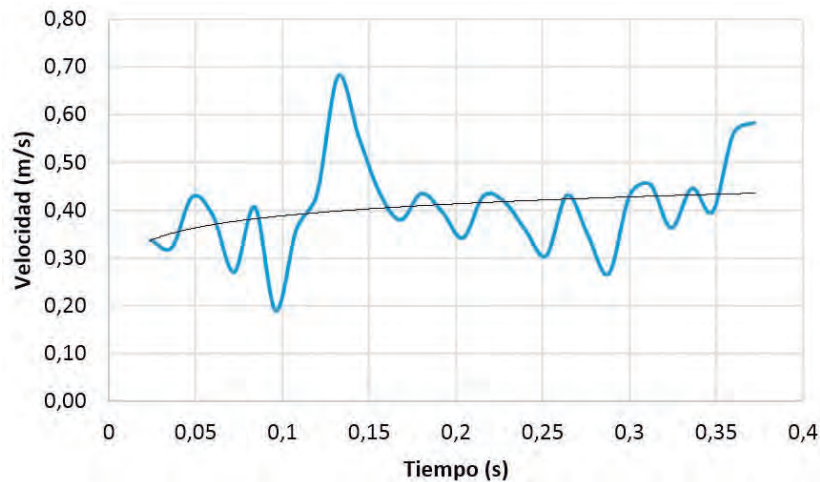


Figura 11. Velocidad radial a 48 rpm en rotación
Fuente: elaboración propia

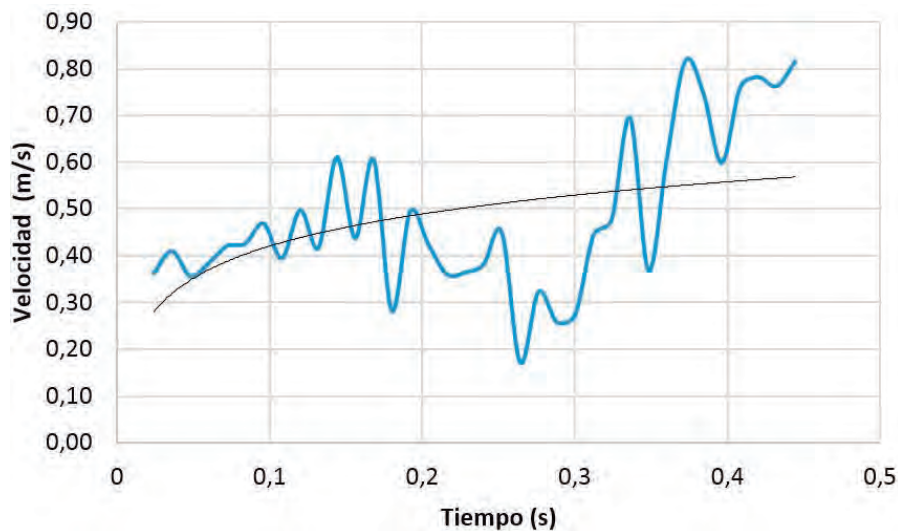


Figura 12. Velocidad radial a 54 rpm en rotación
Fuente: elaboración propia

Las anteriores figuras presentan el comportamiento de las partículas a lo largo de su recorrido por los canales de ventilación en el freno de disco, por lo que se puede suponer que a medida que aumenta la velocidad del freno, aumenta la succión de las partículas de aire y, por lo tanto, el enfriamiento del disco será mucho más rápido en términos de transferencia de calor y aerodinámica.

Conclusiones

La velocidad inicial para cada ensayo sumergido y en rotación, muestra diferencia entre cada rpm, respectivamente. En el caso de 35 rpm equivalente a un auto que va a una velocidad de 60 km/h, en la prueba sumergida arranca con una velocidad de 0,1151 m/s y para la prueba en rotación la partícula empieza con una velocidad de 0,2317 m/s en el primer tramo, velocidad que se mantiene constante durante el transcurso de la prueba; mientras que para el primer caso, la velocidad lleva una secuencia ascendente. Esto debido a que en la prueba con las partículas sumergidas antes de iniciar el movimiento, el disco arranca con una velocidad de 0 rpm, no hay ninguna fuerza de succión y, por lo tanto, las partículas están en reposo,

y en la prueba con el disco en rotación, al arrojarse las partículas, estas son atraídas instantáneamente a la zona de succión del disco provocado por el movimiento giratorio previo.

A medida que la velocidad del automóvil aumenta la succión es mayor, por lo que el tiempo de la prueba es generalmente menor para cada ensayo a velocidad mayor. Este flujo acelerado compensa la cantidad de calor producido al momento de frenar, debido a que hay una mayor cantidad de energía por reducirle al vehículo.

Finalmente, para la configuración de 20 álabes se evidenció el bloqueo en el flujo de aire a bajas velocidades de rotación ($N=541$ rpm), esto debido en gran medida a la reducción del área efectiva de la superficie del disco de freno, es decir, la cantidad de álabes perjudica directamente la circulación de aire. Teniendo en cuenta lo anterior, se concluye que el disco con la configuración de álabes de 15 es la mejor opción de diseño, ya que no tiene efectos de bloqueo a bajas velocidades y su óptimo funcionamiento en operación.

Referencias

- Bocîi, L. S. (2011). The influence of braking time on heat flow through the friction surfaces of the friction elements of disk brakes for railway vehicles. *Transport*, 26(1), 75–78. <https://doi.org/10.3846/16484142.2011.563494>
- Cengel, Y. (2007). *Transferencia de calor y masa. Un enfoque práctico*. (3ra ed). México: McGraw-Hill.
- Chi, Z.; He, Y.; Naterer, G. (2009). Convective heat transfer optimization of automotive brake discs. *SAE International Journal of Passenger Cars - Mechanical Systems*, 2(1), 961–969. <https://doi.org/10.4271/2009-01-0859>
- Echavez-Díaz, R. D.; Quintero-Orozco, A. (2017). *Estudio experimental del comportamiento dinámico del fluido del aire a través de un disco de freno automotriz con pilares de ventilación tipo NACA 66-209* (Tesis de pregrado). Universidad Francisco de Paula Santander, Ocaña, Santander.
- García-León, R. A. (2017). Thermal study in three vented brake discs, using the finite element analysis. *DYNA*, 84(200), 19–27. <http://dx.doi.org/10.15446/dyna.v84n200.55663>
- García-León, R. A.; Acosta Pérez, M. A.; Flórez-Solano, E. (2015). Análisis del comportamiento de los frenos de disco de los vehículos a partir de la aceleración del proceso de corrosión. *Tecnura*, 19(45), 53–63. <https://doi.org/10.14483/udistrital.jour.tecnura.2015.3.a04>
- García-León, R. A.; Echavez-Díaz, R. D.; Flórez-Solano, E. (2018). Análisis termodinámico de un disco de freno automotriz con pilares de ventilación tipo NACA 66-209. *INGECUC*, 14(2), 9–18. <https://doi.org/10.17981/ingecuc.14.2.2018.01>
- García-León, R. A.; Flórez-Solano, E. (2017). Dynamic analysis of three autoventilated disc brakes. Análisis dinámico de tres frenos de disco autoventilados. *Ingeniería e Investigación*, 37(3), 102–114. <https://doi.org/10.15446/ing.investig.v37n3.63381>
- García-León, R. A.; Flórez-Solano, E.; Acevedo-Peñaloza, C. (2018). *Análisis termodinámico en frenos de disco*. Bogotá, Colombia: ECOE Ediciones.
- García-León, R. A.; Pérez-Rojas, E. (2016). Analysis of the amount of heat flow between cooling channels in three vented brake discs. *Ingeniería y Universidad*, 21(1), 71–96. <https://doi.org/10.11144/Javeriana.iyu21-1.aahf>

- Hirasawa, S.; Kawanami, T.; Shirai, K. (2014). Numerical analysis of convection heat transfer on high-temperature rotating disk at bottom surface of air flow duct. In *ASME International Mechanical Engineering Congress and Exposition, Proceedings (IMECE)* (Vol. 8A). Dept. of Mech. Engineering, Kobe University, 1-1 Rokkodai, Nada-Kobe, Hyogo, Japan. <https://doi.org/10.1115/IMECE2014-36142>
- Ho, Y.-H.; Athavale, M. M.; Forry, J. M.; Hendricks, R. C.; Steinetz, B. M. (1996). Numerical simulation of secondary flow in gas turbine disc cavities, including conjugate heat transfer. In *ASME 1996 International Gas Turbine and Aeroengine Congress and Exhibition, GT 1996* (Vol. 1). CFD Research Corporation, Huntsville, AL, United States. <https://doi.org/10.1115/96-GT-067>
- Hu, W.; Tomg, B.; Liu, H. (2007). Dynamics of free straight swimming of anguilla anguilla including forward, braking and backward locomotion. *Journal of Hydrodynamics, Ser. B*, 19(4), 395–402. [http://dx.doi.org/10.1016/S1001-6058\(07\)60132-2](http://dx.doi.org/10.1016/S1001-6058(07)60132-2)
- Huang, Z. C.; Hwung, H. H.; Hsiao, S. C.; Chang, K. A. (2010). Laboratory observation of boundary layer flow under spilling breakers in surf zone using particle image velocimetry. *Coastal Engineering*, 57(3), 343–357. <http://dx.doi.org/10.1016/j.coastaleng.2009.11.004>
- Jiménez-García, C. A.; Rivera-López, J. E.; Casillas-Navarrete, J. M.; Gutiérrez-Paredes, G. J.; Medina-Ovando, A.; Arciniega-Martínez, J. L. (2015). Medición del campo de velocidad en la succión y descarga de un disco de freno automotriz con pilares de ventilación tipo gota, por medio de Velocimetría por Imágenes de Partículas (VIP). *Revista Congreso Iberoamericano de Ingeniería Mecánica*, (1), 1–9.
- Porta, D.; Echeverría, C.; Aguayo, A.; Cardoso, J. E. H.; Stern, C. (2016). Measurement of the Density Inside a Supersonic Jet Using the Background Oriented Schlieren (BOS) Technique. En J. Klapp., L. Di G Sigalotti., A. Medina., A. López., A. Ruiz-Chavarría (Ed.). *Recent Advances in Fluid Dynamics with Environmental Applications*. (115-124). Suiza: Springer Link. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-27965-7>
- Rivera, J.; Arciniega, J.; Gutiérrez, G. (2018). Estudio numérico del comportamiento dinámico del flujo de aire a través de un disco de freno automotriz con pilares NACA 66-209. *REMAI, Revista Multidisciplinaria de Avances de Investigación*, 4(1), 13-22.
- Senatore, C.; Wulfmeier, M.; Vlahinić, I.; Andrade, J.; Iagnemma, K. (2013). Design and implementation of a particle image velocimetry method for analysis of running gear-soil interaction. *Journal of Terramechanics*, 50(5), 311–326. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jterra.2013.09.004>
- Talati, F.; Jalallifar, S. (2018). Investigation of heat transfer phenomena in a Ventilated Disk Brake Rotor with Straight radial rounded vanes. *Applied Sciences*, 20 (8)(1812-5654), 3583–3592.
- Yan, H. B.; Feng, S. S.; Yang, X. H.; Lu, T. J. (2015). Role of cross-drilled holes in enhanced cooling of ventilated brake discs. *Applied Thermal Engineering*, 91, 318–333. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2015.08.042>



Sustitución de nitritos en un producto cárnico embutido por nabo (*Brassica rapa*) y sustitución parcial de harina de papa (*Solanum tuberosum*) por harina de cáscara de mango (*Mangifera indica*) para la evaluación del desarrollo de color y textura

Substitution of nitrites in a meat product stuffed with turnip (*Brassica rapa*) and partial replacement of potato flour (*Solanum tuberosum*) by mango peel meal (*Mangifera indica*) for the evaluation of the development of color and texture

Bernardo Carvajal-Macías¹
Seleny Pérez-Ramírez²
Yhoan Gaviria-Gaviria³
Juan Alzate-Agudelo⁴

¹Universidad de Antioquia (Colombia); correo: bernardo.carvajal@udea.edu.co

²Universidad de Antioquia (Colombia); correo: seleny.perez@udea.edu.co

³Universidad de Antioquia (Colombia); correo: yhoan.gaviria@udea.edu.co

⁴Universidad de Antioquia (Colombia); correo: jpablo.agudelo@udea.edu.co

Recibido: 19-06-2018 Aceptado: 01-04-2019

Cómo citar: Carvajal-Macías, Bernardo; Pérez-Ramírez, Seleny; Gaviria-Gaviria, Yhoan; Alzate-Agudelo, Juan (2019). Sustitución de nitritos en un producto cárnico embutido por nabo (*Brassica rapa*) y sustitución parcial de harina de papa (*Solanum tuberosum*) por harina de cáscara de mango (*Mangifera indica*) para la evaluación del desarrollo de color y textura. *Informador Técnico*, 83(1), 19-29.
<https://doi.org/10.23850/22565035.1518>

Resumen

El color en alimentos cárnicos es el producto de reacciones bioquímicas entre los compuestos naturales de la carne, tales como la mioglobina, la hemoglobina y el oxígeno y la acción de agentes externos, tales como los nitratos y nitritos. Recientemente, se ha descubierto que determinados vegetales pueden ser fuentes de nitratos para la elaboración de productos cárnicos, capaces de almacenarlos en sus diversas estructuras. El objetivo de este trabajo, fue evaluar el desarrollo del color característico de las salchichas, mediante la sustitución de nitritos sintéticos por una fuente natural como el nabo, además, realizar una sustitución parcial de harina de papa por harina de cáscara de mango, para conocer su influencia en la textura final del producto. Para esto se elaboraron 3 muestras (patrón con nitrato, extracto de nabo y nabo deshidratado). La cantidad de nitritos presente se evaluó por espectrofotometría, según el método 973.31 de la *Association of Official Analytical Chemists* (AOAC), los parámetros de colorimetría se determinaron por el método CIELAB y la textura se evaluó con el método Análisis de Perfil de Textura (TPA). Se encontró que la cantidad de nitritos es inferior al patrón y a lo reportado por otras literaturas (patrón: 84,87 ppm, extracto: 9,80 ppm y deshidratado: 11,81 ppm), en cuanto a los análisis de textura y colorimetría se identificaron diferencias significativas entre el patrón y las muestras con adición de nabo. Para concluir, se debe aumentar la proporción de nabo en la adición para lograr la concentración deseada de nitritos en el producto final, la adición de harina de cáscara de mango influye en la textura final del producto. Finalmente, se recomienda realizar evaluación

del contenido de nitritos en el nabo durante un tiempo de almacenamiento determinado y aumentar la proporción de nabo en la salchicha, evaluando que las características sensoriales no se vean afectadas.

Palabras clave: nitritos; nabo; salchicha; colorimetría; textura.

Abstract

The color in meat foods is the product of biochemical reactions between the natural compounds of meat, such as myoglobin, hemoglobin and oxygen and the action of external agents such as nitrates and nitrites. Recently it has been discovered that certain vegetables can be sources of nitrates for the production of meat products, capable of storing them in their various structures. The objective of this work was to evaluate the development of the characteristic color of the sausages by means of the substitution of synthetic nitrites by a natural source like the turnip, in addition to make a partial substitution of potato flour for mango peel flour to know its influence on the texture end of the product. For this, 3 samples were elaborated (Pattern with Nitral, Extract of turnip and dehydrated turnip). The amount of nitrites present was evaluated by spectrophotometry according to method 973.31 of the AOAC, the colorimetry parameters were determined by the CIELAB method and the texture was evaluated with the Texture Profile Analysis (TPA) method. It was found that the amount of nitrite is inferior to the standard and that reported by other literatures (pattern: 84.87 ppm, extract: 9.80 ppm and dehydrated: 11.81 ppm), in terms of texture and colorimetry analysis. They identified significant differences between the standard and the samples with the addition of turnip. To conclude, the proportion of turnip in the addition must be increased to achieve the desired concentration of nitrites in the final product, the addition of mango peel flour influences the final texture of the product. Finally, it is recommended to evaluate the content of nitrites in the turnip during a certain storage time and increase the proportion of turnip in the sausage, evaluating that the sensory characteristics are not affected.

Keywords: nitrites; turnip; sausage; colorimetry; texture.

Introducción

Las salchichas son embutidos elaborados a partir de carne y grasa de vacuno, equino, porcino o aves, dicha mezcla debidamente triturada, molida y mezclada, a la cual se le puede agregar aditivos alimentarios permitidos, dicha mezcla es embutida en una membrana artificial, cocida y eventualmente ahumada (Huanca; Solís, 2010). Respecto al color en los productos cárnicos, se genera por las reacciones bioquímicas entre los compuestos naturales de la carne, como la mioglobina, la hemoglobina y el oxígeno y la acción de agentes externos, como los nitratos y los nitritos (Pinzon; Hleap; Ordoñez Santos, 2015).

Actualmente, se ha descubierto que algunos vegetales pueden ser fuentes de nitratos para la elaboración de productos cárnicos, capaces de almacenar en sus diversas estructuras concentraciones de nitritos (Gallego, 2013), entre ellos el apio, la lechuga y el betabel que tienen concentraciones de entre 1500 a 2800 ppm de nitratos (Montiel-Flores; López-Malo; Bárcenas-Pozos, 2013), además de las acelgas, el pepino y el nabo (Hernández, 2008).

Diversas investigaciones buscan generar productos cárnicos reemplazando los nitritos de origen sintético por fuentes de origen vegetal. Ruiz-Capillas *et al.*, (2014) realizaron la sustitución de nitritos por una formulación que contenía apio, colorante natural y vitaminas C y E, encontrando que las salchichas reformuladas cuentan con condiciones similares a los productos elaborados con nitritos comerciales.

El nabo (*Brassica rapa*) *norfolk* cuello rosa o violeta, presenta sabor agrio o ácido, dulce, tierra o metálico; genera sensación pungente y astringente y su textura es fibrosa y firme (Helland *et al.*, 2015). Este se encuentra en un rango intermedio de composición de nitritos, siendo de 500 a 1000 mg/Kg de nitritos (Moreno; Soto; González, 2015), sin embargo, en un estudio al realizar la concentración, se encontró alrededor de 4800 mg/kg de nitratos y nitritos. Por lo tanto, se puede decir que el nabo es uno de los productos vegetales que más concentración de nitritos contiene (Vargas; Taborda, 2006).

Por otro lado, el contenido de fibra de la cáscara de mango criollo, oscila entre 47,68 % y 59,44 % (Torres-González; Jiménez-Munguía; Bárcenas-Pozos, 2014), lo cual concuerda con lo reportado por Sánchez (2005), quien establece que el contenido de fibra de esta cáscara es de 56,68 %, y el 29,46 % corresponde a fibra dietaria soluble. La Capacidad de Retención de Agua (CRA) se relaciona con la composición de la fibra dietaria, ya que a mayor cantidad de fibra dietaria soluble, dicha propiedad aumenta. La cáscara de mango criollo presenta una CRA aproximadamente de 4,07 g de agua/g fibra, además de una buena actividad antioxidante, debido a su contenido de polifenoles y carotenoides (Cañas; Restrepo; Cortés, 2011).

El objetivo principal de esta investigación fue evaluar el desarrollo del color característico de los productos procesados en una salchicha, mediante la sustitución de nitritos sintéticos por una fuente natural como el nabo. Complementario a esto se pretendió realizar una sustitución parcial de harina de papa por harina de cáscara de mango, para conocer su influencia, en la textura final del producto.

Materiales y métodos

Obtención de las materias primas

La carne empleada para la elaboración del producto fue de res, cerdo (brazuelo), pollo, carne mecánicamente deshuesada (CMD) y tocino. Éstas se obtuvieron de un mercado local del municipio de La Ceja, Antioquia. Los condimentos y aditivos empleados para el procesamiento, como la base Regal, accord, promax, harina de papa, humo líquido, color rojo punzo y orégano, fueron suministrados por la Universidad de Antioquia.

Preparación del sustituyente de nitritos

Extracto de nabo: el material vegetal fuente de los nitritos es el nabo variedad *norfolk* cuello rosa o violeta, provino de una finca ubicada en la vereda Quirama del municipio del Carmen de Viboral, Antioquia, en donde el método de cultivo de los nabos es orgánico y el tipo de producción es para abasto local, no para comercialización. El extracto se realizó a través del troceado y tamizado del nabo, de lo cual se obtuvo el jugo. Debido a la dureza que posee dicho vegetal, se realizó el procedimiento con adición de agua caliente (temperaturas aproximadas de 60-65 °C) y un posterior tamizaje para eliminar la fibra que no se requería para el proceso. Inmediatamente, se procedió a la concentración del extracto por medio de calentamiento y evaporación del agua adicionada al momento de la extracción, para esto se usaron temperaturas de 90-95 °C, hasta obtener el extracto concentrado.

Nabo deshidratado: el nabo se lavó y desinfectó, posteriormente se cortó en láminas para su deshidratación, lo cual se realizó en un horno de convección marca UNOX®, referencia *Rossella* a una temperatura de 90 °C durante 90 min. Luego del proceso de deshidratación, se disminuyó el tamaño de partícula en un procesador de alimentos marca NUTRIBULLET, referencia *Magic*. La harina se almacenó en bolsa de polietileno hasta su uso.

Elaboración de la harina de cáscara de mango

Se obtuvieron cáscaras de mango (comprados en un mercado local del municipio de La Ceja del Tambo, Antioquia), las cuales fueron lavadas y desinfectadas. Posteriormente se deshidrataron a 80 °C durante 120 min en un horno de convección marca UNOX®, referencia *Rossella*. Después de finalizado el tiempo de deshidratación, se procedió a disminuir el tamaño de partícula en un procesador de alimentos marca NUTRIBULLET, referencia *Magic*. La harina se almacenó en bolsa de polietileno hasta su uso.

Elaboración del embutido tipo salchicha

Para empezar, se realizó la recepción de las materias primas teniendo en cuenta los análisis fisicoquímicos, principalmente pH y temperatura de estas. También, se tuvieron en cuenta las características organolépticas de cada una, además, se verificó el peso de la materia prima con su respectivo retiro de partes no deseadas (venas, grandes porciones de grasas, entre otras). Posteriormente, se realizó el pesaje de los ingredientes de acuerdo a lo establecido en el formulador del producto.

A continuación, se realizó el proceso de molienda a la materia prima cárnica y grasa en donde se usó un disco de 4,5 mm de diámetro. Además, se tuvo precaución de mantener una temperatura inferior o igual a 12 °C, y, que no se mezclara la materia prima grasa con la carne para no afectar procesos posteriores. Seguidamente, se realizó el proceso de cutedo, en el cual se tuvo cuidado en el orden de adición de los ingredientes, la temperatura (inferior a 10 °C) y el tiempo de proceso (máximo de 8 min). Una vez terminado este proceso, se continuó con el embutido del producto en un tubular de celulosa calibre 22, haciendo uso de una embutidora manual con una capacidad máxima de 1 kg/bache. Posteriormente, se realizó el porcionado de la salchicha con una longitud aproximadamente igual entre ellas. El tratamiento térmico se realizó en dos secciones. La primera, en una cocción seca mediante un horno ahumador hasta que la temperatura interna del producto se mantuviera entre los 50-55 °C, asegurando una estabilización del color. Finalizado este proceso se pasó a la segunda sección del tratamiento térmico con una cocción húmeda de agua caliente, la cual no superó una temperatura de 80 °C, asegurando que el producto llegara a una temperatura interna de 72 °C para que se diera la cocción completa del mismo. Para finalizar el tratamiento térmico, el producto se llevó a una temperatura entre 0 y 4 °C evitando que este entre en contacto con el agua de enfriamiento para asegurar su inocuidad. Finalmente, el producto se empacó al vacío, asegurando un tiempo de conservación de 30 días sin ser abierto.

En cuanto a la formulación de las salchichas elaboradas con nabo, se emplearon los siguientes porcentajes: extracto de nabo 3 %, nabo deshidratado 2 %, para el patrón se empleó sal nitrante (nitral) al 0,1 %.

Determinación de nitritos

Para los tres tratamientos elaborados se determinó el contenido de nitritos, según el método *Association of Official Analytical Chemists* (AOAC) 973.31. Se pesaron 10 a 12 g de muestra finamente triturada en una balanza analítica marca Sartorius CP2245, depositándola en un *beaker* de 100 mL. Se adicionaron 40 mL de agua desionizada sin superar una temperatura de 80 °C. La muestra se transfirió a un matraz de 500 mL. El *beaker* que contenía la muestra se lavó con porciones sucesivas de agua caliente y se agregaron los lavados al matraz de 500 mL; posteriormente, se agregó agua destilada caliente hasta ajustar aproximadamente 300 mL, las muestras se llevaron a un baño de vapor durante 2 h con agitación ocasional. Luego se enfriaron a una temperatura ambiente. Aparte, se aforó con agua desionizada, se filtró y se tomó una alícuota del filtrado de 25 mL. Seguidamente, con una pipeta volumétrica se llevó a un matraz de 50 mL y se adicionaron 2,5 mL de sulfanilamida ($C_6H_8N_2O_2S$) con bureta y se mezclaron los ingredientes. A continuación, se dejó en reposo durante 5 min, pasado el tiempo se adicionó 2,5 mL de negro de eriocromo T ($C_{20}H_{12}N_3O_7SNa$) con bureta, se mezcló y se aforó con agua desionizada. Después se dejó reposar 15 min y se leyó la absorbancia en un espectrofotómetro marca Hewlett Packard, referencia Agilent serie 8453 UV-VIS a una longitud de onda de 540 nm.

Análisis de perfil de textura

Se desarrolló en un texturometro marca StableMicro Systems mod. TAXT 2i con una celda de carga de fuerza inicial de 30 kg y se realizó con una velocidad antes del test de 1mm/s. Durante el ensayo se utilizó una velocidad de 2 mm/s y después del test de 5 mm/s. El tiempo para la realización de cada ensayo fue de 5 s con un porcentaje de compresión del 40 %. Los parámetros analizados fueron dureza, masticabilidad y gomosidad. Dichos análisis fueron realizados a las tres muestras elaboradas patrón, extracto y deshidratado.

Análisis de colorimetría método CIELAB

Este ensayo se realizó en un equipo DIGI-EYE fabricado por VERIVIDE, usando un iluminante D-65. Dichos análisis fueron realizados a las tres muestras elaboradas patrón (salchicha elaborada con nitral), extracto y deshidratado (sustituyendo el nitral por nabo) tanto a la superficie de la salchicha como al mapa (parte interna) de la misma.

Análisis de los datos

Los datos obtenidos en los diferentes análisis fueron registrados y evaluados mediante el software Microsoft Office Excel 2016.

Resultados y discusión

Determinación de nitritos en salchichas

De acuerdo al método utilizado, en la Tabla 1 se relacionan los resultados obtenidos para el contenido de nitritos presente en las tres muestras de salchichas evaluadas:

Tabla 1.
Promedio del contenido de nitritos en las tres muestras de salchicha

Muestra	Concentración (ppm)
Patrón	84,87
Extracto	9,80
Deshidratado	11,81

Fuente: elaboración propia

Según la Resolución 4125 de 1991 del Ministerio de Salud y Protección Social de Colombia, el límite máximo permitido de nitritos en alimentos es de 200 ppm. Los valores obtenidos fueron inferiores a este referente, ya que la mayor concentración obtenida (84,87 ppm) fue en la muestra patrón, la cual se elaboró a partir de la adición de nitritos de origen sintético (nitral sal curante). Las otras muestras, que fueron elaboradas a partir de una fuente natural de nitritos, *B. rapa*, presentaron valores inferiores al patrón con la cantidad adicionada que reportan en otras investigaciones Vargas y Taborda (2006). Esto puede deberse, principalmente, a que en la fuente natural (*B. rapa*) se tienen originalmente nitratos, los cuales, debido a la actividad bacteriana de la carne, son degradados a nitritos. Estos últimos, son los que ejercen la acción de desarrollo de color en el producto y, por este motivo, si durante el proceso no se cuenta con un tiempo prolongado para que se dé la transformación de los nitratos a nitritos, no se dará un adecuado desarrollo del color.

De acuerdo a la formulación teórica del producto, los resultados obtenidos experimentalmente del patrón son inferiores, debido a que el aditivo (Nitral) tuvo un tiempo prolongado de almacenamiento, lo cual conlleva a que la reacción entre el nitral y la carne no se dé en la forma esperada.

Análisis de textura

Los parámetros evaluados en el análisis del perfil de textura (TPA) se presentan en la Tabla 2 y son graficados en la Figura 1.

Tabla 2.
Datos del análisis de textura (TPA) en las tres muestras de salchicha

Muestra	Dureza (g)	Gomosidad (g)	Masticabilidad (g)
Patrón	4254,3458±453,08	3177,2846±289,86	2966,664±265,89
Extracto	3968,7652±302,67	2813,2356±222,03	2551,369±176,42
Deshidratado	3797,4338±386,07	2211,8170±185,72	2554,433±164,24

Fuente: elaboración propia

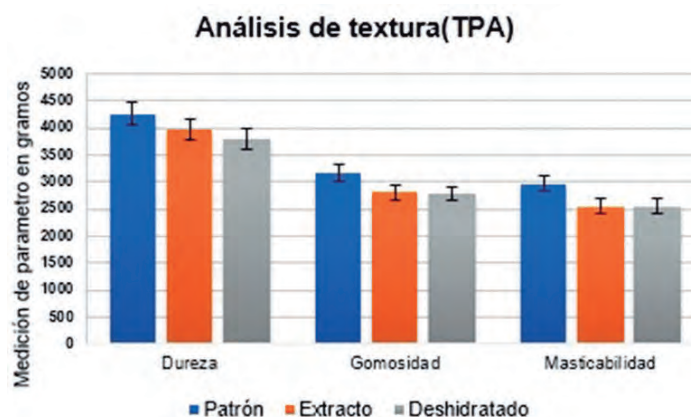


Figura 1. Parámetros de textura evaluados (Dureza, gomosidad y masticabilidad)
Fuente: elaboración propia

Mediante la Figura 1 se pudo determinar que existen diferencias significativas entre las muestras analizadas y el patrón (usando 95 % de confianza), sin embargo, entre las muestras de salchicha con extracto de nabo y nabo deshidratado no existe diferencia significativa. Esto se debe a que en ambas muestras se empleó una fuente natural para la obtención de los nitritos y para la muestra patrón se empleó una fuente sintética, la cual presenta una mayor actividad y estabilidad en el medio.

Al comparar la dureza de la salchicha patrón con las otras dos muestras evaluadas, se puede identificar que esta posee una dureza mayor ($4254,35 \text{ kg m s}^{-2}$), lo que indica que se requiere realizar una fuerza mayor de masticación al producto para obtener una deformación similar a la que se obtendría en las salchichas a las cuales se les realizó la sustitución. Estas reportaron valores de $3968,77 \text{ kg m s}^{-2}$ para la salchicha con el extracto y $3797,43 \text{ kg m s}^{-2}$ para la salchicha con el nabo deshidratado. Esta diferencia en la dureza se debe principalmente a la adición de harina de cáscara de mango en las salchichas con extracto de nabo y nabo deshidratado, la cual posee una capacidad de retención de agua mayor, respecto a la harina de papa que fue usada para la elaboración de la salchicha patrón, lo que genera un aumento del contenido de humedad en el producto final, dando como resultado una disminución en la dureza de la salchicha.

La gomosidad se define como la multiplicación de la dureza y la cohesividad. En la Figura 1 se puede evidenciar que esta se comportó de manera similar a la dureza, ya que presentó una disminución de la gomosidad de las muestras con la sustitución de nitritos ($2813,24 \text{ kg m s}^{-2}$ para la salchicha con extracto y $2211,82 \text{ kg m s}^{-2}$ para la salchicha con deshidratado) en relación con el patrón usado ($3177,29 \text{ kg m s}^{-2}$), siendo esta diferencia significativa para ambos casos. Sin embargo, entre las muestras estudiadas no existe una diferencia significativa. La gomosidad se encuentra directamente relacionada con el estado de la carne (Arnau, 2011), cuando ésta es demasiado magra, el producto final posee una dureza y una gomosidad mayor, que cuando se tiene producto con un contenido más elevado de grasa, favoreciendo la emulsión del producto, dando como resultado una dureza y gomosidad menor.

La masticabilidad de un producto cárnico procesado analizado por el método TPA, se define como la multiplicación de la dureza, la cohesividad y la elasticidad, siendo esta relación directamente proporcional. Por tanto, se obtuvo un comportamiento idéntico a los casos anteriormente mencionados, puesto que si disminuye la dureza, como es el caso de las

dos muestras analizadas, se tendrá una disminución de la masticabilidad del producto. La masticabilidad es una variable que confirma el comportamiento final del producto, puesto que este es la combinación de diferentes factores arrojados por el análisis de textura TPA.

Análisis de color mediante CIELAB

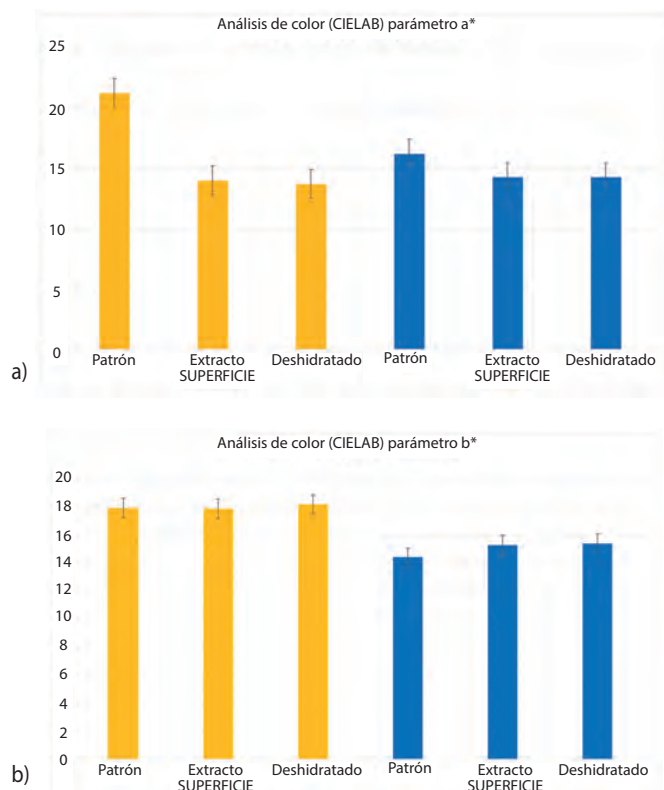
El análisis de color para las tres muestras se realizó por el método CIELAB, en el cual se evalúan las coordenadas a^* y b^* (de verde a rojo y de azul a amarillo, respectivamente), la luminosidad (L^*), el croma (C) y el tono (h). Este último obtenido por lectura directa desde el colorímetro. De acuerdo a estos aspectos evaluados se puede determinar la diferencia significativa que puede existir entre los tratamientos. En la Tabla 3 se presentan los datos obtenidos y en la Figura 2 se muestran los factores evaluados.

Tabla 3.

Promedio de los datos de análisis de color por método CIELAB para las tres muestras elaboradas en su interior (mapa) y en la parte externa (superficie)

SUPERFICIE					
Tratamiento	L	a	b	C	h
Patrón	56,49±0,48	21,30±0,27	17,96±0,26	27,87±0,15	40,14±0,71
Extracto	56,32±0,35	14,03±0,33	17,90±0,19	22,74±0,22	51,93±0,79
Deshidratado	56,82±0,14	13,72±0,46	18,18±0,24	22,78±0,27	52,97±1,09
MAPA					
Tratamiento	L	A	B	C	H
Patrón	64,31±0,27	16,24±0,29	14,41±0,09	21,71±0,24	41,59±0,45
Extracto	61,86±0,36	14,33±0,20	15,27±0,18	20,94±0,25	46,84±0,22
Deshidratado	61,53±0,23	14,28±0,30	15,39±0,15	21,00±0,14	47,14±0,84

Fuente: elaboración propia



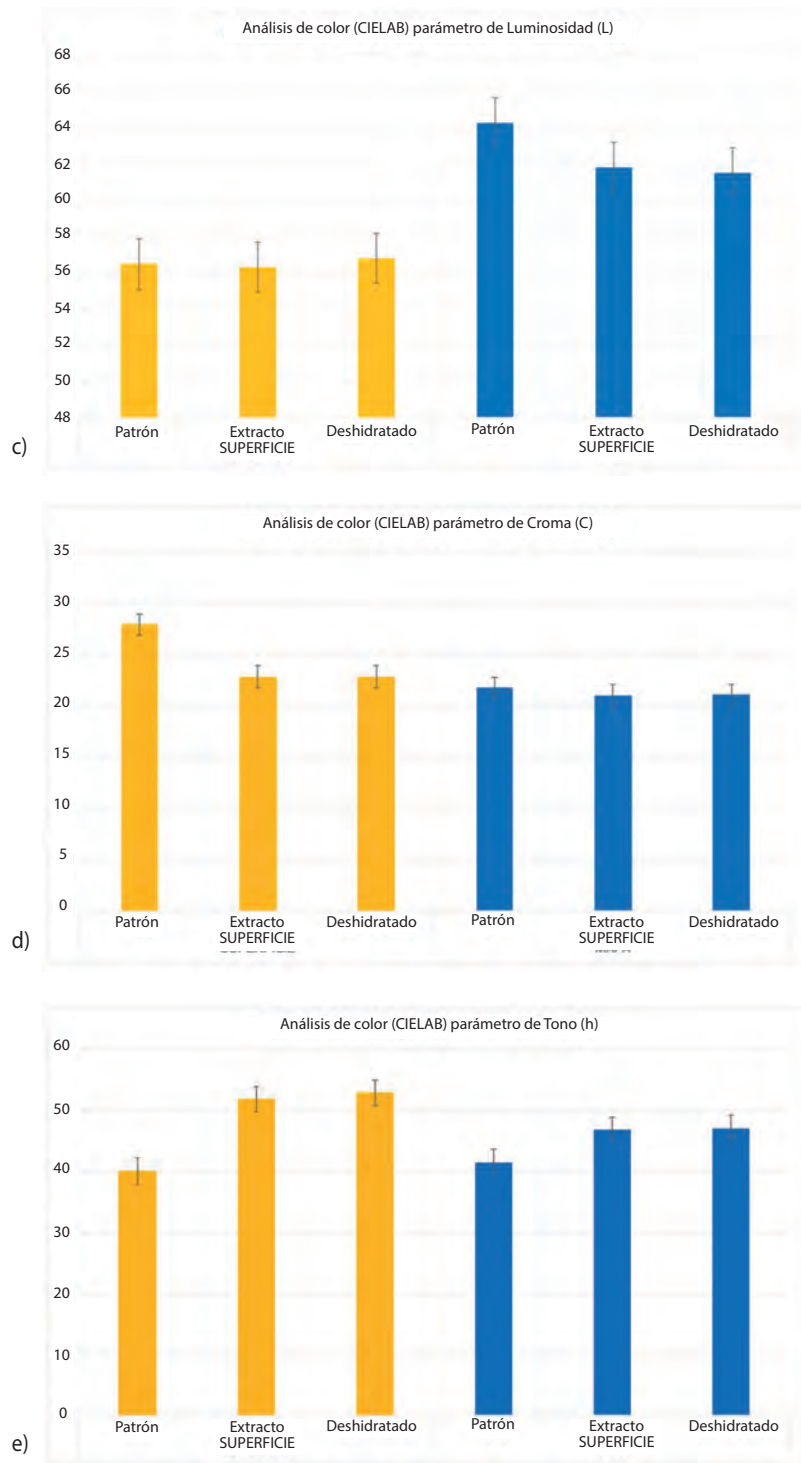


Figura 2. Análisis de color en las muestras de salchicha tanto para la superficie como para el mapa
Fuente: elaboración propia

El parámetro a^* (Figura 2a), el cual comprende la zona entre el color rojo hasta el color verde, presentó diferencias significativas entre las muestras evaluadas y el patrón tanto para la superficie como para el mapa. Este parámetro es importante en productos cárnicos, ya que en su mayoría son de color rojo o similares. Para el caso de los ensayos realizados, la diferencia entre el patrón y las muestras, tiene una relación directa con el contenido de nitritos, el cual se determinó inicialmente, ya que estos son los que aportan el desarrollo del color a los productos cárnicos procesados. A pesar de que la diferencia en la concentración de nitritos entre las muestras con adición de nabo y el patrón fue amplia (70 ppm de

diferencia aproximadamente) visualmente, al realizar el análisis colorimétrico no se evidencia con la misma intensidad, aunque en la superficie sí se encuentra una mayor variación que en el mapa, ya que en la superficie de las salchichas se presenta el desarrollo de la segunda piel, lo cual implica una mayor intensidad del color en la superficie que en el mapa.

Según un estudio realizado por Amensour *et al.*, (2010), explican que en los productos cárnicos la coordenada a^* está influenciada por diversos factores tanto tecnológicos (emulsión en frío o caliente, tipo de picado, entre otros.) como de composición (relación fracción magra / fracción grasa, entre otros). Por su parte, la luminosidad está relacionada con el agua libre en la superficie, el contenido de grasa, el tejido conjuntivo, el contenido y el tipo de hemopigmentos, entre otros.

En cuanto a la disminución de la coordenada a^* conforme se disminuyó el contenido de nitritos al realizar la sustitución por extracto de nabo o nabo deshidratado, puede explicarse por la reducción del nitrito a óxido nítrico (NO) y su consecuente reacción con la mioglobina para formar nitrosomioglobina que se estabiliza por tratamiento debido a que a menor cantidad de nitritos, menor cantidad de reacciones formadoras de nitrosomioglobina. Estos resultados coinciden con los obtenidos por Deda; Bloukas y Fista (2007), quienes trabajaron con salchichas de carne y cerdo adicionadas con nitrito de sodio y pasta de tomate.

Respecto a la evaluación del parámetro de color b^* , este siguió un comportamiento similar al estudiado en el parámetro a^* , presentando una variación mayor entre el patrón y las muestras, lo que puede estar relacionado con el proceso de formación de la segunda piel en la salchicha, en el que se presenta un mayor desarrollo del color amarillo, debido al aporte de este color por parte del nabo tanto deshidratado como en extracto. Este efecto no se evidencia de igual forma que con la adición de nitrato (Deda *et al.*, 2007).

Por otra parte, en la evaluación colorimétrica de las muestras de salchicha se observó que el valor de luminosidad (L^*) no representa diferencias significativas, es decir, teniendo en cuenta un valor $p < 0,05$; esto ocurre tanto para la superficie como para el mapa.

La coordenada de croma (C) representa el grado de saturación del color en las muestras. Para el caso de la superficie se presentó variación a pesar de no ser significativa, sin embargo, en el mapa no existe esta diferencia, lo cual puede estar relacionado con las razones expuestas anteriormente para las demás coordenadas.

Finalmente, en la coordenada h, donde se refleja la información sobre el tono de las salchichas, se presentó un comportamiento inverso a las demás, ya que las muestras con adición de nabo reflejan valores superiores al patrón, siendo esta una diferencia significativa tanto para la superficie como para el mapa.

Las diferencias en el color entre las salchichas de diversos estudios están relacionadas también con las características de color de los principales ingredientes utilizados en la elaboración de las mismas (Isaza; Restrepo; López, 2012).

Conclusiones

De los resultados obtenidos en el presente trabajo se puede concluir que, según el análisis de nitritos, la concentración de nabo tanto deshidratado como en extracto, debe ser en una mayor proporción a la empleada en el actual estudio si se desea obtener un mayor desarrollo de color.

La sustitución parcial de la harina de papa por harina de cáscara de mango disminuye la dureza, gomosidad y masticabilidad en la salchicha, debido a que esta última presenta una mayor CRA.

Con la concentración de nitritos de fuente natural empleados, se pudo obtener un producto con colores de tonalidad rojo, característico de los productos cárnicos.

Agradecimientos

A la profesora Nelly Ospina de Barreneche, docente titular de la Universidad de Antioquia, al señor Hernán Darío Villa Montoya, de Industrias Zenú S.A. Al señor Edwin Arcila, técnico de las plantas móviles de la Universidad de Antioquia. A la profesora Rosario Echeverri, coordinadora del Laboratorio de Análisis Físicoquímico de Alimentos de la Universidad de Antioquia, y al señor Andrés Román, coordinador de Laboratorios Universidad de Antioquia Seccional Oriente.

Referencias

- Amensour, M.; Zapata, E. S.; Abrini, J.; Nadal, E. S.; Barberá, M. E. S.; de Vera, C. N. R.; López, J. F. (2010). Estabilidad del color en salchichas de pollo tipo Frankfurt adicionadas con extracto acuoso de hoja de *Myrtus communis*. *Óptica pura y aplicada*, 43(4), 251-257.
- Arnau, J. (2011). Problemas de los embutidos crudos curados. *Revista Eurocarne*, 194.
- Cañas, Z.; Restrepo, D.; Cortés, M. (2011) Revisión: productos vegetales como fuente de fibra dietaria en la industria de alimentos. *Revista Facultad Nacional de Agronomía Medellín*, 64(1), 6023-6035.
- Deda, M. S.; Bloukas, J. G.; Fista, G. A. (2007). Effect of tomato paste and nitrite level on processing and quality characteristics of frankfurters. *Meat Science*, 76(3), 501-508. <https://doi.org/10.1016/j.meatsci.2007.01.004>
- Gallego, J. (2013). *Fuente alternativa de nitratos para la industria cárnica: Influencia del extracto de apio y cultivos iniciadores sobre el color del jamón cocido tipo Medellín*. (Tesis doctoral). Universidad Miguel Hernández, Valencia, España.
- Helland, H. S.; Leufvén, A.; Bengtsson, G. B.; Skaret, J.; Lea, P.; Wold, A. B. (2016). Storage of fresh-cut swede and turnip in modified atmosphere: effects on vitamin C, sugars, glucosinolates and sensory attributes. *Postharvest Biology and Technology*, 111, 150-160. <https://doi.org/10.1016/j.postharvbio.2015.07.028>
- Hernández, J. M. (2008). Toxinas vegetales de origen natural [Material de clase]. Toxicología alimentaria, Universidad Autónoma de Madrid, Madrid, España.
- Huanca, D; Solís R. (2010). *Determinación de nitritos y nitratos en hot dogs de consumo directo por estudiantes del 5º y 6º grado, de educación primaria del distrito de Villa El Salvador*. (Tesis de pregrado). Universidad Nacional de San Marcos. Lima, Perú.
- Isaza, Y.; Restrepo, D.; López, J. (2012). efecto de la inclusión de un extracto de cereza (*Prunus avium* L.) sobre el estado de oxidación y las características físicoquímicas y sensoriales de salchichas tipo Frankfurt. *Revista Facultad Nacional de Agronomía Medellín*, 65(1), 6541-6552. Recuperado de: <https://revistas.unal.edu.co/index.php/refame/article/view/30782>
- Ministerio de Salud. (5 de abril de 1991). Resolución No. 4125 de 1991. Recuperado de: https://www.invima.gov.co/images/stories/resoluciones/resolucion_4125_1991.pdf
- Montiel-Flores, E.; López-Malo, A.; Bárcenas-Pozos M. E. (2013). Vegetales como fuentes de nitritos: una alternativa para el curado de carnes. *Temas Selectos de Ingeniería de Alimentos*, 7(1), 57-67.
- Moreno, B.; Soto, K.; González, D. (2015). consumo de nitrato y su potencial efecto benéfico sobre la salud cardiovascular. *Revista Chilena de Nutrición*, 42(2), 199-205. <https://doi.org/10.4067/S0717-75182015000200013>

- Pinzón, L. X.; Hleap, J. I.; Ordoñez, L. E. (2015). Análisis de los parámetros de color en salchichas Frankfurt adicionadas con extracto oleoso de residuos de chontaduro (*Bactris Gasipaes*). *Información Tecnológica* 26(5), 45-54. <https://doi.org/10.4067/S0718-07642015000500007>
- Ruiz-Capillas, C.; Tahmouzi, S.; Triki, M.; Rodríguez-Salas, L.; Jiménez-Colmenero, F.; Herrero, A. M. (2015). Nitrite-free Asian hot dog sausages reformulated with nitrite replacers. *Journal of food science and technology*, 52(7), 4333-4341. <https://doi.org/10.1007/s13197-014-1460-1>
- Sánchez, B. S. (2005). *Caracterización fisicoquímica y funcional de la fibra dietaria del fruto del níspero (Eriobotrya japonica) y la cáscara de mango obo (Mangifera indica L.)*. (Tesis de pregrado). Universidad Tecnológica de la Mixteca, Huajuapán de León, Oax., México.
- Torres-González, M. P.; Jiménez-Munguía, M. T.; Bárcenas-Pozos, M. E. (2014). Harinas de frutas y/o leguminosas y su combinación con harina de trigo. *Temas Selectos de Ingeniería de Alimentos*, 8(1), 94-102.
- Vargas del Río, L. M.; Taborda, G. (2006). Nitrosaminas en productos cárnicos: formación e impacto. *Revista Biosalud*, 5, 101-131.



Aplicación de FeO, ZnO y CuO como pigmentos en compuestos cerámicos

FeO, ZnO and CuO application as pigments in ceramic compounds

Karol Roa-Bohórquez¹
Ricardo Paredes-Roa²
Luis Lara-González³
Gabriel Peña-Rodríguez⁴

¹Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia (Colombia); correo: karol.roa@uptc.edu.co;
ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-8696-2232>

²Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia (Colombia); correo: ricardo.paredes@uptc.edu.co;
Colombia; ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-9172-8763>

³Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia (Colombia); correo: luisangel.lara@uptc.edu.co;
ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-2849-0174>

⁴Universidad Francisco de Paula Santander (Colombia); correo: ggabrielp@yahoo.com;
ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-7114-9174>

Recibido: 01-08-2018 Aceptado: 22-03-2019

Cómo citar: Roa-Bohórquez, Karol; Paredes-Roa, Ricardo; Lara-González, Luis; Peña-Rodríguez, Gabriel (2019). Aplicación de FeO, ZnO y CuO como pigmentos en compuestos cerámicos. *Informador Técnico*, 83(1), 30-40.
<https://doi.org/10.23850/22565035.1592>

Resumen

Entre los problemas más relevantes de la industria alfarera de Boyacá, Colombia, se encuentra la ausencia de una gama de tonalidades uniformes de sus productos finales. El color, por tratarse de una propiedad física fácilmente observable, se convierte en un criterio distintivo para clientes potenciales que buscan un producto diferenciador y a la vanguardia dentro de un medio en constante cambio. Por tal razón, el presente trabajo propuso un compuesto cerámico elaborado a partir de arcillas montmorillonitas y óxidos metálicos tales como FeO, CuO y ZnO. Las arcillas se caracterizaron por Fluorescencia de Rayos X (FRX) y de acuerdo a la composición química de cada arcilla, se determinaron las concentraciones de los óxidos metálicos como agentes colorantes, los cuales variaron de 1 a 8 % (en peso). Los prototipos cerámicos se conformaron por el método de prensado uniaxial a una presión de compactación constante de 15 MPa, posteriormente se sinterizaron a 950 °C durante 2 h. Mediante histogramas RGB se realizaron los análisis de color de los especímenes, los resultados mostraron cambios significativos en la pigmentación del compuesto cerámico reportando tono rojo, café y blanco. Lo anterior, hace viable la utilización de estos óxidos como pigmentos termoestables en la elaboración de productos cerámicos tales como: tejas, tabletas y baldosas, entre otros diseños cerámicos que hoy en día solo se pueden encontrar en tiendas de cerámica avanzada.

Palabras clave: pigmentos cerámicos; histogramas RGB; innovación; cerámicos; industria alfarera.

Abstract

Among the most relevant problems of the pottery industry in Boyacá, Colombia, is the absence of a range of uniform shades in their final products. The color, being an easily observable physical property, becomes a distinctive criterion for potential customers seeking a differentiating and cutting-edge product within a constantly changing environment. For that reason, the present work proposed a ceramic compound elaborated from montmorillonite clays and metal oxides such as FeO, CuO and ZnO. The clays were characterized by X-Ray Fluorescence (XRF) and according to the chemical composition of each clay, the concentrations of metal oxides were determined as coloring agents, which varied from 1 to 8 % (by weight).

The ceramic prototypes were shaped by uniaxial pressing method at a constant compaction pressure of 15 MPa, and then sintered at 950 °C for 2 h. RGB histograms were used to analyze the color of the specimens, the results showed significant changes in the pigmentation of the ceramic compound reporting red, brown and white tone. This makes viable the use of these oxides as thermosetting pigments in the production of ceramic products such as roof tiles, tablets and tiles among other ceramic designs, which today can only be found in advanced ceramic shops.

Keywords: ceramic pigments; RGB histograms; innovation; ceramics; pottery industry.

Introducción

La fabricación de cerámica en la región cundiboyacense en Colombia, data desde 1300 a.C. (Prieto, 2010), con la elaboración de ollas de barro y otros utensilios para el uso diario por parte de los *muisca*s. Luego, con la llegada de los españoles, la alfarería evolucionó notablemente debido al uso de hornos para la cocción de la arcilla con la cual se elaboraban ladrillos para la construcción de viviendas.

La técnica actual de fabricación de ladrillos comunes, se lleva a cabo con la combinación de arcillas rojas (en la mayoría de los casos illitas y montmorillonitas) (González; García, 1966) y desgrasantes (arenas silíceas), elementos que cumplen la función de disminuir la plasticidad de la mezcla y la contracción (Amado; Villafrades; Tuta, 2011). Una vez son homogeneizadas las materias primas, se agrega agua para el moldeo y se sinterizan las piezas a diferentes temperaturas dependiendo de la arcilla y el uso de las piezas (Torres; Hernández; Paredes, 2012). Como resultado, de acuerdo a la norma NTC 4205-1 (ICONTEC, 2009) se obtienen productos con diferentes características estructurales como resistencia mecánica entre 3-14 MPa y porcentajes de absorción de agua por debajo del 17 %.

La alfarería se ha convertido en una de las fuentes de sustento de la región y, asimismo, en una actividad generadora de problemáticas ambientales debido a los hornos que se utilizaban (Rojas; Carreño; Gómez, 2015). Estos hornos eran altamente contaminantes y poco eficientes. No obstante, hoy en día estos factores se han mitigado con reconversión tecnológica (Quijano; Díez-Silva; Montes-Guerra; Castro-Silva, 2014), realizando inversión en hornos con mayores eficiencias de combustión y menores emisiones a la atmósfera. Sin embargo, aunque las empresas alfareras realizaron un avance tecnológico importante, la técnica ha permanecido intacta desde hace más de un siglo (Simbaqueba, 1958), lo cual ha impedido innovar en aspectos importantes del diseño del producto como lo es el color.

El color ha sido uno de los problemas más representativos en la industria alfarera, la razón es la complejidad que se presenta en la modificación de la tonalidad de las arcillas, debido al desconocimiento de materias primas que sirvan como pigmentos termoestables e insolubles (Monrós; Badenes; García; Tena, 2003) y mantengan sus propiedades en la matriz original después del proceso de sinterización.

Así pues, la tonalidad en la superficie del ladrillo depende de la composición química y su proceso de sinterización (Gippini, 1966; Fernández, 1998; Guerrero; Espinel; Acevedo; Guillermo, 2017). Por ello, los métodos conocidos por la mayoría de las empresas ladrilleras para modificar el color, consisten en elevar la temperatura de cocción en el horno, mantener la misma por largos periodos (aproximadamente 24 h) o realizar una mezcla de arcillas (Patent No. 348,443, 1886; Betancourt; Martirena; Day; Díaz, 2007). Los dos primeros métodos generan múltiples efectos secundarios no deseados en el producto final tales como: desconchamientos, fragilidad, corazones negros, eflorescencias, sobrecostos e inventarios en proceso (Roa-Bohórquez; Paredes-Roa; Lara-González, 2018). Así mismo, se generan efectos en el medio ambiente debido a la mayor utilización del carbón, un recurso no renovable que aumenta los niveles de contaminación atmosférica. Además, la mezcla de arcillas requiere una variedad de minerales especiales y en la región cundiboyacense es complejo encontrar arcillas de este tipo.

Entre los sistemas tradicionales de medición de color, el RGB es uno de los más utilizados basado en el modelo de síntesis aditiva. Este modelo reúne los tres colores primarios (rojo, verde y azul) para la representación del color a través de receptores RGB, como cámaras, escáneres, sensores, entre otros.

Por consiguiente, en el presente estudio se busca dar una solución a la problemática planteada mediante la aplicación de pigmentos cerámicos que son generalmente utilizados en arcillas caoliníticas y no en arcillas comunes (montmorillonitas), con el fin de generar una gama de tonalidades en la superficie del ladrillo y diversificar la producción actual, ya que no solo se podrán fabricar ladrillos para fachada, también se podrán realizar tabletas, tejas, baldosas entre otros diseños cerámicos, que hoy en día se pueden encontrar en tiendas de cerámica avanzada.

Materiales y métodos

Materias primas y elaboración de muestras

Se recolectaron dos muestras de arcilla a través de un muestreo manual de cono y cuarteo, según los lineamientos de la Norma ASTM C 702 (2011). Este procedimiento se llevó a cabo en un yacimiento ubicado en el kilómetro 3 vía Sogamoso-Morcal, en el departamento de Boyacá, Colombia.

Para lograr la gama de tonalidades, se seleccionaron tres óxidos metálicos de uso común: óxido de hierro Fe_2O_3 (Sigma Aldrich, 95 %), óxido de zinc ZnO (Sigma Aldrich, 99 %) y óxido de cobre CuO (Sigma Aldrich, 95 %). Se clasifican como pigmentos inorgánicos de tipo sintético para el óxido de hierro y de tipo opaco para los óxidos de zinc y cobre (ver Figura 1).

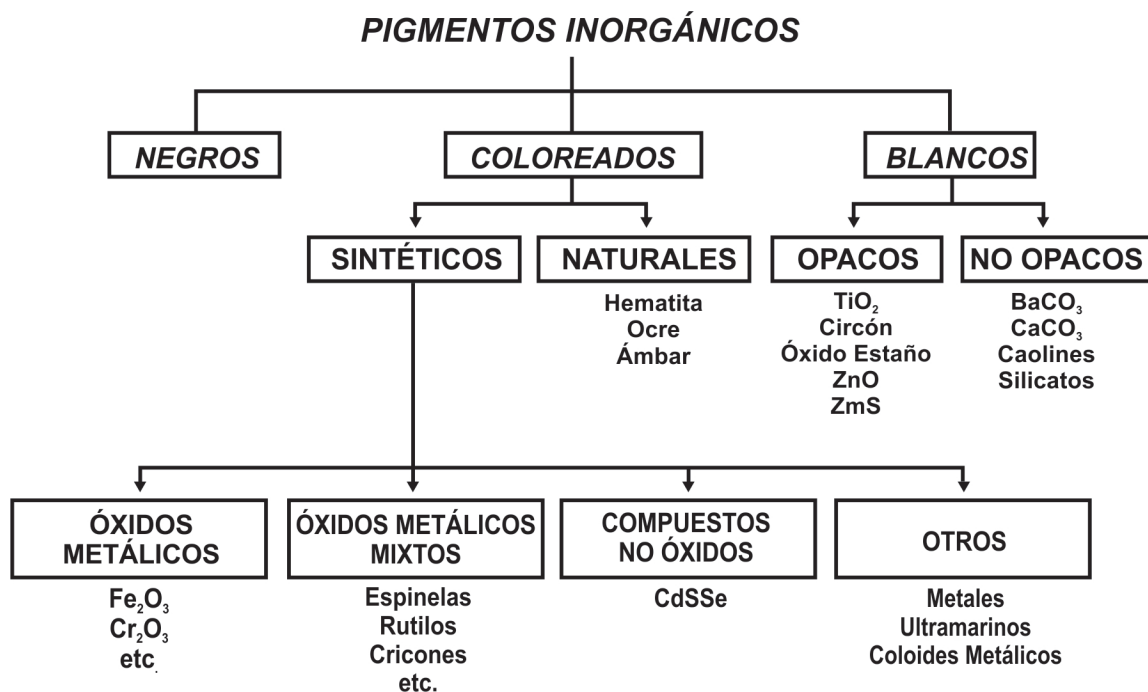


Figura 1. Clasificación de los pigmentos inorgánicos según el color deseado
Fuente: Monrós *et al.*, (2003)

La mezcla utilizada para la elaboración de las probetas consistió en: 2, 4, 6 y 8 % de óxido de hierro para la muestra de arcilla 2; 1, 2, 3 y 4 % de óxido de zinc y 4 % de óxido de cobre, para ambos óxidos se utilizaron las muestras de arcilla 1 y 2. Los prototipos se obtuvieron en forma de membranas circulares por el método de prensado uniaxial, manejando una presión de compactación constante de 15 MPa. Seguidamente, las membranas se sometieron a un proceso de secado a 100 ± 5 °C por 24 h hasta alcanzar una masa constante.

El proceso de sinterización se llevó a cabo en una mufla eléctrica Thermolyne ref. F6018 marca Thermo Scientific, la cual se programó para alcanzar dos rampas de sinterización a 600 y 950 °C, con una velocidad de calentamiento de 5 °C/min. Cada temperatura se mantuvo constante durante un intervalo de 2 h (ver Figura 2).

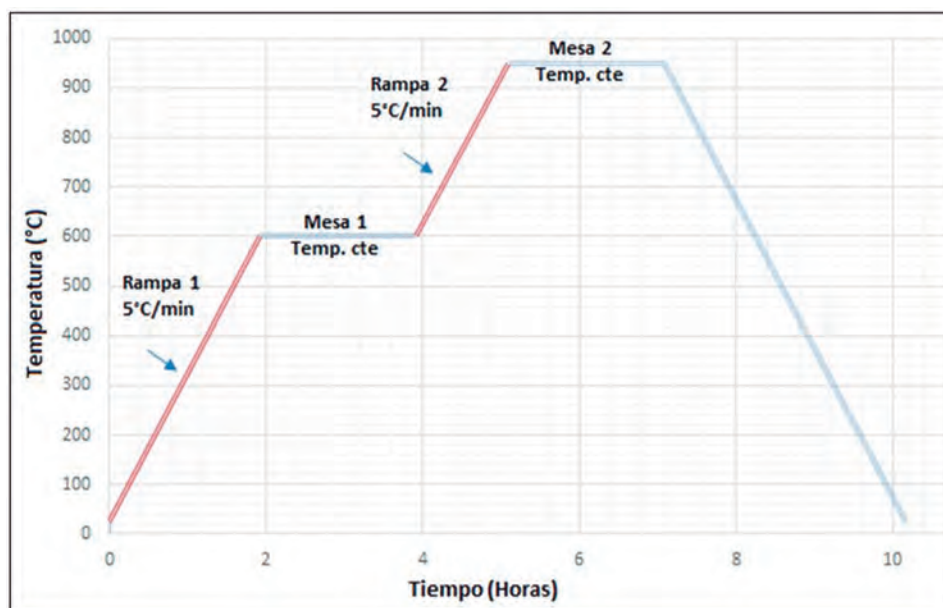


Figura 2. Curva de sinterización utilizada para la obtención de las membranas cerámicas
Fuente: elaboración propia

El análisis del color en cada membrana sinterizada se realizó con el software de procesamiento de imagen digital de dominio público ImageJ. Previo al estudio se fabricaron cajas de fotografía de iluminación constante con bombillas de 1000 W y se tomaron los siguientes parámetros estándar: ISO 100 para la no generación de ruido, apertura de diafragma de 1,5 y velocidad de obturación de 1/2000 s. La cámara fotográfica utilizada en el estudio es de referencia Nikon d5300.

Fluorescencia de Rayos X (FRX)

La composición química de las arcillas se determinó por Fluorescencia de Rayos X (FRX) en un equipo marca PANalytical MiniPal 2. Previo al análisis, cada muestra se trituro hasta alcanzar una granulometría malla #200 ASTM (0,08 mm). Los espectros de composición obtenidos se presentan en la Figura 3. De acuerdo al análisis semicuantitativo ambas muestras de arcilla revelaron que el compuesto más abundante es el óxido de silicio (SiO_2), con un contenido de 61,8 % para la muestra 1 y 56,1 % para la muestra 2 (Tabla 1). Después del óxido de silicio, la alúmina (Al_2O_3) se caracterizó por constituir un porcentaje importante en las muestras con 29 y 22 %, respectivamente.

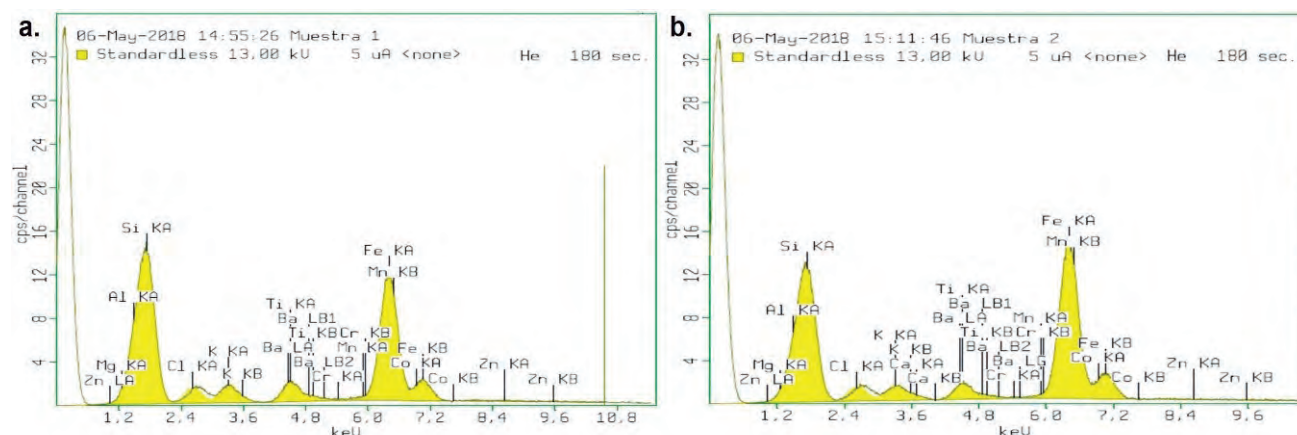


Figura 3. Espectros de fluorescencia de rayos X de polvos de arcilla.

a). Muestra 1
b). Muestra 2
Fuente: elaboración propia

Tabla 1.
Composición química de las muestras de arcilla en estudio

Muestra	Componente químico										
	(%)										
	Al ₂ O ₃	SiO ₂	Fe ₂ O ₃	ZnO	TiO ₂	CuO	K ₂ O	MnO	Cl	MgO	BaO
Arcilla 1	29	61,8	4,57	0,05	0,9	0,03	1,3	0,09	1,1	0,5	0,3
Arcilla 2	22	56,1	12,7	0,08	1,3	0,01	2,5	0,19	2,8	0,9	0,4

Fuente: elaboración propia

Según lo reportado por Alvarado (1985), la relación molar de los óxidos de sílice y aluminio permite clasificar las arcillas, como caolinitas, ilitas o montmorillonitas. En este caso, la relación molar SiO₂/Al₂O₃ en ambas muestras es de 2:1, lo que las clasifica como arcillas montmorilloníticas. Este tipo de arcillas se caracterizan por estar químicamente compuestas por SiO₂ con porcentajes que varían entre 50 y 65 % y Al₂O₃ con participación entre 10 y 25 % (Bailey, 2013). En este caso, la muestra 1 contiene alúmina con un porcentaje superior al 25 %, sin embargo, no alcanza a clasificarse como una arcilla con propiedades refractarias, las cuales comprenden composiciones superiores al 40 % de óxido de aluminio (Díaz, 2015; Sánchez; Orozco; Peñaloza, 2014).

Por otro lado, se observa que los óxidos colorantes Fe₂O₃ y TiO₂, se presentan en concentraciones altas en la muestra de arcilla 2, con porcentajes de 12,7 para el óxido de hierro y 1,3 % para el dióxido de titanio. De acuerdo a lo anterior, cuando la contribución de ambos compuestos supera el 1 %, las arcillas no tendrán una tonalidad blanca después del proceso de sinterización, así como lo reportan Avgustinik (1983), Prada (2015) y Zuluaga *et al.* (2016). Al comparar los porcentajes hallados en la muestra 1 (4,57 % de Fe₂O₃ y 0,9 % de TiO₂), se puede afirmar que con la muestra de arcilla 2 se obtendrán tonalidades más rojizas en el producto final (Rodríguez; Rivera; Aza, 1999). Por tal razón, se selecciona la muestra 2 para la aplicación de Fe₂O₃, debido a que se requerirán menores concentraciones del óxido metálico para alcanzar las tonalidades rojas uniformes en la superficie y, por ende, representará un menor costo su aplicación.

Las arcillas reportaron la presencia de otros compuestos tales como K₂O, MnO, Cl, MgO y BaO, sin embargo, teniendo en cuenta su aporte, se caracterizan por ser trazas en el mineral arcilloso. Para el caso de los óxidos ZnO y CuO, su participación en ambas muestras es baja, por tal razón la aplicación de estos óxidos metálicos en las arcillas se realiza tanto en la muestra 1 como en la 2, y de esta forma observar su comportamiento.

Resultados y discusión

Análisis del color RGB

Aplicación de óxido de hierro (Fe₂O₃)

En la Figura 4, se observan cuatro probetas sinterizadas (a, b, c y d) con aplicación de óxido de hierro en concentraciones de 2, 4, 6 y 8 %, respectivamente. La arcilla utilizada como matriz del compuesto perteneció a la muestra 2 por contener la mayor concentración de este óxido. Así pues, se observa la influencia del óxido de hierro en la tonalidad rojiza de la superficie, comprobando lo descrito por Katsuki y Komarneni (2003), quienes también utilizaron polvos comerciales de Fe₂O₃ como pigmento cerámico en platos de porcelanas blancas.

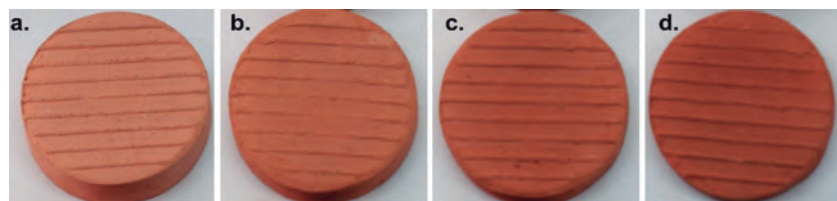


Figura 4. Probetas cerámicas sinterizadas con muestra 2 de arcilla y óxido de hierro.

a). 2 % Fe₂O₃ b). 4 % Fe₂O₃ c). 6 % Fe₂O₃ d). 8 % Fe₂O₃

Fuente: elaboración propia

Para determinar la coloración con mayor precisión, se realizaron histogramas de color RGB para las cuatro membranas con el software ImageJ (Figura 5). Este modelo de histograma se basa en la síntesis aditiva de los colores, lo que permite caracterizar un color en los tres colores primarios.

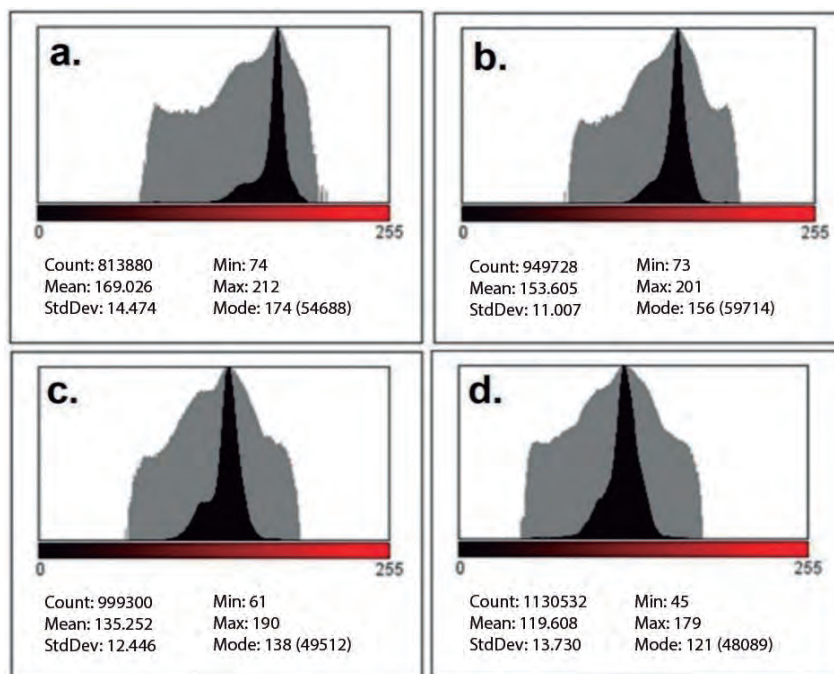


Figura 5. Histogramas de color RGB de probetas cerámicas sinterizadas.
a). 2 % de Fe_2O_3 b). 4 % de Fe_2O_3 c). 6 % de Fe_2O_3 d). 8 % de Fe_2O_3
Fuente: elaboración propia

Para el óxido de hierro se llevó a cabo el análisis RGB del canal rojo, debido a que es el canal saturado en los histogramas (Figura 5). Se observa que el parámetro *min* va disminuyendo a medida que la concentración del óxido aumenta, lo que conlleva hacia el oscurecimiento de dicho color. En los cuatro histogramas el color más oscuro lo reportó la membrana con 8 % de Fe_2O_3 (Figura 5d), ya que evidenció el parámetro *mode* más bajo con un valor de 121.

Aplicación de óxido de zinc (ZnO)

Debido a que las concentraciones de óxido de zinc reportadas por la fluorescencia de rayos X en cada una de las muestras no fueron representativas (no superan el 1 %), la aplicación de este óxido se realizó en ambas muestras. En la Figura 6 se presentan las membranas a, b, c y d, conformadas con la muestra de arcilla 1 en porcentajes de 1, 2, 3 y 4 % de pigmento, respectivamente, en donde se observa que con la aplicación de óxido de zinc se genera también una resistencia a la corrosión y a los rayos UV, según lo reportado por Kiomarsipour; Razavi; Ghani y Kioumarsipour (2013).

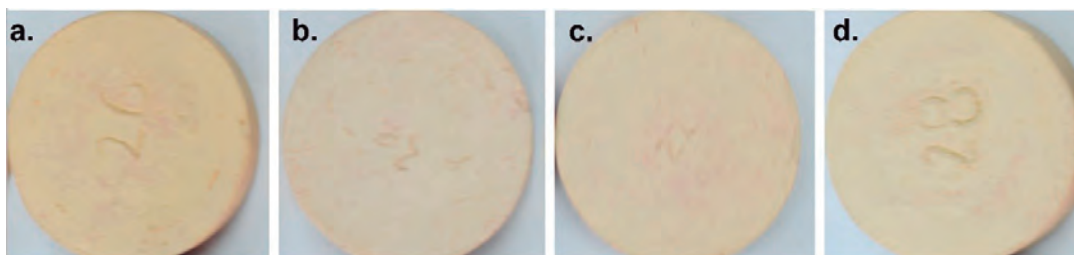


Figura 6. Probetas cerámicas sinterizadas con muestra 1 de arcilla y óxido de zinc.
a). 1 % ZnO b). 2 % ZnO c). 3 % ZnO d). 4 % ZnO
Fuente: elaboración propia

Los histogramas de color RGB para las cuatro membranas de la Figura 6 se presentan en la Figura 7.

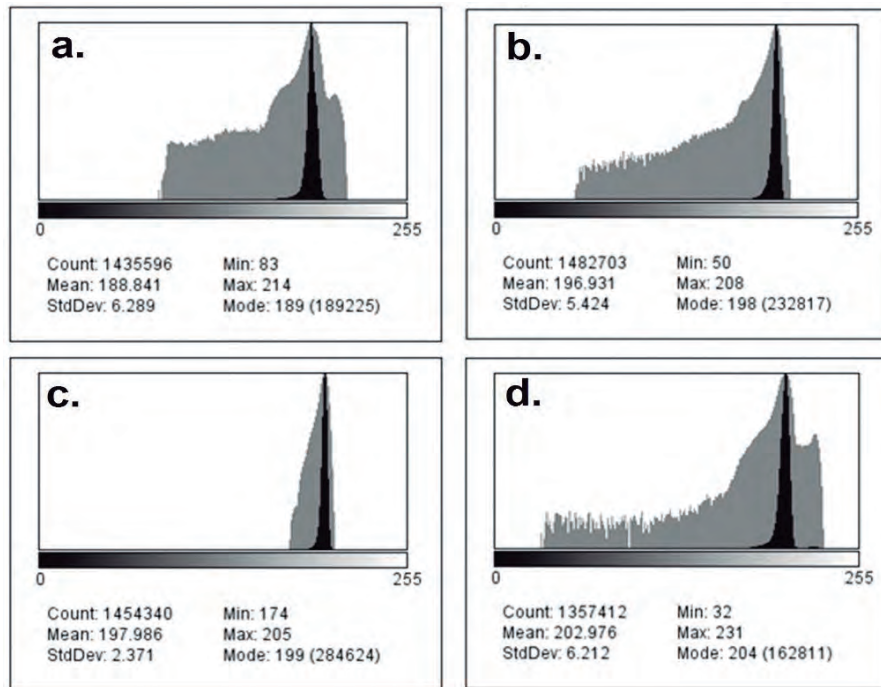


Figura 7. Histogramas de color RGB de probetas cerámicas sinterizadas.

a). 1 % de ZnO b). 2 % de ZnO c). 3 % de ZnO d). 4 % de ZnO

Fuente: elaboración propia

Para el óxido de zinc, el análisis RGB indispensable pertenece al canal blanco, debido a que es el canal saturado. Para las membranas de la Figura 6, los histogramas muestran que el parámetro *mode* incrementa de forma proporcional a la concentración del óxido, es decir, los picos de cada curva se acercan cada vez más al color blanco (referencia *mode*: 255). De los cuatro histogramas el color más claro con tendencia al blanco opaco lo reportó la muestra con 4 % de zinc (Figura 7d) con un parámetro *mode* de 204 (el más cercano a 255).

En la Figura 8 las membranas a, b, c y d, representan las membranas elaboradas a partir de la arcilla 2 con porcentajes de ZnO de 1, 2, 3 y 4 %, respectivamente. A simple vista se puede notar que la muestra 2 no presentó las mismas tonalidades que las membranas de la muestra 1, siendo que en ambas se manejó la misma concentración de pigmento. Esto es debido al alto contenido de Fe_2O_3 de la muestra 2, demostrando su influencia como óxido generador de una alta tonalidad rojiza con mayor dificultad de modificar.

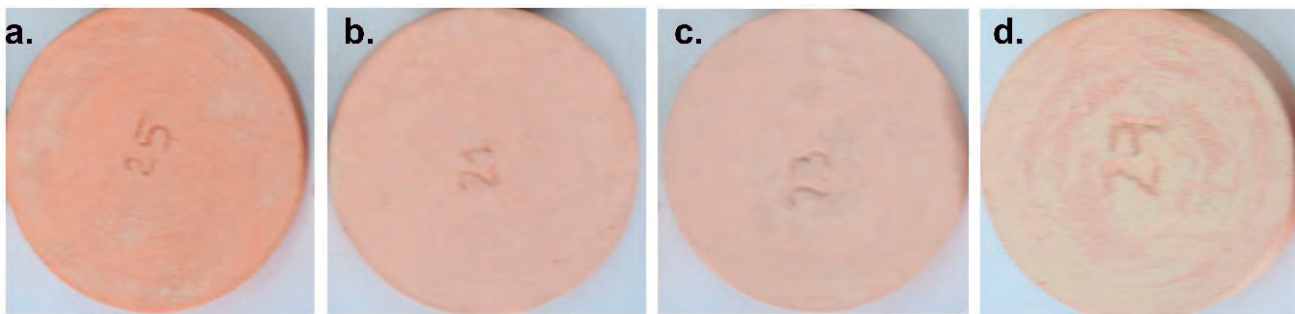


Figura 8. Probetas cerámicas sinterizadas con muestra 2 de arcilla y óxido de zinc.

a). 1 % ZnO b). 2 % ZnO c). 3 % ZnO d). 4 % ZnO

Fuente: elaboración propia

Los histogramas de color RGB se muestran en la Figura 9 para las cuatro membranas de la muestra 2, de la Figura 8. Al igual que en la muestra 1, los histogramas reportan un parámetro *mode* que aumenta proporcionalmente con la concentración del óxido, los picos de cada curva se acercan al color blanco con una menor intensidad. El color más claro hallado en las muestras lo exhibe el 4 % de óxido de zinc con un parámetro *mode* de 200 (el más cercano a 255).

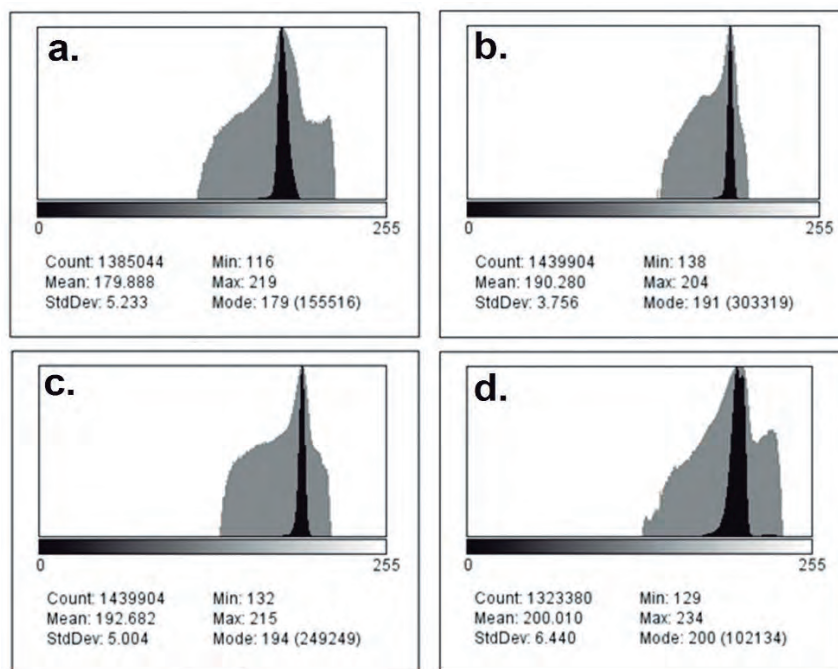


Figura 9. Histogramas de color RGB de probetas cerámicas sinterizadas.

a). 1 % de ZnO b). 2 % de ZnO c). 3 % de ZnO d). 4 % de ZnO

Fuente: elaboración propia

Aplicación de óxido de cobre (CuO)

Las membranas presentadas en la Figura 10 representan las probetas elaboradas a partir de las muestras de arcillas 1 y 2 con una concentración de 4 % de CuO. De acuerdo al trabajo realizado por Gargori; Galindo; Llusar; Fas y Monrós (2014), adiciones de óxido de cobre entre el 3 % y el 5 % logran modificar la tonalidad de materiales arcillosos, así como incrementar de forma favorable su absorción y conductividad eléctrica, como también su conductividad térmica (Cheng; Chai; Zhang, 2014). Se observa que la probeta elaborada a partir de la muestra de arcilla 2 resultó con una tonalidad café más fuerte con la misma cantidad de pigmento que la probeta elaborada con la muestra de arcilla 1. Este cambio puede ser atribuido al alto contenido de Fe_2O_3 en esta arcilla, el cual favorece este tipo de tonos.

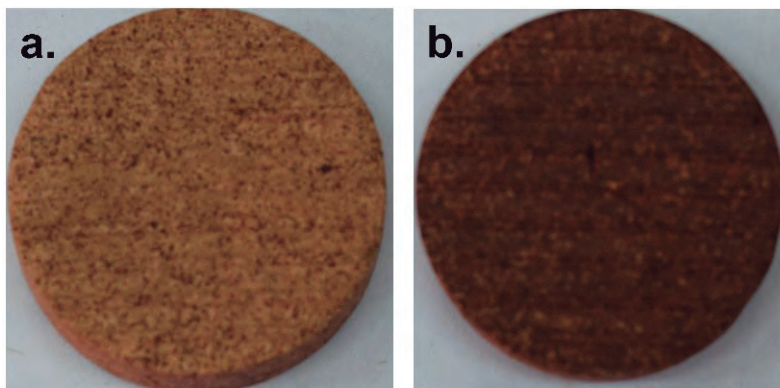


Figura 10. Probetas cerámicas sinterizadas con ambas muestras de arcilla y óxido de cobre.

a). Muestra 1 de arcilla y 4 % CuO b). Muestra 2 de arcilla con alto contenido de Fe_2O_3 y 4 % CuO

Fuente: elaboración propia

Los histogramas de color RGB para las membranas de la muestra 1 y 2 se presentan en la Figura 11. Para el óxido de cobre (CuO) el análisis RGB se llevó a cabo con el canal rojo y azul, debido a que son los colores primarios para formar el tono café. Al comparar los dos histogramas del canal rojo, se evidencia que la media o parámetro *mode* de la membrana de la muestra 2 (figura 11c) tiende más hacia la izquierda, es decir, hacia el color negro, reportando un *mode* de 54. Por otro lado, en la muestra 1 obtuvo 99 (Figura 11a), un valor que se ubica más lejos del 0 de referencia. De igual manera sucedió con el canal o color azul de las dos muestras, en donde la muestra 2 (Figura 11d) se encuentra más próxima al color negro de referencia (*mode* 20) que la muestra 1 (Figura 11b) la cual obtuvo un valor de 42.

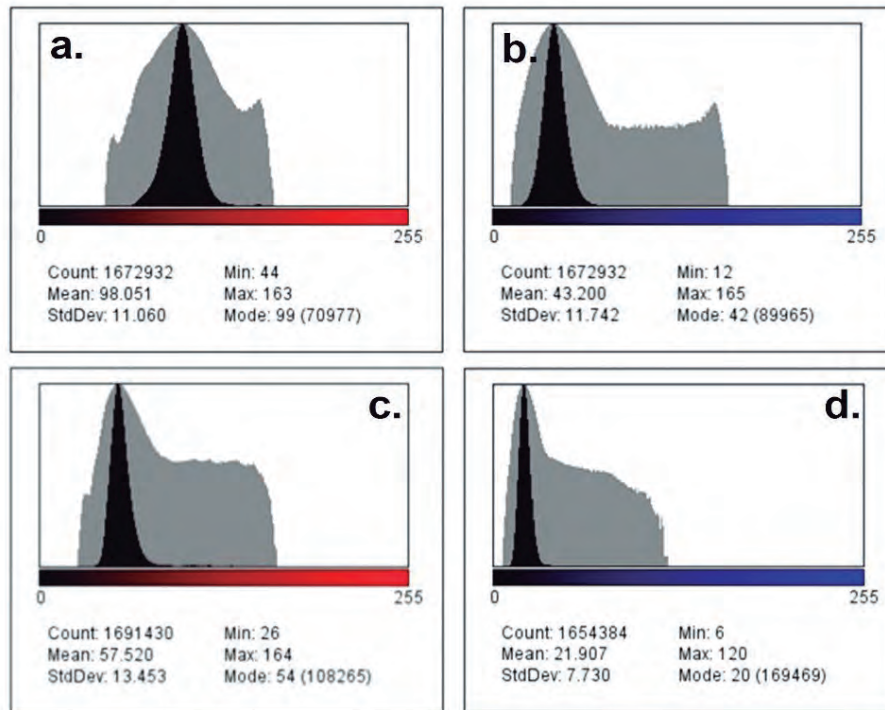


Figura 11. Histogramas de color RGB de probetas cerámicas sinterizadas.

a-b). Canales rojo y azul muestra 1 con 4 % CuO

c-d). Canales rojo y azul muestra 2 con 4 % CuO

Fuente: elaboración propia

Conclusiones

Es posible utilizar óxidos sintéticos para dar color a los materiales cerámicos, ayudando a la creación de nuevos productos y facilitando innovación dentro del sector alfarero, así como en la estandarización de sus materias primas y productos finales.

Con la utilización de óxidos se puede transformar la tonalidad de arcillas comunes, sin embargo, es necesaria la caracterización de las materias primas por ser la parte fundamental del proceso. Su composición química influye de manera significativa en la elección de los óxidos y cantidades a adicionar del mismo para generar gamas de tonalidades diferentes.

La aplicación de óxidos influye en los procesos de sinterización de los materiales cerámicos, teniendo en cuenta que puede remplazar la práctica de aumento de temperaturas y de prolongación del tiempo de cocción y, de esta forma, reducir los tiempos del proceso.

El óxido de zinc genera una nueva gama de tonalidades claras para las arcillas comunes, lo cual permite la fabricación de tabletas y ladrillos para fachada de este color. Estos productos hoy en día son muy utilizados en la construcción de viviendas y en su mayoría solo pueden ser fabricados a partir de arcillas especiales como caolines.

Para lograr colores y texturas ocrellamativas para los clientes se debe realizar la aplicación de óxido de cobre, cuya tonalidad varía según la arcilla utilizada y el contenido de otros óxidos como el óxido de hierro.

Referencias

- Alvarado, A. (1985). *El origen de los suelos*. (No. 24). Provincia de Cartago, Turrialba, Costa Rica: Serie materiales de enseñanza/ Centro Agronómico Tropical de Investigación y enseñanza CATIE.
- Amado, S., Villafrades, N.; Tuta, E. (2011). Caracterización de arcillas y preparación de pastas cerámicas para la fabricación de tejas y ladrillos en la región de Barichara, Santander. *Dyna*, 78(167), 50-58.
- Anderson, J. C. (1886). *U.S. Patent No. 348,443*. Washington, DC: U.S. Patent and Trademark Office.
- ASTM International. (2011). Standard Practice for Reducing Samples of Aggregate to Testing Size. (ASTM C. 702/C702M-11).
- Avgustinik, A. (1983). *Cerámica*. Barcelona: Editorial Reverté.
- Bailey, S. (2013). *Clays and Clay Minerals*. Kent: Elsevier Science.
- Betancourt, D.; Martirena, F.; Day, R.; Diaz, Y. (2007). Influencia de la adición de carbonato de calcio en la eficiencia energética de la producción de ladrillos de cerámica roja. *Revista Ingeniería de Construcción*, 22(3), 187-196. <https://doi.org/10.4067/S0718-50732007000300005>
- Cheng, Q.; Chai, J.; Zhang, Z. (2016). Investigation of double-layer coating pigmented with CuO particles of different concentrations on aesthetic and thermal aspects. *International Journal of Thermal Sciences*, 105, 36-44. <https://doi.org/10.1016/j.ijthermalsci.2016.02.010>
- Díaz, J. S. (2015). *Fabricación de mulita a partir de alúmina y sílice mediante molienda y variación en la composición Química* (Tesis de pregrado). Universidad Autónoma de Querétaro, Santiago de Querétaro, Qro., México.
- Fernández, C. A. (1998). Fabricación de ladrillos. *Revista de la Facultad de Agronomía*, 4(1), 9-12. Recuperado de: <http://revista.agro.unlp.edu.ar/index.php/revagro/article/view/729>
- Gargori, C.; Galindo, R.; Llusar, M.; Fas, N.; Monrós, (2014). Pigmentos cerámicos de alta absorción y conductividad térmica para colectores solares. Congreso Nacional de Medio ambiente. Universitat Jaume I, España.
- Gippini, E. (1966). Mecanismo químico de la formación del color en los ladrillos. *Materiales de construcción*, (123), 50-62. <https://doi.org/10.3989/mc.1966.v16.i123.1704>
- González, F.; García, G. (1966). Arcillas cerámicas de Andalucía III. Yacimientos terciarios de la margen derecha del Guadalquivir en la provincia de Sevilla. *Boletín de la Sociedad Española de Cerámica y Vidrio*, 5(2), 229-245.
- Guerrero, G.; Espinel, E.; Acevedo, S.; Guillermo, H. (2017). Análisis de temperaturas durante la cocción de ladrillos macizos y sus propiedades finales. *Tecnura*, 21(51), 118-131. <https://doi.org/10.14483/udistrital.jour.tecnura.2017.1.a09>
- ICONTEC. (2009). NTC 4205-1. Unidades de mampostería de arcilla cocida. Ladrillos y bloques cerámicos: parte 1: mampostería estructural / ICONTEC.
- Katsuki, H.; Komarneni, S. (2003). Role of α -Fe₂O₃ morphology on the color of red pigment for porcelain. *Journal of the American Ceramic Society*, 86(1), 183-185. <https://doi.org/10.1111/j.1151-2916.2003.tb03300.x>

- Kiomarsipour, N.; Razavi, R. S.; Ghani, K.; Kioumarsipour, M. (2013). Evaluation of shape and size effects on optical properties of ZnO pigment. *Applied Surface Science*, 270, 33-38. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2012.11.167>
- Monrós, G.; Badenes, A.; García, A.; Tena, A. (2003). *El color de la cerámica: Nuevos mecanismos en pigmentos para los nuevos procesados de la industria cerámica* (Vol. 11). Castellón, España: Publicacions de la Universitat Jaume I.
- Prada Orgaz, F. (2015). *Estudio, desarrollo y aplicación de los óxidos de hierro de la mina 'Santa Rosa' para su uso industrial como pigmento* (Tesis doctoral). Universidad de Oviedo, España.
- Prieto, L. F. M. (2010). Alfarería y urbanismo. Los chircales de Santafé (hoy Bogotá) y su impronta en la arquitectura y el desarrollo urbano de la ciudad colonial. *Nodo: Arquitectura. Ciudad. Medio Ambiente*, 4(8), 31-58.
- Quijano, B.; Díez-Silva, H. M.; Montes-Guerra, M. I.; Castro-Silva, H. F. (2014). Implementación de procesos sostenibles vinculando industrias regionales: Reciclaje de residuos siderúrgicos como proyecto de cambio de la mampostería en Boyacá-Colombia. *Revista Escuela de Administración de Negocios*, (77), 82-103. <https://doi.org/10.21158/01208160.n77.2014.817>
- Roa-Bohórquez, K. L.; Paredes-Roa, R. A.; Lara-González, L. Á. (2018). Aplicación de $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ y cenizas volantes como refuerzo en la matriz de unidades cerámicas macizas. *Revista Ingenierías Universidad de Medellín*, 17(32), 35-49. <https://doi.org/10.22395/rium.v17n32a2>
- Rodríguez, G. P.; Rivera, F. G.; Aza, S. (1999). Obtención industrial de materiales cerámicos a partir de lodos rojos del proceso Bayer. *Boletín de la Sociedad Española de Cerámica y Vidrio*, 38(3), 220-226. <https://doi.org/10.3989/cyv.1999.v38.i3.962>
- Rojas Torres, M. A.; Carreño Dueñas, D. A.; Gómez Ángel, S. M. (2015). Reconversión tecnológica en el sector productivo artesanal de hornos de ladrillo y cal para reducir la contaminación atmosférica en el valle de Sogamoso (Boyacá, Colombia). *Virtualpro*, 167, 1-17.
- Sánchez, J.; Orozco, J. A.; Peñaloza, L. (2014). Evaluación de mezclas de arcillas para la fabricación de ladrillos refractarios que sirvan para la reconversión tecnológica de los hornos utilizados en Norte de Santander. *Revista de Investigación de la Universidad del Quindío*, 25(1), 57-64.
- Simbaquera, L. (1958). *Apuntes lexicográficos sobre a industria del ladrillo en Bogotá*. Bogotá, Colombia: Tesauros.
- Torres, P.; Hernández, D.; Paredes, D. (2012). Uso productivo de lodos de plantas de tratamiento de agua potable en la fabricación de ladrillos cerámicos. *Revista Ingeniería de Construcción*, 27(3), 145-154. <https://doi.org/10.4067/S0718-50732012000300003>
- Zuluaga, D.; Henao, A. P.; García, D. F.; Rodríguez, J. E.; Hoyos, Á. M.; López, M. E.; Gómez, C. (2016). Caracterización térmica, química y mineralógica de un tipo de arcilla roja propia de la región andina colombiana, empleada para la producción de ladrillos para construcción. *Revista Colombiana de Materiales*, 9, 53-63.



Caracterización fisicoquímica de biodiésel derivado de grasa de pollo como alternativa de producción limpia en la Sabana de Túquerres-Nariño

Physicochemical characterization of biodiesel derived from chicken fat as an alternative of clean production in sabana of Túquerres-Nariño

José Mera-Ayala^{1*}
Danilo Revelo-Vargas²
Milton Mora-Martínez³
Jonathan Pérez-Barón⁴
Yuliana Areiza-Rico⁵

^{1*}Servicio Nacional de Aprendizaje SENA (Colombia); correo: jmera@sena.edu.co;
ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-5582-542X>

²Servicio Nacional de Aprendizaje SENA (Colombia); correo: drevelo@sena.edu.co;
ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-9879-1976>

³Servicio Nacional de Aprendizaje SENA (Colombia); correo: mmoram@sena.edu.co;
ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-5564-3906>

⁴Servicio Nacional de Aprendizaje SENA (Colombia); correo: jonnas1982@gmail.com;
ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-8112-9401>

⁵Servicio Nacional de Aprendizaje SENA (Colombia); correo: yareiza@sena.edu.co;
ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-3988-5996>

Recibido: 05-09-2018 Aceptado: 21-03-2019

Cómo citar: Mera-Ayala, José; Revelo-Vargas, Danilo; Mora-Martínez, Milton; Pérez-Barón, Jonathan; Areiza-Rico Yuliana (2019). Caracterización fisicoquímica de biodiésel derivado de grasa de pollo como alternativa de producción limpia en la sabana de Túquerres-Nariño. *Informador Técnico*, 83(1), 41-50. <https://doi.org/10.23850/22565035.1783>

Resumen

Actualmente, existe una alta dependencia en zonas limítrofes de Colombia por el suministro constante de combustibles derivados del petróleo. La generación de biocombustibles a partir de materiales grasos biológicos de bajo costo, fácil adquisición y que minimicen los impactos ambientales, son temas de investigación. El objetivo de este trabajo fue evaluar las características fisicoquímicas de biodiésel derivado de grasa de pollo, la cual es manejada como residuo agroindustrial del proceso de transformación en las granjas avícolas de la subregión de la sabana de Túquerres del departamento de Nariño, Colombia. Se evaluó la grasa de pollo ó aceite de pollo sometido a procesos de extracción, purificación y transesterificación, por medio de una catálisis básica, utilizando como catalizador hidróxido de sodio en una fase alcohólica de metanol. Los resultados de los análisis del biodiésel de grasa de pollo, cumplieron con lo estipulado en la NTC 5444, a excepción del parámetro de viscosidad (7,5 mm²/s a 40 °C), el cual es superior a lo establecido en la norma. La grasa de pollo es una materia prima alternativa en la producción de biodiésel convencional en las zonas de producción, que cumple con las especificaciones de la normatividad colombiana, de acuerdo a la NTC 5444, y podría ser utilizado en cualquier motor de combustión diésel, para obtener beneficios, como proceder de una fuente renovable, un menor contenido de azufre y contribuir en la búsqueda de sostenibilidad.

Palabras clave: biocombustibles; fuente de energía; grasa animal; residuos; transesterificación.

Abstract

Currently, there is a high dependence in border areas of Colombia for the constant supply of petroleum fuels. The biofuels generation from low-cost biological fat materials, easy acquisition and minimizing environmental impacts, are research topics. The objective of this work, was to evaluate the physicochemical characteristics of biodiesel derived from chicken fat, which is managed as agroindustrial waste of the transformation process in the poultry farms of the Sabana Sub Region, Nariño Department, Colombia. Chicken fat oil was evaluated to extraction, purification and transesterification processes by means of basic catalysis, using sodium hydroxide in an alcoholic phase of methanol. The results of the chicken fat biodiesel analysis comply with the stipulations of NTC 5444, with the exception of the viscosity parameter (7.5 mm²/s at 40 °C), which is higher than the one established in the rule. Chicken fat is an alternative raw material in the production of conventional biodiesel in the same production areas, which meets the specifications of Colombian regulations according to NTC 5444, and could be used in any diesel combustion engine, with benefits like a lower sulfur content and contributing to the research for sustainability.

Keywords: biofuels; energy source; animal fat; waste; transesterification.

Introducción

Hoy por hoy, existe un gran auge a nivel mundial por la obtención de energías limpias y combustibles que reemplacen total o parcialmente el uso de combustibles fósiles en sistemas mecánicos a motor. Esta iniciativa promueve el uso de aceites vegetales o animales en la producción de biocombustible tipo diésel, con el fin de disminuir los impactos económicos y ambientales generados por el uso de combustión tradicional, sin comprometer la seguridad alimentaria (Saka; Kusdiana, 2001; Montenegro; Sierra; Guerrero, 2012) y conservando el óptimo desempeño del motor.

En países como Colombia, las poblaciones limítrofes alejadas de las ciudades principales tienen una alta dependencia del suministro constante de combustibles derivados de petróleo y dependen de las naciones contiguas para solucionar sus demandas energéticas (Kirubakaran; Arul, 2018). Sin embargo, las distancias y los costos de transporte hacen que en algunos casos escasee el suministro de combustible y muchas de las industrias se vean afectadas. Por ello, se plantea la producción de un biocombustible alternativo a partir de la utilización de grasa animal de bajo costo y fácil adquisición, que contribuyan a la reducción de gastos de producción de biodiesel (Purandaradas *et al.*, 2018), como es el caso de la grasa de pollo, de la cual pueden extraerse ácidos grasos útiles para la obtención de biodiésel. La grasa tiene una alta disponibilidad en el departamento de Nariño debido a que la principal actividad avícola de la región es la producción de pollos para engorde, seguida de la producción de pollos para postura (Cámara de Comercio de Pasto, 2018). El 50 % de la producción se encuentra localizada en la Subregión la sabana (Guaitarilla, Imués, Ospina, Sapuyes y Túquerres). De los despojos del pollo, entre 22 al 25 % del peso total corresponde a la piel, compuesta principalmente por lípidos de un 32 al 36,5 % (Kyung; Gandemer, 1987), que pueden ser una fuente alternativa para la producción de biodiésel en la región.

El biodiésel puro obtenido es biodegradable, sin toxicidad, libre de azufre y compuestos aromáticos independientemente del alcohol y el aceite vegetal utilizados (Reyes; Sepúlveda, 2006). Además del aceite y el catalizador, también se opta por utilizar el metanol sobre el etanol por los beneficios económicos y las mejores propiedades que trae su utilización (Muniyappa; Brammer; Noureddini, 1996; López; Goodwin; Bruce; Lotero, 2005; Mendonça *et al.*, 2019), resultando, en general, un biodiésel con mínimas cantidades de azufre, y que a causa del contenido de oxígeno en su composición química, presenta una combustión más completa, disminuyendo la emisión de partículas, monóxido de carbono e hidrocarburos no quemados (Castro; Castillo; Nazario; Coello; Guevara, 2008).

La transesterificación es uno de los métodos más empleados en la producción de biodiésel a partir de grasa vegetal o animal (Hincapié; Mondragón; López, 2011; Zhang; Chen; Yang; Yan, 2010; Alptekin; Canakci, 2009; Montenegro *et al.*, 2012), con la presencia de un catalizador básico (Gürü; Artukoglu; Keskin; Koca, 2009) o catálisis heterogénea ácida o básica para evitar problemas de saponificación (Arnaud; Trystram; Relkin; Collignan, 2006), usando hidróxido de sodio (Becerra; López; Centeno; Giraldo, 2008). Además, los compuestos y materiales a usar a nivel de laboratorio, son económicos y

factibles de adquirir (Arias; Teuta; Parra, 2011). Según Saleh (2011), este método radica en un intercambio de las moléculas de un éster y un alquil de baja densidad, obteniendo cadenas de alquil-éster ($C_xH_yO_2$) muy similares a la molécula del diésel ($C_{16}H_{34}$), excepto por el oxígeno que se libera con los gases de combustión, generando como subproducto la glicerina (Šimáček *et al.*, 2011).

La transesterificación es un proceso reversible, donde se utiliza alcohol en exceso con el fin de lograr el equilibrio a la producción de esteres. El metanol (CH_3OH), en el transcurso de la reacción forma emulsiones que se disuelven con facilidad, sin embargo, no es miscible con los triglicéridos, como consecuencia, es necesaria la agitación mecánica, con el fin de facilitar la transferencia de masa (Novillo; Velarde; Cascante, 2017). Por lo anterior, el objetivo de esta investigación fue evaluar las características fisicoquímicas de biodiésel derivado de grasa de pollo, residuo agroindustrial del proceso de transformación en las granjas avícolas de la subregión de la sabana del departamento de Nariño.

Materiales y métodos

La producción de biodiésel se llevó a cabo en las instalaciones de la Tecnoacademia del Centro Sur Colombiano de Logística Internacional, SENA – Regional Nariño, ubicado en el municipio de Túquerres, departamento de Nariño (Colombia), localizado a 4.070 metros sobre el nivel del mar (m.s.n.m) a una temperatura promedio de $11 \pm 1^\circ C$ y una humedad relativa promedio de 70 %.

Extracción y purificación del aceite

Se utilizó una muestra de 750 g del tejido graso generado como residuo de los procesos de transformación en las granjas avícolas de la sabana de Túquerres. La muestra se sometió a un proceso de calentamiento a $70^\circ C$ en una estufa eléctrica (HACEB, modelo EM-1), por 20 min, con el fin de romper los tejidos celulares y extraer el aceite líquido. Posteriormente, se utilizó papel filtro para separar el aceite de los demás tejidos y, finalmente, el aceite fue sometido a deshumidificación en una placa de agitación y calentamiento (Thomas Scientific, Hotplate/stirrer) a una temperatura de $105^\circ C$ durante 15 min como se ilustra en la Figura 1, del cual se obtuvo el aceite.

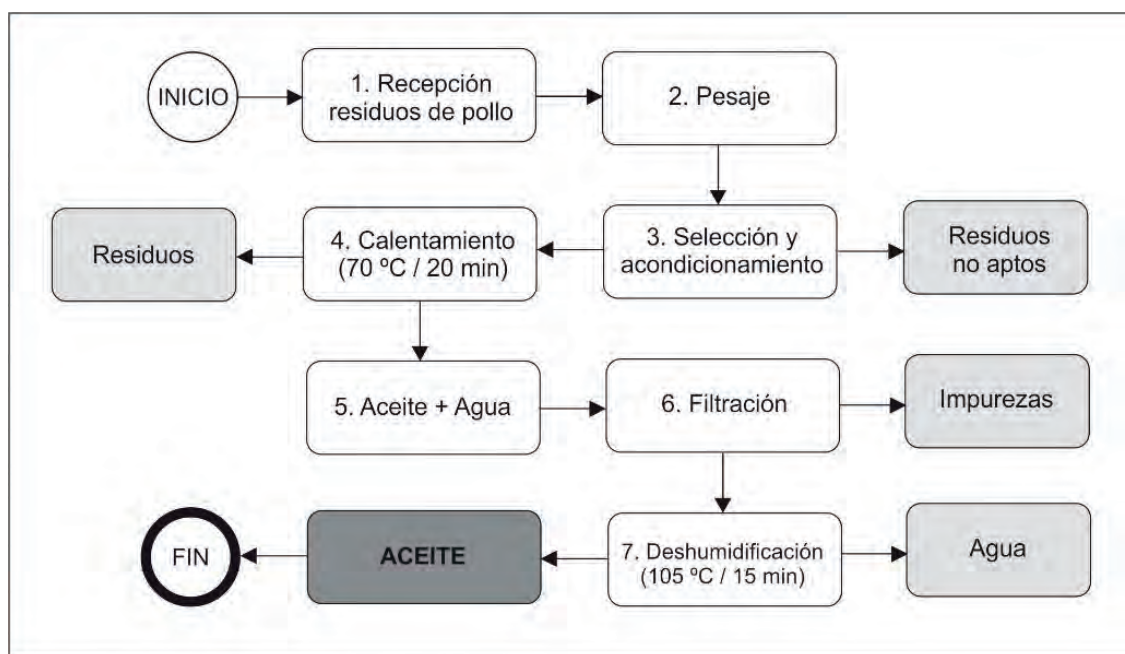


Figura 1. Diagrama de flujo para la extracción y purificación de aceite de grasa de pollo
Fuente: elaboración propia

Caracterización del aceite de pollo

El aceite de grasa de pollo fue sometido a análisis de propiedades fisicoquímicas con el propósito de caracterizar el producto final después de la reacción química. La densidad del aceite se determinó por medio de un densímetro digital (ASTM D4052, ASTM, 2018); y las propiedades concernientes a las características de instauración, cantidad de oxígeno incorporado y acidez total de las muestras, se determinaron por medio de los métodos de índice de refracción (NTC 289, ICONTEC, 2002), índice de peróxidos (NTC 236, ICONTEC, 2011) e índice de acidez (ASTM D664, ASTM, 2017), respectivamente.

Transesterificación de aceite de pollo y producción de biodiésel

Inicialmente, el aceite de pollo ó grasa de pollo se precalentó hasta una temperatura de $50 \pm 1^\circ\text{C}$ en una plancha de agitación y calentamiento (Thomas Scientific, Hotplace/stirrer). La preparación de la fase alcohólica de metanol se realizó mediante mezcla y reacción inicial con el catalizador de hidróxido de sodio, por su ventaja de disolverse en aceite en presencia de metanol, especialmente se opta debido a la solubilidad, es más eficaz y de un costo bajo (Kirubakaran; Arul, 2018), el cual fue añadido al reactor en una proporción de 0,5 % con base al contenido de aceite. Se optó por emplear un contenido de metanol en exceso de 200 % para obtener una relación molar estequiométrica de alcohol: aceite (3:1), según recomienda Sánchez-Cantú *et al.*, (2019), donde se tomó como ácido graso predominante el ácido oleico, el cual representa el 41 % (Amado; Villamizar; Gafaro, 2005). Finalmente, se mezcló y efectuó la reacción de transesterificación durante 60 min.

Separación y purificación del biodiésel

Para la separación de las dos fases formadas (biodiésel y glicerina) en la reacción de transesterificación, se sometieron los productos a un proceso de decantación durante 30 min como muestra la Figura 2. Posteriormente, se realizaron dos lavados con ácido acético (6 % v/v) para retirar el hidróxido de sodio. El agua y el metanol residual se eliminaron calentando el biodiésel a 105°C (Thomas Scientific, Hotplace/stirrer) durante 15 min.

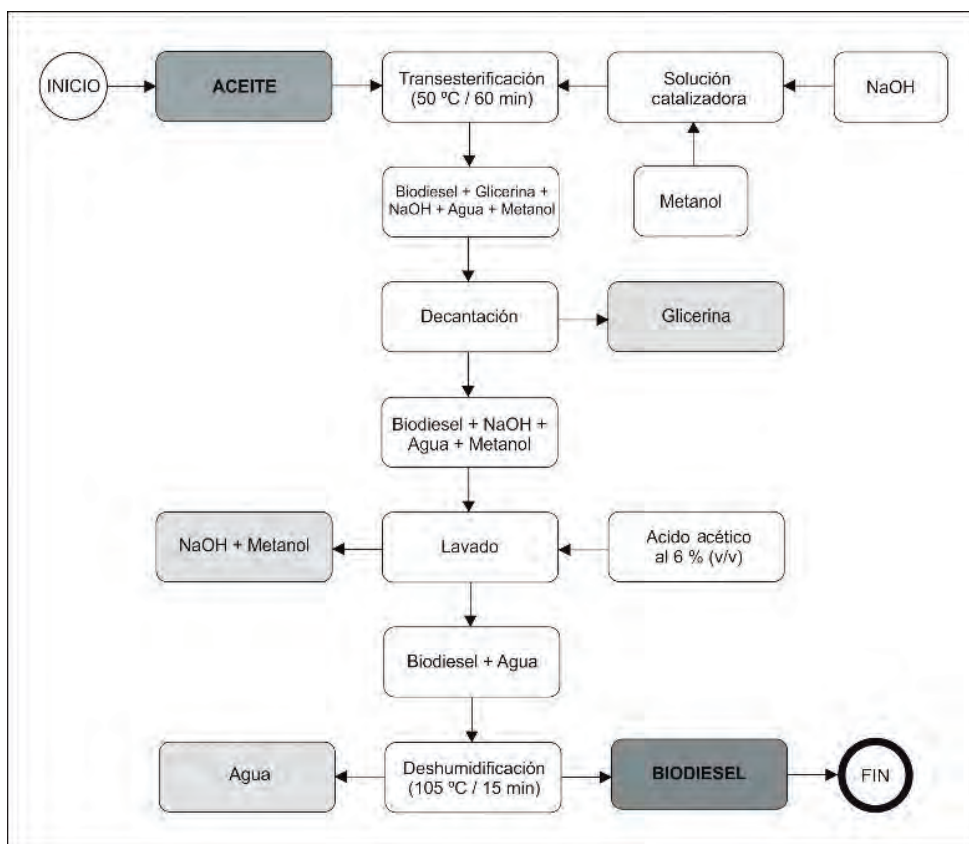


Figura 2. Diagrama de flujo para la producción y purificación de biodiésel a partir de grasa de pollo
Fuente: elaboración propia

Caracterización del biodiésel

Se evaluaron las propiedades del biodiésel obtenido a partir de grasa de pollo, con las siguientes propiedades: densidad (ASTM D4052, ASTM, 2018), contenido de metanol (UNE-EN 14110, Norma Europea EN, 2003), contenido de humedad (NTC 287, ICONTEC, 2018), viscosidad a 40 °C (ASTM D445, ASTM, 2018), índice de acidez (ASTM D664, ASTM, 2017), punto de inflamación (ASTM D93, ASTM, 2018), cenizas sulfatadas (ASTM D874, ASTM, 2018) y poder calorífico inferior (ASTM D5865, ASTM, 2013). Estas propiedades se compararon, según la NTC 5444 (biodiésel para uso en motores diésel: especificaciones, ICONTEC, 2018).

Resultados y discusión

Caracterización del aceite de pollo ó grasa de pollo

Los resultados de la caracterización del aceite obtenido a partir de grasa de pollo y su comparación con el aceite de soya, según la Norma Técnica Colombiana (NTC 254, ICONTEC, 2016) está registrado en la Tabla 1.

Tabla 1.
Caracterización del aceite obtenido a partir de grasa de pollo

Propiedad	Aceite de grasa de pollo	Aceite de soya (NTC 254)	Método de ensayo
Densidad a 13 °C (kg/m ³)	922,9	917 - 924	ASTM D4052 (ASTM, 2018)
Índice de refracción a 12,2 °C	1,4674	1,4760 – 1,4720	NTC 289 (ICONTEC, 2002)
Índice de peróxidos (m-eq g de O ₂ /kg)	3,0	5 máximo	NTC 236 (ICONTEC, 2011)
Índice de acidez (mgNaOH/g)	0,2	0,1 máximo	NTC 218 (ICONTEC, 2011)

Fuente: elaboración propia

De acuerdo a los resultados de la Tabla 1, se evidenció que a excepción del parámetro de índice de acidez (0,2 mgNaOH/g), el aceite de grasa de pollo cumple con lo estipulado en la NTC 254 (ICONTEC, 2016), norma en la que se basan los parámetros del aceite que actualmente se comercializa en Colombia. Por consiguiente, es clara la viabilidad de producir aceite de fuentes animales, cumpliendo con la normatividad colombiana.

Caracterización del biodiésel

Las propiedades evaluadas del biodiésel obtenido se compararon con la NTC 5444 (ICONTEC, 2018), que especifica las características del biodiésel para uso en motores diésel (Tabla 2).

Tabla 2.
Caracterización del biodiésel obtenido a partir de grasa de pollo

Propiedad	Método de ensayo	Biodiésel de grasa de pollo	Biodiésel B100 (NTC 5444)	Otros autores
Densidad a 15 °C (kg/m ³)	ASTM D4052 (ASTM, 2018)	892,8	860 - 900	867 (Bhatti; Hanif; Qasim; Rehman, 2008)
				858,9
Contenido de metanol (% masa)	ISO 14110 (EN, 2003)	0,001	0,2 máximo	0,06 (Kirubakaran; Arul 2018)
Contenido de humedad (mg/kg)	NTC 287 (ICONTEC, 2018)	120	500 máximo	100 (Bhatti <i>et al.</i> , 2008)
Viscosidad a 40 °C (mm ² /s)	ASTM D445 (ASTM, 2018)	7,5	1,9 - 6,0	4,71 (Montenegro <i>et al.</i> , 2012)
Índice de acidez (mgNaOH/g)	ASTM D664 (ASTM, 2017)	0,2	0,5 máximo	0,25 (Bhatti <i>et al.</i> , 2008)
Punto de inflamación (°C)	ASTM D93 (ASTM, 2018)	169	120 mínimo	180 (Gürü <i>et al.</i> , 2009)
				164 (Montenegro <i>et al.</i> , 2012)
Cenizas sulfatadas (%masa)	ASTM D874 (ASTM, 2018)	0,02	0,02 máximo	0,02 (Ramos; Fernández; Casas; Rodríguez; Pérez, 2009)
Poder calorífico inferior (kJ/kg)	ASTM D5865 (ASTM, 2013)	39.456,1	+/- 39.500	44.947,5 (Gürü; Koca; Can; Cınar; Sahin, 2010)

Fuente: elaboración propia

El biodiésel de grasa de pollo cumple con lo estipulado en la NTC 5444 (ICONTEC, 2018) (Tabla 2), a excepción del parámetro de viscosidad cuyo valor resultó superior al establecido en la norma. Sin embargo, de acuerdo a Rakopoulos; Papagiannakis y Kyritsis (2011), la viscosidad del biodiésel normalmente es mayor respecto al diésel comercial, en ese caso, el motor requerirá mayor potencia para su funcionamiento, y así evitar dificultades generadas por la variación en el flujo de combustible durante la combustión y una posible reducción de la eficiencia del motor (Alptekin; Canakci 2009; Pehan; Jerman; Kegl; Kegl; Kirubakaran; Arul, 2018). Por lo tanto, para disminuir la viscosidad del biodiésel, se recomienda realizar una mezcla estándar de B5 o B10 (5 % biodiésel – 95 % diésel o 10 % biodiésel – 90 % diésel).

Según Torres *et al.*, (2011), se pudo evidenciar que la densidad en el biodiesel obtenido se ajusta dentro del parámetro de la norma, lo que permite reducir el riesgo de problemas durante la combustión, como retrasos en la inyección y disminución del rendimiento del motor, los cuales son ocasionados por densidades fuera del estándar.

Con relación al contenido de metanol, el cual es un parámetro de calidad del biodiésel, se pudo evidenciar que el resultado obtenido es un valor significativamente bajo, producto de una reacción total durante la transesterificación. Una reacción incompleta puede conllevar a bajo número de cetano y altos porcentajes de glicerina, generando taponamientos en los inyectores (Arias *et al.*, 2011).

Respecto al contenido de humedad, se evidenció que el resultado de 120 mg/kg fue bajo, según parámetros de la NTC 5444 (ICONTEC, 2018); similar al resultado reportado por Bhatti *et al.*, (2008), de 100, 200 y 150 mg/kg con biodiésel de grasa de pollo, carnero y aceite de cocina, respectivamente. Este parámetro está relacionado con el poder calorífico inferior, pues cuanto menor sea el contenido de humedad mayor será su poder calorífico. Rakopoulos *et al.*, (2011) expresan que la propiedad higroscópica del etanol y metanol se encuentra asociada a su contenido de agua, el cual puede aumentar si no se almacena el biodiésel en un recipiente adecuado (Geller; Adams; Goodrum; Pendergrass, 2009). La presencia de agua puede

ocasionar una separación de fases en mezclas con diésel comercial, además corrosión y proliferación de microorganismos que afecten la calidad del biodiésel (Arias *et al.*, 2011).

También se pudo notar que el Índice de acidez de 0,25 mgNaOH/g coincide con el que reporta Bhatti *et al.*, (2008), en su estudio de la producción de biodiésel de grasa desechada, en el cual figura la grasa de pollo como una alternativa competitiva al diésel convencional.

Por otro lado, el punto de inflamación reportado fue de 169 °C, cuyo valor representa un efecto importante sobre la potencia del motor, de modo que cuando se aumenta el contenido de concentración de biodiésel en el combustible mezclado con diésel y biodiésel, también se aumentará la potencia del motor similar al del biodiésel de múltiples fuentes oleosas vegetales (Ramos *et al.*, 2009; Hoseini *et al.*, 2019), que se ajusta a lo establecido en la NTC 5444 (ICONTEC, 2018), el cual es considerado un índice de seguridad para el manejo y depósito del biodiésel.

El contenido de cenizas sulfatadas obtenido cumple el requerimiento de la norma, disminuyendo la generación de depósitos en el motor, lo cual representa un combustible más limpio que no perjudicará su vida útil (Kaplan; Arslan; Sürmen, 2006). Además, el empleo de biodiésel, en contraste con el diésel, es el alto valor del punto de inflamación en el combustible biodiésel y un número de cetano mayor, que es de gran importancia en la combustión dentro de los motores diésel, mejorando el rendimiento y reduciendo la contaminación producida (Hoseini *et al.*, 2019), convirtiendo al biodiesel a base de grasa de pollo en un aspirante viable para substituir los combustibles fósiles (Khan *et al.*, 2014).

En cuanto al poder calorífico reportado, se evidenció similitud al estipulado en la norma, sin embargo, este puede aumentar si se mezcla con diésel en una relación del 10 % biodiésel – 90 % diésel, tal como lo reporta Gürü *et al.*, (2010), quien realizó un estudio comparativo de las propiedades del diésel y mezcla de diésel con biodiésel obtenido a partir de grasa de pollo. De igual manera, es de considerar que el biodiésel de origen vegetal presenta un número de cetano mayor al diésel comercial (Kaplan *et al.*, 2006), que puede llegar a compensar el biodiésel con valores inferiores del poder calorífico inferior.

Conclusiones

La grasa de pollo generada como residuo agroindustrial en las granjas avícolas, es una materia prima alternativa para la producción de biodiésel, que puede ser utilizada en las zonas rurales donde el acceso de combustibles convencionales es muy difícil. Los resultados experimentales permitieron identificar las propiedades físico-químicas del biodiésel de grasa de pollo, que cumple con las especificaciones de la normatividad colombiana, de acuerdo a la NTC 5444, a excepción de la viscosidad, y podría ser utilizado en cualquier motor de combustión diésel. Se recomienda realizar una mezcla normalizada (B5 o B10) con diésel comercial, la cual no representaría efectos negativos durante su uso, ya que no requiere realizar ninguna modificación del motor. Asimismo, el biodiésel de grasa de pollo se destaca por sus cualidades ambientales y la producción limpia al provenir de una fuente renovable, tener menor cantidad de azufre y contribuir a la sostenibilidad como una fuente de energía alternativa.

Referencias

- Alptekin, E.; Canakci, M. (2009). Characterization of the key fuel properties of methyl ester–diesel fuel blends. *Fuel*, 88(1), 75–80.
<https://doi.org/10.1016/j.fuel.2008.05.023>
- Amado, E.; Villamizar, A.; Gafaro, A. (2005). Evaluación del proceso de producción de biodiesel a partir de grasas amarillas con altos contenidos de ácidos grasos libres. *Bistua: Revista de la Facultad de Ciencias Básicas*, 3(1), 54–60.
- Arias, D. E.; Teuta, C. A.; Parra, J. (2011). Caracterización de las propiedades del biodiesel de girasol bajo la Norma NTC de 100/04 y medición de poder calorífico. *AVANCES Investigación en Ingeniería*, 8(2) 73–80.

- Arnaud, E.; Trystram, G.; Relkin, P.; Collignan, A. (2006). Thermal characterization of chicken fat dry fractionation process. *Journal of Food Engineering*, 72(4), 390–397. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2004.12.021>
- ASTM International. (2013). Standard test method for gross calorific value of coal and coke. (ASTM D5865-13).
- ASTM International. (2017). Standard test method for acid number of petroleum products by potentiometric titration. (ASTM D664-17a).
- ASTM International. (2018). Standard test method for density, relative density and api gravity of liquids by digital density meter. (ASTM D4052-18a).
- ASTM International. (2018). Standard test method for kinematic viscosity of transparent and opaque liquids (and calculation of dynamic viscosity). (ASTM D445-18).
- ASTM International. (2018). Standard test method for sulfated ash from lubricating oils and additives. (ASTM D874-13a-18)
- ASTM International. (2018). Standard test methods for flash point by pensky-martens closed cup tester. (ASTM D93-18).
- Becerra, M.; López, J. E.; Centeno, A.; Giraldo, S. A. (2008). Producción de biodiésel y glicerina limpia empleando catálisis básica heterogénea. *Revista ION*, 21(1), 31–38.
- Bhatti, H. N.; Hanif, M. A.; Qasim, M.; Rehman, A. (2008). Biodiésel production from waste tallow. *Fuel*, 87(13-14), 2961–2966. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2008.04.016>
- Cámara de Comercio de Pasto. (2018). *Sector avícola*. (Boletín Económico No. 004-08-2018). Recuperado de: http://www.ccpasto.org.co/wp-content/uploads/2018/09/BoletinEconomico_No_004-08-2018_Sector-av%C3%ADcola.pdf
- Castro, P.; Castillo, L.; Nazario, M.; Coello, J.; Guevara, J. (2008). Producción de biodiésel a pequeña escala a partir de aceites usados en la ciudad de Lima. Consejo Nacional del Ambiente de Perú (CONAM). Recuperado de: <http://www.solucionespracticas.org.pe/produccion-de-biodiesel-a-pequena-escala-a-partir-de-aceites-usados-en-la-ciudad-de-lima>
- Geller, D. P.; Adams, T. T.; Goodrum, J. W.; Pendergrass, J. (2008). Storage stability of poultry fat and diesel fuel. *Fuel*, 87(1), 92–102. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2007.03.043>
- Gürü, M.; Artukoglu, B. D.; Keskin, A.; Koca, A. (2009). Biodiesel production from waste animal fat and improvement of its characteristics by synthesized nickel and magnesium additive. *Energy Conversion and Management*, 50, 498–502. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2008.11.001>
- Gürü, M.; Koca, A.; Can, O.; Cınar, C.; Sahin, F. (2010). Biodiesel production from waste chicken fat based sources and evaluation with Mg based additive in a diesel engine. *Renewable Energy*, 35(3), 637–643. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2009.08.011>
- Hincapié, G.; Mondragón, F.; López D. (2011). Conventional and in situ transesterification of castor seed oil for biodiesel production. *Fuel*, 90(4), 1618–1623. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2011.01.027>

- Hoseini, S. S.; Najafi, G.; Ghobadian, B.; Mamat, R.; Ebadi, M. T.; Yusaf, T. (2019). Characterization of biodiesel production (Ultrasonic-assisted) from Evening-primroses (*Oenothera lamarckiana*) as novel feedstock and its effect on CI engine parameters. *Renewable Energy*, 130, 50–60. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2018.06.042>
- ICONTEC. (2002). Grasas y aceites animales y vegetales. Determinación del Índice de refracción. (NTC 289:2002).
- ICONTEC. (2011). Grasas y aceites vegetales y animales. Determinación del Índice de peróxido. (NTC 236:2011).
- ICONTEC. (2016). Grasas y aceites animales y vegetales comestibles. Aceite comestible de soya. (NTC 254:2016).
- ICONTEC. (2018). Biodiesel para uso en motores diésel. Especificaciones. (NTC 5444:2018).
- ICONTEC. (2018). Grasas y aceites animales y vegetales. Determinación del contenido de humedad y materia volátil. (NTC 287:2018).
- Kaplan, C.; Arslan, R.; Sürmen, A. (2006). Performance characteristics of sunflower methyl ester as biodiesel. *Energy Source*, 28(8), 751–755. <https://doi.org/10.1080/009083190523415>
- Khan, A. M.; Shaikh, A. Khan, I.; Kanwal, S. (2014). Comparative Production of Biodiesel from Waste Chicken Fats and Cooking Oil. *Journal of Biofuels*, 5 (1), 32-40. <https://doi.org/10.5958/j.fuel.2014.00005.1>
- Kirubakaran, M.; Arul, M. S. (2018). A comprehensive review of low cost biodiesel production from waste chicken fat. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 82, 390–401. <http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2017.09.039>
- Kyung, K. E.; Gandemer, G. (1987). Lipid and PUFA contents of muscle and skin of chicken. Influence of anatomical location. *Proceedings of 33th International Congress of Meat Science and Technology*. Helsinki, Finland.
- López, D.; Goodwin, J.; Bruce, D.; Lotero, E. (2005). Transesterification of triacetin with metanol on solid acid and base catalysts. *Applied Catalysis A*, 295(2), 97–105. <https://doi.org/10.1016/j.apcata.2005.07.055>
- Mendonça, I. M.; Paes, O. A.; Maia, P. J.; Souza, M. P.; Almeida, R. A.; Silva, C.C.; de Freitas, F. A. (2019). New heterogeneous catalyst for biodiesel production from waste tucumã peels (*Astrocaryum aculeatum* Meyer): Parameters optimization study. *Renewable Energy*, 130, 103–110. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2018.06.059>
- Montenegro Mier, M.; Sierra Vargas, F.; Guerrero Fajardo, C. (2012). Producción y caracterización de biodiésel a partir de aceite de pollo. *Informador Técnico*, 76, 62–71. <https://doi.org/10.23850/22565035.29>
- Muniyappa, P. R.; Brammer, S. C.; Noureddini, H. (1996). Improved conversion of plant oils and animal fats into biodiesel and co-product. *Bioresource Technology*, 56(1), 19–24. [https://doi.org/10.1016/0960-8524\(95\)00178-6](https://doi.org/10.1016/0960-8524(95)00178-6)
- Norma Europea EN. (2003). Derivados de aceites y grasas. Ésteres metílicos de ácidos grasos (FAME). Determinación del contenido de metanol. (UNE-EN 14110).
- Novillo, S. M. B.; Velarde, J. I. A.; Cascante, G. E. M. (2017). Análisis de los factores que influyen en el proceso de transesterificación para la producción de biodiésel a partir de aceites de

- cocina usados. *Revista Observatorio de la Economía Latinoamericana, Ecuador*. Recuperado de: <http://www.eumed.net/cursecon/ecolat/ec/2017/produccion-biodiesel.html>
- Pehan, S.; Jerman, M. S.; Kegl, M.; Kegl, B. (2009). Biodiesel influence on tribology characteristics of a diesel engine. *Fuel*, 88(6), 970–979.
<https://doi.org/10.1016/j.fuel.2008.11.027>
- Purandaradas, A.; Silambarasan, T.; Kadarkarai, M.; Ranganathan, B.; Arumugam, D. G.; Kayal, V. D.; Devipriya, A.; Kavitha, P. (2018). Development and quantification of biodiesel production from chicken feather meal as a cost-effective feedstock by using green technology. *Biochemistry and Biophysics Reports*, 14, 133–139.
<https://doi.org/10.1016/j.bbrep.2018.04.012>
- Rakopoulos, D. C.; Rakopoulos, C. D.; Papagiannakis R. G.; Kyritsis D. C. (2011). Combustion release analysis of ethanol or n-butanol diesel fuel blends in heavy-duty DI diesel engine. *Fuel*, 90(5), 1855–1867.
<https://doi.org/10.1016/j.fuel.2010.12.003>
- Ramos, M. J.; Fernández, C. M.; Casas, A.; Rodríguez, L.; Pérez, A. (2009). Influence of fatty acid composition of raw materials on biodiesel properties. *Bioresource Technology*, 100(1), 261–268.
<https://doi.org/10.1016/j.biortech.2008.06.039>
- Reyes, J. F.; Sepúlveda, M. A. (2006). PM-10 emissions and power of a Diesel engine fueled with crude and refined Biodiesel from salmon oil. *Fuel*, 85(12-13), 1714–1719.
<https://doi.org/10.1016/j.fuel.2006.02.001>
- Saka, S.; Kusdiana, D. (2001). Biodiesel fuel from rapeseed oil as prepared in supercritical methanol. *Fuel*, 80(2), 225–231.
[https://doi.org/10.1016/S0016-2361\(00\)00083-1](https://doi.org/10.1016/S0016-2361(00)00083-1)
- Saleh, H. E. (2011). The preparation and shock tube investigation of comparative ignition delays. *Fuel*, 90(1), 421–429.
<https://doi.org/10.1016/j.fuel.2010.08.019>
- Sánchez-Cantú, M.; Morales, M.; Pérez-Díaz, L. M.; Zeferino, R.; Hilario-Martínez, J. C.; Sandoval-Ramírez, J. (2019). Biodiesel production under mild reaction conditions assisted by high shear mixing. *Renewable Energy*, 130, 174–181.
<https://doi.org/10.1016/j.renene.2018.06.035>
- Šimáček, P.; Kubicka, D.; Kubicková, I.; Homola, F.; Pospíšil, M.; Chudoba J. (2011). Premium quality renewable diesel fuel by hydroprocessing of sunflower oil. *Fuel*, 90(7), 2473–2479.
<https://doi.org/10.1016/j.fuel.2011.03.013>
- Torres-Jiménez, E.; Svoljšak Jerman, M.; Gregorc, A.; Lisec, I.; Dorado, M. P.; Kegl, B. (2011). Physical and chemical properties of ethanol–diesel fuel blends. *Fuel*, 90, 795–802.
<https://doi.org/10.1016/j.fuel.2010.09.045>
- Zhang, J.; Chen, S.; Yang, R.; Yan, Y. (2010). Biodiesel production from vegetable oil using heterogeneous acid and alkali catalyst. *Fuel*, 89(10), 2939–2944.
<https://doi.org/10.1016/j.fuel.2010.05.009>



Integración de la impresión 3D en el proceso de cera perdida para la producción de joyas, con fines de estandarización

Integration of 3D printing in the process of lost wax for the production of jewelry, for standardization purposes

Leidy Yaneth Vega-Rodríguez¹
Laura Muñoz-Mesa²

¹ Servicio Nacional de Aprendizaje SENA; (Colombia); correo: lyvega@sena.edu.co

² Servicio Nacional de Aprendizaje SENA; (Colombia); correo: laurammesa@gmail.com

Recibido: 12-12-2018 Aceptado: 01-04-2019

Cómo citar: Vega, L. Y.; Mesa, L. M. (2019). Integración de la impresión 3D en el proceso de cera perdida para la producción de joyas, con fines de estandarización. *Informador Técnico*, 83(1), 51-65.
<https://doi.org/10.23850/22565035.1933>

Resumen

Las resinas poliméricas son las más utilizadas en la impresión 3D. Estas experimentan diferentes comportamientos y no pueden ser empleadas bajo las mismas condiciones de proceso que cuando se utiliza cera en el proceso de cera perdida. Con este estudio se buscó definir las condiciones estandarizadas para obtener piezas finales de joyería con acabados de calidad, a partir de un proceso de cera perdida combinado con la tecnología de impresión 3D para la elaboración de prototipos. La selección y comprensión de diversas variables y parámetros de proceso es uno de los principales desafíos para la optimización. Diferentes autores consideran que la etapa de quemado es la más crítica y crucial. Por ello, se proponen cuatro curvas de quemado con el fin de evaluar el comportamiento de dos resinas (B9-Emerald y Tepic 2000) e intentar disminuir el tiempo de quemado, sin afectar la calidad de la pieza. Se obtuvieron piezas de mejor calidad al aplicar una curva con tres rampas de temperatura: 150, 455 y 750 °C, mantenidas durante 40, 30 y 20 min, respectivamente, con un tiempo total de 4,5 h.

Palabras clave: cera perdida; resinas poliméricas; impresión 3D; estandarización; tiempo de quemado; calidad.

Abstract

Polymer resins are the most used in 3D printing. These resins have a different behavior than wax (used in the lost wax process) and cannot be used with the same conditions. This study aims to define the standardized conditions for obtaining final pieces of jewelry with good finishes, from a casting process combined with 3D technology for prototypes making. The selection and understanding of the various variables and condition of the process are one of the main challenges for the optimization. Different authors consider that the burning stage is the most critical and crucial. For this reason, four burn curves are proposed, in order to evaluate the behavior of two resins (B9-Emerald and Epic 2000) and try to reduce the burning time, without affecting the quality of the piece. Parts with better quality were obtained by applying a curve with three temperature ramps: 150, 455 and 750 °C, maintained for 40, 30 and 20 min, respectively with a total time of 4.5 h.

Keywords: lost wax; polymer resins; 3D printing; standardization; burn time; quality.

Introducción

El proceso de cera perdida es la técnica mediante la cual, una pieza maestra o prototipo hecho a mano en cera se recubre con material cerámico (yeso) llamado investimento, el cual, resiste altas temperaturas y una vez endurecido adopta la geometría exacta de la pieza deseada. Luego, el molde se coloca en un horno donde el prototipo de cera se elimina por fusión o combustión, dejando una cavidad hueca dentro del molde por donde se vierte el metal fundido para obtener la joya (Pattnaik; Karunakar; Jha, 2012; Singh; Singh, 2016).

Respecto a la elaboración de los prototipos en cera hechos artesanalmente a mano, el joyero moldea bloques de cera por medio de cuchillas y herramientas para tallar hasta lograr la forma deseada: anillo, serpiente, caja para piedras, entre otros (Underhill, 2017). Este proceso es 100 % manual, demanda la atención total del joyero y la calidad obtenida depende de las habilidades del artesano, por lo cual, es difícil lograr todos los detalles, simetrías, peso o grosor exacto como están descritos en el diseño. En caso de requerirse una copia, el prototipo deberá ser tallado de nuevo (Campos; Romeiro, 2013; Muñoz-Mesa; Sánchez, 2016).

En los últimos años, el proceso de cera perdida ha experimentado una evolución considerable con el desarrollo de equipos, materiales y la adopción de nuevas tecnologías, lo que ha permitido abrir nuevas oportunidades para la integración entre el diseño y los procesos de producción. Actualmente, se está utilizando la impresión 3D para crear prototipos más complejos y personalizados, con un nivel de detalle mayor, características minuciosas e intrincadas y precisión dimensional, con menos defectos y en menos tiempo, contando, además, con la facultad de hacer evaluaciones y modificaciones de diseños y especificaciones de manera eficiente y predecir errores (Campos; Romeiro, 2013; Pattnaik *et al.*, 2012; Redwood, s.f. a).

Con esta investigación se pretendió establecer y definir las condiciones estandarizadas para obtener piezas de joyería con excelentes acabados, utilizando la impresión 3D para la elaboración de prototipos. De esta manera, el sector joyero nacional resultaría beneficiado con la reducción de compras de equipos innecesarios, la reducción de reprocesos, la disminución significativa de los tiempos de entrega y con una mejora considerable en productividad y competitividad (Berman, 2012; Huang; Liu; Mokasdar; Hou, 2013). Es por esto que la comprensión de la relación entre los diversos parámetros controlables involucrados en el proceso de cera perdida es un punto clave para la optimización del ciclo y para lograr un alto grado de confiabilidad en la calidad del producto final. El plan experimental propuesto permitió evaluar la incidencia de la etapa del quemado, específicamente el tiempo y la calidad final del producto, considerando que esta etapa es la más crítica y crucial.

Marco teórico

Fundición a la cera perdida

El proceso de cera perdida es utilizado ampliamente en diferentes industrias y aplicaciones ingenieriles que incluyen piezas de joyería, componentes de precisión de la industria médica, de hidroplantas, de defensa, automotriz y otras herramientas como equipos domésticos y comerciales (Singh *et al.*, 2016). Su principal ventaja es su flexibilidad y versatilidad para satisfacer las especificaciones exigentes de los clientes, desde detalles muy finos y secciones delgadas hasta formas intrincadas, utilizando herramientas y materiales que son eficientes a largo plazo (Singh; Singh, 2015). Así mismo, se logra una alta precisión en las piezas, con tolerancias de $\pm 0,005$ pulgadas, con un excelente acabado superficial (Pattnaik *et al.*, 2012; Singh *et al.*, 2016; Singh; Singh, 2016).

El proceso de cera perdida está plenamente establecido como el principal proceso de producción de joyería y como una herramienta importante en la joyería fina, artística y la orfebrería, y no hay señales de ningún proceso alternativo que pueda desplazarla. En la Figura 1 se muestra una breve descripción de las diferentes etapas del proceso de fundición a la cera perdida de acuerdo con autores como Pattnaik *et al.* (2012) y Singh y Singh (2016), quienes explican los pasos básicos de este proceso.



Figura 1. Etapas involucradas en la fabricación de joyas mediante el proceso de cera perdida.
Fuente: adaptado de Pennsylvania Precision Cast Parts (PPCP)

El primer paso para producir una pieza única, es crear un concepto y un diseño. La idea creativa y la tecnología se fusionan perfectamente en el diseño para enfatizar la personalización y el arte. En algunos casos los diseñadores crean una representación integral mediante el diseño asistido por computadora, (CAD - *Computer-Aided Design*) (Campos; Romeiro, 2013). Algunos de los softwares más conocidos son: *RhinoCeros*, *Rhino Gold* y *Matrix*.

Una vez se tiene un diseño establecido, se continúa con la creación del prototipo o pieza maestra. Antiguamente, la elaboración de prototipos se hacía moldeando un material blando, típicamente cera, arcilla o yeso (Hoffman, 2016), usando herramientas para tallar, que permiten transformar un simple bloque de cera en un modelo exacto al de las joyas finas que se crearán (Underhill, 2017). El prototipo obtenido debe tener tolerancias dimensionales para compensar su propia contracción volumétrica, así como la contracción por solidificación del metal fundido en el molde de yeso (Pattnaik *et al.*, 2012). De igual forma, el prototipo debe estar libre de defectos e imperfecciones, como rasguños, burbujas de aire y líneas de unión distintas, para que estos no se reproduzcan en la pieza final (Sias, 2005).

Dependiendo de las joyas elaboradas, los prototipos moldeados o impresos son ensamblados en un "árbol de fundición". Dependiendo del tamaño, peso y metal a ser vertido, dos o más prototipos se adjuntan a una estructura vertical conocido como bebedero, que permite que el metal fundido fluya en las múltiples cavidades desde un solo punto de entrada (Sias, 2005; Singh; Singh; Hashmi, 2016). Finalmente, los árboles son ubicados en una base circular de caucho e insertados en un tarro de acero inoxidable o aluminio, ya que son materiales preferidos por tener alta conductividad térmica (Singh; Singh, 2016). En seguida, se preparan los moldes con investimento, en donde el *gesso* de París es uno de los materiales predilectos para la elaboración de joyas en oro y aleaciones de plata. De acuerdo a las medidas del recipiente de acero inoxidable se hace una mezcla de agua:yeso, esta mezcla se vacía hasta superar la altura del árbol, se deja secar y solidificar hasta formar una capa externa sólida uniforme, que reproduce cada detalle del prototipo (Prasad, 2012). Así pues, el secado completo de la mezcla para el molde puede durar de 16 a 48 h, lo que permite que el recubrimiento cure (endurezca) y se

obtenga un molde lo más fuerte posible (Corti, 2010; Prasad, 2012). Sin embargo, se debe tener en cuenta que el yeso no puede ser utilizado para el *casting* de metales con puntos de fusión superiores a 1000 °C, debido a que el yeso comienza a degradar compuestos sulfurados, principalmente, sulfato de calcio, con temperaturas de fundición entre 1100 y 2000 °C (Beeley; Smart, 1995; Sias, 2005).

Por otra parte, una vez que los moldes de yeso se han curado por completo, se retira la base de caucho y se colocan los recipientes en un horno para que la cera se derrita y/o vaporice, dando como resultado una cavidad. El molde debe calentarse de manera que las capas superficiales de cera se derritan y de esta forma, evitar agrietamiento e incluso destrucción del molde, lo que podría ocasionarse por el diferencial de expansión térmica entre la cera y el yeso (Pattnaik *et al.*, 2012; Prasad, 2012). Generalmente, en el horno se establecen diferentes etapas de calentamiento, con una temperatura que no supere 800 °C especialmente cuando se utiliza yeso, ya que a temperaturas más altas, la reacción entre el sulfato de calcio y el sílice provoca la ruptura de la inversión, al generar CaSiO_3 (Mohd; Ismail; Ahmad; Isa, 2015; Sias, 2005). Esta etapa puede tardar de 12 a 16 h, dependiendo del tamaño y cantidad de los árboles insertados en el horno, del tamaño de los tarros metálicos y de los materiales usados para la elaboración de prototipos.

Posteriormente, al eliminarse toda la cera del molde de yeso comienza la fundición del metal o *casting*, para lo cual, el tarro metálico es colocado en una máquina de colada con asistencia al vacío. Esto facilita la impulsión y expulsión del aire a través del yeso y el vertimiento del metal en la cavidad antes de que se solidifique. El metal o su aleación se funde en un crisol, con lo que se garantiza que se sobreexponga la viscosidad, lo que permite rellenar los detalles finos de la cavidad (Campos; Romeiro, 2013; Singh *et al.*, 2016). La temperatura de vertido no debería ser muy alta, porque podría romper el molde de yeso y no debería ser muy baja, porque se producirían piezas defectuosas (Singh *et al.*, 2016).

Luego, el yeso es removido para liberar la pieza mediante un golpe mecánico, sumergiéndolo en agua fría, aplicándole un chorro de agua a alta presión (6-10 ksi) o disolviéndola químicamente con nitrógeno líquido congelado a 195 °C o hidróxido de sodio fundido entre 482 y 537 °C (Corti, 2010; Prasad, 2012). Una vez se haya removido la pieza de joyería se corta del árbol de fundición. Una de las mayores ventajas del proceso de cera perdida es que se producen piezas que normalmente requieren poco o ningún trabajo de acabado, lo que ahorra tiempo, reduce costos y agiliza la producción (Pattnaik *et al.*, 2012).

Fabricación aditiva o impresión 3D

El término fabricación aditiva o impresión 3D abarca una gran cantidad de procesos y tecnologías que ofrecen un espectro completo de capacidades para la producción de piezas y productos sólidos mediante la unión de materiales (cera, polvo o plástico), generalmente capa sobre capa a partir de datos del modelo 3D, a diferencia de las metodologías de fabricación sustractiva como el mecanizado tradicional ASTM F2792-12a. (ASTM International, 2012), (Mellor; Hao; Zhang, 2014). La impresión 3D alcanza unas notorias ventajas respecto a otras técnicas derivadas por su capacidad de producción, personalización del cliente y desarrollo de productos con estructuras complejas (Schniederjans, 2017; Stansbury; Idacavage, 2016). Otras ventajas incluyen: alta flexibilidad en la fabricación de piezas, asequibilidad y evaluación rápida de diseños, capacidad para facilitar la optimización de parámetros de moldeo, ahorro de material mediante reducción de procesos de fabricación sustractivos y ahorros de tiempo de entrega en el desarrollo de herramientas para producción de alto volumen (Berman, 2012; Holmström; Partanen; Tuomi; Walter, 2010; Pattnaik *et al.*, 2012; Petrovic *et al.*, 2009).

Actualmente, existe un mercado diversificado que requiere la fabricación de productos personalizados, por lo que la impresión 3D se está utilizando para elaborar piezas médicas y dentales, piezas de repuesto para productos electrónicos y electrodomésticos, modelos topográficos, piezas de aviones más livianos, dispositivos protésicos personalizados, entre otros (Kearney, 2014; Bhandari; Regina, 2014; Petrick; Simpson, 2013; Ramya; Vanapalli, 2016; Schniederjans, 2017). También, está siendo utilizada por diseñadores de moda y de joyas para la elaboración de prototipos, productos personalizados y piezas artísticas (Kearney, 2014; Yap; Yeong, 2014).

Etapas del proceso de impresión 3D

La impresión 3D consta de dos fases: una fase virtual (modelado y simulación) y una fase física (fabricación). Para transformar un diseño 2D (boceto) en un diseño 3D, se utiliza un software de diseño asistido por computadora (3D-CAD) para crear un modelo digital, que luego es dividido virtualmente en muchas capas finas horizontales necesarias para completar la pieza modelo (Vanderploeg; Lee; Mamp, 2017).

Las etapas del proceso de impresión son esquematizadas en la Figura 2.

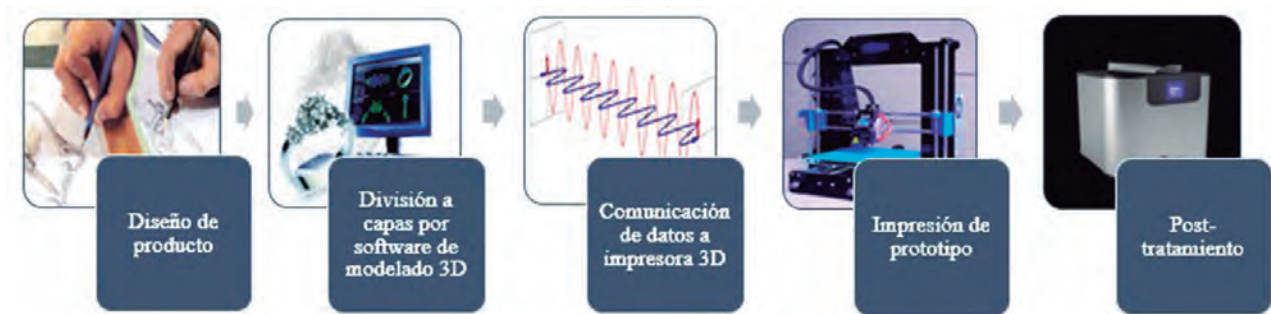


Figura 2. Etapas del proceso de impresión.

Fuente: elaboración propia a partir de (Chua; Leong; Lim, 2010; Vanderploeg; Lee; Mamp, 2017).

El primer paso de la impresión 3D es la generación de un modelo sólido digital o de superficie imprimible en 3D (tridimensional), que describa y represente matemáticamente la geometría externa de un objeto (Gibson; Rosen; Stucker, 2015). Este modelo se genera mediante un software de diseño asistido por computadora (CAD), utilizando servicios en línea proporcionados por plataformas de impresión 3D (*Thingiverse*, *Shapeways* o *Sculpteo*) o generando un modelo digital de un objeto existente mediante escáner 3D, el cual, luego se divide en miles de capas (según la resolución) a través de un software de preparación (Gao *et al.*, 2015; Rayna; Striukova, 2016). Rhino 3D es uno de los programas más utilizado en el modelado de diseño 3D para productos de vestuario y joyería, que permite trabajar con superficies curvas complejas (Yap; Yeong, 2014).

Posteriormente, las superficies externas cerradas del modelo CAD se representan mediante formato de lenguaje de triangulación estándar por sus siglas en inglés (*STL - Standard Tessellation Language*), este formato se importa a un programa de segmentación que lo convierte en código G, el cual, es un lenguaje de programación de las máquinas que trabajan con Control Numérico Computarizado (CNC) y que proporciona instrucciones de movimiento paso a paso para la impresora (Balletti; Ballarin; Guerra, 2017; Redwood, s.f. b). El archivo *STL* se envía a la impresora y de acuerdo con las capas que se han obtenido, se corta el modelo en secciones transversales (Chua; Leong; Lim, 2010). La impresión de la pieza puede tardar de varios minutos a varias horas en completarse dependiendo del tamaño y la complejidad del modelo y del tipo de máquina utilizada.

Tecnologías de impresión

Las tecnologías que se pueden usar para construir capas sucesivas son variadas y en diferentes niveles de desarrollo. Los procesos de impresión 3D pueden ser directos e indirectos.

Los procesos directos, derriten selectivamente el lecho de polvo de metal usando una fuente de energía como un rayo láser o electrones, para fabricar las partes metálicas directamente (Yap; Yeong, 2014). La tecnologías 3D de este grupo son fusión selectiva por láser por sus siglas en inglés (*SLM*) y fusión por haz de electrones por sus siglas en inglés (*EBM*), que generalmente se pueden emplear para la producción de volumen medio a alto (Cheah; Chua; Lee; Feng; Totong, 2005).

Por otro lado, la impresión 3D indirecta no produce las partes finales directamente en el metal; en cambio, se usa un prototipo fabricado a partir de materiales estándares con propiedades conocidas como la resina, que luego son utilizados para la fundición por inversión (Cheah *et al.*, 2005; Gebhardt, 2012; Yap; Yeong, 2014). Así pues, la calidad del molde depende principalmente de la calidad del prototipo. Algunas de las tecnologías de este tipo son: estereolitografía laser (SLA por sus siglas en inglés), modelado de deposición fusionada (FDM por sus siglas en inglés) y procesamiento de luz digital (DPL por sus siglas en inglés) (Cheah *et al.*, 2005; Guo; Leu, 2013).

Aplicación de impresión 3D en la fabricación de prototipos

Actualmente, para la creación de joyas se combina la tecnología de impresión 3D moderna con la fundición tradicional de metales. Para ello, se comienza con la impresión de un modelo 3D en resina. Las estructuras de soporte se imprimen junto con el prototipo para asegurarse de que este no se rompa. Seguidamente, se eliminan las estructuras de soporte y se limpia el prototipo. Luego, se continúa con el proceso tradicional de cera perdida. En la Figura 3 se presenta el proceso completo.

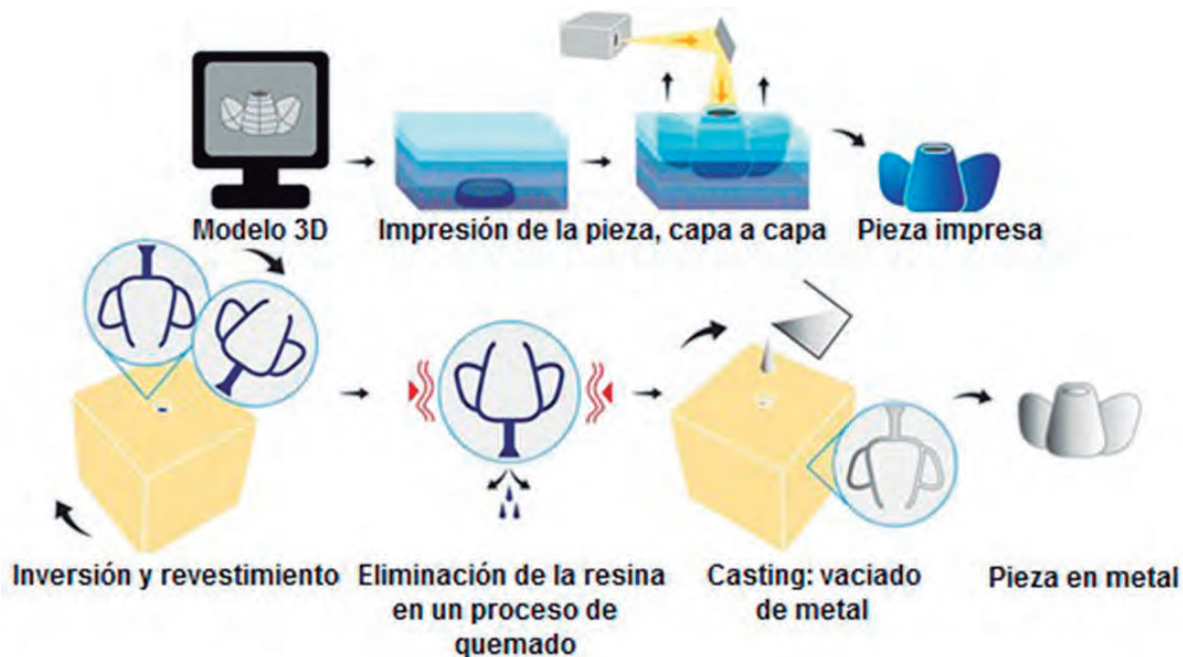


Figura 3. Etapas del Proceso de cera perdida con patrones impreso en 3D. Cortesía de Sculpteo
Fuente: cortesía Sculpteo Sculpteo. (n.d.). Sculpteo. Retrieved October 20, 2018, from <https://www.sculpteo.com/en/glossary/3d-printed-wax/>

La impresión 3D integrada al proceso de cera perdida permite la creación de prototipos muy complejos y personalizados; producción de múltiples diseños en una sola impresión; producción de piezas con un nivel muy alto de detalle; reducción significativa de los tiempos de entrega y el costo en comparación con las técnicas tradicionales de fabricación de prototipos (CNC en cera, moldes de aluminio para fundición, entre otros); mejoramiento de la calidad y precisión; minimización de errores; flexibilidad de producción al eliminar los problemas de equilibrio de línea y los cuellos de botella de producción y, lograr control y monitoreo más precisos de los procesos (Campos; Romeiro, 2013; Huang *et al.*, 2013; Muñoz-Mesa; Sánchez, 2016; Redwood, s.f. a). De esta forma, la impresión 3D se ha convertido en una herramienta útil para la creación de prototipos y el desarrollo de diseños de una manera económica y efectiva en menor tiempo (Redwood, s.f. c). Así pues, gracias a la variedad de material es posible fabricar la joya completa con impresión 3D; sin embargo, el principal esfuerzo se ha concentrado en encontrar materiales con los que no se presenten problemas de agrietamiento en el yeso, combustión incompleta o presencia de ceniza residual después de la etapa de quemado (Marwah; Sharif; Zainol; Ibrahim; Mohamad, 2013).

Empresas joyeras a nivel mundial están utilizando esta nueva tecnología, como es el caso de *Tripsion, Sharebot, American Pearl, Lupeon y Makebu*, que no solo se benefician de la impresión 3D en la etapa de producción, sino también como estrategia de marketing (Muñoz-Mesa; Sánchez, 2016).

Metodología

Selección del diseño y elaboración de prototipos

El diseño de la pieza de joyería que se seleccionó tiene una superficie compleja, con superficies curvas y planas, con texto pequeño y letras formadas por travesaños muy delgados y difíciles de reproducir; por lo que se consideró como una pieza intrincada que requiere estándares de calidad exigentes. El diseño se presenta en la Figura 4.



Figura 4. Modelo CAD del anillo para impresión 3D.
Fuente: elaboración propia

Para la impresión, se seleccionaron dos resinas poliméricas: Emerald verde (proporcionada por B9 Creator) y Epic 2000-verde (fabricada por Jamghe MSDS). La impresión se realizó en una impresora B9 Creator V1.2 y una impresora Makex Model U50 para las resinas mencionadas, respectivamente. Para la etapa de curado se utilizó una cámara de curado UV LED de alta intensidad (40 mW/cm²).

Preparación de investimento

En la preparación del investimento se utilizó una relación de 1 g (o mL) de agua por 2,5 g de yeso, la cual es considerada por Actis Grande, Forno, Klotz y Tiberto (2011) como la más óptima. Se utilizaron tarros de acero inoxidable de 38,1 mm x 63,5 mm (1,5 in de diámetro x 2,5 in de alto).

Etapa de quemado y casting

En esta etapa, se probaron diferentes condiciones de quemado como se presentan en la Figura 5.

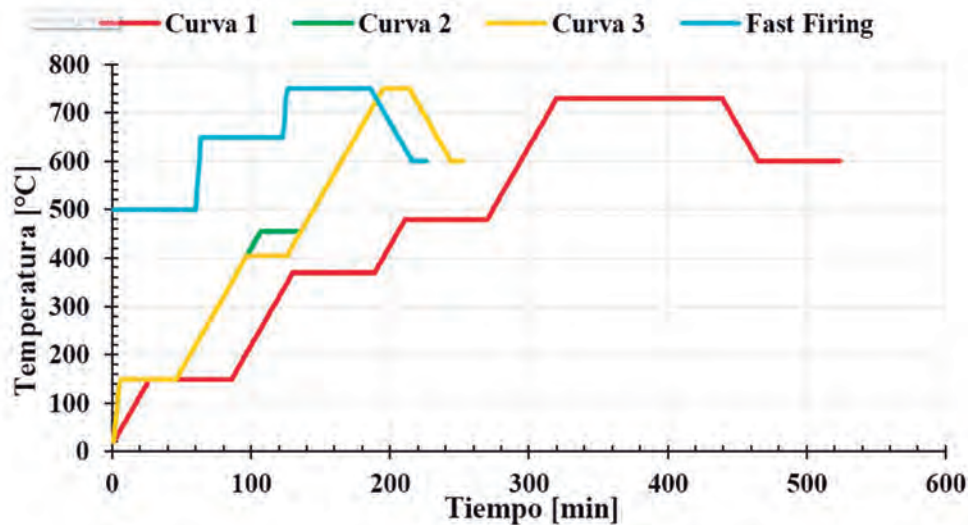


Figura 5. Curvas de quemado testeadas.
Fuente: elaboración propia

Por lo tanto, se pudo evidenciar que la **curva 1** (curva convencional): consiste en cuatro rampas a 150, 370, 480 y 732 °C, con una velocidad de calentamiento de 5 °C/min mantenida por 1 h. La última etapa fue mantenida por 2 h. Esta curva fue probada con las dos resinas seleccionadas.

La **curva 2**: consistió en tres rampas diferentes a 150, 455 y 750 °C. Desde temperatura ambiente se incrementó la temperatura hasta 150 °C, a 30 °C/min y se mantuvo durante 40 min. Desde 150 hasta 455 °C se usó una velocidad de calentamiento de 5 °C/min, que fue mantenida en las últimas etapas. Esta temperatura fue sostenida por 30 min y luego se incrementó hasta 750 °C, permaneciendo constante por 20 min. Esta curva fue probada con las dos resinas seleccionadas.

La **curva 3**: consistió en tres rampas diferentes a 150, 405 y 750 °C. Desde temperatura ambiente se incrementó la temperatura hasta 150 °C, a 30 °C/min y se mantuvo durante 40 min. Desde 150 hasta 405 °C se usó una velocidad de calentamiento de 5°C/min, que fue mantenida en las últimas etapas. Esta temperatura fue sostenida por 30 min y luego se incrementó hasta 750 °C, permaneciendo constante por 20 min. Esta curva fue probada solo con la resina Epic 2000.

La **curva 4**: fue un ciclo *fast-firing* (quemado rápido). Los recipientes se colocaron en el horno directamente a 500 °C. Después de 60 min de sostenimiento, la temperatura del horno se incrementó rápidamente hasta 650 °C y se mantuvo durante 60 min, 5 min antes de cumplir ese tiempo, los tarros se retiraron del horno para inyectarles aire comprimido. Luego se insertaron nuevamente en el horno para seguir con un calentamiento rápido hasta 750 °C. Esta curva fue probada con las dos resinas.

Al final, los recipientes fueron enfriados hasta 600 °C y se mantuvieron en esa temperatura durante 10 min, excepto en la curva 1 donde esta temperatura fue mantenida durante 1 h.

La etapa de quemado se desarrolló en un horno con sistema *Venturi Neyvulcan 3-550 A* y para vaciado del metal se utilizó un *Vacuum* de marca *Lamicol* con especificaciones de succión de 10 a 30 Pa (pascales).

Resultados y discusión

Los prototipos de resina son difíciles de quemar completamente cuando se usa una curva de quemado utilizada tradicionalmente para cera. Es por ello que las piezas producidas bajo esas condiciones tienen un acabado superficial pobre y requieren un trabajo de pulido extenso, por lo que resulta más provechoso realizar una repetición de la pieza modificando

las condiciones de proceso. La elección del ciclo del quemado adecuado para las resinas utilizadas se basa en la calidad de la pieza final. En este caso, se seleccionaron las condiciones de quemado con las cuales se logró un equilibrio de la calidad obtenida en las partes gruesas y delgadas de la pieza fundida. La inspección visual fue la primera prueba de calidad que se les realizó a las piezas, seguido del uso de un microscopio Motic SMZ168 Stereo Zoom, que tiene un rango de ampliación de 7,5 a 50x, en el que se examinaron las piezas, para así, garantizar un mayor nivel de detalle las mismas.

Las piezas fundidas obtenidas del quemado de las resinas bajo la curva convencional-curva 1, lucieron una superficie rugosa y áspera (ver Figura 6). Adicionalmente, presentaron perforaciones y huecos.

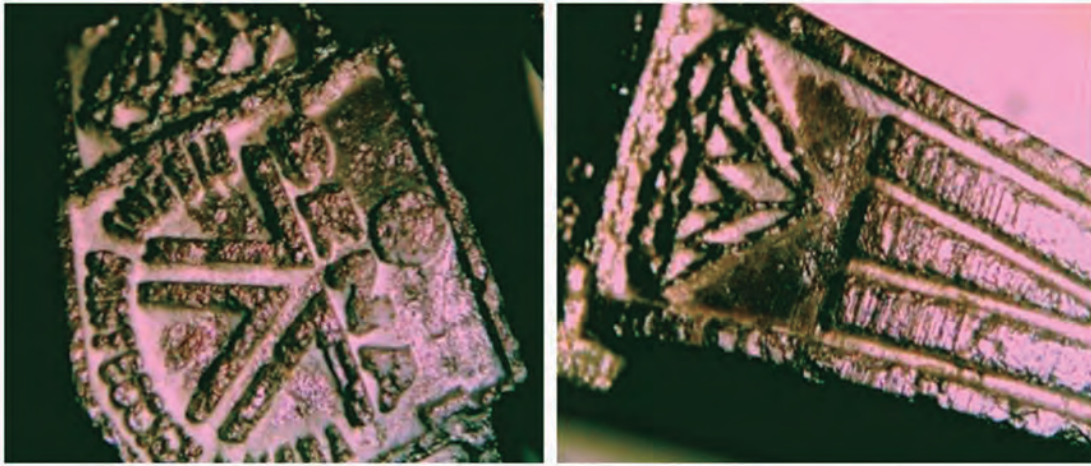


Figura 6. Detalles de la superficie de las piezas fundidas impresas con resina B9-Emerald bajo condiciones de quemado convencional (Curva 1).
Fuente: elaboración propia

Resultados similares se obtuvieron con la resina Epic 2000, cuya pieza también presentó una superficie irregular con poros y perforaciones muy visibles, como se muestra en la Figura 7.

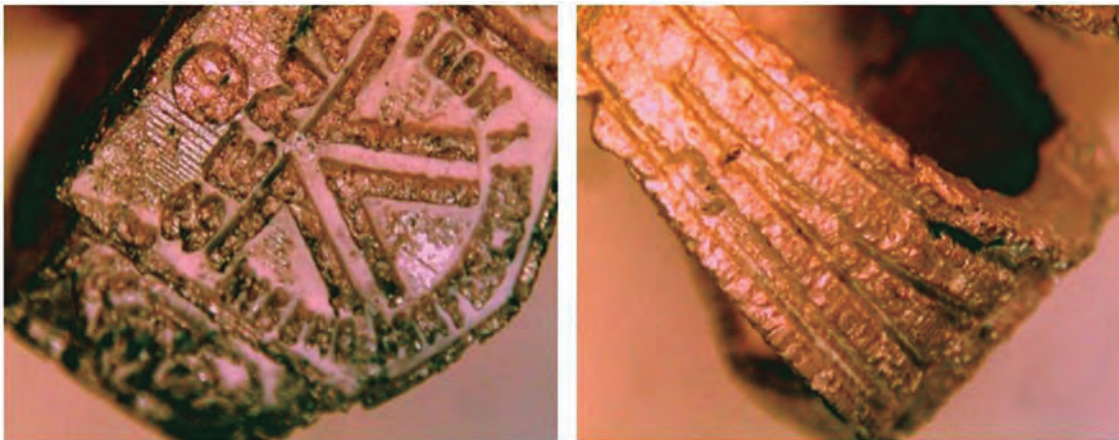


Figura 7. Detalles de la superficie de las piezas fundidas impresas con resina Epic 2000 bajo condiciones de quemado convencional (Curva 1)
Fuente: elaboración propia

Respecto a la curva 2, en la cual se disminuyó el tiempo de sostenimiento en las diferentes etapas, se evidenció un mejor equilibrio entre las partes gruesas y los detalles de la pieza. La rugosidad de la superficie mejoró para la resina B9-Emerald, comparado con los resultados obtenidos en la curva 1 como se aprecia en la Figura 8.

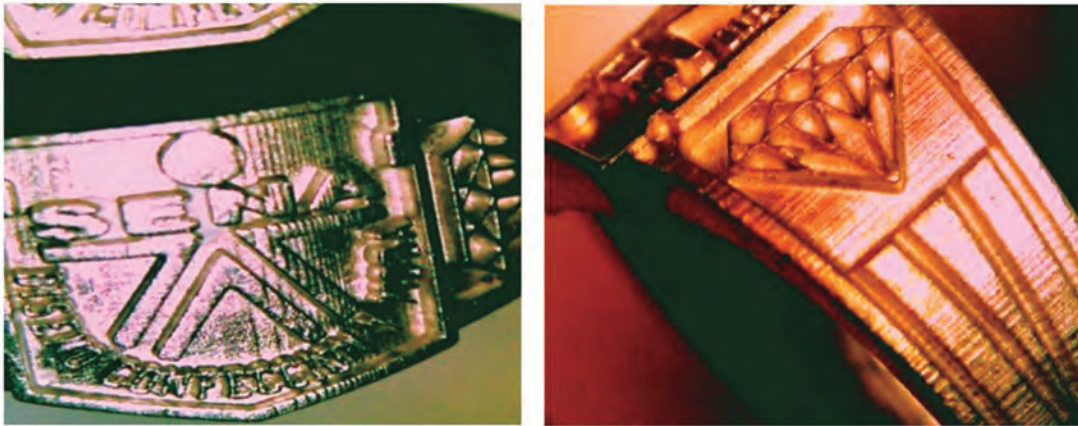


Figura 8. Detalles de la superficie de las piezas fundidas impresas con resina B9-Emerald bajo condiciones de quemado de curva 2
Fuente: elaboración propia

En el caso de las piezas impresas en Epic 2000, se aprecia presencia de poros en la parte frontal de la pieza, específicamente en la parte superior de la palabra “confección” (ver Figura 9).



Figura 9. Detalles de la superficie de las piezas fundidas impresas con resina Epic 2000 bajo condiciones de quemado de Curva 2
Fuente: elaboración propia

Las piezas obtenidas bajo las condiciones de curva 2, presentan un buen acabado, por lo que se requeriría un pulido normal para eliminarlas. La curva 3, solo fue probada con la resina Epic 2000. Como se muestra en la Figura 10, se pudo evidenciar la presencia de grietas y perforaciones en la superficie, posiblemente relacionadas con las fuertes tensiones térmicas que experimenta el yeso. Incluso, en una de las piezas es posible apreciar poros grandes y alineados que podrían haberse generado por una burbuja existente en el molde de yeso, que al romperse generó poros internamente unidos. No obstante, las letras presentaron buena apariencia y las líneas de impresión son visibles.

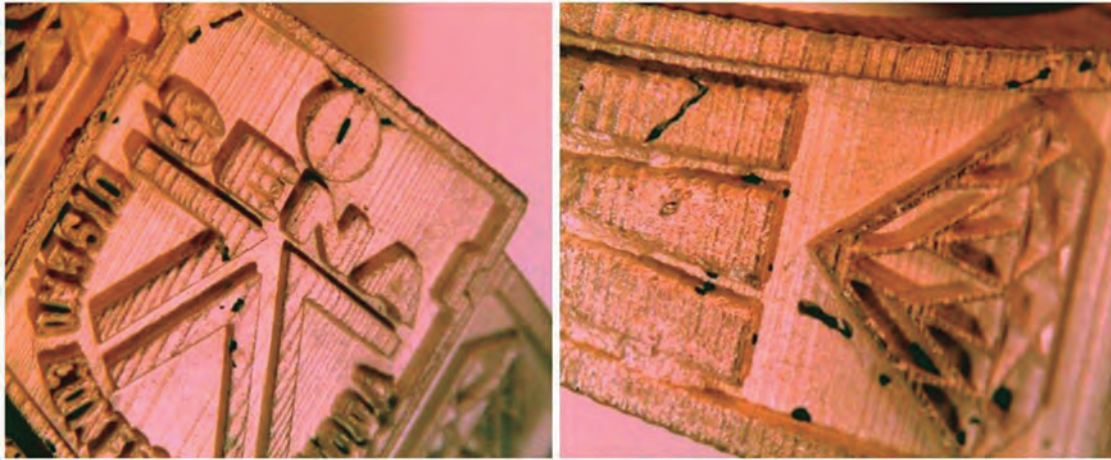


Figura 10. Detalles de la superficie de las piezas fundidas impresas con resina Epic 2000 bajo condiciones de quemado de Curva 3
Fuente: elaboración propia

Por otra parte, la curva 4 de quemado rápido se probó con el fin de determinar si el yeso toleraría un tratamiento similar, y si se podría obtener una pieza con excelente acabado en el menor tiempo posible. No obstante, la inmersión del tarro en el horno a 500 °C, seguido de calentamiento a 730 °C, no fue beneficiosa para mejorar la calidad de los vaciados de piezas de joyería. La pieza fundida, cuyo prototipo fue elaborado con resina Epic 2000, presentó más daños y superficie más rugosa comparada con la pieza obtenida de resina B9-Emerald. (Ver Figuras 11, 12).



Figura 11. Detalles de la superficie de las piezas fundidas impresas con resina B9-Emerald bajo condiciones de quemado rápido
Fuente: elaboración propia

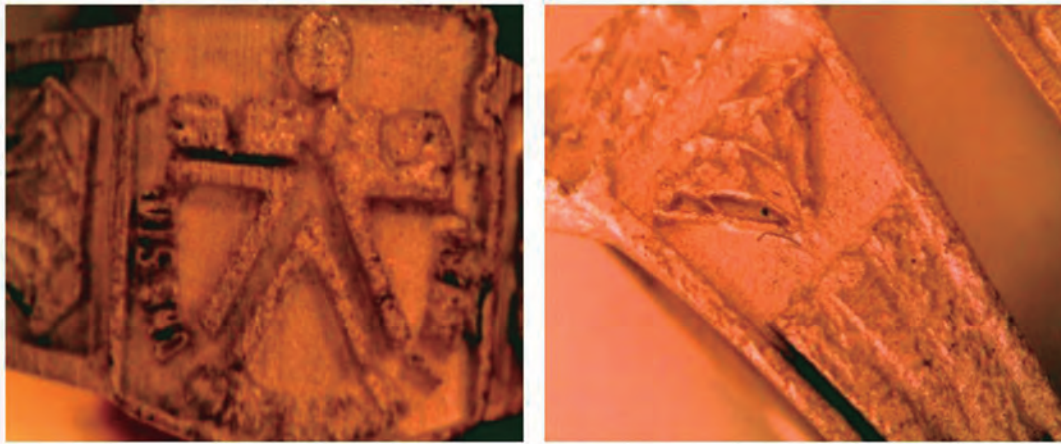


Figura 12. Detalles de la superficie de las piezas fundidas impresas con resina Epic 2000 bajo condiciones de quemado rápido
Fuente: elaboración propia

De acuerdo con los expertos técnicos consultados, la mayoría de las piezas de joyería obtenidas lucen con baja calidad, debido a la presencia de poros, grietas, cúmulo de materia, prominencia, alta rugosidad y letras ilegibles.

Conclusiones

La impresión 3D ha ido adquiriendo importancia y se ha convertido en una tecnología con potencial disruptivo, debido a su versatilidad para la producción directa de objetos físicos a partir de datos de diseño digital, brindando beneficios en términos de costo, capacidad de cumplir con soluciones de diseño complejas y ahorro de tiempo. La industria de la joyería es un ejemplo de su aplicación en la que se necesita libertad de diseño, para crear piezas con un alto grado de innovación y personalización, con especificaciones y dimensiones exactas, sin los altos excedentes que se generan por ser de fabricación única. Para promover el uso generalizado de piezas de resinas en el proceso de cera perdida es importante no alterar el proceso y mantenerlo lo más tradicional posible, permitiendo a las empresas de joyería beneficiarse de las bondades que ofrece el uso de impresión 3D.

En términos generales, se obtuvieron resultados satisfactorios con una curva que cuenta con tres rampas a 150, 455 y 750 °C, mantenidas durante 40, 30 y 20 min, respectivamente. Sin embargo, las piezas presentaron detalles que afectan su calidad, por lo que es difícil decir con exactitud qué variable del proceso tuvo mayor incidencia. Por ello, es importante analizar otras variables como: composición del yeso, relación agua:yeso, tiempo de fraguado, ubicación de los bebederos, tipo de horno utilizado, temperatura real de los moldes, entre otros. Así mismo, para fortalecer esta investigación es necesario hacer un análisis de la interacción entre las resinas y el yeso, teniendo en cuenta las condiciones de quemado.

Bibliografía

- Actis Grande, M.; Forno, I.; Klotz, U.; Tiberto, D. (2011). Quality Excellence in the Direct Casting of RP Resins : Reality or Fiction ? In *The Santa Fe Symposium on Jewelry Manufacturing Technology*. Politecnico di Torino & Research Institute for Precious Metals and Metals Chemistry (FEM).
- ASTM International. (2012). Standard Terminology for Additive Manufacturing Technologies, (Withdrawn 2015) (ASTM F2792-12a).
- ATKearney. (2014). *3D Printing: A Manufacturing Revolution*, 1–16. Recuperado de: <https://www.atkearney.com/documents/10192/5992684/3D+Printing+A+Manufacturing+Revolution.pdf/bf8f5c00-69c4-4909-858a-423e3b94bba3>

- Balletti, C.; Ballarin, M.; Guerra, F. (2017). 3D printing: State of the art and future perspectives. *Journal of Cultural Heritage*, 26, 172–182.
<https://doi.org/10.1016/j.culher.2017.02.010>
- Beeley, P.; Smart, R. (1995). *Investment casting*. London: Institute of Materials.
- Berman, B. (2012). 3-D printing: The new industrial revolution. *Business Horizons*, 55(2), 155–162.
<https://doi.org/10.1016/j.bushor.2011.11.003>
- Bhandari, S.; Regina, B. (2014). 3D Printing and Its Applications. *International Journal of Computer Science and Information Technology Research*, 2(2), 378–380.
- Campos, J. C.; Romeiro, E. (2013). Implementation of Rapid Manufacturing Systems in the Jewellery Industry in Brazil. In Information Resources Management Association (Ed.), *Industrial Engineering: Concepts, Methodologies, Tools, and Applications: Concepts, Methodologies, Tools, and Applications* (817–837). USA: Engineering Science Reference.
<https://doi.org/10.4018/978-1-4666-1945-6.ch046>
- Cheah, C. M.; Chua, C. K.; Lee, C. W.; Feng, C.; Totong, K. (2005). Rapid prototyping and tooling techniques: A review of applications for rapid investment casting. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 25(3–4), 308–320.
<https://doi.org/10.1007/s00170-003-1840-6>
- Chua, C. K.; Leong, K. F.; Lim, C. S. (2010). *Rapid Prototyping: Principles and Applications*. World Scientific Publishing Co. Pte. Ltda.
- Corti, C. (2010). Jewelry Manufacturing Technology. In C. Corti & R. Holliday (Eds.), *Gold: Science and applications* (pp. 191–212). Taylor & Francis Group.
- Gao, W.; Zhang, Y.; Ramanujan, D.; Ramani, K.; Chen, Y.; Williams, C. B.; Zavattieri, P. D. (2015). The status, challenges, and future of additive manufacturing in engineering. *Computer-Aided Design*, 69, 65–89.
<https://doi.org/10.1016/j.cad.2015.04.001>
- Gebhardt, A. (2012). Understanding Additive Manufacturing Rapid Prototyping - Rapid Tooling - Rapid Manufacturing. *Carl Hanser, München*, 591.
<https://doi.org/10.3139/9783446431621>
- Gibson, I.; Rosen, D.; Stucker, B. (2015). *Additive Manufacturing Technologies: 3D Printing, Rapid Prototyping, and Direct Digital Manufacturing*. Second Edition, New York: Springer.
<https://doi.org/10.1007/978-1-4939-2113-3>
- Guo, N.; Leu, M. C. (2013). Additive manufacturing: Technology, applications and research needs. *Frontiers of Mechanical Engineering*, 8(3), 215–243.
<https://doi.org/10.1007/s11465-013-0248-8>
- Hoffman, A. (2016). *Better Diamond Initiative: Different Processes in Jewelry Manufacturing*. Recuperado de: <https://betterdiamondinitiative.org/different-processes-manufacturing-jewelry/>
- Holmström, J.; Partanen, J.; Tuomi, J.; Walter, M. (2010). Rapid manufacturing in the spare parts supply chain: Alternative approaches to capacity deployment. *Journal of Manufacturing Technology Management*, 21(6), 687–697.
<https://doi.org/10.1108/17410381011063996>

- Huang, S. H.; Liu, P.; Mokasdar, A.; Hou, L. (2013). Additive manufacturing and its societal impact: A literature review. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 67(5–8), 1191–1203. <https://doi.org/10.1007/s00170-012-4558-5>
- Marwah, O. M. F.; Sharif, S.; Zainol, M. A.; Ibrahim, M.; Mohamad, E. J. (2013). 3D Printer Patterns Evaluation for Direct Investment Casting. *Applied Mechanics and Materials*, 465–466(December 2013), 1400–1403. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.465-466.1400>
- Mellor, S.; Hao, L.; Zhang, D. (2014). Additive manufacturing: A framework for implementation. *International Journal of Production Economics*, 149, 194–201. <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2013.07.008>
- Mohd Nor, S. Z.; Ismail, R.; Ahmad, S.; Isa, M. I. N. (2015). The effect of dewaxing and burnout temperature in block mold process for copper alloy casting. *International Journal of Engineering and Technology*, 7(5), 1905–1915.
- Muñoz-Mesa, L.; Sánchez, J. (2016). El impacto de la impresión 3D en la joyería. *Lampsakos*, 16, 89–97. <https://doi.org/10.21501/21454086.2219>
- Pattnaik, S.; Karunakar, D. B.; Jha, P. K. (2012). Developments in investment casting process - A review. *Journal of Materials Processing Technology*, 212(11), 2332–2348. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2012.06.003>
- Petrick, I. J.; Simpson, T. W. (2013). 3D Printing Disrupts Manufacturing. *Research Technology Management*, 56(6), 12–16. <https://doi.org/10.5437/08956308X5606193>
- Petrovic, V.; Haro, J. V.; Jordá, O.; Delgado, J.; Blasco, J. R.; Portolés, L. (2009). Additive Layer Manufacturing: State of the art in industrial applications through case studies. *International Journal of Production Research*, 25.
- Prasad, R. (2012). Progress in Investment Castings. In *Science and Technology of Casting Process* (pp. 25–72). IntechOpen. <https://doi.org/10.5772/50550>
- Ramya, A.; Vanapalli, S. I. (2016). 3D Printing Technologies in Various Applications. *International Journal of Mechanical Engineering and Technology*, 7(3), 396–409.
- Rayna, T.; Striukova, L. (2016). From rapid prototyping to home fabrication: How 3D printing is changing business model innovation. *Technological Forecasting and Social Change*, 102, 214–224. <https://doi.org/10.1016/j.techfore.2015.07.023>
- Redwood, B. (s.f. a). *3D HUBS: Jewelry 3D Printing Applications*. Recuperado de: <https://www.3dhubs.com/knowledge-base/jewelry-3d-printing-applications>
- Redwood, B. (s.f. b). *3D HUBS: The Additive Manufacturing Process*. Recuperado de: <https://www.3dhubs.com/knowledge-base/additive-manufacturing-process>
- Redwood, B. (s.f. c). *3D HUBS: The Advantages of 3D Printing*. Recuperado de: <https://www.3dhubs.com/knowledge-base/advantages-3d-printing>
- Schniederjans, D. G. (2017). Adoption of 3D-printing technologies in manufacturing: A survey analysis. *International Journal of Production Economics*, 183(Part A), 287–298. <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2016.11.008>

- Sias, F. R. (2005). *Lost-wax Casting: Old, New, and Inexpensive Methods*. Pendleton, South Carolina: Woodsmere Press. Recuperado de:
https://books.google.com.co/books?id=e_09Enaf4tIC&printsec=frontcover&hl=es&source=gbs_ge_summary_r&cad=0#v=onepage&q&f=false
- Singh, R., Singh, S.; Hashmi, M. S. J. (2016). Investment Casting. In *Reference Module in Materials Science and Materials Engineering* (pp. 1–18).
<https://doi.org/10.1016/B978-0-12-803581-8.04163-1>
- Singh, S.; Singh, R. (2016). Precision investment casting: A state of art review and future trends. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, 230(12), 2143–2164.
<https://doi.org/10.1177/0954405415597844>
- Stansbury, J. W.; Idacavage, M. J. (2016). 3D printing with polymers: Challenges among expanding options and opportunities. *Dental Materials*, 32(1), 54–64.
<https://doi.org/10.1016/j.dental.2015.09.018>
- Underhill, R. (2017). *Jewelry Designs: Wax Carving*. Recuperado de:
<https://jewelrydesigns.com/jewelry/jewelry-making/wax-carving/>
- Vanderploeg, A.; Lee, S.-E.; Mamp, M. (2017). The application of 3D printing technology in the fashion industry. *International Journal of Fashion Design, Technology and Education*, 10(2), 170–179.
<https://doi.org/10.1080/17543266.2016.1223355>
- Yap, Y. L.; Yeong, W. Y. (2014). Additive manufacture of fashion and jewellery products: a mini review: This paper provides an insight into the future of 3D printing industries for fashion and jewellery products. *Virtual and Physical Prototyping*, 9(3), 195–201.
<https://doi.org/10.1080/17452759.2014.938993>



Evaluación del perfil de ácidos grasos de *Isochrysis galbana* mediante el uso de métodos ácidos y alcalinos de transesterificación

Fatty acid profile evaluation of *Isochrysis galbana* through the use of acid and alkaline transesterification methods

Elena Medina-Pérez¹
 María Ruíz-Domínguez²
 Juan Morales-Espinoza³
 Pedro Cereza-Mezquita⁴

¹ Universidad de Antofagasta (Chile); correo: e-b-medina@hotmail.com;
 ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-3289-0522>

² Universidad de Antofagasta (Chile); correo: maria.ruiz@uantof.cl;
 ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-6520-7940>

³ Universidad de Antofagasta (Chile); correo: juan.morales@uantof.cl

⁴ Universidad de Antofagasta (Chile); correo: pedro.cereza@uantof.cl;
 ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-0822-0844>

Recibido: 01-07-2018 Aceptado: 12-03-2019

Cómo citar:

Medina, Elena; Ruíz-Domínguez, María; Morales, Juan; Cereza, Pedro (2019). Evaluación del perfil de ácidos grasos de *Isochrysis galbana* mediante el uso de métodos ácidos y alcalinos de transesterificación. *Informador Técnico*, 83(1), 66-75.
 doi: <https://doi.org/10.23850/22565035.1574>

Resumen

Isochrysis galbana es una microalga marina destacada por contener una gran diversidad de biomoléculas de interés antioxidante. Su alto contenido en lípidos permite su uso en acuicultura o como fuente de biocombustible, por su perfil de ácidos grasos rico en poliinsaturados como Ácido Docosahexaenoico (DHA) o por su alto contenido en fucoxantina (carotenoide). Desde hace un siglo esta microalga es conocida como alimento para bivalvos, larvas de peces y/o moluscos. Por otra parte, la transesterificación es la reacción necesaria para poder derivatizar los ácidos grasos en Ácidos Grasos Metilados (AGM) y poder identificarlos y cuantificarlos; este es un paso clave para optimizar y conocer la mejora del perfil de ácidos grasos obtenido desde la biomasa de estudio. Por consiguiente, este trabajo presentó la diferencia significativa del perfil de ácidos grasos y contenido de los mismos de *I. galbana* a partir de 8 Métodos de Transesterificación Directa e Indirecta (MTD y MTI, respectivamente), además del uso de catalizadores ácidos y alcalinos (AC1, AC2 y AL1 y AL2). Los resultados arrojaron mejores contenidos de ácidos grasos metilados respecto a la biomasa seca en el método MTD-AL1 con un ~6 % y de una abundancia relativa de DHA del ~12 % en el método MTI-AL2. Asimismo, el perfil de ácidos grasos más abundante presente en la microalga se destacó en MTD-AL2 con un 57,66 % en poliinsaturado. Por otro lado, la adición de un patrón interno en las experiencias llevadas a cabo, pudo identificar que los métodos MTD-AL1 y MTI-AC1 obtuvieron mayor eficiencia en la transesterificación con un ~93 % y ~87 %, respectivamente. Por consiguiente, el método que se seleccione para la lectura correcta de ácidos grasos presentes en cualquier biomasa es relevante para observar un perfil más rico en insaturaciones como se ha comprobado con la microalga *I. galbana*.

Palabras clave: lípidos; ácidos grasos; ácido docosahexaenoico; ácidos grasos poliinsaturados; ingredientes funcionales; antioxidantes.

Abstract

Isochrysis galbana is a marine microalga which highlights by containing a great diversity of antioxidant biomolecules. It shows a high content of lipids that can be used in aquaculture and biofuel, its high polyunsaturated fatty acid profile such as DHA (docosahexaenoic acid) or for having high fucoxanthin content (carotenoid group). For a century, this microalga is very well known as feed for bivalves, larva of fish, crustaceans, and mollusks. Transesterification is the necessary reaction to be able to derivative the fatty acids in methylated fatty acids (AGM) and thus be able to identify and quantify them. It is a key step to optimize and therefore know the improvement of the obtained fatty acid profile of study biomass. Hence, this work presents the significant difference of eight methods for obtaining fatty acids from the direct and indirect transesterification reaction (MTD and MTI, respectively). Moreover, acidic and alkaline catalysts were also used (AC1, AC2 and AL1 and AL2). The results presented better contents of AGMs (methylated fatty acids) respecting dry biomass in the MTD-AL1 method with ~ 6% and a relative abundance of DHA of ~ 12 % in MTI-AL2. In addition, the most abundant fatty acid profile was MTD-AL2 with 57.66 % in polyunsaturated. On the other hand, thanks to the addition of an internal standard in the experiences, it was possible to identify that the MTD-AL1 and MTI-AC1 methods were the most efficient in the transesterification obtained with ~ 93 % and ~ 87 % , respectively. Therefore, the method that is selected for the correct reading of fatty acids present in any biomass is relevant to detect a profile with more unsaturation as has been purchased with the microalga *I. galbana*.

Keywords: lipids; fatty acids; docosahexaenoic acid (DHA); PUFAs; functional ingredients; antioxidants.

Introducción

En los últimos años, el interés por producir alimentos funcionales ha aumentado en la industria de comestibles. Este término se introdujo desde los años 80 en Japón, donde se muestra la capacidad que presentan ciertos alimentos de minimizar la incidencia de enfermedades crónicas a partir de una dieta determinada (Aronson, 2017). Así, se han descrito mejoras del sistema inmune, sistema endocrino, nervioso, circulatorio y/o digestivo (Arai, 1996; Aronson, 2017). La búsqueda de nuevos compuestos bioactivos ha crecido en los últimos años por la creciente demanda de interés de los consumidores. En particular, los Ácidos Grasos Poliinsaturados (AGPI) son una de las familias definidas como compuestos de interés y/o compuestos bioactivos, que han tomado más relevancia en el área de alimentos (Molino *et al.*, 2019). Esto debido a que se ha demostrado sus múltiples beneficios para la salud humana, como la regulación de la presión sanguínea, prevención de trombosis y/o regulación de la glucosa en pacientes con diabetes (Lemahieu *et al.*, 2015; Shahidi; Ambigaipalan, 2018). Dentro de esta familia de AGPI, se encuentra el Ácido Docosahexaenoico (DHA) descrito por sus propiedades bioactivas como por su capacidad de potenciar el desarrollo de la memoria y aprendizaje en niños, además de reducir en personas mayores problemas cardiovasculares (Kuda *et al.*, 2016; Tang; Qin; Wang; Li; Tian, 2011).

La fuente tradicional de DHA es el aceite de pescado, pero puede ser insuficiente para la producción alimentaria que demanda el mercado (Sprague; Dick; Tocher, 2016; Tang *et al.*, 2011). Es por esto, que se han buscado otras fuentes alternativas como lo son las microalgas, descritas entre otras, por llegar a contener intracelularmente entre un 20 a un 50 % de su peso seco de lípidos. Incluso, bajo condiciones de estrés pueden llegar a alcanzar hasta el 85 % de producción de estos mismos (Chisti, 2007; Santos-Sánchez *et al.*, 2016). Se describe en algunas especies que entre el 37 al 45 % de su peso puede ser contenido exclusivo de DHA (Santos-Sanchez *et al.*, 2016). De esta manera, las microalgas en los últimos años han sido motivo de estudio por sus propiedades bioactivas y sus potenciales aplicaciones biotecnológicas (Mendes, Reis, Vasconcelos; Guerra; da Silva, 2009). La especie microalgas *Isochrysis galbana*, se conoce por poseer diversas propiedades positivas para la salud humana (Kim; Kang; Kwon; Chung; Pan, 2012), además de ser una especie utilizada ampliamente como alimento en acuicultura, precisamente por su potencial antioxidante (Mishra; Mishra, 2018). Recientes estudios demuestran el posible uso de *I. galbana* como fuente de varias biomoléculas importantes, como polisacáridos, ácidos grasos, carotenoides, vitaminas, entre otros, que mejoran el valor nutricional, no solo en los piensos usados en acuicultura, sino destinados al consumo humano (Guedes; Amaro; Malcata, 2011; Mishra; Mishra, 2018), como por ejemplo en la producción de DHA (Molina; Sánchez; García; Fernández; Acien, 1994; Qi *et al.*, 2002). Particularmente, para poder realizar la extracción y cuantificación de los Ácidos Grasos (AG) se lleva a cabo una reacción de transesterificación de los mismos. Este procedimiento es muy

específico y costoso, especialmente en aquellos destinados para la producción de biodiesel, la transesterificación es el proceso más importante (Chen; Lee, 2018). En la Figura 1 se observa el diagrama general donde se utilizan solventes orgánicos (alcoholes) y catalizadores tanto ácidos como básicos, que mejoran la extracción de los AG desde la biomasa (aceites) (Fukuda; Kondo; Noda, 2001; Sung; Han, 2016). Finalmente, se producen los llamados Ácidos Grasos Metilados AGM pudiendo ser cuantificados por cromatografía de gases (Sung; Han, 2016), más un residuo que es glicerol como coproducto. En el caso de la transesterificación ácida, los reactivos mayormente descritos son el ácido sulfúrico, fosfórico y clorhídrico, los cuales describen una catálisis más lenta, pero más conveniente para los gliceroles que presentan AG libres y con mayor contenido acuoso (Chen; Lee, 2018; Fukuda *et al.*, 2001; Silitonga; Masjuki; Ong; Mahlia; Kusumo, 2017). Sin embargo, en la transesterificación básica se utilizan comúnmente carbonatos, hidróxidos de sodio y potasio, donde la catálisis puede llegar a ser hasta 4000 veces más rápida que la ácida, aunque los gliceroles y alcoholes deben ser anhidros, para evitar la saponificación y reducir la eficiencia de la transesterificación (Fukuda *et al.*, 2001; González; Gallego, 2011).



Figura 1. Reacción del proceso de Transesterificación
Fuente: elaboración propia

Por otro lado, la transesterificación puede clasificarse como directa o indirecta (Figura 2), donde la principal diferencia se presenta en que la primera trabaja con la biomasa directamente (bien húmeda o seca), y la segunda desde una extracción lipídica de la biomasa (González; Gallego, 2011; Silitonga *et al.*, 2017).

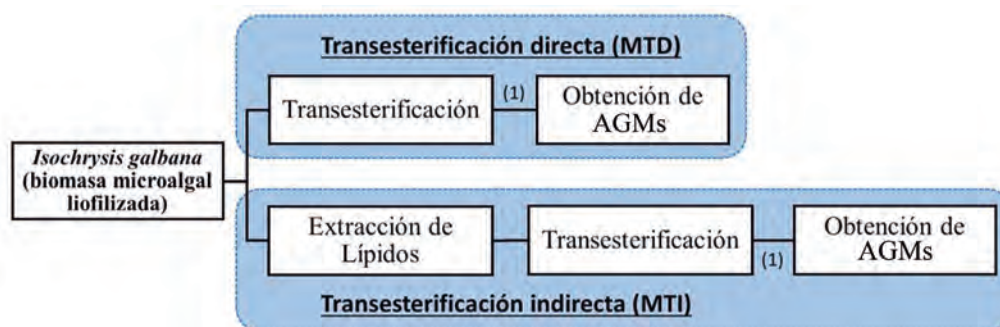


Figura 2. Comparación de los métodos de extracción de ácidos grasos directo e indirecto llevados a cabo desde la microalga *I. galbana*. (1) glicerol y agua
Fuente: elaboración propia

De este modo, el trabajo presentó una comparativa de los diversos perfiles de ácidos grasos resultantes desde *I. galbana* a partir de una selección de 8 métodos de transesterificación descritos en materiales y métodos. Esta experiencia se llevó a cabo en dos grupos que se engloban como métodos directos e indirectos llamados MTD y MTI, respectivamente, y a su vez con cuatro tipos de catalizadores agrupados como ácidos y alcalinos (AC1 - AC2 y AL1 - AL2, respectivamente) para así poder determinar la influencia en el perfil de ácidos grasos y particularmente en el porcentaje obtenido de DHA, según la metodología usada de *I. galbana*.

Materiales y Métodos

Material y reactivos de estudio

La biomasa utilizada en este estudio fue la microalga *Isochrysis galbana*, obtenida desde la colección de microalgas del Laboratorio de Microalgas y Compuestos Bioactivos (Universidad de Antofagasta, Chile). En todos los casos, la microalga

fue cosechada en su fase exponencial de crecimiento y liofilizada en un sistema de congelado en seco (Labconco Freezone 2.5L Benchtop Freeze Dry System, USA). Los reactivos usados para todos los ensayos fueron de calidad cromatográfica. Finalmente, el patrón externo usado en el equipo de cromatografía de gases GC – FID (Shimadzu 2010, Japón) fue AGM Mix C4-C24 estándar de SUPELCO y el patrón interno C15:0 (TAG, tripentadecanoico >99 %, NU-CHEK PRE, INC), usando una concentración por muestra de 10 ppm.

Extracción y cuantificación de lípidos totales

La extracción de lípidos totales se realizó a partir de aproximadamente 20 mg de biomasa liofilizada de *I. galbana*, de acuerdo al método de extracción cloroformo: metanol (2:1, v/v) modificado por Axelsson y Gentili (2014), con agitación continua. La cuantificación de los lípidos totales se realizó gravimétricamente mediante la siguiente fórmula 1:

$$L (\%) = [(P2-P1)/(Biomasa)] \times 100 \quad (1)$$

Donde L es el porcentaje de lípidos totales, P2 es el peso en gramos del vial más el residuo de lípidos obtenidos desde la extracción de biomasa liofilizada de *I. galbana* por el método descrito anteriormente, P1 es el peso en gramos del vial seco sin muestra y Biomasa es la biomasa liofilizada utilizada en gramos de *I. galbana*, por cada extracción. Posteriormente, desde el residuo obtenido de lípidos se conservaron bajo atmósfera rica en N_2 y bajo oscuridad para continuar con el proceso de extracción de ácidos grasos denominado transesterificación indirecta.

Extracción de ácidos grasos

La extracción de ácidos grasos se llevó a cabo desde la biomasa liofilizada de *I. galbana*, (Transesterificación Directa, MTD) o desde la fracción de lípidos explicada en el apartado anterior (Transesterificación Indirecta, MTI). Además, en ambos casos se hizo una comparativa utilizando un catalizador ácido o alcalino/básico (AC y AL, respectivamente), presentándose los diversos métodos resumidos en la Figura 3 junto con sus referencias. En todos los casos, los AGM fueron recuperados en n-hexano para proceder con el análisis de los mismos por cromatografía de gases – GC-FID.

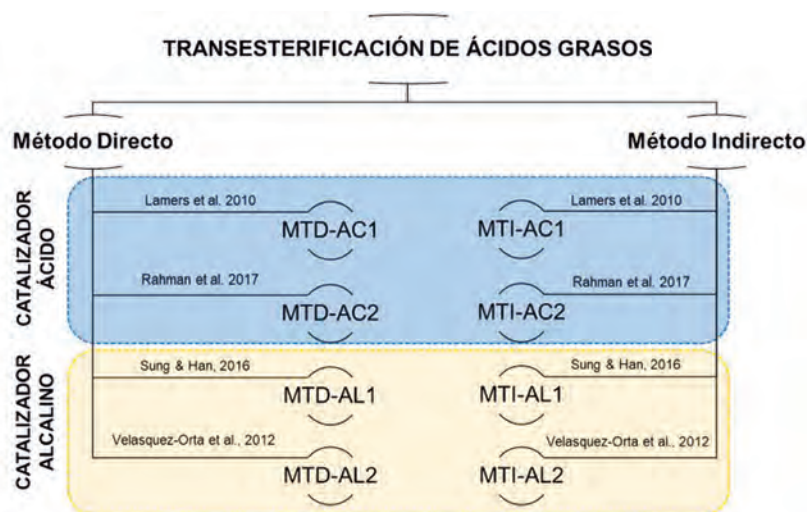


Figura 3. Resumen de los métodos utilizados para la transesterificación de AG a partir de biomasa liofilizada de *Isochrysis galbana*
Métodos de Transesterificación Directos (MTD): MTD- AC1 (catalizador 10% H_2SO_4 : MeOH* (v/v), (Lamers et al., 2010)), MTD-AC2 (catalizador 1 % H_2SO_4 : MeOH (v/v) (Rahman; Aziz; Al-khulaidi; Sakib; Islam, 2017)), MTD-AL1 (catalizador 2,5 M NaOH en MeOH, (Sung; Han, 2016)) y MTD-AL2 (1 % K_2CO_3 : MeOH (p/v) (Velásquez-Orta; Lee; Harvey, 2012)).
Métodos de Transesterificación Indirectos (MTI): MTI- AC1 (catalizador 10 % H_2SO_4 : MeOH (v/v) (Lamers et al., 2010)), MTI-AC2 (catalizador 1 % H_2SO_4 : MeOH (v/v) (Rahman et al., 2017)), MTI-AL1 (catalizador 2,5 M NaOH en MeOH, (Sung; Han, 2016)) y MTI-AL2 (1 % K_2CO_3 : MeOH (p/v) (Velásquez-Orta et al., 2012)
 *MeOH: metanol.

Fuente: elaboración propia

Cuantificación de ácidos grasos por cromatografía gaseosa – GC-FID

Cuantificación de AGMs: El cromatógrafo de gas (GC Shimadzu 2010, Japón) equipado con un Detector de Ionización de Llama (DIL) y con un inyector “split/splitless”, fue usado para analizar la composición de AGMs. En todos los casos, las muestras fueron inyectadas en una columna capilar RESTEK (30 m, 0,32 mm i.d., 0,25 µm espesor). La temperatura del inyector se mantuvo a 250 °C en modo split, con una relación de 4.5:1 y el gas portador fue nitrógeno a un flujo constante de 11,25 mL•min⁻¹. La temperatura del horno fue de 80 °C por 5 min, posteriormente se incrementó a 165 °C a 4 °C•min⁻¹ por 2 min, se continuó incrementando a 180 °C a 2 °C•min⁻¹ por 5 min. Se calentó con un gradiente de 2 °C•min⁻¹ a 200 °C por 2 min. Luego, nuevamente se calentó con una velocidad de 4 °C•min⁻¹ a 230 °C por 2 min y finalmente esa temperatura se mantuvo por 2 min, alcanzando 250 °C a 2 °C•min⁻¹, mientras que la temperatura del detector fue de 280 °C. De forma individual, los AGMs fueron identificados mediante la comparación de su tiempo de retención con la mezcla del AGM estándar (AGM Mix C4-C24, Supelco Analytical) y fueron cuantificados, de acuerdo a la comparación del área arrojada debajo de los picos del mix establecido mediante el software LabSolutions versión 5 compatible con Windows.

Eficiencia de la transesterificación: para conocer la eficiencia en la reacción de transesterificación de cada uno de los métodos utilizados, se añadió desde el comienzo de la reacción una cantidad de patrón interno de 100 ppm por muestra (Tripentadecanoico >99%, NU-CHEK PRE, INC), donde se calculó la eficiencia de la transesterificación mediante la siguiente fórmula 2:

$$\eta_{TR}, (\%) = (IS2 / (IS1) \times 100 \quad (2)$$

Donde η_{TR} es la eficiencia de la transesterificación en porcentaje, IS2 es la concentración del patrón interno calculada en cromatógrafo de gases (GC-FID) y IS1 es la concentración real añadida por muestra del patrón interno (~100 ppm).

Análisis estadístico

Todas las muestras se realizaron por triplicado y, además, en el caso de patrón interno para cálculos de eficiencia de la transesterificación se añadió una muestra más sin biomasa, tan solo con el patrón. Los criterios de aceptación de cada uno de los parámetros de validación se calcularon mediante el software STATGRAPHICS Centurion XVI, versión 16.1.18.

Resultados y Discusión

El perfil de ácidos grasos mayoritarios presentes en *I. galbana* se muestran en la Tabla 1, según el método de transesterificación ácida y alcalina utilizado. Se observa que, entre métodos de extracción directos e indirectos, estos últimos logran extraer un perfil más variado de AG. La extracción de lípidos fue llevada a cabo con la mezcla de solventes descritas anteriormente, cloroformo:metanol, 2:1 (v/v) (Axelsson; Gentili, 2014), la cual fue demostrada en varios estudios como la mezcla de solventes más eficientes en la extracción de lípidos (D'Oca *et al.*, 2011; Sheng; Vannela; Rittmann, 2011). Por otro lado, se puede constatar que, entre las catálisis ácida y alcalina, esta última fue la más efectiva en la obtención de AGPI, pero no de Ácidos Grasos Monoinsaturados (AGMI), los cuales tienen un alto interés para la fabricación de alimentos funcionales (Xu; Qian, 2014). Cabe destacar que, ambas catálisis presentan como más abundantes el ácido palmítico (C16:0), palmitoléico (C16:1), oleico (C18:1), y ácido linolénico (C18:3). Según Velásquez *et al.*, (2012), un AG exclusivo de la catálisis alcalina es el ácido linolénico (C18:3), y para la catálisis ácida el ácido mirístico (C14:0) y ácido miristoleico (C14:1), los cuales también fueron observados en el perfil de *I. galbana*.

Tabla 1.
Métodos de transesterificación

Ácidos grasos	Método Directo (MTD)				Método Indirecto (MTI)			
	AC1	AC2	AL1	AL2	AC1	AC2	AL1	AL2
C4:0	-	-	-	5,37	1,27	0,23	1,39	8,43
C14:0	20,44	18,73	13,76	2,17	20,68	20,51	19,16	19,41
C16:0	33,22	35,42	21,99	4,94	41,91	38,37	27,45	-
C18:0	-	-	-	-	0,81	2,97	-	-
Σ Saturados	53,66	54,15	35,75	12,48	64,67	62,08	48	27,84
C14:1	1,37	-	-	-	-	-	2,85	-
C16:1	11,25	9,43	9,78	2,15	-	9,17	9,61	-
C18:1	33,08	35,13	34,19	-	3,95	25,46	23,40	12,17
C24:1	-	-	-	-	-	-	-	4,25
Σ Monoinsaturados	45,7	44,56	43,97	2,15	3,95	34,63	35,86	16,42
C18:2	-	-	-	12,24	3,38	-	-	-
C18:3	-	-	15,80	40,28	0,97	-	13,99	10,62
C20:4	-	-	-	-	-	0,83	-	10,11
C20:3	-	-	-	5,04	-	1,35	-	-
DHA (C22:6)	0,64	1,29	0,60	0,10	2,20	1,11	2,15	12,32
Σ Poliinsaturados	0,64	1,29	16,4	57,66	6,55	3,29	16,14	33,05
Otros	-	-	3,88	27,71	24,82	-	-	22,69

Perfil de ácidos grasos mayoritarios presentes en *I. galbana*, según los métodos de transesterificación usados (% área, n=3, $\pm$ SD no fue representada en la tabla, pero fue menor a 5 %)

Fuente: elaboración propia

Respecto a la abundancia obtenida de DHA, en la Tabla 1 se muestra que una mayor cantidad obtenida fue a través del método MTI-AL2 (12,32 %) seguido por MTI-AC1 (2,20 %), lo que reafirma lo descrito anteriormente donde la fase lipídica que involucra la extracción indirecta potenciaría la obtención de DHA a partir de la microalga, para así generar alimentos funcionales con múltiples beneficios para la salud humana (Kim *et al.*, 2012).

En la Figura 4 se observa el contenido de AGMs obtenido a partir de la microalga *I. galbana*, de acuerdo al método de transesterificación utilizado respecto a biomasa y a la cuantificación de lípidos. El método MTD-AL1 fue el que mayor contenido de AGM respecto a biomasa y lípidos arrojó 59,60 y 124,15 mg/g, respectivamente, lo que permite establecer que la fase lipídica realizada en la extracción indirecta, no tiene mayor influencia en el contenido obtenido como AGM total. Estos resultados demuestran que al ser la extracción directa la más efectiva para extraer mayor cantidad de AG desde la microalga, el proceso es más rápido y económico en cuanto a la utilización de solventes. Sin embargo, de acuerdo a lo descrito por Fukuda *et al.*, (2001); Santos-Sánchez *et al.*, (2016), la transesterificación alcalina es más rápida que la ácida. Sin embargo, los métodos MTD-AL2 y MTI-AL2 fueron los que menos concentraciones de AGM alcanzaron, aunque la proporción de DHA fue del 12 % en el caso de MTI-AL2. Aunque fue el caso con mayor abundancia de todos no implicó el hecho de que fuera el que mayor cantidad obtuviera, puesto que hubo un 0,28 % de AGM respecto a biomasa seca. De esta manera, el método MTD-AL1 fue no solo el que mejor resultado obtuvo de AGM, sino también el mejor con respecto a la abundancia relativa de DHA, siendo inferior a lo descrito por Santos-Sánchez *et al.* (2016), llegando a alcanzar 5,9 % de DHA.

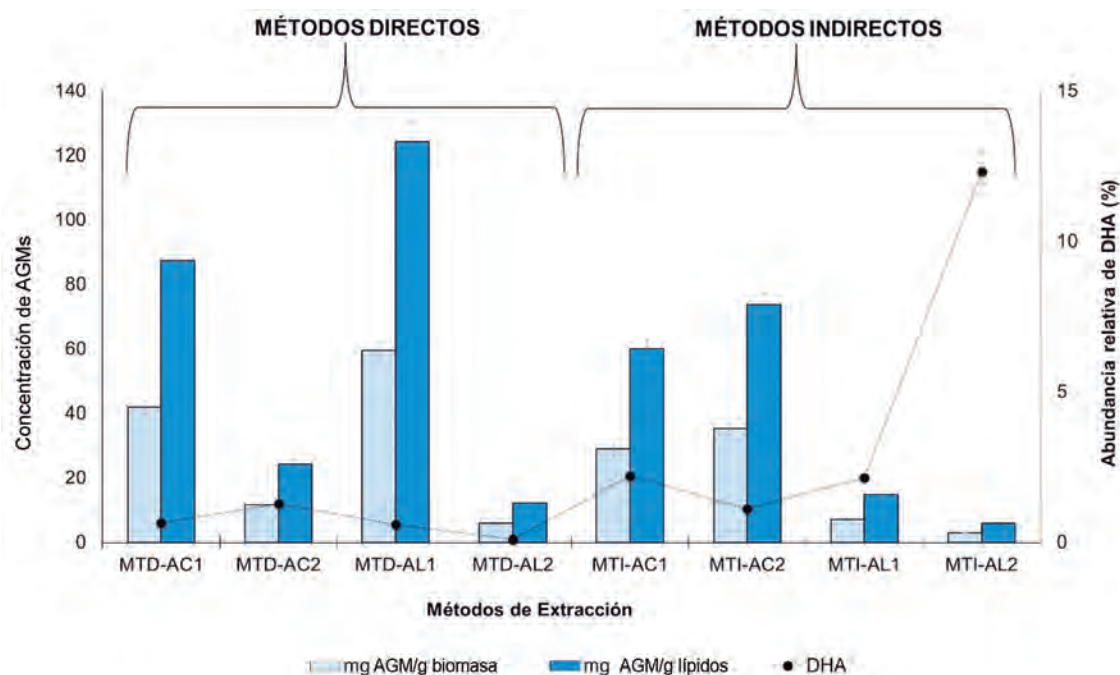


Figura 4. Contenido de AGMs respecto a biomasa y lípidos de la microalga *I. galbana* y abundancia relativa de DHA (%)
Fuente: elaboración propia

La Figura 5 presenta la eficacia de cada método de transesterificación calculado a partir del patrón interno añadido desde el comienzo de la reacción.

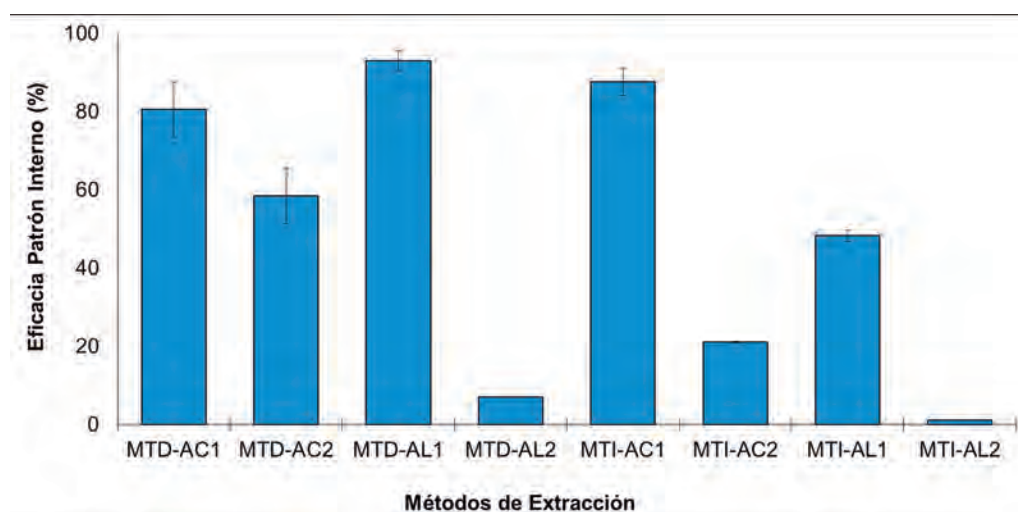


Figura 5. Eficacia de los métodos de transesterificación directos e indirectos
Fuente: elaboración propia

El método MTD-AL1 presentó la mayor eficacia con un 93,03 % seguido por MTI-AC1 con un 87,61 %. Sin embargo, el método MTI-AC2 fue uno de los más bajos (~21 %), siendo el que en la Figura 4 se presenta con un contenido promedio de AGM respecto a biomasa (35,33 mg/g), esto, de acuerdo a otros autores, podría haber ocurrido porque en sí la catálisis ácida es lenta, y podrían haberse degradado una cantidad de ácidos grasos presentes en la biomasa (Fukuda *et al.*, 2001). Por último, los métodos MTI-AL2 y MTD-AL2 son los que menos eficiencia tuvieron (~1,0-7,0 %), coincidiendo con que fueron los que menores concentraciones de AGM respecto a biomasa y lípidos presentaron (Figura 4). Estos resultados coinciden en parte con lo descrito por Chen y Lee (2018), en el estudio de optimización de transesterificación de ácidos

grasos de la microalga *Monoraphidium* sp como métodos directos. El trabajo concluye con una mejora del rendimiento de AGM, usando transesterificación ácida en vez de alcalina tanto desde la biomasa húmeda como seca. Además, propone una transesterificación continua de catalizadores, ácidos y básicos dando lugar a mejores resultados una combinación de ambas, lo cual podría ser planteado para próximas investigaciones. Similares resultados se observaron en el trabajo desarrollado por Chamola, Khan, Raj, Verma y Jain (2019), a partir de un diseño Box Behnken (Narula; Thakur; Uniyal; Kalra; Jain, 2017), cuyos factores fueron el porcentaje de metanol, de catalizador (ácido o alcalino) y la concentración de los mismos. Su estudio refleja una mejora en el rendimiento de AGM bajo catálisis ácida, la cual presenta datos muy seguidos con la alcalina (89,5 y 87,4 % de rendimiento de AGM, respectivamente). Aunque nuestro estudio destaca MTD-AL1 (catalizador alcalino 2,5M NaOH), es el único caso, pues de forma general tanto en métodos directos como indirectos resultaron más eficientes las reacciones con catalizadores ácidos (H_2SO_4) y en mayor porcentaje (10 % v/v).

Conclusiones

Entre los ocho métodos de extracción utilizados, el más eficiente para la extracción de DHA fue MTI-AL2 con más del 12 % en abundancia relativa de DHA. Sin embargo, debido al poco contenido de ácidos grasos la productividad de DHA no es consistente. Por otro lado, MTD-AL1 fue el proceso con el perfil más rico en mono y poliinsaturado (43,97 % y 16,4 %, respectivamente, además de contener mayor contenido de AGM respecto biomasa del ~6 %, lo que implica aproximadamente el 12,4 % del contenido de lípidos de *I. galbana*. Si realizamos una comparación entre los métodos de extracción directos e indirectos, los métodos directos lograron extraer mayor cantidad de DHA que los indirectos, por lo que el proceso de extracción se realizó de forma más rápida, lo que impide que algún AG se degrade. Finalmente, se observó en todos los casos que la microalga *I. galbana* es una microalga marina con un perfil rico en ácidos grasos útiles en aplicaciones alimentarias, además de contener DHA, importante ingrediente funcional, lo que hace *I. galbana* puede ser una potencial candidata como fuente natural de compuestos bioactivos.

Referencias

- Arai, S. (1996). Studies on functional foods in Japan—state of the art. *Bioscience, biotechnology, and biochemistry*, 60(1), 9-15.
<https://doi.org/10.1271/bbb.60.9>
- Aronson, J. K. (2017). Defining 'nutraceuticals': neither nutritious nor pharmaceutical. *British journal of clinical pharmacology*, 83(1), 8-19.
<https://doi.org/10.1111/bcp.12935>
- Axelsson, M.; Gentili, F. (2014). A single-step method for rapid extraction of total lipids from green microalgae. *PloS one*, 9(2), e89643.
<https://doi.org/10.1371/journal.pone.0089643>
- Chamola, R.; Khan, M. F.; Raj, A.; Verma, M.; Jain, S. (2019). Response surface methodology based optimization of in situ transesterification of dry algae with methanol, H_2SO_4 and NaOH. *Fuel*, 239, 511-520.
<https://doi.org/10.1016/j.fuel.2018.11.038>
- Chen, J.-J.; Lee, Y.-R. (2018). Optimization of the transesterification reaction of microalgal *Monoraphidium* sp. *Renewable Energy*, 129, Part B, 717-723.
<https://doi.org/10.1016/j.renene.2017.06.012>
- Chisti, Y. (2007). Biodiesel from microalgae. *Biotechnology advances*, 25(3), 294-306.
<https://doi.org/10.1016/j.biotechadv.2007.02.001>

- D'Oca, M. G. M.; Viêgas, C. V.; Lemoes, J. S.; Miyasaki, E. K.; Morón-Villarreyes, J. A.; Primel, E. G.; Abreu, P. C. (2011). Production of AGMs from several microalgal lipidic extracts and direct transesterification of the *Chlorella pyrenoidosa*. *Biomass and bioenergy*, 35(4), 1533-1538. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2010.12.047>
- Fukuda, H.; Kondo, A.; Noda, H. (2001). Biodiesel fuel production by transesterification of oils. *Journal of bioscience and bioengineering*, 92(5), 405-416. [https://doi.org/10.1016/S1389-1723\(01\)80288-7](https://doi.org/10.1016/S1389-1723(01)80288-7)
- González, A. R.; Gallego, E. G. (2011). Variables de operación en el proceso de transesterificación de grasas animales: una revisión. *Ingeniería y Universidad*, 15(1), 197-218. Recuperado de <https://revistas.javeriana.edu.co/index.php/iyu/article/view/1143>
- Guedes, A. C.; Amaro, H. M.; Malcata, F. X. (2011). Microalgae as sources of high added-value compounds—a brief review of recent work. *Biotechnology progress*, 27(3), 597-613. <https://doi.org/10.1002/btpr.575>
- Kim, S. M.; Kang, S.-W.; Kwon, O.-N.; Chung, D.; Pan, C.-H. (2012). Fucoxanthin as a major carotenoid in *Isochrysis* aff. *galbana*: Characterization of extraction for commercial application. *Journal of the Korean Society for Applied Biological Chemistry*, 55(4), 477-483. <https://doi.org/10.1007/s13765-012-2108-3>
- Kuda, O.; Brezinova, M.; Rombaldova, M.; Slavikova, B.; Posta, M.; Beier, P.; Kopecky, J. (2016). Docosahexaenoic Acid-Derived Fatty Acid Esters of Hydroxy Fatty Acids (FAHFAs) With Anti-inflammatory Properties. *Diabetes*, 65(9), 2580-2590. <https://doi.org/10.2337/db16-0385>
- Lamers, P. P.; van de Laak, C. C.; Kaasenbrood, P. S.; Lorier, J.; Janssen, M.; De Vos, R. C.; Wijffels, R. H. (2010). Carotenoid and fatty acid metabolism in light-stressed *Dunaliella salina*. *Biotechnology and bioengineering*, 106(4), 638-648. <https://doi.org/10.1002/bit.22725>
- Lemahieu, C.; Bruneel, C.; Ryckebosch, E.; Muylaert, K.; Buyse, J.; Foubert, I. (2015). Impact of different omega-3 polyunsaturated fatty acid (n-3 PUFA) sources (flaxseed, *Isochrysis galbana*, fish oil and DHA Gold) on n-3 LC-PUFA enrichment (efficiency) in the egg yolk. *Journal of functional foods*, 19, part B, 821-827. <https://doi.org/10.1016/j.jff.2015.04.021>
- Mendes, A.; Reis, A.; Vasconcelos, R.; Guerra, P.; da Silva, T. L. (2009). *Cryptocodinium cohnii* with emphasis on DHA production: a review. *Journal of applied phycology*, 21(2), 199-214. <https://doi.org/10.1007/s10811-008-9351-3>
- Mishra, N.; Mishra, N. (2018). Exploring the biologically active metabolites of *Isochrysis galbana* in pharmaceutical interest: an overview. *International Journal of Pharmaceutical Sciences and Research*, 9(6), 2162-2174.
- Molina Grima, E.; Sánchez Pérez, J. A.; García Camacho, F.; Fernández Sevilla, J. M.; Acien Fernández, F. G. (1994). Effect of growth rate on the eicosapentaenoic acid and docosahexaenoic acid content of *Isochrysis galbana* in chemostat culture. *Applied microbiology and biotechnology*, 41(1), 23-27. <https://doi.org/10.1007/BF00166076>
- Molino, A.; Larocca, V.; Di Sanzo, G.; Martino, M.; Casella, P.; Marino, T.; Musmarra, D. (2019). Extraction of Bioactive Compounds Using Supercritical Carbon Dioxide. *Molecules*, 24(4), 782. <https://doi.org/10.3390/molecules24040782>

- Narula, V.; Thakur, A.; Uniyal, A.; Kalra, S.; Jain, S. (2017). Process parameter optimization of low temperature transesterification of algae-Jatropha Curcas oil blend. *Energy*, 119, 983-988. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2016.11.043>
- Qi, B.; Beaudoin, F.; Fraser, T.; Stobart, A. K.; Napier, J. A.; Lazarus, C. M. (2002). Identification of a cDNA encoding a novel C18- Δ 9 polyunsaturated fatty acid-specific elongating activity from the docosahexaenoic acid (DHA)-producing microalga, *Isochrysis galbana*. *FEBS letters*, 510(3), 159-165. [https://doi.org/10.1016/S0014-5793\(01\)03247-1](https://doi.org/10.1016/S0014-5793(01)03247-1)
- Rahman, M.; Aziz, M.; Al-khulaidi, R. A.; Sakib, N.; Islam, M. (2017). Biodiesel production from microalgae *Spirulina maxima* by two step process: Optimization of process variable. *Journal of Radiation Research and Applied Sciences*, 10(2), 140-147. <https://doi.org/10.1016/j.jrras.2017.02.004>
- Santos-Sánchez, N.; Valadez-Blanco, R.; Hernández-Carlos, B.; Torres-Arino, A.; Guadarrama-Mendoza, P.; Salas-Coronado, R. (2016). Lipids rich in ω -3 polyunsaturated fatty acids from microalgae. *Applied microbiology and biotechnology*, 100(20), 8667-8684. <https://doi.org/10.1007/s00253-016-7818-8>
- Shahidi, F.; Ambigaipalan, P. (2018). Omega-3 polyunsaturated fatty acids and their health benefits. *Annual review of food science and technology*, 9, 345-381. <https://doi.org/10.1146/annurev-food-111317-095850>
- Sheng, J.; Vannela, R.; Rittmann, B. E. (2011). Evaluation of methods to extract and quantify lipids from *Synechocystis* PCC 6803. *Bioresource technology*, 102(2), 1697-1703. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2010.08.007>
- Silitonga, A.; Masjuki, H.; Ong, H. C.; Mahlia, T.; Kusumo, F. (2017). Optimization of extraction of lipid from *Isochrysis galbana* microalgae species for biodiesel synthesis. *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects*, 39(11), 1167-1175. <https://doi.org/10.1080/15567036.2017.1310957>
- Sprague, M.; Dick, J. R.; Tocher, D. R. (2016). Impact of sustainable feeds on omega-3 long-chain fatty acid levels in farmed Atlantic salmon, 2006–2015. *Scientific Reports*, 6, 21892. <https://doi.org/10.1038/srep21892>
- Sung, M.; Han, J.-I. (2016). Alkaline in situ transesterification of *Aurantiochytrium* sp. KRS 101 using potassium carbonate. *Bioresource technology*, 205, 250-253. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2015.12.089>
- Tang, S.; Qin, C.; Wang, H.; Li, S.; Tian, S. (2011). Study on supercritical extraction of lipids and enrichment of DHA from oil-rich microalgae. *The Journal of Supercritical Fluids*, 57(1), 44-49. <https://doi.org/10.1016/j.supflu.2011.01.010>
- Velásquez-Orta, S.; Lee, J.; Harvey, A. (2012). Alkaline in situ transesterification of *Chlorella vulgaris*. *Fuel*, 94, 544-550. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2011.11.045>
- Xu, Y.; Qian, S. Y. (2014). Anti-cancer activities of ω -6 polyunsaturated fatty acids. *Biomedical journal*, 37(3), 112-119.



Inoculación de nanopartículas de TiO_2 -Ag en semillas de espinaca

Inoculation of TiO_2 -Ag nanoparticles in spinach seeds

Fernando Gordillo-Delgado¹
Jakeline Zuluaga-Acosta²
Benyi-Juliana Marín-Gallego³

¹ Universidad del Quindío; (Colombia); correo: fgordillo@uniquindio.edu.co

² Universidad del Quindío (Colombia); correo: jzuluagaa@uqvirtual.edu.co

³ Universidad del Quindío (Colombia); correo: bjmaring@uqvirtual.edu.co

Recibido: 16-10-2018 Aceptado: 12-04-2019

Cómo citar: Gordillo-Delgado, Fernando; Zuluaga-Acosta, Jakeline; Marín-Gallego, Benyi (2019). Inoculación de nanopartículas de TiO_2 -Ag en semillas de espinaca. *Informador Técnico*, 83(1), 76-85.
<https://doi.org/10.23850/22565035.1659>

Resumen

La espinaca es consumida por su valioso aporte nutricional. Sin embargo, en Colombia su baja producción en cultivos, ha sido de poco interés en el área de la investigación. Por otro lado, la nanotecnología que puede ser utilizada en la agricultura para evitar o controlar enfermedades en los cultivos a través de la aplicación de nanopartículas (NPs) se perfila como un tema de alto potencial en nuestro país. En este trabajo, se evaluó la inoculación de suspensiones de NPs de dióxido de titanio con incorporación de plata (TiO_2 -Ag) en semillas de espinaca. Las NPs se sintetizaron a través del método sol-gel y se caracterizaron por medio de Difracción De Rayos X (DFR). Se obtuvieron muestras en polvo con tamaños de partícula entre 7 y 26 nm que se suspendieron en agua a diferentes concentraciones para la inoculación. En comparación con el grupo control (sin inoculación), se obtuvo un crecimiento de las plantas con NPs del tamaño más bajo y concentración del 2 %, debido a que posiblemente el TiO_2 -Ag incorporado contribuye al proceso de fotosíntesis y desempeña un papel antimicrobiano. La actividad fotosintética de las plantas tratadas, se midió mediante la técnica fotoacústica y del análisis de los resultados se obtuvo que con el tratamiento hecho con la suspensión de NPs de menor tamaño, a concentración entre 0,25 y 2 %, la Razón de Evolución de Oxígeno (REO) es similar a la que se observó en las plantas del grupo control. Esto indica que el tratamiento con NPs de TiO_2 -Ag entre 7 y 8 nm puede inducir el crecimiento sin alterar drásticamente la tasa fotosintética de plantas de espinaca a bajas concentraciones, lo que puede ser una alternativa eficiente para la mejora de la producción de este cultivo.

Palabras clave: espinaca; nanopartículas; fotoacústica; dióxido de titanio; plata; actividad fotosintética; inoculación de semillas.

Abstract

Spinach is consumed for its valuable nutritional contributions. However, in Colombia, this crop has been of little interest in the research area due to its low production. On the other hand, the nanotechnology that can be used in agriculture to prevent or control diseases in crops through the application of nanoparticles (NPs) is emerging as a high potential subject in our country. In this work, the inoculation of suspensions of titanium dioxide NPs with the incorporation of silver (TiO_2 -Ag) in spinach seeds was evaluated. The NPs were synthesized through Sol-gel method and characterized by means of X-ray diffraction; suspensions of these powder samples of grain size between 7 and 26 nm were prepared at different concentrations for inoculation. In comparison with the control group (without inoculation), highest plant growth was obtained with NPs of the lowest size and 2 % concentration. It possibly due to the contribution in the photosynthesis process and antimicrobial role of incorporated TiO_2 -Ag. The photosynthetic activity of the plants from control and treated groups was measured by the photoacoustic technique and it was found that the plants treated with the smallest NPs suspension,

at a concentration between 0.25 and 2 %, presented a rate of oxygen evolution similar to control group. These results indicate that the treatment with NPs of TiO₂-Ag between 7 and 8 nm at low concentration can improve the growth without drastic alteration of the photosynthetic rate of spinach plants, which can be an efficient alternative for improvement in crop production.

Keywords: spinach; nanoparticles; photoacoustic; titanium dioxide; silver; Inoculation of seeds.

Introducción

El consumo de hortalizas frescas en el mundo ha incrementado del 36 al 40 % en las últimas décadas, con una tasa anual de producción de 4,1 % (881 millones de toneladas) aproximadamente, en comparación con la reportada el siglo pasado de 1,7 % (324 millones de toneladas). China es el mayor contribuyente con el 50 % de la producción mundial (*Food and Agriculture Organization of the United Nations* [FAO], 2018).

Así mismo, la extensión de cultivos de espinaca (*Spinace oleraceae*) ha aumentado por su valor nutricional, bajo en calorías y con un contenido elevado de agua, que aporta fibra, calcio, fósforo, hierro y vitaminas A, B1, B2 y C. Esta planta generalmente, se desarrolla a temperaturas entre 5 y 15 °C en terrenos fértiles ricos en materia orgánica y con pH neutro (Watt, 1975; Fersini, 1976; *Centers for Disease Control and Prevention* (CDC), 2007).

En Colombia, el área sembrada de hortalizas de hoja entre ellas la espinaca, es de alrededor de 12.850 ha, distribuidas en los departamentos de la región central como Cundinamarca, Boyacá, Antioquia, Santander y Norte de Santander (Departamento Administrativo Nacional de Estadística [DANE], 2015). Sin embargo, como la producción de espinaca es baja respecto al total de hortalizas de hoja (alrededor de 200 ha cultivadas anualmente), no hay suficientes manuales de manejo ni alternativas para solucionar problemas locales, específicamente los relacionados con el control de enfermedades y plagas (Sánchez, 2017).

Con relación a la nanotecnología, se aplica en la agricultura para el tratamiento de enfermedades de las plantas y en el mejoramiento de la absorción de nutrientes. Su uso puede reducir el empleo de pesticidas e insecticidas comerciales, lo que mitiga el impacto ambiental de esta actividad (Rai; Ingle, 2012). Uno de los materiales con mayor potencial para este tipo de usos es la plata (Ag), por sus características antimicrobianas (Wiesner; Lowry; Dionysiou; Biswas, 2006), mientras que el dióxido de titanio (TiO₂), se perfila como un candidato viable por su biocompatibilidad y su actividad fotocatalítica (Osborne *et al.*, 2013).

En este trabajo se evaluó el efecto de la inoculación de suspensiones de NPs de TiO₂-Ag en semillas de espinaca, a través del seguimiento y monitoreo de medidas morfológicas y de la actividad fotosintética.

Materiales y métodos

Síntesis y caracterización del TiO₂-Ag

El TiO₂-Ag se obtuvo a través del método sol-gel, este método es una ruta química que permite la fabricación de materiales amorfos y policristalinos a temperatura ambiente. Se inicia con la síntesis de una suspensión coloidal de partículas sólidas en un líquido (sol), que después de un proceso de hidrólisis y condensación se transforman en un material sólido lleno de solvente (gel). Éste se evapora del gel para obtener la muestra en forma de polvo. En este caso, se mezclaron 33 mL de metanol (*Merck*), 5 mL de titanio bis (*acetylacetonate diisopropoxide*) (*Sigma-Aldrich*) al 97 % y 0,04 g de nitrato de plata (*Sigma-Aldrich*) al 99 % en un *beaker* con agitación constante hasta obtener una dilución completa del nitrato de plata. Después la mezcla se vertió en una caja de *Petri* manteniendo la agitación. Luego, se preparó una mezcla de agua destilada y metanol de la que se añadieron 2 mL gota a gota a la caja de *Petri* y se continuó la agitación durante 5 min. Finalmente, el producto se dejó secar a temperatura ambiente hasta obtener un sólido que se maceró y se sinterizó a temperaturas de 300, 400, 500 y 600 °C durante 1 h. Después de cada tratamiento térmico las muestras se caracterizaron mediante Difracción de Rayos X (DRX).

Se eligió el método sol-gel para la fabricación de las NPs de $\text{TiO}_2\text{-Ag}$, debido a que es relativamente económico, realizable en un menor tiempo, amigable con el medio ambiente y seguro. De igual forma, permite la observación de la formación del gel y la ventaja de que es posible manipular el tamaño de grano y sintetizar material en polvo de alta pureza. Este es uno de los métodos que permite producir estructuras homogéneas a escalas finas (nm) y se ha posicionado dentro de las rutas químicas para la generación de material inorgánico avanzado de alta tecnología (Hench; West, 1990; Morales; Moran; Quintana; Estrada, 2009).

Inoculación de semillas de espinaca

Las semillas de espinaca (*Spinace oleracea*) se sumergieron en suspensiones de NPs de $\text{TiO}_2\text{-Ag}$ en agua destilada, previamente sometidas a ultrasonido por un periodo de 3 h. Los tratamientos se hicieron en cajas de *Petri* durante 3 d, a una temperatura promedio de 17 °C con periodos alternos de exposición lumínica natural, utilizando concentraciones de 0,25, 2, 4 y 6 % de NPs de tamaños de 7, 8, 10 y 26 nm. Después de este proceso, las semillas se dejaron sobre papel adsorbente con riego diario hasta su germinación y se trasplantaron en un sustrato hidropónico para su cultivo bajo condiciones de invernadero. La altura de las plantas se registró diariamente durante 16 días.

Actividad fotosintética

La Razón de Evolución de Oxígeno (REO) liberado en el proceso de fotosíntesis, se midió con la técnica fotoacústica (FA), que forma parte de un conjunto de métodos experimentales que se conocen como fototérmicos, en los que periódicamente se inciden pulsos de luz sobre la muestra, cuya energía es absorbida parcialmente y transformada en calor, de tal forma, que la temperatura de la muestra, y por lo tanto, la presión del aire adyacente, cambian con la misma frecuencia de la radiación incidente. El sonido que se genera puede ser captado por un micrófono y se conoce como señal FA; teniendo en cuenta que durante este proceso pueden suceder fenómenos fotoquímicos como la fotosíntesis, la contribución se suma a la señal FA. Esto permite la determinación de la actividad fotosintética usando una celda FA.

En el montaje experimental, la hoja de la planta viva se colocó sellando la cavidad de la celda y se le hizo incidir luz roja pulsada sobre su haz, mientras que por el envés se irradió temporalmente con una luz blanca para saturar el proceso de la fotosíntesis cada 30 s. La señal FA se adquirió a través de un amplificador “lock-in” SR830 y se registró en función del tiempo a través de una interfaz y un computador. El efecto fotoacústico se produce cuando la radiación modulada es absorbida por la hoja de espinaca, pero la intensidad del sonido no depende solamente de las características ópticas y térmicas, sino también de la generación periódica de oxígeno. Por ello, de las curvas que se obtienen saturando el proceso de fotosíntesis se determina el porcentaje de oxígeno a generar periódicamente. De igual forma, como la fisiología de las plantas es afectada por las condiciones de cultivo, con esta técnica se puede evaluar la influencia que tiene un tratamiento determinado a través del monitoreo de la actividad fotosintética.

Resultados y discusión

Caracterización con Difracción de Rayos X (DRX)

Se analizó la estructura de las NPs de $\text{TiO}_2\text{-Ag}$ utilizando DRX en el rango de 2θ entre 20 y 80°. Es una de las configuraciones más utilizadas para muestras policristalinas en forma de polvo, de películas delgadas o multicapa, llamada geometría *Bragg-Brentano* (Quiroz, 2014). En los difractogramas se observó que los picos de difracción de *Bragg* concuerdan con los reportados por Hernández (2010), indicando la presencia de TiO_2 en fase anatasa, lo que es favorable para la fotocatalisis (Macías; García; De La Torre; Chávez, 2000) y se observaron variaciones del ancho de los picos que dependen del tamaño promedio del cristal (Macak *et al.*, 2007), el cual se estimó con la fórmula de *Scherrer* (Villar; Bonilla, 2015). Por otro lado, los tamaños de grano de las muestras sinterizadas a 600, 500, 400 y 300 °C fueron de $26,0 \pm 0,6$, $10,9 \pm 0,4$, $8,3 \pm 0,4$ y $7,3 \pm 0,1$ nm, respectivamente. Este comportamiento con el aumento de la temperatura de sinterización corresponde a un fenómeno de coalescencia (Mosquera; Rosas; Debut; Guerrero, 2015).

Crecimiento de las plantas

Los resultados de la medición de la altura de las 10 plantas de espinaca de cada tratamiento se muestran en la Figura 1. Se observó que las plantas tratadas con NPs de 7 nm, a una concentración de 2 %, alcanzaron 89 % más de altura que las de control. Este resultado concuerda con el estudio realizado por Martínez (2015), quien encontró que la aplicación de concentraciones bajas de NPs de TiO_2 influye en el crecimiento y desarrollo de plantas de maíz, teniendo efecto en la biomasa y la micromorfología, en función del tipo de NPs y de la concentración aplicada. Por su parte, Yang *et al.*, (2007), suministraron NPs de TiO_2 en fase anatasa en el suelo, con concentraciones en el rango 2,5 - 40 g kg^{-1} , y obtuvieron un rendimiento promedio de la espinaca en un 95 % superior al control, lo que relacionaron con un efecto de optimización en la fijación de nitrógeno. Se ha demostrado que el TiO_2 incrementa la actividad de varias enzimas responsables de las reacciones metabólicas (Capaldi; Diniz; Moretto; Antunes; Zezzi, 2015) y facilita la absorción de nutrientes, lo que mejora la velocidad de germinación, debido a que favorece la formación de Ácido Indol Acético (AIA) en las raíces o brotes que pueden incrementar el vigor de la semilla y el crecimiento de las plántulas (Krishnaraj; Ji; Harper; Yun, 2016).

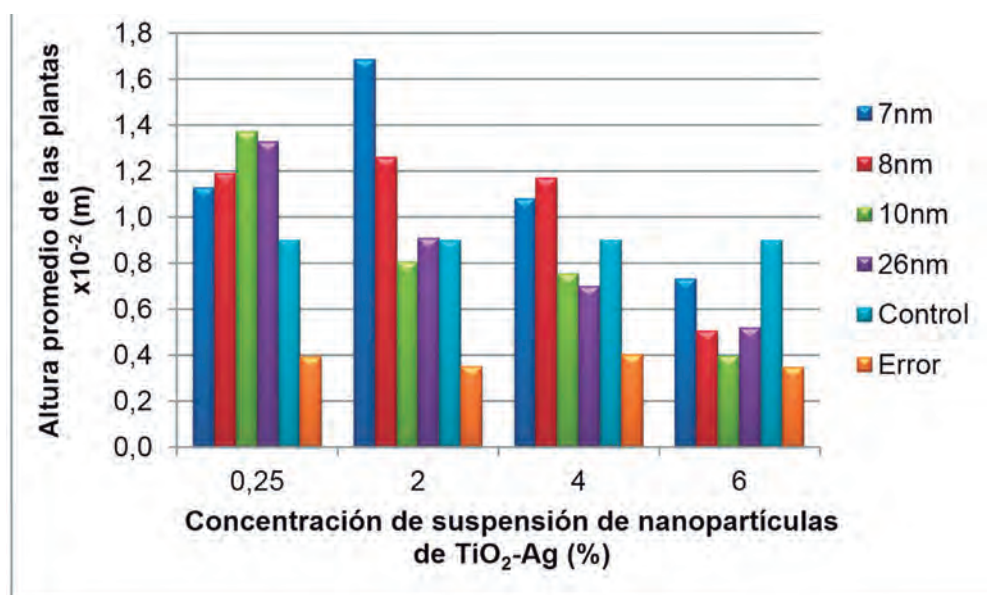


Figura 1. Altura promedio de las plantas de espinaca, a los 16 días de haber sido sembradas, luego de la inoculación con suspensiones de nanopartículas de dióxido de titanio incorporado con plata (NPs $\text{TiO}_2\text{-Ag}$) con diferentes tamaños de partícula y concentración
Fuente: elaboración propia

Aun cuando en este trabajo el contenido de plata en las suspensiones inoculadas fue bajo, se ha demostrado que este elemento tiene propiedades antibacterianas, que inhiben el crecimiento de *staphylococcus aureus*, *pseudomonas aeruginosa* y *escherichia coli* (Stockmann; Sherwin; Ampofo; Spigarelli, 2014), que afectan el crecimiento de las plantas y son reportados como unos de los principales microorganismos causantes de enfermedades transmitidas por alimentos (Figuerola; Navarrete; Caro; Troncoso; Faúndez, 2002; Luján, 2014; Ocaña de Jesús *et al.*, 2017).

Por otra parte, con relación a la ecotoxicidad que se puede generar en el suelo por el empleo de NPs en la agricultura, algunos autores han reportado repercusiones en la composición microbiana, tales como generación de desequilibrio ecológico y afectación a la población de bacterias promotoras de crecimiento, fundamentales en la producción agrícola. Las NPs pueden causar lisis celular, producción de especies de oxígeno reactivas en ubicación intracelular, producción de estrés oxidativo, lesiones del Ácido desoxirribonucleico (ADN), alteración de los mecanismos de transporte a través de las membranas y desnaturalización de biomacromoléculas (Shah; Belozeroova, 2009; Fang; Shan; Wen; Lin; Owens, 2009; Nowack, 2009; Somasundaran; Fang; Ponnuram; Li, 2010; Gutarowska; Skora; Zduniak; Rembisz, 2012). Sin embargo, se ha concluido en la mayoría de estudios que la ecotoxicidad de las NPs depende de las concentraciones utilizadas (Zhang; Niu Yan; Cai, 2011; Gutarowska *et al.*, 2012). Por ello, en este trabajo la inoculación de las NPs se hizo directamente en las semillas y se evitó el depósito NPs en el suelo y aunque existen reportes que confirman que tanto las NPs de TiO_2 como

de plata, a bajas concentraciones y tamaños de partícula no son tóxicas para el ser humano (Weir; Westerhoff; Fabricius; Hristovski; Von Goetz, 2012; Vladimir, 2012), es necesario hacer estudios correspondientes con las plantas tratadas antes de definir el uso del producto en campo.

No obstante, es necesario resaltar que el TiO_2 ha sido aprobado para el consumo humano desde 1960 por la Administración de Alimentos y Medicamentos de Estados Unidos, y posteriormente en Europa por el Comité Científico en Alimentos bajo la nomenclatura E171 (FAO; Organización Mundial de la Salud [OMS], 2011). Actualmente El Instituto Nacional de Seguridad y Salud en el Trabajo (INSHT) de los Estados Unidos recomienda límites de exposición en relación con las partículas extrafinas de TiO_2 : $0,3 \text{ mg/m}^3$ para NPs de TiO_2 ($< 100 \text{ nm}$), frente a $2,4 \text{ mg/m}^3$ para partículas finas ($> 100 \text{ nm}$) (El Instituto Nacional de Seguridad y Salud en el Trabajo [NIOSH], 2011).

Razón de Evolución de Oxígeno (REO)

El comportamiento de la amplitud de la señal FA proveniente de las hojas de las plantas se muestra en la Figura 2. Estas curvas son el promedio de las mediciones de 10 plantas, las cuales se escogieron al azar de los grupos de cada tratamiento y fueron tomadas 20 d después de sembradas. En ellas se observó el componente fototérmico de la señal, adicionada a la correspondiente liberación de oxígeno (componente fotobárica). Esta última dejó de contribuir cuando se hizo incidir la luz blanca continua, ya que saturó el proceso fotosintético. Por lo tanto, se evidenció que al encender esta luz, la señal cae abruptamente y se restablece cuando se apaga. La REO se calcula como el porcentaje de decrecimiento o aumento de este voltaje.

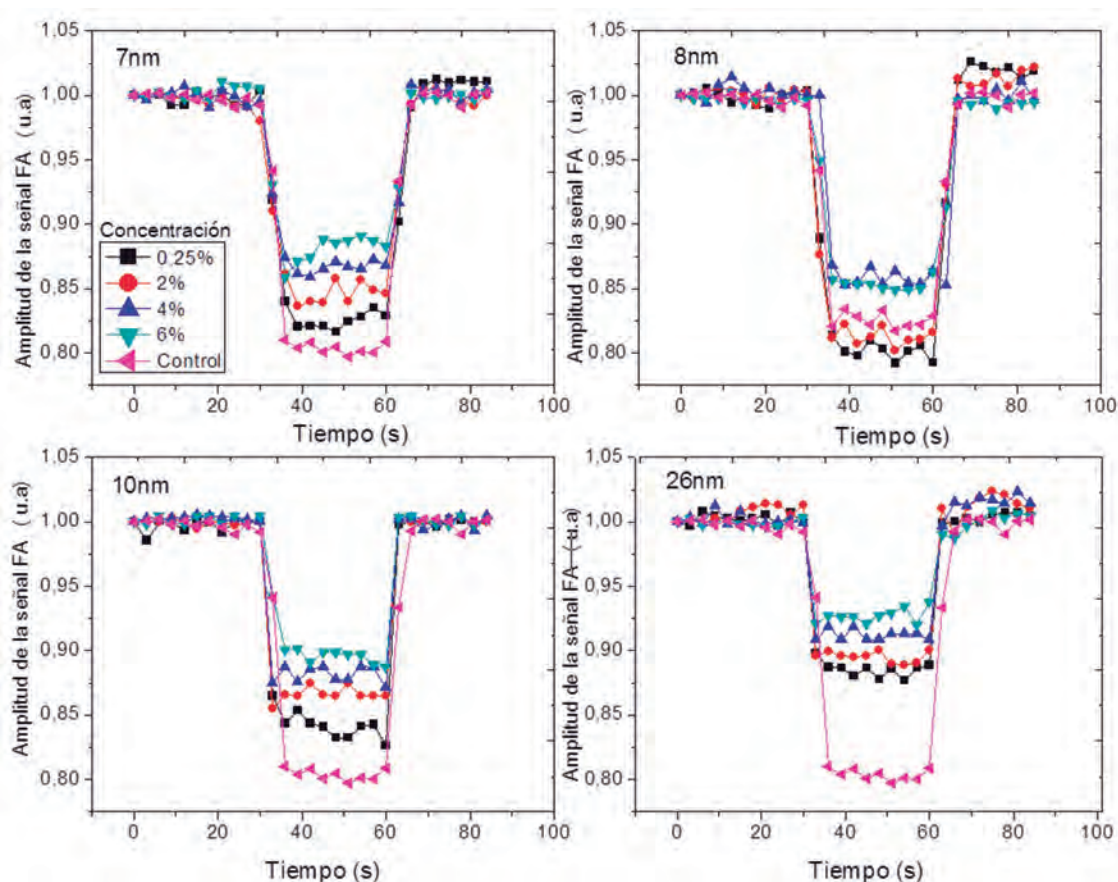


Figura 2. Amplitud de la señal fotoacústica en función del tiempo, correspondiente a las plantas de los tratamientos con nanopartículas de $\text{TiO}_2\text{-Ag}$ y del grupo control
Fuente: elaboración propia

La amplitud de la señal se muestra en la Figura 3, en donde se evidencia que el comportamiento de ésta fue cercano al del grupo control con la suspensión de tamaño promedio de 8 nm y concentración de 2 %, mientras que con el mayor tamaño de partícula (26 nm), el comportamiento de la señal FA se alejó del de control, proporcionalmente con el aumento de la concentración. Es decir que las plantas reaccionaron de manera positiva al tratamiento con las NPs de tamaño menor a 10 nm y concentraciones menores a 4 %, ya que no se ve afectado el metabolismo normal de la planta. Esto corresponde a lo encontrado por Bradfield (2015), quien en su estudio demostró que la aplicación foliar de 0,25 % de TiO_2 (2500 mg L^{-1}) aumentó la biomasa de espinaca, lo que fue atribuido al aumento de la tasa fotosintética o al mantenimiento de la misma en presencia del tratamiento.

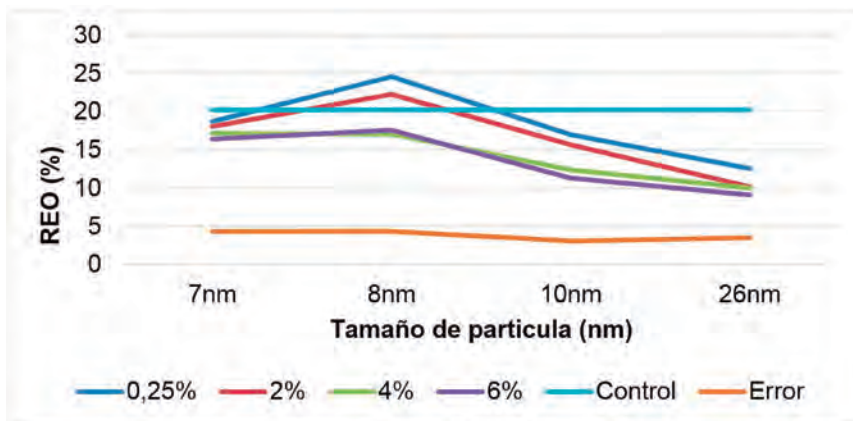


Figura 3. Razón de Evolución de Oxígeno de las plantas del grupo control y de las tratadas con las nanopartículas de $\text{TiO}_2\text{-Ag}$.
Fuente: elaboración propia

Por su parte, Ze; Liu; Wang; Hong; Hong (2010), determinaron los mecanismos por los cuales las NPs de TiO_2 pueden favorecer la fotosíntesis, para ello, utilizaron como objeto de estudio *arabidopsis thaliana*. Las plantas fueron rociadas con 0,25 % de NPs TiO_2 y concluyeron que este compuesto puede inducir el aumento significativo de la expresión de los genes que codifican para el complejo de captación de luz II (*light harvesting complex II* - LHCII), ya que las NPs podrían estar acelerando la velocidad de transporte de los electrones de la cadena entera y la transformación de la energía luminosa en energía electrónica. Asimismo, podrían promover la absorción de la luz de cloroplastos.

Por tanto, se puede suponer que la fotosíntesis de las plantas de espinaca también puede estar siendo influenciada por la inoculación de este fotocatalizador (TiO_2), teniendo en cuenta que al incorporarse a la planta puede eventualmente absorber luz solar, que excita a los electrones hasta ganar suficiente energía para saltar de la Banda de Valencia (BV) a la Banda de Conducción (BC) y los portadores de carga generados pueden migrar a la superficie para reaccionar con moléculas adyacentes. En soluciones acuosas, los huecos fotogenerados en la BV del TiO_2 forman radicales OH, mientras que los electrones en la BC reducen el oxígeno disuelto (Kazuya; Tsuyoshi; Taketoshi; Akira, 2012; Quiroz, 2014). Estas especies, en particular los radicales OH, tienen un alto potencial de oxidación que actúa sobre el dióxido de carbono y el agua (Ollis; Ekabi, 1993), lo que puede acelerar el proceso fotosintético. De igual forma, Hong *et al.*, (2005) y Zheng *et al.*, (2008), indicaron que las propiedades de las NPs de TiO_2 para aumentar la capacidad fotosintética, provienen de su habilidad para disminuir las Especies Reactivas de Oxígeno (ERO) en los cloroplastos de espinaca.

También, se ha comprobado que después de 24 h de exposición a 4 mM (319 mg L^{-1}) de NPs de TiO_2 , se incrementan los niveles de Malondialdehído (MDA) en las raíces de cebolla. El MDA es un indicador de peroxidación lipídica porque es el producto de la descomposición de los poliinsaturados y ácidos grasos que se encuentran en las biomembranas. Esto indica que las NPs de TiO_2 a estas concentraciones aumentan la generación de ERO que conducen a una mayor peroxidación de lípidos y estrés oxidativo (Ghosh; Bandyopadhyay; Mukherjee, 2010).

Asimismo, se ha determinado que el contenido de MDA en algas que crecen en contacto con las NPs de TiO_2 es significativamente mayor al control. Esto muestra que las NPs de TiO_2 podrían imponer estrés oxidativo sobre las células de algas, dependiendo la concentración (Lin; Ji; Long; Yang; Wu, 2012). Por lo tanto, se considera que el TiO_2 en altas concentraciones de mayor a 1 g/L que puede inducir estrés en las plantas, llegando a cambiar la estructura y constitución

de la pared y membrana celular (Liu; Lin; Zhao, 2013), lo que altera la eficiencia fotosintética, debido a las interacciones de estas NPs con los fotosistemas, ya que la clorofila puede transferir energía a las NPs (Olejnik *et al.*, 2013; Rico; Peralta-Videa; Gardea-Torresdey, 2015).

Conclusión

El tratamiento con nanopartículas de TiO₂-Ag en polvo con tamaños de partícula entre 7 y 8 nm y a concentraciones entre 0,25 y 2 %, tienen un efecto positivo sobre el crecimiento de plantas de espinaca en condiciones de invernadero, sin alterar drásticamente el metabolismo natural de la planta, ya que la razón de evolución de oxígeno de las plantas tratadas es muy similar a la de los individuos del grupo control.

De acuerdo con los resultados obtenidos, se puede afirmar que tanto el tratamiento descrito, como el método de medición de este parámetro fotosintético, tienen potencial para convertirse en herramientas para el mejoramiento de cultivos y evaluación de nuevos productos.

Referencias

- Bradfield, S. (2015). *Influence of TiO₂ engineered nanoparticles on photosynthetic efficiency and contaminant uptake* (Tesis doctoral). Southern Illinois University Carbondale, Illinois.
- Capaldi, S.; Diniz, A.; Moretto, R.; Antunes, R.; Zezzi, M. (2015). Nanoparticles applied to plant science. A review. *Talanta*. 131, 693-705.
<https://doi.org/10.1016/j.talanta.2014.08.050>
- Centers for Disease Control and Prevention. (2007). Multistate outbreaks of Salmonella infections associated with raw tomatoes eaten in restaurants. United States, 2005-2006. *MMWR. Morbidity and mortality weekly report*, 56(35), 909-911.
- Departamento Administrativo Nacional de Estadística (2015). *Boletín técnico. Encuesta Nacional Agropecuaria*. (ENA 2015). Recuperado de:
https://www.dane.gov.co/files/investigaciones/agropecuario/enda/ena/2015/boletin_ena_2015.pdf
- Fang, J.; Shan, X.; Wen, B.; Lin, J.; Owens, G. (2009). Stability of titania nanoparticles in soil suspensions and transport in saturated homogeneous soil columns. *Environmental pollution*, 157(4), 1101-1109.
<https://doi.org/10.1016/j.envpol.2008.11.006>
- Food and Agriculture Organization of the United Nations (2018). *World Food and Agriculture, Statistical Pocketbook*. Rome, 254pp.
- Food and Agriculture Organization of the United Nations y Organización Mundial de la Salud (2011). *Reunión conjunto de FAO/OMS de Expertos acerca de la aplicación de la nanotecnología en los sectores alimentario y agropecuario: posibles consecuencias para la inocuidad de los alimentos*. (Informe de la reunión 2011). Recuperado de: <http://www.fao.org/3/i1434s/i1434s00.pdf>
- Fersini, A. (1976). *Horticultura práctica*. Edit. Diana (2ª ed.). México
- Figuerola, G.; Navarrete, P.; Caro, M.; Troncoso, H.; Faúndez, G. (2002). Portacion de Staphylococcus aureus enterotoxigénicos en manipulación de alimentos. *Revista médica de Chile*, 130(8), 859-864.
<https://doi.org/10.4067/S0034-98872002000800003>

- Ghosh, M.; Bandyopadhyay, M.; Mukherjee, A. (2010). Genotoxicity of titanium dioxide (TiO₂) nanoparticles at two trophic levels: plant and human lymphocytes. *Chemosphere*, 81(10), 1253-1262. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2010.09.022>
- Gutarowska, B.; Skora, J.; Zduniak, K.; Rembisz, D. (2012). Analysis of the sensitivity of microorganisms contaminating museums and archives to silver nanoparticles. *International Biodeterioration & Biodegradation*, 68, 7-17. <https://doi.org/10.1016/j.ibiod.2011.12.002>
- Hench, L. L.; West, J. K. (1990). The sol-gel process. *Chemical reviews*, 90(1), 33-72. <https://doi.org/10.1021/cr00099a003>
- Hernández, C. (2010). *Estudio de la actividad catalítica del dióxido de titanio soportado en alúmina en la síntesis de ozono a partir de oxígeno por el método de descarga silenciosa*. (Tesis de maestría). Universidad Nacional De Colombia, Bogotá, Colombia.
- Hong, F.; Zhou, J.; Liu, C.; Yang, F.; Wu, C.; Zheng, L.; Yang, P. (2005). Effect of Nono-TiO₂ on photochemical reaction of chloroplasts of spinach. *Biological trace element research*, 105(1-3), 269-279. <https://doi.org/10.1385/BTER:105:1-3:269>
- Kazuya, N.; Tsuyoshi, O.; Taketoshi, M.; Akira, F. (2012). Photoenergy conversion with TiO₂ photocatalysis: New materials and recent applications. *Electrochimica Acta*, 84, 103-111. <https://doi.org/10.1016/j.electacta.2012.03.035>
- Krishnaraj, C.; Ji, B. J.; Harper, S. L.; Yun, S. I. (2016). Plant extract-mediated biogenic synthesis of silver, manganese dioxide, silver doped manganese dioxide nanoparticles and their antibacterial activity against food and water borne pathogens. *Bioprocess and biosystems engineering*, 39(5), 759-772. <https://doi.org/10.1007/s00449-016-1556-2>
- Lin, D.; Ji, J.; Long, Z.; Yang, K.; Wu, F. (2012). The influence of dissolved and surface-bound humic acid on the toxicity of TiO₂ nanoparticles to *Chlorella* sp. *Water research*, 46(14), 4477-4487. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2012.05.035>
- Liu, K.; Lin, X.; Zhao, J. (2013). Toxic effects of the interaction of titanium dioxide nanoparticles with chemicals or physical factors. *International journal of nanomedicine*, 8, 2509-2520.
- Luján, D. (2014). *Pseudomonas aeruginosa: un adversario peligroso*. *Acta Bioquímica Clínica Latinoamericana*, 48(4), 465-474.
- Macak, J. M.; Tsuchiya, H.; Ghicov, A.; Yasuda, K.; Hahn, R.; Bauer, S.; Schmuki, P. (2007). TiO₂ nanotubes: Self-organized electrochemical formation, properties and applications. *Current Opinion in Solid State and Materials Science*, 11(1-2), 3-18. <https://doi.org/10.1016/j.cossms.2007.08.004>
- Macías, L.; García, M.; De La Torre, I.; Chávez, A. (2000). Cuantificación de fases en óxidos de titanio por medio de difracción de rayos X. En *Congreso Técnico Científico ININ-SUTIN*. Instituto Nacional de Investigaciones Nucleares, Ocoyoacac, México. Recuperado de: https://inis.iaea.org/collection/NCLCollectionStore/_Public/33/013/33013257.pdf?r=1&r=1
- Martínez, L. A. (2015). *Micromorfología de tallo y raíz de plantas de maíz y frijol tratadas con nano partículas de titanio, hierro y zinc, bajo invernadero* (Tesis de grado). Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro, Saltillo, México. Recuperado de:

<http://repositorio.uaaan.mx:8080/xmlui/bitstream/handle/123456789/6844/T20520%20MARTINEZ%20RODRIGUEZ%2c%20LUIS%20ALBERTO%20%2063436.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

- Morales, J.; Moran, J.; Quintana, M.; Estrada, W. (2009). Síntesis y caracterización de nanopartículas de plata por la ruta Sol-Gel a partir de Nitrato de plata. *Revista de la Sociedad Química del Perú*, 75(2), 177-184
- Mosquera, E.; Rosas, N.; Debut, A.; Guerrero, V.H. (2015). Síntesis y caracterización de nano partículas de dióxido de titanio obtenidas por el método Sol-Gel. *Revista Politécnica*, 36(3), 7.
- National Institute for Occupational Safety and Health (2011). *Occupational exposure to titanium dioxide*. Current Intelligence. (Bulletin 63, 2011). Recuperado de:
<https://www.cdc.gov/niosh/docs/2011-160/pdfs/2011-160.pdf>
- Nowack, B. (2009). The behaviour and effects of nanoparticles in the environment. *Environmental pollution*, 157(4), 1063-1185.
<https://doi.org/10.1016/j.envpol.2008.12.019>
- Ocaña de Jesús, R.; Gutiérrez, I.; Sánchez, P.; Barsain, M.; Campos, C.; Laguna, A. (2017). Persistencia, internalización y translocación de Escherichia coli O157:H7, O157:H16 y O105ab en plantas y frutos de tomate (Solanum lycopersium L). *Revista Argentina de Microbiología*, 50(4), 408-416.
<https://doi.org/10.1016/j.ram.2017.12.001>
- Olejnik, M.; Krajnik, B.; Kowalska, D.; Twardowska, M.; Czechowski, N.; Hofmann, E.; Mackowski, S. (2013). Imaging of fluorescence enhancement in photosynthetic complexes coupled to silver nanowires. *Applied Physics Letters*, 102(8), 083703.
<https://doi.org/10.1063/1.4794171>
- Ollis, D.F.; Ekabi, H. (1993). *Photocatalytic purification and treatment of water and air*. Elsevier: Amsterdam.
- Osborne, O.J.; Johnston, B. D.; Moger, J.; Balousha, M.; Lead, J. R.; Kudoh, T.; Tyler, C. R. (2013). Effects of particle size and coating on nanoscale Ag and TiO₂ exposure in zebrafish (Danio rerio) embryos. *Nanotoxicology*, 7(8), 1315-1324.
<https://doi.org/10.3109/17435390.2012.737484>
- Quiroz, H. (2014). *Preparación y estudio de las propiedades estructurales, ópticas y morfológicas de nanotubos de TiO₂ para su aplicación en sensores ópticos* (Tesis de maestría). Universidad Nacional de Colombia. Bogotá, Colombia. 23-36 pp
- Rai, M.; Ingle, A. (2012). Role of nanotechnology in agriculture with special reference to management of insect pests. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 94(2), 287-293.
<https://doi.org/10.1007/s00253-012-3969-4>
- Rico, C. M.; Peralta-Videa, J. R.; Gardea-Torresdey, J. L. (2015). Chemistry, biochemistry of nanoparticles, and their role in antioxidant defense system in plants. In Siddiqui M., Al-Whaibi M., Mohammad F. (Eds.) *Nanotechnology and Plant Sciences* (pp. 1-17). Springer, Cham.
https://doi.org/10.1007/978-3-319-14502-0_1
- Sánchez, J. (2017). Mercado de productos agrícolas ecológicos en Colombia. *Suma de negocios*, 8(18), 156-163.
<https://doi.org/10.1016/j.sumneg.2017.10.001>
- Shah, V.; Belozeroval, I. (2009). Influence of metal nanoparticles on the soil microbial community and germination of lettuce seeds. *Water, Air, and Soil Pollution*, 197(1-4), 143-148.
<https://doi.org/10.1007/s11270-008-9797-6>

- Somasundaran, P.; Fang, X.; Ponnuram, S.; Li, B. (2010). Nanoparticles: characteristics, mechanisms and modulation of biotoxicity. *KONA powder and particle journal*, 28, 38-49. <https://doi.org/10.14356/kona.2010007>
- Stockmann, C.; Sherwin, C. M.; Ampofo, K.; Spigarelli, M. G. (2014). Development of levofloxacin inhalation solution to treat *Pseudomonas aeruginosa* in patients with cystic fibrosis. *Therapeutic advances in respiratory disease*, 8(1), 13-21. <https://doi.org/10.1177/1753465813508445>
- Villar, M.; Bonilla, M. A. (2015). *Obtención y caracterización de nanopartículas de LiMn_2O_4 , $\text{LiMn}_{1.5}\text{Fe}_{0.5}\text{O}_4$ y $\text{LiMn}_{1.25}\text{Fe}_{0.75}\text{O}_4$* (Tesis de maestría). Universidad Tecnológica de Puebla. Puebla, México.
- Vladimir, M. (9 de mayo de 2011). Titanium Dioxide: A Changing Paradigm in Occupational Risk Management. (Blog). Recuperado de: <http://blogs.cdc.gov/niosh-science-blog/2011/05/09/TiO2>
- Watt, B. K. (1975). *Composition of Foods. Agricultural handbook*. Washington DC, U. S. Dep of Agric.
- Weir, A.; Westerhoff, P.; Fabricius, L.; Hristovski, K.; Von Goetz, N. (2012). Titanium dioxide nanoparticles in food and personal care products. *Environmental science & technology*, 46(4), 2242-2250. <https://doi.org/10.1021/es204168d>
- Wiesner, M. R.; Lowry, G. V.; Dionysiou, P.; Biswas, P. (2006). Assessing the risk of manufactured nanomaterials. *Environmental Science & Technology*, 40(14), 4336-45. <https://doi.org/10.1021/es062726m>
- Yang, F.; Liu, C.; Gao, F.; Su, M.; Wu, X.; Zheng, L.; Hong, F.; Yang, P. (2007). The improvement of spinach growth by nano-anatase TiO_2 treatment is related to nitrogen photoreduction. *Biological trace element research*, 119(1), 77-88. <https://doi.org/10.1007/s12011-007-0046-4>
- Ze, Y.; Liu, C.; Wang, L.; Hong, M.; Hong, F. (2010). The regulation of TiO_2 nanoparticles on the expression of light-harvesting complex II and photosynthesis of chloroplasts of *Arabidopsis thaliana*. *Biological trace element research*, 143(2), 1131-1141. <https://doi.org/10.1007/s12011-010-8901-0>
- Zhang, X.; Niu, H.; Yan, J.; Cai, Y. (2011). Immobilizing silver nanoparticles onto the surface of magnetic silica composite to prepare magnetic disinfectant with enhanced stability and antibacterial activity. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 375(1-3), 186-192. <https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2010.12.009>
- Zheng, L.; Mingyu, S.; Xiao, W.; Chao, L.; Chunxiang, Q.; Liang, C.; Hao, H.; Xiaoqing, L.; Fashui, H. (2008). Antioxidant Stress is promoted by nano-anatase in spinach chloroplasts under UV-B radiation. *Biological Trace Element Research*, 121(1), 69-79. <https://doi.org/10.1007/s12011-007-8028-0>

Indice de autores

Authors

Abner Quintero-Orozco. Universidad Francisco de Paula Santander, Ocaña (Colombia); Instituto Politécnico Nacional (México); correo: aquintero@ufpso.edu.co

Benyi-Juliana Marín-Gallego. Universidad del Quindío (Colombia); correo: bjmaring@uqvirtual.edu.co

Bernardo Carvajal-Macías. Universidad de Antioquia (Colombia); correo: bernardo.carvajal@udea.edu.co

Danilo Revelo-Vargas. Servicio Nacional de Aprendizaje SENA (Colombia); correo: drevelo@sena.edu.co; ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-9879-1976>

Elena Medina-Pérez. Universidad de Antofagasta (Chile); correo: e-b-medina@hotmail.com; ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-3289-0522>

Fernando Gordillo-Delgado. Universidad del Quindío (Colombia); correo: fgordillo@uniquindio.edu.co

Gabriel Peña-Rodríguez. Universidad Francisco de Paula Santander (Colombia); correo: ggabrielp@yahoo.com; ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-7114-9174>

Guadalupe Gutiérrez-Paredes. Instituto Politécnico Nacional (México); correo: ggutierrez@ipn.mx

Jakeline Zuluaga-Acosta. Universidad del Quindío (Colombia); correo: jzuluagaa@uqvirtual.edu.co

Jesús Rivera-López. Instituto Politécnico Nacional (México); correo: eduardo_rivera@hotmail.com

Jonathan Pérez-Barón. Servicio Nacional de Aprendizaje SENA (Colombia); correo: jonnas1982@gmail.com; ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-8112-9401>

José Mera-Ayala. * Servicio Nacional de Aprendizaje SENA (Colombia); correo: jmera@sena.edu.co; ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-5582-542X>

Juan Alzate-Agudelo. Universidad de Antioquia (Colombia); correo: jpablo.agudelo@udea.edu.co

Juan Morales-Espinoza. Universidad de Antofagasta (Chile); correo: juan.morales@uantof.cl

Karol Roa-Bohórquez. 1Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia (Colombia); correo: karol.roa@uptc.edu.co; ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-8696-2232>

Laura Muñoz-Mesa. Servicio Nacional de Aprendizaje SENA; (Colombia); correo: laurammesa@gmail.com

Leidy Yaneth Vega-Rodríguez. Servicio Nacional de Aprendizaje SENA; (Colombia); correo: lyvega@sena.edu.co

Luis Lara-González. Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia (Colombia); correo: luisangel.lara@uptc.edu.co; ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-2849-0174>

Maria Ruíz-Domínguez. Universidad de Antofagasta (Chile); correo: maria.ruiz@uantof.cl; ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-6520-7940>

Milton Mora-Martínez. Servicio Nacional de Aprendizaje SENA (Colombia); correo: mmoram@sena.edu.co; ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-5564-3906>

Pedro Cereza-Mezquita. Universidad de Antofagasta (Chile); correo: pedro.cereza@uantof.cl; ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-0822-0844>

Ricardo García-León. Universidad Francisco de Paula Santander, Ocaña (Colombia); Instituto Politécnico Nacional (México); correo: ragarcial@ufpso.edu.co

Ricardo Paredes-Roa. Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia (Colombia); correo: ricardo.paredes@uptc.edu.co; Colombia; ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-9172-8763>

Seleny Pérez-Ramírez. Universidad de Antioquia (Colombia); correo: seleny.perez@udea.edu.co

Yhoan Gaviria-Gaviria. Universidad de Antioquia (Colombia); correo: yhoan.gaviria@udea.edu.co

Yuliana Areiza-Rico. Servicio Nacional de Aprendizaje SENA (Colombia); correo: yareiza@sena.edu.co; ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-3988-5996>

Línea de atención al cliente:
(57 - 1) 472 2000 en Bogotá
01 8000 111 210 a nivel Nacional
.....
www.4-72.com.co

El servicio de **envíos**
de Colombia



Informador Técnico

ISSN 0122-056X e-ISSN 2256-5035

Directrices para autores

El Informador Técnico se propone estimular la difusión del conocimiento en temas de actualidad nacional e internacional en las áreas de: Ingeniería de Materiales, Ingeniería Química, Ingeniería Mecánica, Ingeniería Electrónica e Informática, Ingeniería Ambiental, Biotecnología, Diseño Industrial, Gestión del Conocimiento, Innovación y Desarrollo Tecnológico, Prospectiva y Vigilancia Estratégica: Tecnológica y de Mercados y afines, que recojan el resultado de investigaciones, la reflexión científica, y la producción intelectual de los investigadores. Los juicios emitidos por los autores de los artículos son de su entera responsabilidad; por lo tanto, no comprometen las políticas del Servicio Nacional de Aprendizaje SENA ni las del Comité Editorial. La periodicidad de la revista es semestral. Los autores deben enviar sus manuscritos únicamente a través de la plataforma OJS de la revista. Recibido el texto, éste se somete a una revisión editorial por parte del Comité Editorial en la que se determina su pertinencia temática y normas de la revista.

Una vez calificado como pertinente para la publicación, inicia el proceso de evaluación por pares internacionales, en el que se conserva el anonimato de los evaluadores y los autores (doble ciego). Este proceso determina la idoneidad académica del texto y la posibilidad de publicación, o la necesidad de solicitar modificaciones a los autores para nuevamente someter el trabajo a una nueva evaluación.

El Informador Técnico sigue las pautas de Colciencias para la indexación de publicaciones seriadas, dando preferencia a los artículos de:

- a) **INVESTIGACIÓN:** documento que establece la pregunta de investigación, el camino para someterla a prueba (análisis estadístico del experimento, protocolos disciplinarios) y la confrontación de los resultados obtenidos con la literatura actual. La estructura del documento generalmente incluye cuatro apartados: introducción, metodología, resultados y conclusiones.
- b) **REFLEXIÓN:** documento que presenta resultados de investigación desde una perspectiva analítica, interpretativa o crítica del autor, sobre un tema específico, recurriendo a fuentes originales y de revisión.
- c) **REVISIÓN:** es el resultado de una investigación terminada donde se analizan, sistematizan e integran los resultados de investigaciones publicadas o no publicadas, sobre un campo en ciencia o tecnología, con el fin de dar cuenta de los avances y las tendencias de desarrollo. Se caracteriza por presentar una cuidadosa revisión bibliográfica superior a 50 referencias.

PROCESO DE EDICIÓN DE LOS MANUSCRITOS

La revista es de acceso abierto y publica semestralmente artículos en español, inglés y portugués. La recepción de manuscritos es permanente y si son avalados por el Comité Editor, se envían a dos pares evaluadores anónimos calificados internacionalmente y externos al Comité Editor. Este proceso continúa con la verificación de las evaluaciones de los pares evaluadores y las respuestas por parte del autor, solicitando de igual forma las modificaciones de estilo que se consideren pertinentes antes de autorizar su publicación. El artículo aprobado por el Comité se remite a los autores para la aprobación de la versión final. Las publicaciones para autores afiliados al Servicio Nacional de Aprendizaje SENA no superarán el 50% por número.

PRESENTACIÓN DE LOS MANUSCRITOS

- Los artículos remitidos deben ser originales, escritos en español, inglés o portugués, no publicados con anterioridad o simultáneamente en otra revista o en línea.
- Es indispensable que los autores envíen una **carta de presentación**.
- Los artículos pueden contener un máximo de 20 páginas numeradas, sin incluir tablas y figuras, en papel tamaño carta (21,57 cm x 27,94 cm). Márgenes 2.54 cm en toda la hoja. Deben presentarse a interlineado 1.5 líneas, fuente Arial y tamaño de letra 11 puntos.
- En la primera página se debe incluir: títulos del artículo en español e inglés; nombre completo de los autores, filiación institucional, correo electrónico institucional preferiblemente, ORCID (en inglés, *Open Researcher and Contributor ID*; en español Identificación de Investigador y Colaborador abierto); resumen no superior a 250 palabras y entre cinco u ocho palabras clave, que no estén incluidas en el título.
- Se debe indicar **autor de correspondencia** con el fin de facilitar el contacto y el seguimiento del manuscrito.
- El documento se debe entregar en un archivo de Word.

ESTRUCTURA DEL MANUSCRITO

La presentación de los manuscritos debe contener los siguientes elementos:

Título. El título del artículo debe tener las palabras necesarias para describir con precisión el tema principal tratado sin que sea demasiado largo (Máximo 14 palabras, Arial 16 puntos).

Autores. Deben estar completos los nombres y apellidos de todos los autores, así como la filiación institucional de cada uno, ciudad, país y correo electrónico de contacto. El orden de la autoría estará dado por los aportes intelectuales al desarrollo del escrito. El autor de contacto debe estar resaltado por un asterisco (*). Las comunicaciones se harán a través de dicho autor.

Resumen. En el resumen se incluye el objetivo principal del artículo, la discusión general de la metodología, los principales resultados, conclusiones y el aporte al estado del arte. El resumen debe contener máximo 250 palabras.

Palabras clave. Deben ser alusivas al contenido principal del artículo. Se admiten un mínimo de cinco y un máximo de ocho palabras claves.

Introducción. Formula el objetivo (propósito), el alcance (planteamiento de la pregunta de investigación), el aporte realizado, la importancia e impacto del trabajo y los antecedentes del artículo.

Marco teórico o Estado de la técnica. Presenta el estado de la tecnología en el ámbito científico o la revisión de literatura para el soporte de las hipótesis planteadas (sólo si es requerido para el desarrollo del artículo).

Metodología. Se describen los métodos, procedimientos o técnicas experimentales más relevantes para la obtención de los resultados y el diseño experimental aplicado (evitar la descripción detallada de técnicas estándar).

Resultados. Presenta los resultados que soportan las conclusiones y el alcance del artículo. Se debe soportar la información estadística (número de observaciones y descriptivos de la muestra como media, desviación estándar, correlaciones, significatividad, entre otros) si aplica. Los análisis de resultados deben estar enfocados en la comprobación de hipótesis y su confrontación con el estado de la técnica.

Conclusiones. Se describen los aportes realizados, se discuten en relación con estudios previos, se plantean las implicaciones de los resultados y su relación con el objetivo propuesto.

Agradecimientos. Se incluyen las instituciones o personas que han colaborado en el desarrollo del artículo o el trabajo objeto de análisis en el mismo (opcional).

Referencias. Cada una de las referencias bibliográficas (artículos, libros, normas, patentes, etc.) que se especifiquen a lo largo del documento, deben aparecer en esta sección en orden estrictamente alfabético según la Norma APA 2016 sexta edición. No referenciar informes técnicos internos o de resultados no publicados. El artículo debe contener como mínimo 10 referencias bibliográficas.

PRESENTACIÓN DE CITAS Y REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

El Informador Técnico utiliza el formato de las Normas APA 6ta Edición. Las referencias se ubicarán al final del texto, no en pie de página. Deben darse en orden alfabético, forma completa y exacta de manera que puedan ser ubicadas fácilmente por el lector. En términos generales es necesario considerar los siguientes aspectos:

Cita de parafraseo

En la cita de parafraseo se utilizan las ideas de un autor, pero en palabras propias del escritor.

Cita basada en el texto

Si el autor no hace parte de la oración debe ir entre paréntesis el apellido, seguido del año de publicación, *por ejemplo*: parece ser que en este caso la influencia de los inhibidores de radicales en solución, es mínima (Thakur, 2013). Cuando son dos autores sus apellidos van separados por “y”, si se publica en inglés por ampersand “&” dentro de un paréntesis, *por ejemplo*: (Sen & Reddy, 2011). Cuando se trata de tres o cuatro autores, es necesario referirse a todos los autores la primera vez que se mencionan; *por ejemplo*: (López, Jones, Gold & Hammond, 2016). En las subsecuentes citaciones se debe escribir el apellido del primer autor, seguido de la expresión *et al.* *Por ejemplo*: (López *et al.*, 1998). Para cinco o más autores, siempre se debe usar el apellido del primer autor seguido de la expresión *et al.* *Por ejemplo*: (Miller *et al.*, 2005).

Cita basada en el autor

Si el autor hace parte de la oración se menciona el apellido y a renglón seguido el año entre paréntesis, *por ejemplo*: para este propósito se dispone del programa RANK_OBJ, desarrollado por Deutsch (1998). Si se trata de dos autores deben escribirse los apellidos y el año entre paréntesis, *por ejemplo*: Shmaryan y Deutsch (1999) demostraron que.... Cuando se trata de tres o cuatro autores es necesario referirse a todos los autores la primera vez que se mencionan, *por ejemplo*: el mecanismo fue propuesto por López, Jones, Gold y Hammond (1998). En las siguientes citaciones debe escribirse: López *et al.*, (1998) estudiaron los avances. Para cinco o más autores, siempre se debe usar el apellido del primer autor seguido de la expresión *et al.*, *por ejemplo*: demostrado por Miller *et al.*, (2005) en su investigación.

Cita Textual

Una cita textual es cuando se extraen fragmentos o ideas literales de un texto. Las palabras o frases omitidas se reemplazan con puntos suspensivos (...).

Citas de menos de 40 palabras

Cuando la cita tiene menos de 40 palabras se escribe inmersa en el texto y entre comillas

Cita basada en el texto

Si el autor no hace parte de la oración debe ir entre paréntesis el apellido, seguido del año de publicación y paginación, *por ejemplo*: parece ser que en este caso la influencia de los inhibidores de radicales en solución, es mínima (Thakur, 2013, p.28).

Cita basada en el autor

Si el autor hace parte de la oración se menciona el apellido y a renglón seguido el año entre paréntesis, al finalizar la cita se escribe la paginación, *por ejemplo*: Deutsch (1998), afirma “que para este propósito se dispone del programa RANK_OBJ” (p.28).

Citas de más de 40 palabras

Las citas que tienen más de 40 palabras se escriben aparte del texto, con sangría izquierda aplicada al párrafo y sin comillas.

Cita basada en el texto

Si el autor no hace parte de la oración debe ir entre paréntesis el apellido, seguido del año de publicación y paginación,

Ejemplo:

La gasificación, es un proceso termoquímico en el que se dan un conjunto de reacciones químicas en un ambiente pobre en oxígeno, dando como resultado la transformación de un sólido en una serie de gases que pueden ser empleados en la combustión.

En este proceso la celulosa se transforma en hidrocarburos más ligeros, en monóxido de carbono e hidrógeno. En este proceso la celulosa se transforma en hidrocarburos más ligeros, en monóxido de carbono e hidrógeno. El rendimiento del proceso de gasificación varía dependiendo de la tecnología, el combustible y el agente gasificante que se utilice, en el rango (Thakur, 2013, p.28).

Cita basada en el autor

Si el autor hace parte de la oración se menciona el apellido y a renglón seguido el año entre paréntesis, al finalizar la cita se escribe la paginación,

Ejemplo:

La gasificación, es un proceso termoquímico en el que se dan un conjunto de reacciones químicas en un ambiente pobre en oxígeno, dando como resultado la transformación de un sólido en una serie de gases que pueden ser empleados en la combustión. Thakur (2013), afirma que:

En este proceso la celulosa se transforma en hidrocarburos más ligeros, en monóxido de carbono e hidrógeno. En este proceso la celulosa se transforma en hidrocarburos más ligeros, en monóxido de carbono e hidrógeno. El rendimiento del proceso de gasificación varía dependiendo de la tecnología, el combustible y el agente gasificante que se utilice, en el rango (p.28).

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Al final del artículo se deben presentar en estricto orden alfabético de acuerdo con el apellido del autor mencionado en el texto. Cuando son dos autores sus apellidos van separados por “y”, si la publicación es en inglés por ampersand “&”.

Artículos de Revistas

Apellido, A. A.; Apellido, B. B.; Apellido, C. C. (Fecha). Título del artículo. Nombre de la revista, volumen (número), pp-pp. doi: xx.xxxxxxx

Ejemplos:

Arana, A. (2000). The effect of diesel properties on the emissions of particulate matter. *Ciencia, Tecnología y Futuro*, 2(1), 31-46. <https://doi.org/10.23850/22565035.1500>

Arana, A.; Torres, J.; Herrera, J.; Sarmiento, J. (2000). The effect of diesel properties on the emissions of particulate matter. *Ciencia, Tecnología y Futuro*, 2(1), 31-46. <https://doi.org/10.23850/22565035.1500>

Libros

Apellido, A. A. (Año). *Título*. Ciudad, País: Editorial.

Ejemplos:

Thomann, R. (1987). *Principles of surface water quality modeling and control*. New York: Harper and Row.

Thomann, R. V.; Mueller, J. A. (1987). *Principles of surface water quality modeling and control*. New York: Harper and Row.

Capítulo de un libro

Apellido, A. A.; Apellido, B. B. (Año). Título del capítulo o la entrada. En A. A. Apellido (Ed.), *Título del libro* (pp. xx-xx). Ciudad, País: Editorial.

Ejemplos:

Batista, L. R.; Chalfoun, S. M.; Batista, C. F. S.; Schwan, R. F. (2016). Coffee: types and production. In B. Caballero, P. Finglas, & F. Toldrá (Eds.), *The Encyclopedia of Food and Health* (pp. 28-33). Oxford, Inglaterra: Academic Press.

Tesis

Autor, A.; Autor, A. (Año). Título de la tesis (Tesis de pregrado, maestría o doctoral). Nombre de la institución, Lugar

Ejemplos:

Avendaño, D.; Sánchez, L. E. (1995). Desarrollo y evaluación de una técnica de recuperación de suelos de manglar afectada por hidrocarburos (Tesis de pregrado). Universidad Jorge Tadeo Lozano, Bogotá, Colombia.

Simposios, ponencias y conferencias

Autor, A.; Autor, A. (Fecha). Título de la ponencia. En A. Apellido del presidente del congreso (Presidencia), Título del simposio o congreso. Simposio o conferencia llevada a cabo en el congreso Nombre de la organización, Lugar

Ejemplos:

Roque, C.; Renard, M.; Vanquy, N. (mayo de 1994). Numerical model for predicting complex sulfate scaling during water flooding. En M. Benitez (presidencia) *Int. Symp. On Formation Damage*. Conferencia llevada a cabo en el III Congreso SPE, Cali, Colombia.

Material Electrónico

Apellido, A. A. (Año). *Título*. Recuperado de <http://www.xxxxxx.xxx>

Ejemplos:

Benítez, M. (2018). Que son y que no son las empresas de tipo familiar. Recuperado de: http://revistas.sena.edu.co/index.php/inf_tec

Normas ASTM

Las referencias para las normas ASTM deben presentarse de la siguiente forma.

Ejemplos:

ASTM Standard E 741-82. Test Method for Determining Air Leakage Rate by Dilution, Annual Book of Standards, Vol. 3, ASTM International, West Conshohocken, PA, 1982.

Para mayor información consultar Normas APA sexta edición

Instrucciones especiales para la digitación:

Párrafos: se justifican sin dejar espacio entre los consecutivos y sin partir las palabras; no dejar más de un espacio entre palabras después de coma, punto y coma, dos puntos, paréntesis y punto seguido. No incluir saltos de página o finales de sección; los guiones tipográficos deben ser largos y tocar la palabra adjunta: (-) pero el que se usa entre palabras y números es el del teclado, y sin dejar espacio ejemplo: petro-químico, 2000-2007.

Ecuaciones: se presentan en el procesador incluido en Word, en la fuente Arial 9 puntos; para los símbolos de las constantes, variables y funciones se utilizan letras latinas básicas o griegas incluidas en las ecuaciones y deben ir en cursiva; los símbolos matemáticos y los números no van en cursiva, identificando los símbolos inmediatamente después de la ecuación. Los términos de las ecuaciones y las fórmulas químicas en el texto deben ir en cursiva. Los números que identifican las ecuaciones deben ir entre paréntesis y en letra cursiva,

al lado derecho de las mismas. Las fracciones en las fórmulas deben escribirse con barra horizontal. Al enunciarlas dentro del texto se pueden escribir con la barra oblicua. Las ecuaciones deben numerarse secuencialmente y estar referenciadas dentro del texto.

Figuras: el término Figura se utiliza para los diagramas, las fotos y los gráficos, las notas relacionadas con la Figura se incluyen en la parte inferior de la misma y la información contenida debe ser completa e incluir indicadores que permitan dar información al artículo. Las figuras no requieren de recuadros y se deben nombrar, numerar y referenciar en el artículo, en estricto orden. El título se escribe tipo oración, se digita como un párrafo normal fuera de la figura, utilizando la fuente Arial 9 puntos.

Ejemplo:

Tablas: Los encabezamientos de cada columna deben ser breves con las unidades de medida entre paréntesis. Las notas relacionadas con

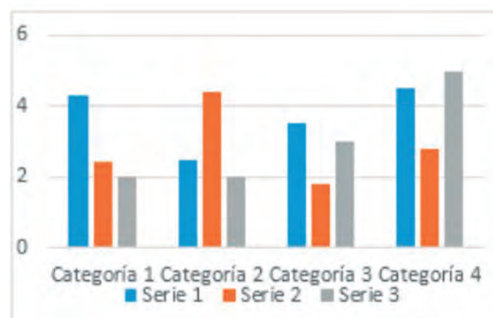


Figura 2. Micrografía SEM en la sección transversal de la muestra

la tabla deben ser muy completas, deben orientar al lector y se incluyen en la parte superior de la misma.

Ejemplo:

Tabla1.

Micrografía SEM en la sección transversal de la muestra

	Datos 1	Datos 2	Datos 3
1	22	10	25
2	6	5	4
3	32	5	15
4	10	44	7

Fuente: Elaboración propia

Las Figuras y Tablas deben tener numeración consecutiva independiente, deben estar referenciadas dentro del texto y antes de ser presentadas. Se deben mostrar como elementos predeterminados en Word, las abreviaturas y los símbolos usados en las tablas y las figuras deben ser explicados en la parte inferior de las mismas. Los gráficos, figuras y fotografías deben ser utilizados en colores con una resolución mayor a 250 pixeles.

Nomenclatura: los números decimales se deben señalar con coma (,) y los millares y millones con un punto (.). Se debe utilizar el Sistema Internacional de Unidades (SIU).

Fórmulas químicas y expresiones matemáticas: los subíndices y superíndices en las fórmulas se deben indicar claramente.

Notas de pie de página: en caso de ser necesarias deben contener solamente aclaraciones o complementos del trabajo que, sin afectar la continuidad del texto, aporten información adicional que el autor considere necesario incluir.

Abreviaturas: la primera vez que aparezcan dentro del texto deben ir entre paréntesis después de su expresión completa y en lo subsiguiente se escribe sólo la sigla o abreviatura respectiva.

Archivo: los originales recibidos se conservan como parte del archivo de la revista.

Informador Técnico

ISSN 0122-056X e-ISSN 2256-5035

Author guidelines

Informador Técnico (Inf.Tec) promotes scientific knowledge in the fields of plastics, materials, metallurgy, hard coatings, and industrial, environmental, technological, quality, knowledge, and innovation management. The articles published should be a consequence of research, scientific reflection, and intellectual production of their authors. The judgments made by the authors are of their entire responsibility. Therefore, they don't compromise the National Learning Service (Servicio Nacional de Aprendizaje SENA) or the Editorial Board. The journal is published twice a year. The authors must send their manuscripts only through the Open Journal System. Once received, the manuscript is submitted through a review from the editorial team that evaluates its fit with the scope and guidelines of the journal. After that, once the fit to the journal is verified, the double-blinded peer review process starts. This process evaluates the scientific quality of the manuscript to decide whether is publishable, or it needs modifications from the authors to be submitted again for a new round of review.

Informador Técnico follows Colciencias National Bibliographic Index "Publindex" criteria, selecting the next type of papers:

a) Scientific and technological research article (type 1)

This article presents the results of original research projects, indicating how the research question was addressed, the methods of testing used (statistical experimental analysis, disciplinary protocols), and the contrast of generated data with scientific literature. This article must have an introduction, methodology, results, and conclusions.

b) Reflection article (type 2)

This article presents the results of a completed research project from the authors' analytical, interpretative, or critical viewpoint, related to a specific topic and based on original sources.

c) Literature review (type 3)

This article compiles the results of a completed research project in which published research results in the fields of science and technology are analyzed and systematized to share advances and development trends. This type of article is characterized by presenting a carefully compiled bibliographic review of at least 50 references.

EDITORIAL PROCESS

Informador Técnico is an open access journal and publishes twice a year articles in Spanish, English, and Portuguese. The reception of manuscripts is permanently, and if they are validated by the Editorial Board, the manuscripts are sent to two peer reviewers. This process continues with the verification of double blinded peer review evaluations, and the answers to the reviewers' comments made by the authors. Style correction prior to final approval is made. The article approved by the Editorial board is sent to the authors for final approval. Articles from the Servicio Nacional de Aprendizaje SENA will not be over 50%.

MANUSCRIPT SUBMISSION

- The manuscript submitted must be original, written in Spanish, English or Portuguese, not published before or simultaneously in another journal printed or online.
- Authors must send a presentation letter.
- Manuscripts must contain a maximum of 20 pages, without tables or figures, letter size paper (21.57 cm x 27.94 cm), margins 2.54 cm, 1.5 space between paragraphs, font Arial, font size 11.
- The first page must include titles in Spanish and English; authors full name, affiliation, e-mail, ORCID (*Open Researcher and Contributor ID*), the abstract must be under 250 words, keywords between 5 or 8.
- The correspondent author must be clearly identified.
- The document should be sent as a Word file.

MANUSCRIPT SECTIONS

Manuscripts must contain the following sections:

Title. The title should be concise, and sufficiently informative so readers can grasp the scientific content of the article and focus of research (maximum 14 words, font Arial size 16).

Authors. Full name of each researcher should be given with his/her affiliation (department or section, faculty or experimental center, university or research organization) and postal address, city, department or state, country. The email, phone/fax, mobile, and the corresponding address of the corresponding author should also be provided.

Abstract. This section summarizes objectives, methods, results, and conclusions in one paragraph, no longer than 250 words.

Keywords. This section must have five to eight keywords related to the content of the article.

Introduction. This section Briefly describes the scientific rationale behind the research problem being addressed, previous studies, and the contribution made.

Theoretical development. This section presents the state of the art in the scientific field or literature review to support the hypothesis (only if required).

Methodology or Materials and Methods. This section describes the analytical and statistical research methodology used so other researchers can replicate the study or readers can better understand data interpretation thresholds.

Results. This section presents the facts that support conclusions and the reach of the research. It must support statistical information (number of observations and descriptive of the sample). The analysis must be focused on the test of hypothesis and verification to the state of the art.

Conclusions. This section explains the contributions made, the discussion with previous results, the implications and accomplishment of the purpose of the study.

Acknowledgments. This section mentions individuals or organizations that provided technical assistance or statistical support as well as sources of funding for the research.

References. The references are a list of source materials consulted that are cited in the text. All references cited in the text should be listed in the reference section at the end of the document and, vice versa, all references listed in the reference section should be cited in the text. The list of references should be organized in alphabetical order of authors' surnames. Use Arabic numbers, not Roman numerals, to indicate volume number. Citations and references in the article must comply with the 2016 APA sixth edition Style Manual. The article must contain at least 10 references.

REFERENCES

Informador Técnico follows the 2016 APA sixth edition Style Manual for citing references in text, which is based on the author-date citation system that consists of including the author's surname and the date of publication within parenthesis, instead of using footnotes or endnotes. This system allows readers to readily find the complete reference in the pertinent section at the end of the document.

Quotation of fewer than 40 words

Citations within the text can be:

Textual or literal, when literally extracting a segment from another text to use in your article. Separate literal quotations from the text of your article with quotation marks, quotations must match source document word for word and must be attributed to original by indicating the author, year of publication, and page where the text was extracted from.

Paraphrasing or non-literal citation, when taking a passage from the work of another author and put it into your own words. The original source must be acknowledged by indicating the author's surname and the year of publication.

Guidelines to cite authors within the text:

Two authors: Surnames separated by "and".

Three or four authors: Cite surname of the first author, followed by the surname of the second, third, and fourth author separated by commas, the first time they are mentioned. For subsequent citations, use the surname of the first author, followed by the expression *et al.*

Five or more authors: Cite surname of the first author, followed by the expression *et al.*

Corporate author: Place name of the organization. Example: Refugees (ONU, 2012).

No name or autonomous: Instead of surname, use the word "anonymous".

Citation of a citation: When secondary sources have been accessed, then use the following example as reference: Zapata (cited by Rosales, 2012) determined the risks...

BIBLIOGRAPHICAL REFERENCES

When writing an article, to avoid plagiarism, it is essential to clearly identify those ideas and information that were taken from other sources or authors, and which were generated by you as authors during the execution of your research. Whenever you use what someone else has said, you should always indicate the source using a citation or reference.

Journal article

Last name, A. A.; Last name, B. B.; Last name, C. C. (year). Title of the article. Journal, volume (issue), page-page. doi: xx.xxxxxxx

Examples:

Arana, A. (2000). The effect of diesel properties on the emissions of particulate matter. *Ciencia, Tecnología y Futuro*, 2(1), 31-46. <https://doi.org/10.23850/22565035.1500>

Arana, A.; Torres, J.; Herrera, J.; Sarmiento, J. (2000). The effect of diesel properties on the emissions of particulate matter. *Ciencia, Tecnología y Futuro*, 2(1), 31-46. <https://doi.org/10.23850/22565035.1500>

Online journal article

Mota de Cabrera, C. (2006). El rol de la escritura dentro del currículo de la enseñanza y aprendizaje del inglés como segunda lengua (esl/efl): Una perspectiva histórica. *Acción Pedagógica*, 15(1), 56-63. Retrieved from <http://www.saber.ula.ve/accionpe/>

Printed newspaper article

Manrique Grisales, J. (14 November 2010). La bestia que se tragó Armero. *El Espectador*, pp. 16-17.

Online newspaper article

Bonet, E. (2011, 2 February). Miles de personas oran en la plaza Tahrir de El Cairo. *El Tiempo*. Retrieved from <http://www.eltiempo.com/mundo/africa>

Books

Last name, A. A. (year). *Title*. Cit. Country: Editorial.

Examples:

Thomann, R. (1987). *Principles of surface water quality modeling and control*. New York: Harper and Row.

Thomann, R. V.; Mueller, J. A. (1987). *Principles of surface water quality modeling and control*. New York: Harper and Row.

Batista, L. R.; Chalfoun, S. M.; Batista, C. F. S.; Schwan, R. F. (2016). Coffee: types and production. In B. Caballero, P. Finglas, & F. Toldrá (Eds.), *The Encyclopedia of Food and Health* (pp. 28-33). Oxford, Inglaterra: Academic Press.

Book with editor

Wilber, K. (Ed.). (1997). *El paradigma holográfico*. Barcelona, España: Editorial Kairós.

Electronic book

De Jesús Domínguez, J. (1887). *La autonomía administrativa en Puerto Rico*. Retrieved from <http://memory.loc.gov/cgibin/query/>

Book with assigned DOI

Montero, M.; Sonn, C. C. (Eds.). (2009). *Psychology of Liberation: Theory and applications*. doi: 10.1007/978-0-387-85784-8

Book chapter

Molina, V. (2008). "... es que los estudiantes no leen ni escriben": El reto de la lectura y la escritura en la Pontificia Universidad Javeriana de Cali. In H. Mondragón (Ed.), *Leer, comprender, debatir, escribir. Escritura de artículos científicos por profesores universitarios* (pp. 53-62). Cali, Valle del Cauca: Sello Editorial Javeriano.

Thesis

Lastname, A.; Lastname, A. (year). Thesis title (undergraduate, master degree or doctoral degree). Educational institution, City.

Examples:

Avendaño, D.; Sánchez, L. E. (1995). Desarrollo y evaluación de una técnica de recuperación de suelos de manglar afectada por hidrocarburos (Tesis de pregrado). Universidad Jorge Tadeo Lozano, Bogotá, Colombia.

Aponte, L.; Cardona, C. (2009). *Educación ambiental y evaluación de la densidad poblacional para la conservación de los cóndores reintroducidos en el Parque Nacional Natural Los Nevados y su zona amortiguadora* (tesis de pregrado). Universidad de Caldas, Manizales, Colombia.

Proceedings of symposium and congresses

Last name, A.; Last name, A. (year). Title. In A. Last name of the chairman of the Congress, Title of the Congress. The conference presented in name of the Congress, place.

Examples:

Roque, C.; Renard, M.; Vanquy, N. (mayo de 1994). A numerical model for predicting complex sulfate scaling during water flooding. En M. Benitez (Chairman) *Int. Symp. On Formation Damage*. Conferencia llevada a cabo en el III Congreso SPE, Cali, Colombia.

Rojas, C.; Vera, N. (agosto del 2013). ABMS (Automatic BLAST for Massive Sequencing). In H. Castillo (Presidencia), *Biología Computacional y Bioinformática CCBCOL*. II Congreso Colombiano Manizales, Colombia.

Electronic material

Last name, A. A. (year). Title. Retrieved from <http://www.xxxxxx.xxx>

Examples:

Benítez, M. (2018). Que son y que no son las empresas de tipo familiar. Recuperado de: http://revistas.sena.edu.co/index.php/inf_tec

Corporate or governmental reports

Departamento Administrativo Nacional de Estadísticas. (2012). *Tecnologías de la información y las comunicaciones*. Retrieved from <http://www.dane.gov.co>

Report of a governmental organization

Bonet, A. (junio, 2011). Evolución del estudio y conceptualización de la consciencia. In H. Castillo (Presidencia), *El psicoanálisis en Latinoamérica*. Simposio llevado a cabo en el XXXIII Congreso Iberoamericano de Psicología, Manizales, Colombia.

Normas ASTM

ASTM must be presented as follows.

Examples:

ASTM Standard E 741-82. Test Method for Determining Air Leakage Rate by Dilution, Annual Book of Standards, Vol. 3, ASTM International, West Conshohocken, PA, 1982.

For further information please consult APA sixth edition.

Guidelines for writing:

Paragraphs: Use full justification, do not leave blank lines between paragraphs and do not hyphenate words at the end of lines. Leave only one (1) space between words and after commas, colons, semi-colons, parenthesis, and periods within paragraphs. Do not include page breaks or section ends. Use hyphens (-) in the case of compound words, for example, theoretical-practical; the end dash (–) to indicate ranges and intervals, with no spaces on either side, for example, 2000–2007. Use dash in the case of clauses, with no spaces on either side, for example, many trials—although not all—were affected by the heavy rains.

Equations: For equations, use Word’s Equation Editor function set in Arial font, 9 points. Use italics for the symbols of constants, variables, and functions, as well as for Latin or Greek letters used in equations. Explain all symbols used in the equation. For mathematical signs and numbers do not use italics. Label each symbol immediately after the equation. Chemical formulas must be in italics. The equation number must be between parenthesis and in italics. Fractions in formulas must be written with a horizontal bar. When enunciated within the text they should be written with a slash. Equations must be enumerated sequentially and be cited within the text.

Figures: All figures should have a caption, placed below but outside the figure itself. Captions should be written in sentence style. Figures should be numbered strictly in order of citation within the text. Use Arial font, 9 points, for figure captions and, when possible, for figure components. Use Microsoft Word functions to create figures and tables.

Example:

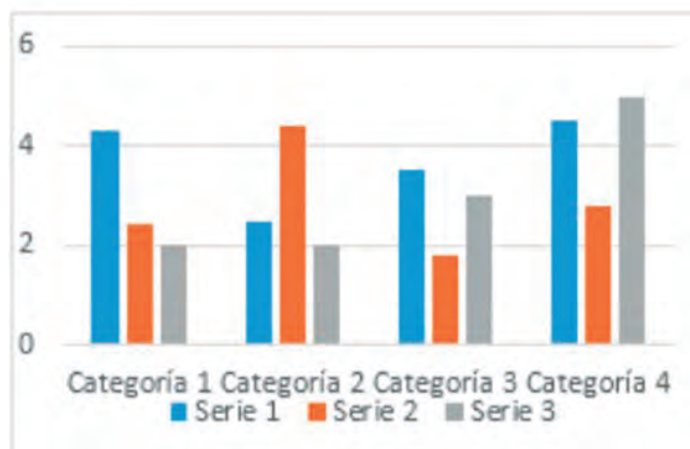


Figure 2. SEM micrograph in the cross-section of the sample

Example:

Tables: The headings of each column must be brief and use the measuring unit between parenthesis. The notes related to the table must be complete at the top of the table.

Table 1.
SEM micrograph in the cross-section of the sample

	Datos 1	Datos 2	Datos 3
1	22	10	25
2	6	5	4
3	32	5	15
4	10	44	7

Source: The authors

Figures and Tables must be enumerated independently and must be referenced within the text before they are presented. They must appear as MS Word objects, abbreviations and symbols used in Tables and Figures must be explained at the bottom. Use, whenever possible, color graphs, figures, and photos. Images should have a resolution of at least 250 pixels.

Nomenclature: Use a period (.) for decimals and commas (,) for thousands and millions. Use the International System of Units (SI).

Chemical formulas and mathematical expressions: Sub-indices and super indices in formulas must be indicated clearly.

Footnotes: footnotes must complement information without affecting the clarity of the text, and must provide additional information that is considered necessary.

Abbreviations: the first time they appear must be between parenthesis after their complete expression, and then the abbreviation is used.

Archive: original manuscripts are held as part of the archive of the Journal.



Proyecto SENA transforma las olas del Pacífico en energía eléctrica



Un proyecto de Economía Naranja único en Colombia, para producir energía eléctrica a partir de las olas marinas, sistema conocido como Undimotriz, flota ahora en aguas del Pacífico, en Buenaventura.

Se trata de una cápsula, equipada con un generador y una turbina, que fue instalada en el mar, al pie del Hotel Maguipi, el pasado 13 de febrero, como prototipo de lo que promete convertirse en una alternativa real para zonas hasta donde no llega la interconexión eléctrica.

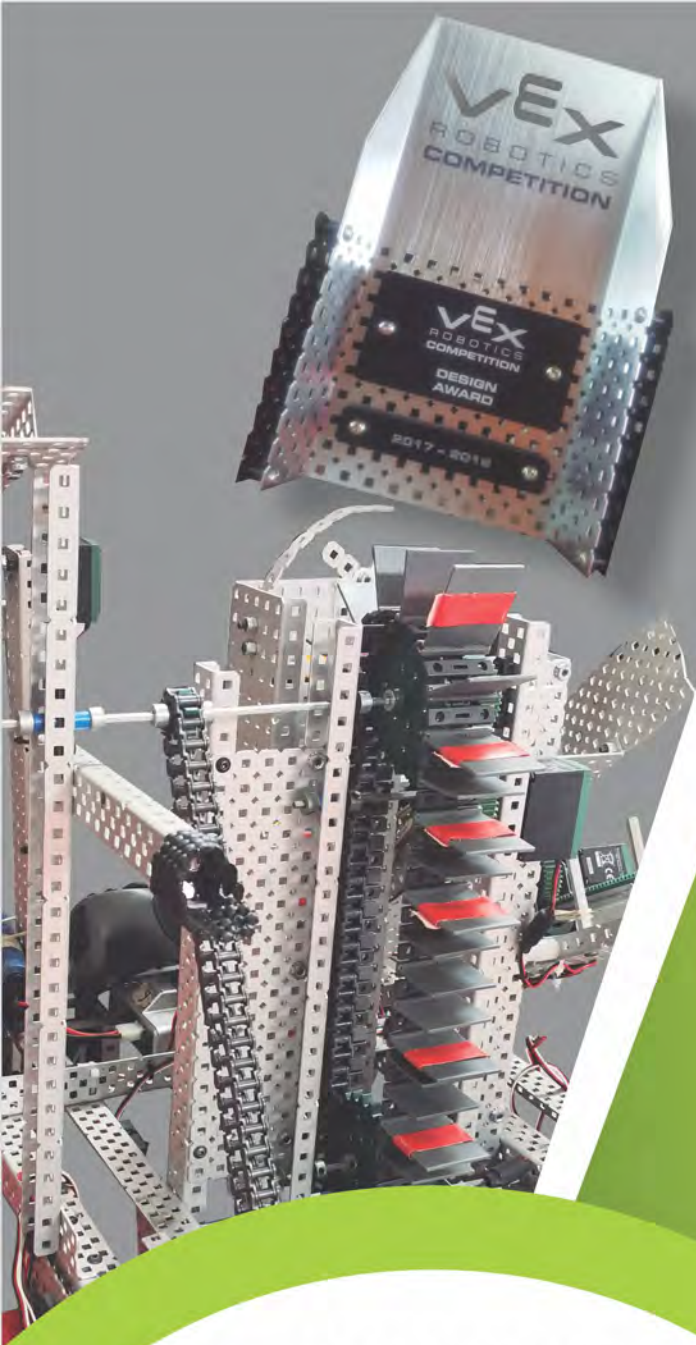
El sitio de prueba fue seleccionado debido a que allí hay un acantilado donde las olas del mar golpean con suficiente potencia.

El prototipo Undimotriz funciona con el oleaje y la fuerza del viento, que son "atrapadas" por la cápsula, hasta producir la energía eléctrica.

El sistema instalado genera 1.000 vatios de energía, los cuales pueden acumularse para ir supliendo las necesidades de los usuarios.

Además de los centros ASTIN y CEAI, el CNP y el CDTI han prestado su apoyo. El proyecto, financiado por SENNOVA, podría ser replicado desde Nariño hasta el Chocó.





Mundial de Robótica VEX ROBOTICS

24 al 27 de abril

Louisville, Kentucky, Estados Unidos



INFORMADOR TÉCNICO

Calle 52 No. 2Bis-15

Teléfonos: 57 (2) 431 5800 Ext. 22694

www.sena.edu.co

E-mail: revistaitastin@sena.edu.co

http://revistas.sena.edu.co/index.php/inf_tec
Cali, Valle del Cauca, Colombia

CENTRO NACIONAL DE ASISTENCIA TÉCNICA A LA INDUSTRIA ASTIN

Calle 52 No. 2Bis-15

Teléfonos: 57 (2) 431 5847 Ext. 22667

E-mail: astin@sena.edu.co

<http://centroastinsena.blogspot.com/>
www.sena.edu.co