

Síntesis verde de nanopartículas de ZnO con actividad antibacteriana para funcionalizar textiles de algodón

Green synthesis of ZnO nanoparticles with antibacterial activity for cotton textile functionalization

Laura Muñoz-Echeverri¹
Daniel Campo-Avenidaño²
Manuela Hoyos-García³
Maica Obregón- Velázquez⁴
Juan Muñoz-Vergara⁵
German Giraldo-Correa⁶

¹ Servicio Nacional de Aprendizaje SENA (Colombia). Correo electrónico: lmunoz729@misena.edu.co
orcid: <https://orcid.org/0000-0002-3796-4140>

² Servicio Nacional de Aprendizaje SENA (Colombia). Correo electrónico: dfcampo@misena.edu.co
orcid: <https://orcid.org/0000-0003-4587-9138>

³ Servicio Nacional de Aprendizaje SENA (Colombia). Correo electrónico: manuellagarziia@gmail.com

⁴ Servicio Nacional de Aprendizaje SENA (Colombia). Correo electrónico: isabella30obre@gmail.com

⁵ Servicio Nacional de Aprendizaje SENA (Colombia). Correo electrónico: juanstevanmv17@gmail.com

⁶ Servicio Nacional de Aprendizaje SENA (Colombia). Correo electrónico: gdgiraldoc@sena.edu.co

Recibido: 31-03-2021 Aceptado: 17-08-2021

Cómo citar: Muñoz-Echeverri, Laura; Campo-Avenidaño, Daniel; Hoyos-García, Manuela; Obregón- Velázquez, Maica; Muñoz-Vergara, Juan; Giraldo-Correa, German (2021). Síntesis verde de nanopartículas de ZnO con actividad antibacteriana para funcionalizar textiles de algodón. *Informador Técnico*, 85(2), 126-145.
<https://doi.org/10.23850/22565035.3645>

Resumen

En la presente investigación se evaluó la síntesis verde de nanopartículas de óxido de zinc (ZnO) y su aplicación como agente antibacteriano para sustratos textiles. El proceso de síntesis implicó el uso de extractos de *Azadirachta indica*, *Aloe vera*, y acetato de zinc como precursor metálico. La síntesis de nanopartículas se confirmó mediante espectrofotometría UV-Vis, espectroscopia de infrarrojo con transformada de Fourier (FTIR), difracción de rayos X (DRX) y microscopía electrónica de barrido. La eficiencia de las nanopartículas como agentes antibacterianos en textiles se probó en uno de 100 % algodón funcionalizado por impregnación. Este fue sometido a cinco y diez ciclos de lavado doméstico para analizar la durabilidad de las nanopartículas. La actividad antibacteriana del textil funcionalizado, con y sin ciclos de lavado, se determinó mediante la norma ISO 20743:2007 contra la bacteria *Staphylococcus aureus* ATCC 6538. Se encontró que las nanopartículas confieren una actividad antibacteriana fuerte al textil y, aunque hay una pérdida importante del nanomaterial con los ciclos de lavado, la concentración remanente es suficiente para mantener una actividad antibacteriana significativa hasta los diez ciclos de lavado. Se concluye que las nanopartículas de ZnO son candidatas promisorias para ser empleadas como agentes antibacterianos en la industria textil, pues presentan actividad antibacteriana y son relativamente fáciles de obtener por síntesis verde con extractos de *A. indica* y *A. vera*, material vegetal de fácil acceso en el departamento de Antioquia.

Palabras clave: *Aloe vera*; *Azadirachta indica*; durabilidad; nanomateriales; textiles antibacterianos; óxido de zinc; ISO 20743:2007.

Abstract

In the present investigation, we evaluated the green synthesis of ZnO nanoparticles and their application as an antibacterial agent for textile substrates. The synthesis process involved the use of *Azadirachta indica* and *Aloe vera* extracts, and zinc acetate dihydrate as a metallic precursor. The synthesis of the nanoparticles was confirmed by UV-Vis spectrophotometry, Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FTIR), X-Ray Diffraction (DRX), and Scanning Electron Microscopy (SEM). The efficiency of nanoparticles as a textile antibacterial agent was tested in a 100 % cotton textile functionalized by exhaustion. The textile was subjected to five and ten domestic washing cycles to analyze the durability of the nanoparticles. The antibacterial activity of the functionalized textile, with and without washing cycles, was determined by the ISO 20743:2007 standard against *Staphylococcus aureus* ATCC 6538 bacteria. We found that nanoparticles conferred strong antibacterial activity to the textile, and while there is a significant loss of nanoparticles with wash cycles, the remaining concentration is sufficient to maintain significant antibacterial activity up to ten cycles. We concluded that ZnO nanoparticles are promising candidates to be used as antibacterial agents in the textile industry, presenting antibacterial activity and being relatively easy to obtain by green synthesis using vegetal substracts available in Antioquia.

Keywords: *Aloe vera*; *Azadirachta indica*; durability; nanomaterials; antimicrobial textile; zinc oxide; ISO 20743:2007.

1. Introduccion

La nanotecnología es actualmente una de las áreas de investigación más activas, enfocada en el desarrollo de nuevos materiales a escalas nanométricas, con aplicación en diferentes áreas de la ciencia y/o sectores industriales (Dulta; Koşarsoy-Ağçeli; Chauhan; Jasrotia; Chauhan; 2021; Gómez-Garzón, 2018; Jayachandran; Aswathy; Nair, 2021). Los nanomateriales, comparados con los materiales tradicionales de la misma composición, tienen propiedades únicas como su distribución, morfología y una alta relación superficie/volumen, esto último los hace más reactivos (Jayachandran *et al.*, 2021; Zayed; Othman; Ghazal; Hassabo, 2021).

En el sector textil, la nanotecnología tiene como principal objetivo la producción de nanomateriales que aporten funcionalidades sin alterar el confort los tejidos (Yetisen *et al.*, 2016). El algodón, una fibra líder a nivel mundial, única por su suavidad, confort y biodegradabilidad (Jayachandran *et al.*, 2021; Tania; Ali, 2020), es también propenso al crecimiento de bacterias, lo que conduce, a su vez, al deterioro del tejido, desgaste de colores, malos olores y posibles infecciones (Muñoz, 2019; Tania; Ali, 2020). Por lo anterior, una de las funcionalidades más estudiadas, y con importantes avances en los últimos años, corresponde a la actividad antibacteriana (Ibrahim; Abd El-Ghany; Eid; Mabrouk, 2018; Muthu, 2017; Saha; Mondal, 2021; Song; Padrão; Ribeiro; Zille, 2021; Verbič; Gorjanc; Simončič, 2019).

Entre los nanomateriales que llaman la atención para el desarrollo de textiles antibacterianos, se encuentran las nanopartículas de ZnO (Agarwal; Menon; Kumar; Shanmugam, 2018; Mishra; Militky, 2019; Salat *et al.*, 2018; Tania; Ali, 2020). Estas corresponden a óxidos metálicos con características únicas como estabilidad química, biocompatibilidad y bioseguridad (no tóxicas), tienen una alta actividad fotocatalítica, son de los semiconductores metálicos más importantes, y además de actividad antibacteriana brindan protección contra la luz UV (Dulta *et al.*, 2021; Tania; Ali, 2020; Zayed *et al.*, 2021).

Las nanopartículas de ZnO pueden ser obtenidas mediante diferentes rutas como procesos físicos, síntesis química o biosíntesis (Bandeira; Giovanela; Roesch-Ely; Devine; da Silva Crespo, 2020; Basnet; Chenu; Samanta; Chatterjee, 2018). De estas, la biosíntesis o síntesis verde es catalogada como la ruta más amigable con el ambiente y menos costosa, e implica el uso de microorganismos o plantas que actúan como agentes reductores o estabilizantes (Bandeira *et al.*, 2020; Dulta *et al.*, 2021; Zayed *et al.*, 2021).

Extractos de plantas como *Azadirachta indica* o *Aloe vera* han sido evaluados con éxito en la síntesis verde de nanopartículas de ZnO (Ali *et al.*, 2016; Handago; Zereffa; Gonfa, 2019; Rasli; Basri; Harun, 2020; Sharma; Kumar; Thakur; Chauhan; Chauhan, 2020; Sohail *et al.*, 2020; Suganya; Vivekanandhan, 2019). Ambas plantas se caracterizan por su contenido de fitoquímicos, que incluyen polifenoles, polisacáridos y ácidos orgánicos (Bhuyan; Mishra; Khanuja; Prasad; Varma, 2015; Rasli *et al.*, 2020). El uso de estos extractos con diversidad de fitoquímicos provee ventajas como la producción de nanopartículas de variadas formas y tamaños (Singh; Neelam; Kaushik, 2019).

Si bien la síntesis verde de nanopartículas de ZnO ha sido ampliamente documentada, así como su uso en la funcionalización de textiles, a la fecha son escasos los reportes donde nanopartículas de ZnO producidas por síntesis verde con *A. indica* o *A. vera* han sido empleadas en la obtención de textiles antibacterianos. En este sentido, con una amplia disponibilidad de las dos plantas en la región, se realizó esta investigación aplicada, en la cual se sintetizaron nanopartículas de ZnO con extractos de *A. indica* y *A. vera*. Las nanopartículas obtenidas fueron impregnadas en un textil de algodón para evaluar su capacidad de conferir actividad antimicrobiana a un tejido y durabilidad bajo diferentes ciclos de lavado, luego de un proceso de funcionalización convencional.

2. Metodología

2.1. Preparación y caracterización fitoquímica de los extractos naturales

Para la síntesis verde de nanopartículas de ZnO, se evaluaron dos extractos naturales, el primero obtenido a partir de hojas *Azadirachta indica* (*A. indica*) y el segundo desde hojas de *Aloe vera* (*A. vera*). Las hojas de *A. indica* fueron colectadas desde arbustos ubicados en zonas residenciales aledañas al Centro Textil y de Gestión Industrial del SENA; las hojas de *A. vera*, desde una huerta familiar en el municipio de Bello, Antioquia.

Durante la preparación del extracto de *A. indica*, las hojas fueron lavadas con agua corriente hasta eliminar todo resto de impurezas, se pasaron por agua desionizada y se picaron finamente 100 g de hojas fueron mezclados con 400 mL de agua desionizada estéril y se mantuvieron por 20 min a 60 °C con agitación intermitente (Handago *et al.*, 2019). Para el extracto de *A. vera*, se lavaron las hojas con abundante agua, se pasaron por agua desionizada, se extrajo el cristal y se picó finamente la piel, donde 100 g fueron mezclados con 400 mL de agua desionizada estéril; la mezcla se mantuvo en agitación constante por 10 min a 60 °C (Ali *et al.*, 2016). Ambas mezclas se dejaron enfriar hasta temperatura ambiente, se removió el material vegetal y se filtraron las fases líquidas a través de papel Whatman No. 1 y membrana de acetato de celulosa de 0,45 µm. Luego de medir el pH, cada extracto fue almacenado a 4 °C hasta su uso.

Se realizó una caracterización fitoquímica de los extractos, en la que se cuantificó espectro fotométricamente el contenido de azúcares reductores, fenoles totales y actividad antioxidante. La concentración de azúcares reductores fue determinada mediante el método del ácido dinitrosalicílico (DNS), según el procedimiento de Bello, Carrera y Díaz (2006); para la construcción de la curva de calibración se usó D-glucosa y la concentración de azúcares se reportó como gramos de azúcares/L de extracto. La actividad antioxidante se cuantificó por los métodos de los radicales ABTS+ y DPPH, y la concentración de fenoles totales por el método de Folin Ciocalteu. Los últimos tres análisis fueron llevados a cabo según los procedimientos descritos por Quiceno *et al.* (2017), quienes reportaron la actividad antioxidante en términos de mmol Trolox/L de extracto o TEAC (actividad antioxidante equivalente a Trolox) y el contenido de fenoles totales como mg ácido gálico/L extracto o EAC (Equivalentes a Ácido Gálico). Todos los análisis fueron realizados por triplicado.

2.2. Síntesis de nanopartículas de ZnO

La síntesis de nanopartículas de ZnO se realizó empleando de manera independiente cada extracto natural. Algunas condiciones de síntesis fueron seleccionadas con base en los resultados de un diseño experimental preliminar, donde se evaluó la concentración de extracto (10-50 %) y tiempo de síntesis (1-3 h). Así mismo, se consideraron y modificaron procedimientos reportados en trabajos previos sobre síntesis verde de nanopartículas de ZnO (Bhuyan *et al.*, 2015; Handago *et al.*, 2019; Lalithambika; Thayumanavan; Ravichandran; Subramanian, 2017; Singh *et al.*, 2018; Singh *et al.*, 2011).

De manera breve, se mezclaron 300 mL de extracto (*A. indica* o *A. vera*) y 700 mL de acetato de zinc dihidratado al 0,5 M. Las soluciones se mantuvieron en agitación constante a 60 °C por 2 h. Transcurrido el tiempo de reacción, se dejaron enfriar y se ajustó el pH alrededor de 7,0 con hidróxido de sodio (0,5 M), lo que condujo a la formación de precipitados. Las mezclas fueron centrifugadas a 5000 rpm por 15 min, se descartó el sobrenadante y las partículas sedimentadas se lavaron con agua destilada y etanol al 96 %, respectivamente. Las muestras obtenidas se secaron a 75 °C durante la noche y se calcinaron a 600 °C por 2 h. Finalizada la síntesis con cada extracto, se obtuvo un material sólido particulado que fue almacenado en recipientes herméticos hasta su caracterización y uso. En la presentación de los resultados se utilizó la nomenclatura NPsZnO *A. indica* como referencia a las nanopartículas de ZnO obtenidas con extracto de *A. indica* y NPs-ZnO *A. vera* para las nanopartículas de ZnO sintetizadas con extracto de *A. vera*.

2.3. Caracterización de las nanopartículas

Para confirmar la formación de nanopartículas de ZnO y determinar diferentes características físicas y químicas, las muestras obtenidas fueron sometidas a diferentes análisis. Las propiedades ópticas se evaluaron mediante espectrofotometría UV-Vis en un rango de longitudes de onda de 300 nm a 700 nm (UV Vis GENESYS 10S; Thermo Scientific). Se detectaron grupos funcionales por FTIR (Fourier-transform infrared spectroscopy) bajo la técnica de Reflexión Total Atenuada entre los números de onda 650 cm⁻¹ y 4000 cm⁻¹, empleando un dispositivo Nicolet iS10 FTIR Thermo Scientific. El tamaño y la morfología de las nanopartículas fueron examinadas mediante microscopía electrónica de barrido (SEM por sus siglas en inglés, Scanning Electron Microscope) en un equipo ZEISS EVO • MA y LS Serie. Para determinar las fases cristalinas y confirmar la síntesis de ZnO, las nanopartículas se analizaron en un difractómetro de rayos X (DRX) Malvern-PANalytical Modelo Empyrean 2012, con detector Píxel 3D y fuente de Cu, bajo el modo paso a paso y un ángulo de barrido (2θ) entre 5 y 80°. El tamaño de los cristallitos submicroscópicos presentes en las nanopartículas fue determinado a través de la ecuación de Debye Scherrer (Ecuación 1), donde D corresponde al tamaño del cristallito, λ a la longitud de onda de los rayos X (1.541 Å), β ancho medio del pico de difracción (FWHM o Full-width-at-half-maximum) y θ al ángulo de difracción (β y θ se expresan en radianes) (Bhuyan *et al.*, 2015; Jayachandran *et al.*, 2021; Malik; Mitra, 2021).

$$D = \frac{0,9 \lambda}{\beta \cos \theta} \quad (1)$$

2.4. Funcionalización de un textil de algodón con las nanopartículas de ZnO

La capacidad de las nanopartículas de conferir actividad antibacteriana a textiles se evaluó en uno compuesto en un 100 % de algodón, tejido punto, apto para teñir y sin blanqueamiento óptico. Para facilitar el análisis, el textil fue dividido en tres muestras de 30 x 30 cm. Posteriormente, con el objetivo de eliminar impurezas que pudiesen interferir en la adhesión homogénea de las nanopartículas, las muestras fueron sometidas a un proceso de lavado en discontinuo, el cual involucró la aplicación de un humectante (2 g/L) y suavizante (1 g/L) a 85 °C durante 30 min en agitación constante, se bajó la temperatura a 80 °C y se aplicó detergente (1g/L). Uno

de los textiles fue usado como control negativo, y los dos restantes para funcionalizar con las nanopartículas de ZnO provenientes de las síntesis con los dos extractos naturales.

La funcionalización de los textiles se realizó por método de impregnación, donde fue necesario determinar del porcentaje de arrastre o “pick up”, que arrojó un valor del 80 % (Ecuación 2). Para la impregnación se prepararon soluciones de nanopartículas a una concentración de 50 g/L, y se empleó isopropanol como solvente. Una vez impregnados los textiles en las soluciones de nanopartículas, se pasaron por un Fourland, que se ajustó a una presión de 12,5 bar y velocidad de 10 m/min. Cada textil fue sometido a un proceso de termofijación a 120 °C por 3 min. La superficie de los textiles funcionalizados fue analizada mediante microscopía electrónica de barrido. Algunas condiciones del proceso de funcionalización fueron seleccionadas con base en trabajos previamente reportados (Belay; Mekuria; Adam, 2020; Salas; Guerreiro; Rosas, 2016; Uribe *et al.*, 2016).

$$\text{Porcentaje de arrastre} = \frac{\text{Peso textil húmedo} - \text{Peso textil seco}}{\text{Peso textil seco}} \times 100 \quad (2)$$

2.5. Evaluación durabilidad al lavado de las nanopartículas en el textil

Para determinar la durabilidad de las nanopartículas en el textil, se adaptó la norma técnica NTC 1155-3 (Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación [Icontec], 2017), la cual fue concebida para realizar ensayos de solidez al color, y describe el proceso para simular cinco ciclos de lavado doméstico. En el caso particular de esta investigación, se empleó el ensayo 1A, donde se cambiaron las esferas de acero por esferas de vidrio y se usaron muestras textiles de 15 x 5 cm, cada muestra por triplicado. En total se simularon cinco y diez ciclos de lavado doméstico.

Luego de los procesos de lavado, se determinó por absorción atómica la cantidad de Zn remanente en los textiles de algodón, la cual se reporta en mg de Zn por kg de tela (mg/kg). Este análisis fue realizado en un equipo Thermo iCE 3000 Series, bajo el método de absorción con llama. Previo al análisis, las muestras textiles fueron sometidas a una digestión con HCl y HNO₃, empleando una relación 3:1.

2.6. Evaluación de la actividad antimicrobiana

Finalmente, se evaluó la actividad antimicrobiana de los textiles funcionalizados mediante la norma ISO 20743:2007, adaptada por Colombia como la NTC 6174 (Icontec, 2016; Standard International, 2007). Entre los ensayos descritos por la norma, se seleccionó el de absorción contra la cepa bacteriana *Staphylococcus aureus* ATCC 6538. Se analizaron los textiles funcionalizados sin lavar, con cinco y diez ciclos de lavado; como control se empleó el textil sin funcionalizar. La actividad antimicrobiana fue calculada a partir de la Ecuación 3, que incluye los conteos de Unidades Formadoras de Colonias (UFC) en el tiempo inicial y a las 20 h de incubación de los textiles con el microorganismo. En la Ecuación 3, A corresponde al valor de la actividad antibacteriana; F es el valor de crecimiento en las muestras control ($F = \lg C_t - \lg C_o$); G es el valor de crecimiento en las muestras textiles con agente antimicrobiano ($G = \lg T_t - \lg T_o$); $\lg T_t$ es el promedio del logaritmo común de bacterias vivas en tres muestras del textil funcionalizado a las 20 h de incubación; $\lg T_o$ el promedio del logaritmo común de bacterias vivas en las tres muestras del textil funcionalizado inmediatamente después de la inoculación; $\lg C_t$ es el promedio del logaritmo común de bacterias vivas en tres muestras del textil control a las 20 h de la incubación; y $\lg C_o$ el promedio del logaritmo común de bacterias vivas en las tres muestras del textil control inmediatamente después de la inoculación. El resultado de eficiencia de la propiedad antibacteriana se determinó con base en la Tabla 1.

$$A = F - G = (\lg C_t - \lg C_o) - (\lg T_t - \lg T_o) \quad (3)$$

Tabla 1. Eficiencia de la propiedad antibacteriana.

Eficiencia de la propiedad antibacteriana	Valor para la actividad antibacteriana (A)
Insuficiente	$A \leq 2$
Significante	$2 \leq A \leq 3$
Fuerte	$A \geq 3$

Fuente: Icontec (2016).

3. Resultados y discusión

3.1. Caracterización fitoquímica de los extractos naturales

La primera parte de este trabajo consistió en determinar características fitoquímicas como capacidad antioxidante, contenido de polifenoles y azúcares reductores para cada extracto natural (*A. vera* y *A. indica*). En ambos casos se encontró presencia de los fitoquímicos cuantificados y capacidad antioxidante (Tabla 2), donde el extracto de *A. indica* presentó concentraciones o valores significativamente más altos. Adicionalmente, se obtuvieron valores de pH de $5,98 \pm 0,006$ y $5,09 \pm 0,06$ para los extractos de *A. indica* y *A. vera*, respectivamente.

Tabla 2. Resultados caracterización fitoquímica de los extractos naturales.

Tipo de extracto	Actividad antioxidante		Fitoquímicos	
	ABTS (mmol trolox/L)	DPPH (mmol trolox/L)	Polifenoles (mg ac. gálico/L)	Azúcares reductores (g/L)
<i>Azadirachta indica</i> (<i>A. indica</i>)	$647,40 \pm 3,30$	$365,03 \pm 14,73$	$969,69 \pm 29,81$	$3,83 \pm 0,03$
<i>Aloe vera</i> (<i>A. vera</i>)	$87,50 \pm 1,28$	$27,03 \pm 4,73$	$70,99 \pm 3,22$	$1,96 \pm 0,02$

Fuente: elaboración propia.

Según datos reportados por Dharmasivam *et al.* (2017), quienes sintetizaron nanopartículas de ZnO a partir de extractos de *Aloe vera* e *Hibiscus sabdariffa*, la cantidad de cada fitoquímico entre los sustratos vegetales evaluados también difiere, donde, en su caso, el *A. vera* es el que presenta las concentraciones más altas. Sin embargo, estos datos no parecieron influir de manera significativa en la síntesis de nanopartículas, lo que sugiere que es el tipo de fitoquímicos más que su concentración lo que toma relevancia en el proceso. Dharmasivam *et al.* (2017) y Singh *et al.* (2018) proponen, además, que la formación de nanopartículas de ZnO usando extractos naturales puede deberse principalmente a la presencia de compuestos fenólicos y flavonoides.

3.2. Obtención y caracterización de las nanopartículas de ZnO

En la Figura 1 se presentan fotografías tomadas durante el proceso de síntesis de las NPsZnO *A. Indica* y NPsZnO *A. vera*. En dichas fotografías se aprecia un precipitado de color amarillo en el proceso con *A. indica*, y rojizo con extracto de *A. vera*, algo similar a lo reportado en otras investigaciones (Ali *et al.*, 2016; Dulta *et al.*, 2021; Jayachandran *et al.*, 2021). Los cambios de coloración en las soluciones y precipitado estarían asociados al tipo y composición química de los extractos naturales. Luego de la calcinación, las partículas adquirieron un color grisáceo, también reportado por Jayachandran *et al.* (2021).

Adicionalmente, antes del ajuste del pH con hidróxido de sodio (NaOH), la solución con *A. indica* presentó un pH de $5,94 \pm 0,03$, y con *A. vera* de $5,96 \pm 0,04$. De acuerdo con Arya *et al.* (2021) y Bandeira *et al.* (2020), el pH de las soluciones de síntesis, además de influir en la morfología de las nanopartículas, puede conducir a una variación en el número de núcleos de ZnO y el crecimiento de las unidades, por lo que se opta por su ajuste. En el caso de la síntesis verde de nanopartículas de ZnO, se ha reportado el pH neutro como adecuado (Singh *et al.*, 2018).

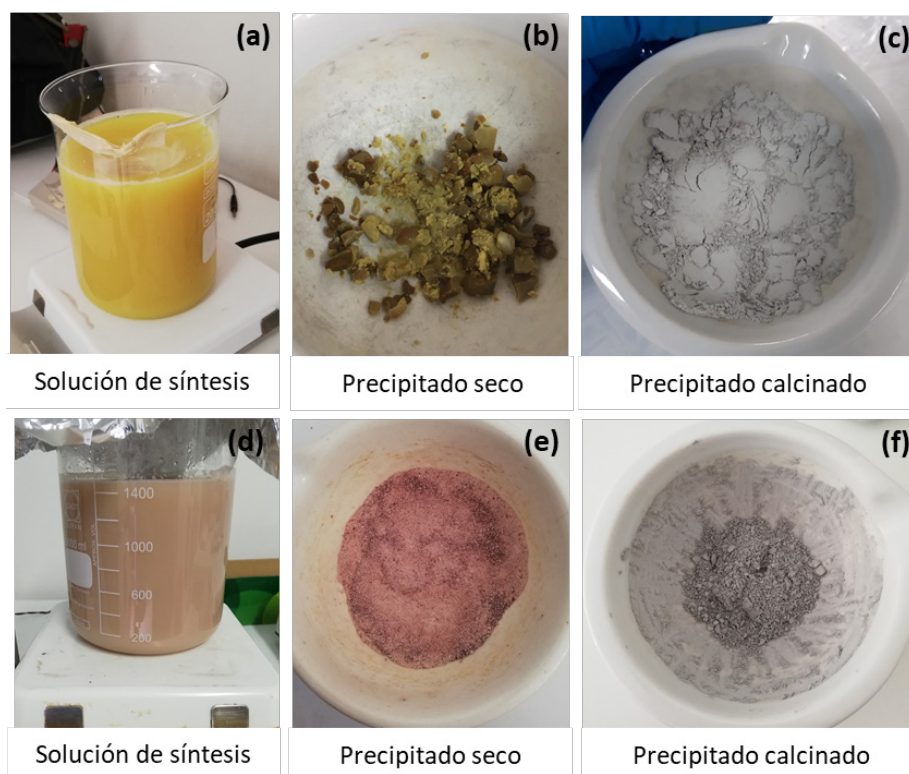


Figura 1. Proceso de síntesis de nanopartículas de ZnO con extractos de *A. indica* (a, b y c) y *A. vera* (d, e y f). De izquierda a derecha se presentan soluciones de síntesis, precipitados secados en horno de convección forzada y precipitados calcinados (nanopartículas).
Fuente: elaboración propia.

Aunque el mecanismo de síntesis de nanopartículas de ZnO a partir de extractos naturales aún está en investigación, existen algunos acercamientos que lo tratan de explicar. El primero de ellos considera que el proceso comienza con la reducción de zinc a su estado cero valente, y termina con su calcinación, operación en la que se oxida (Basnet *et al.*, 2018; Singh *et al.*, 2018). Otra propuesta, más cercana, quizás, al mecanismo de síntesis acaecido en este trabajo, indica que los iones de zinc se acomplejan con los polifenoles (u otro fitoquímico) adquiriendo su forma Zn^{+2} . El Zn^{+2} se convierte en hidróxido de zinc ($Zn(OH)_2$), en este caso con ayuda adicional del NaOH (coprecipitación); y finalmente la calcinación descompone el $Zn(OH)_2$ en nanopartículas de ZnO (Basnet *et al.*, 2018; Bhuyan *et al.*, 2015; Dharmasivam *et al.*, 2017; Zayed *et al.*, 2021).

Independientemente del mecanismo de síntesis, los diferentes fitoquímicos presentes en los extractos naturales participan como agentes reductores y estabilizantes (Basnet *et al.*, 2018; Jayachandran *et al.*, 2021; Dharmasivam *et al.*, 2017; Zayed *et al.*, 2021). Reportes sobre la síntesis de nanopartículas de ZnO por los métodos químicos de precipitación o sol-gel resaltan la importancia de utilizar agentes estabilizantes, los cuales ayudan a controlar y direccionar el crecimiento de las nanopartículas y, en algunos casos, modifican su superficie para evitar aglomeraciones (Arya *et al.*, 2021; Malik; Mitra, 2021).

Una vez terminadas las síntesis, se cuantificaron los rendimientos volumétricos de los procesos (g nanopartículas/L de solución de síntesis), que arrojaron valores de 8,27 g/L con *A. indica* y 7,67 g/L con *A. vera*. Se considera que las diferencias en los resultados se deben a pérdidas en el proceso de recuperación, más que al tipo de extracto. Cada muestra de nanopartículas fue caracterizada con las técnicas que se reportan en literatura para este tipo de materiales. A continuación, se describen los resultados obtenidos.

3.2.1. Espectros UV-Vis

En la Figura 2 se presentan los espectros UV-Vis de las suspensiones de nanopartículas sintetizadas con los dos extractos. Aunque los picos de absorción no se observan lo suficientemente definidos como en otras investigaciones (Ali *et al.*, 2016; Elumalai; Velmurugan, 2015; Liu *et al.*, 2020; Dharmasivam *et al.*, 2017; Singh *et al.*, 2019), sí se aprecian pequeñas bandas alrededor de los 382 nm para las NP-ZnO *A. vera* y 389 nm para las NP-ZnO *A. indica*. De acuerdo con Dharmasivam *et al.* (2017) y Liu *et al.* (2020), la absorción a estas longitudes de onda estaría asociada a la transición de electrones en el ZnO desde la banda de valencia a la banda de conducción.

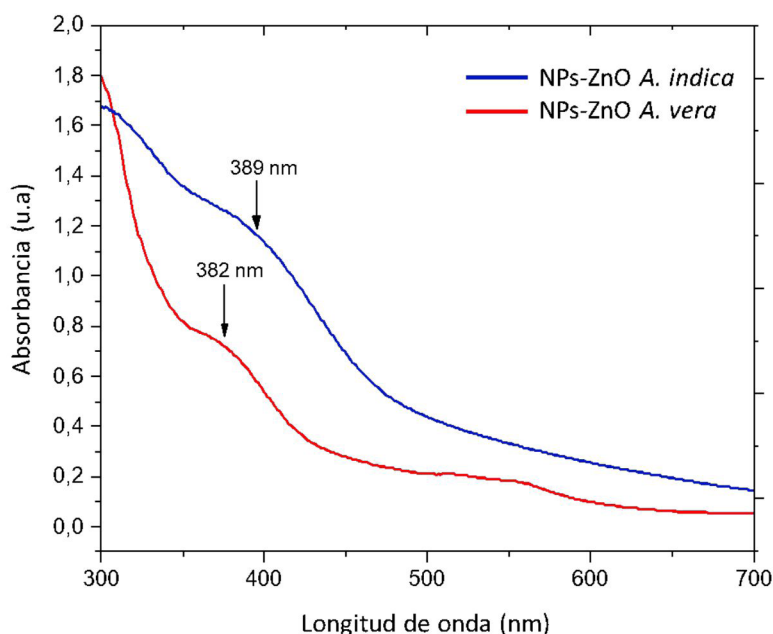


Figura 2. Espectros UV-Vis asociados a las nanopartículas de ZnO sintetizadas con extractos de *A. indica* (línea azul) y *A. vera* (línea roja).

Fuente: elaboración propia.

Los resultados del UV-Vis corroboran, entonces, la síntesis de nanopartículas con ambos extractos. Adicionalmente, debido a la poca definición de los picos de absorción, se puede inferir aglomeración de las partículas (Malik; Mitra, 2021).

3.2.2. Análisis FTIR

En la Figura 3 están representados los espectros FTIR para las nanopartículas de ZnO obtenidas. En ellos se pueden observar bandas de absorción en 2339 y 2347 cm^{-1} , 1429 y 1433 cm^{-1} , 1157 y 1152 cm^{-1} , 880 cm^{-1} , 694 y

660 cm^{-1} , donde las bandas 2339 y 2347 cm^{-1} corresponderían al estiramiento del doble enlace $\text{C} = \text{C}$ de grupos aromáticos. Las bandas 1429 y 1433 cm^{-1} están relacionadas a grupos carbonilos asociados a amidas secundarias. Entre 1157 y 1152 cm^{-1} se obtienen bandas características de un estiramiento del enlace CN . De manera general, las bandas anteriores junto a la que se presenta en 880 cm^{-1} indican la presencia y participación de fitoquímicos (aminas, cetonas, alcoholes, ácido carboxílico, polioles y terpenoides) en la formación de ZnO (Elumalai; Velmurugan, 2015; Singh *et al.*, 2019). Por otro lado, considerando lo descrito por Liu *et al.*, (2020) y Ramesh, Anbuvannan y Viruthagiri, (2015), las bandas de absorción entre los números de onda 694-660 cm^{-1} podrían corresponder a frecuencias en los enlaces ZnO, lo que sugiere, una vez más, la síntesis de ZnO.

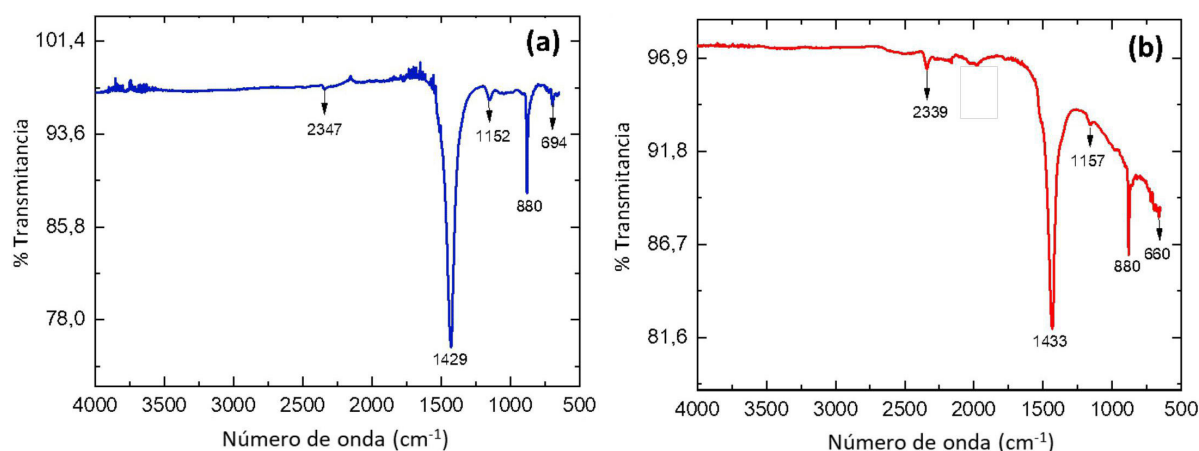


Figura 3. Espectros FTIR de nanopartículas de ZnO obtenidas con extractos de *A. indica* (a) y *A. vera* (b).
Fuente: elaboración propia.

En general, no se observaron diferencias significativamente grandes entre los espectros FTIR de las nanopartículas de ZnO obtenidas con cada extracto (NPsZnO *A. Indica* y NPs-ZnO *A. vera*), lo que confirma lo sugerido previamente: en estos procesos de síntesis y características finales de las nanopartículas, parecen primar otros factores (tiempo de síntesis, tipo y concentración del precursor, temperatura y tipo de agentes reductores, entre otros) sobre la concentración de fitoquímicos de cada extracto.

3.2.3. Análisis DRX

El análisis de difracción de rayos X (Figura 5) arrojó patrones similares para las dos muestras de nanopartículas, con picos característicos alrededor de las posiciones (2θ): 31,88°, 34,54°, 36,37°, 47,7°, 56,7°, 62,96°, 66,5°, 68°, 69,2°, 72,7° y 77,1°. Estos difractogramas fueron comparados con el patrón de DRX para el ZnO (JCPDS n. 5-664) (Malik; Mitra, 2021) y con patrones reportados por otros autores (Bhuyan *et al.*, 2015; Dulta *et al.*, 2021; Jayachandran *et al.*, 2021; Selim; Azb; Ragab; Abd El-Azim, 2020; Sharma *et al.*, 2020; Singh *et al.*, 2018; Singh *et al.*, 2019), donde se encontró una alta correspondencia entre los planos cristalinos y/o posiciones de los picos característicos. A partir de este análisis se puede afirmar que las nanopartículas sintetizadas están compuestas por ZnO como única fase identificada, y se corrobora su naturaleza cristalina, la cual no varía significativamente con el tipo de extracto natural.

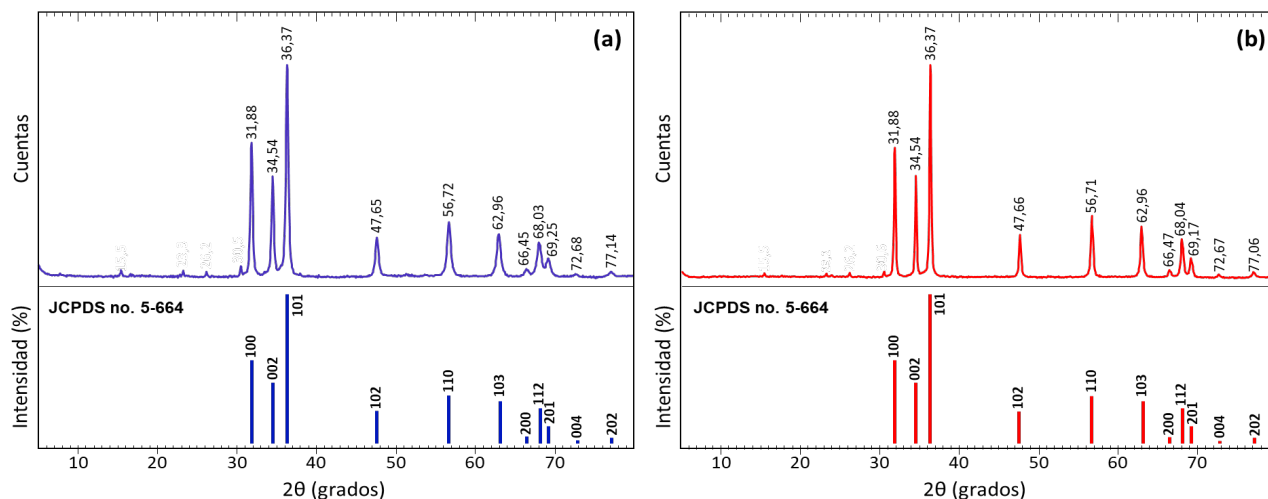


Figura 4. Difractogramas asociados a las nanopartículas de ZnO sintetizadas con extractos de *A. indica* (a) y *A. vera* (b).

Debajo de cada difractograma se presenta el patrón de difracción con los planos cristalinos característicos del ZnO según JCPDS no. 5-664.

Fuente: difractogramas, elaboración propia; JCPDS no. 5-664, tomado de Malik y Mitra (2021).

A partir de los difractogramas y la ecuación de Debye-Scherrer (Ecuación 1) se determinó el tamaño de los cristalitas asociados a las nanopartículas. El tamaño del cristallito se puede considerar como el tamaño límite inferior de las partículas obtenidas (Cullity; Stock, 2014). En este caso, para la cuantificación de este parámetro se consideraron los picos de mayor intensidad en cada espectro (Tabla 3). En promedio, se obtuvo un tamaño de cristallito de $24,86 \pm 3,31$ nm para las NPsZnO *A. Indica* y de $29,61 \pm 3,43$ nm para las NPs-ZnO *A. vera*.

Tabla 3. Resultados análisis de difracción para varios planos cristalinos asociados a las nanopartículas de ZnO y determinación del tamaño de los cristalitas.

No	NPsZnO <i>A. Indica</i>				NPs-ZnO <i>A. vera</i>			
	2θ (grados)	FWHM (rad)	Índice de Miller	Tamaño del cristallito (nm)	2θ (grados)	FWHM (rad)	Índice de Miller	Tamaño del cristallito (nm)
1	31,88	0,00456	100	31,66	31,88	0,00456	100	31,66
2	34,54	0,00546	002	26,59	34,54	0,00456	002	31,88
3	36,37	0,00546	101	26,72	36,37	0,00456	101	32,05
4	47,65	0,00637	102	23,80	47,66	0,00456	102	33,28
5	56,72	0,00728	110	21,65	56,71	0,00546	110	28,85
6	62,96	0,00728	103	22,34	62,96	0,00546	103	29,77
7	68,03	0,00728	112	22,99	68,04	0,00637	112	26,27
8	69,25	0,00728	201	23,16	69,17	0,00728	201	23,15

Fuente: elaboración propia.

3.2.4. Análisis en SEM

Se llevó a cabo un análisis topográfico por microscopía electrónica de barrido para determinar la morfología y tamaño de las nanopartículas de ZnO obtenidas por síntesis verde. En la Figura 4 se observa que la morfología es predominantemente esférica con formación de agregados, tal como lo sugería el análisis de UV-Vis.

Agregados similares fueron observados por Belay *et al.* (2020) y Dulta *et al.* (2021) durante una síntesis química por precipitación y en una síntesis verde con extractos de *Bergenia ciliata*, respectivamente. Ambos trabajos denominan a los agregados o clústeres como nanopartículas en forma de manojos de flores, las cuales consisten en varias partículas individuales alineadas en forma radial desde un centro. La formación de agregados, según Elumalai y Velmurugan (2015), se debe a la alta energía superficial de las nanopartículas y de la síntesis en medio acuoso. Entre tanto, Dhandapani, Siddarth, Kamalasekaran, Maruthamuthu y Rajagopal (2014) reportan que un aumento en el tiempo de síntesis, de 30 a 90 min, puede incrementar la formación de aglomerados y el crecimiento de las nanopartículas.

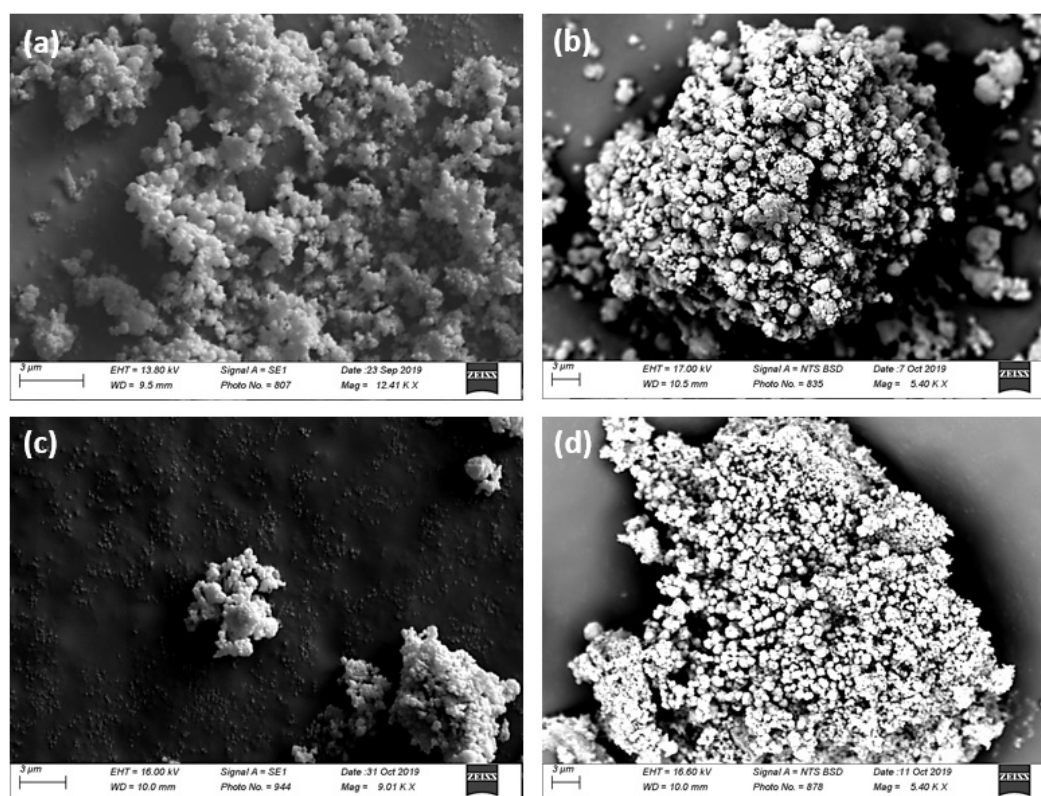


Figura 5. Micrografías SEM de las nanopartículas de ZnO sintetizadas con extractos de *A. indica* (a y b) y *A. vera* (c y d). Fuente: elaboración propia.

Respecto al tamaño de las partículas, se lograron establecer de manera aproximada, mediante SEM, diámetros entre los 200 nm y 300 nm para los dos grupos de nanopartículas sintetizadas (NPsZnO *A. Indica* y NPs-ZnO *A. vera*). Estos diámetros, a su vez, se encuentran dentro del rango reportado por Samat y Nor (2013), con valores entre los 150 y 350 nm, y con morfologías igualmente esféricas. De otro lado, Dobrucka y Długaszewska (2016), Sharma *et al.* (2020) y Suganya y Vivekanandhan (2019) obtuvieron nanopartículas de ZnO de tamaños más reducidos, que variaron entre 100 y 190 nm, 65 y 180 nm, y 30 y 110 nm, respectivamente; en el caso de Dobrucka y Długaszewska (2016), además de morfologías esféricas, generaron nanopartículas hexagonales.

Es importante destacar que, aunque en los casos reportados se empleó síntesis verde, las condiciones de los procesos fueron diferentes a las utilizadas en el presente estudio, por lo que variaron, entre otros aspectos, el tiempo y la temperatura de síntesis (3-4 h, 70-90 °C), el tipo y la concentración del precursor de zinc, la concentración de extracto, y las condiciones de secado o calcinación final (Dobrucka; Długaszewska, 2016; Samat; Nor, 2013; Sharma *et al.*, 2020; Suganya; Vivekanandhan, 2019). Cada una de estas variaciones, como se mencionó previamente, tiene relevancia e influyen en las características morfológicas y tamaños de las nanopartículas (Agarwal; Kumar; Shanmugam, 2017; Jayachandran *et al.*, 2021; Rasli; Basri; Harun, 2020).

3.3. Funcionalización textil de algodón con nanopartículas de ZnO

Luego de aplicar las nanopartículas sobre las muestras textiles, se analizó la superficie de las fibras empleando microscopía electrónica de barrido (Figura 6), esto con el fin de verificar la adhesión del nanomaterial en el sustrato textil y su durabilidad después de varios ciclos de lavado. En la Figura 6a se presenta el textil sin funcionalizar, donde las superficies de las fibras se observan lisas, libres de partículas. Entre tanto, las micrografías de las Figuras 6b y 6c muestran que, luego de la funcionalización, las fibras del textil quedaron impregnadas con NPsZnO *A. indica* y NPs-ZnO *A. vera* respectivamente, que se observaron dispersas en algunas zonas (flechas amarillas) y aglomeradas en otras (flechas rojas). Además, se apreció una distribución ligeramente heterogénea con zonas un poco más enriquecidas en nanopartículas, de apariencia y/o textura rugosa.

La apariencia rugosa del textil es una característica también reportada por Zayed *et al.* (2021), quienes sugieren el uso de biopolímeros durante la funcionalización para contrarrestar este efecto. De acuerdo con estos autores, compuestos como el alginato, carboximetil celulosa y quitosano, además de generar una distribución homogénea y penetración de las nanopartículas en la superficie del textil, conducen a una superficie más suave.

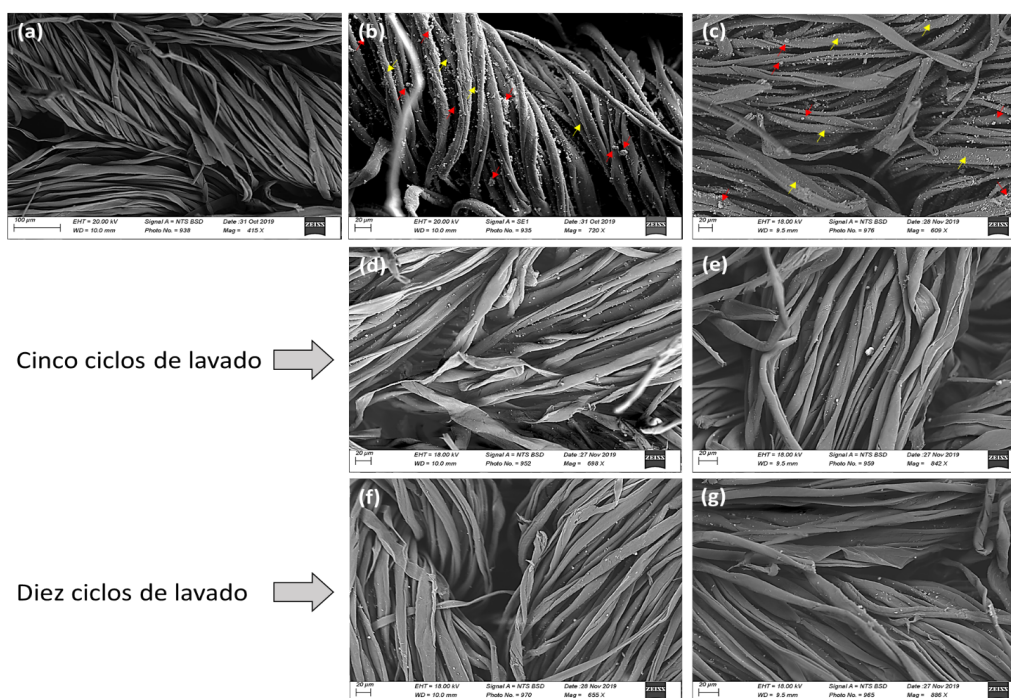


Figura 6. Micrografías de muestras textiles sin funcionalizar, funcionalizadas sin y con cinco y diez ciclos de lavado (prueba de durabilidad): (a) textil sin funcionalizar-control; (b) textil funcionalizado con NPsZnO *A. indica* sin lavar; (c) textil funcionalizado con NPs-ZnO *A. vera* sin lavar; (d) textil funcionalizado con NPs-ZnO *A. indica* cinco ciclos de lavado; (e) textil funcionalizado con NPs-ZnO *A. vera* cinco ciclos de lavado; (f) textil funcionalizado con NPs-ZnO *A. indica* diez ciclos de lavado; (g) textil funcionalizado con NPs-ZnO *A. vera* diez ciclos de lavado.

Fuente: elaboración propia.

3.3.1. Durabilidad de las nanopartículas

Las Figuras 6d-6g presentan micrografías de los textiles sometidos a la prueba de durabilidad, con cinco y diez ciclos de lavado doméstico (textil con NPsZnO *A. indica*, Figuras 6d y 6f; textil con NPsZnO *A. vera*, Figuras 6e y 6g). Comparado con las Figuras 6b y 6c (muestras textiles sin lavar), en estas se aprecia que después de los ciclos de lavado, la cantidad de nanopartículas es cada vez menor, aunque no llegan a eliminarse por completo. Becheri, Dürr, Lo Nostro y Baglioni (2008) sugieren que el tamaño de la nanopartícula juega un papel importante en la adhesión a las fibras. Mientras partículas grandes, y que tienden a aglomerarse, pueden ser removidas fácilmente de la superficie, las partículas pequeñas pueden penetrar con mayor facilidad y adherirse fuertemente al textil. Sumado a lo anterior, se reporta que los materiales inorgánicos y las fibras generalmente no generan interacciones fuertes, lo que conduce a la pérdida de los compuestos inorgánicos en los procesos de lavado (Hu *et al.*, 2020; Noorian; Hemmatinejad; Navarro, 2020). En resumen, conociendo que las partículas sintetizadas presentan diámetros relativamente grandes y forman aglomerados, aunado a que muy posiblemente tampoco se formaron uniones fuertes o covalentes entre las fibras y las nanopartículas (Becheri *et al.*, 2008; Salas *et al.*, 2016), se explica su pérdida en los ensayos de durabilidad.

3.3.2. Concentración de Zinc en las muestras textiles

Como método de confirmación de los resultados anteriores, se determinó por absorción atómica la concentración de Zn en cada muestra textil: sin funcionalizar, funcionalizadas y funcionalizadas con cinco y diez ciclos de lavado (prueba de durabilidad). Se asumió que la cantidad de Zn era proporcional a la de nanopartículas de ZnO adheridas. En la Figura 7 se resumen los resultados obtenidos.

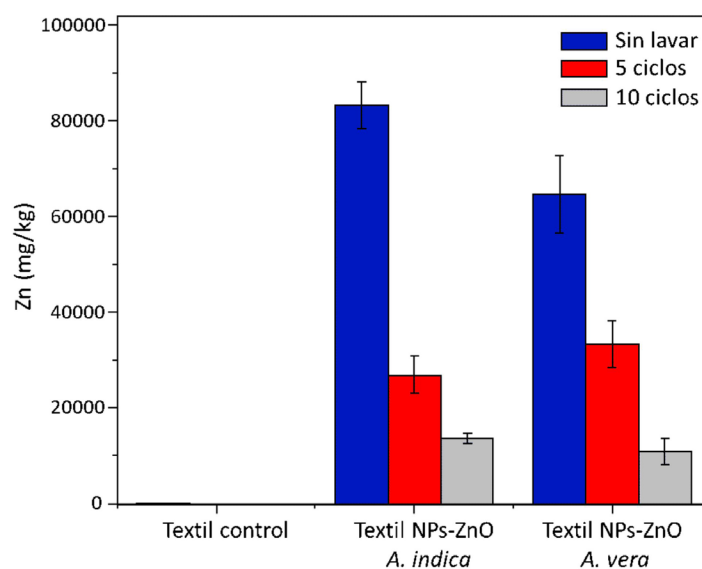


Figura 7. Concentración de Zn en las diferentes muestras textiles: sin funcionalizar (textil control), funcionalizadas sin lavar, con cinco y diez ciclos de lavado doméstico (textil NPs-ZnO *A. indica* y Textil NPs-ZnO *A. vera*).

Fuente: elaboración propia.

Como se observa en la Figura 7, el textil sin funcionalizar (textil control) no presentaba concentraciones importantes del metal (78,05 mg/kg), lo que constata que el zinc presente en los textiles funcionalizados solo podría corresponder al de las nanopartículas de ZnO impregnadas. Adicionalmente, la baja cantidad del metal en el textil sin funcionalizar lo confirma como buen control para la prueba antibacteriana. Por otro lado, para los textiles funcionalizados sin lavar, se encontró una cantidad importante de Zn (83270,98 $\pm$ 4726,30 mg/kg textil con NPsZnO *A. indica* y 64661,19 $\pm$ 7988,85 mg/kg textil con NPs-ZnO *A. vera*), lo que corrobora los resultados obtenidos por microscopia electrónica de barrido, donde se aprecia presencia abundante de nanopartículas de ZnO en las fibras.

Respecto a los textiles sometidos a diferentes ciclos de lavado, la cuantificación del Zn permitió estimar los porcentajes de reducción del metal y, por tanto, de nanopartículas en los textiles, que presentaron decrecimientos del 67,6 y 83,6 % para el textil con NPsZnO *A. indica* bajo cinco y diez ciclos de lavado, respectivamente; y del 48,5 y 83,0 % en el caso del textil con NPs-ZnO *A. vera*.

Estos resultados hacen pensar en la necesidad de evaluar nuevas condiciones de síntesis que conlleven a tamaños más reducidos, u otros métodos o parámetros de funcionalización que garanticen uniones más fuertes entre las fibras y el nanomaterial; esto teniendo en cuenta que en la práctica el número de lavados de un textil durante su vida útil supera los diez ciclos. Una alternativa que se infiere de los resultados de Uribe *et al.* (2016) es la formulación de un baño con una concentración menor de nanopartículas, que garantice una distribución más homogénea y evite su aglomeración. A la fecha se han publicado diversos trabajos sobre funcionalización de textiles con nanopartículas de ZnO, en los que el uso de aglutinantes, polímeros o la modificación de la superficie del textil mediante adición de ligandos incrementan la durabilidad del nanomaterial en el textil, y consecuentemente mantienen las propiedades conferidas (Noorian *et al.*, 2020; Tania; Ali, 2020; Verbič *et al.*, 2019; Zayed *et al.*, 2021).

3.3.3. Evaluación de la actividad antibacteriana de los textiles funcionalizados

Teniendo en cuenta que el propósito de las nanopartículas es conferir actividad antibacteriana al textil de algodón, como última prueba se evaluó su actividad antibacteriana de acuerdo con la norma ISO 20743:2007 (NTC 6174), que presenta tres pruebas cuantitativas a partir de las cuales es posible estimar un valor. En este caso se aplicó la prueba de absorción tanto a los textiles funcionalizados sin lavar como aquellos sometidos a la prueba de durabilidad, mediante cinco y diez ciclos de lavados domésticos. En la Tabla 4 se presentan los valores determinados para la actividad antibacteriana (A), aplicando la Ecuación 3.

Tabla 4. Actividad antibacteriana (A) de los textiles funcionalizados sin y con diferentes ciclos de lavado.

Tratamiento aplicado	Sin lavar	5 ciclos	10 ciclos
Textil NP ZnO. <i>A. indica</i>	4,28 ± 0,74*	3,62 ± 0,49*	2,54 ± 0,71
Textil NP ZnO. <i>A. vera</i>	6,08 ± 0,15*	2,33 ± 0,47	2,83 ± 0,63

*Textiles con actividad antibacteriana fuerte

Fuente: elaboración propia.

De acuerdo con los valores de A (Tabla 4) y los criterios de eficiencia que se describen en la Tabla 1, se puede decir que las nanopartículas de ZnO sintetizadas con extractos de *A. indica* y *A. vera* presentan actividad antibacteriana contra *S. aureus*, tal como ha sido reportado por diversos autores (Christy *et al.*, 2019; Elumalai; Velmurugan, 2015; Handago *et al.*, 2019; Dharmasivam *et al.*, 2017; Sharma *et al.*, 2020).

Al analizar de manera particular los resultados de la Tabla 3, sobresalen las actividades antibacterianas de los textiles sin lavar funcionalizados con ambos tipos de nanopartículas, y el textil con cinco ciclos de lavado impregnado con NPsZnO *A. indica*, que presenta una eficiencia fuerte. Entre tanto, los textiles sometidos a diez ciclos de lavado y el impregnado con NPsZnO *A. vera* con cinco ciclos de lavado exhiben una eficiencia significativa menor a los demás, pero sin pérdida de funcionalidad.

Al comparar los valores de A entre el textil sin lavar y los sometidos a la prueba de durabilidad con NPsZnO *A. indica*, se observa que el valor de la actividad antibacteriana va reduciendo conforme aumentan ciclos de lavado, lo que estaría asociado a la pérdida de agente antibacteriano de la superficie del textil. No obstante, los resultados de actividad antibacteriana también muestran que, aunque la cantidad de nanopartículas disminuye drásticamente con los lavados, las concentraciones remanentes son suficientes para limitar el crecimiento de *S. aureus* en el textil.

Los resultados anteriores concuerdan con lo presentado por Rajendra *et al.* (2010), quienes evalúan, mediante el ensayo de líneas paralelas (norma AATCC 147), la actividad antibacteriana de un textil de algodón impregnado con nanopartículas de ZnO obtenidas por síntesis química. Rajendra *et al.* (2010) reportan que el textil, además de inhibir el crecimiento de *S. aureus*, también presenta actividad antibacteriana contra la bacteria Gram negativa *Escherichia coli*. Esta actividad de amplio espectro perduró, en su caso, hasta los 20 ciclos de lavado, aunque con cada ciclo disminuyó su porcentaje de eficiencia. Así mismo, Noorian *et al.* (2020), tras realizar una síntesis sonoquímica “*in situ*”, encontraron que el porcentaje de reducción de *E. coli* y *S. aureus* después de lavar el textil, decreció desde un 95,7 hasta un 25,3 % y del 94,8 al 25,1 %, respectivamente. Con el fin de evitar la pérdida de nanopartículas, y por ende de actividad antibacteriana, en esta investigación se realizó una modificación preliminar del textil adicionando ácido 4-aminobenzoico (PABA).

Respecto a la síntesis verde, Zayed *et al.* (2021) evalúan la actividad antimicrobiana de un textil de algodón impregnado con nanopartículas sintetizadas con extractos de *Psidium guajava*. Si bien estos autores obtienen un textil con actividad contra *S. aureus*, *E. coli* y la levadura *Candida albicans*, ésta igualmente se va perdiendo con los ciclos de lavado (5, 10, 15 y 20 ciclos). En su caso, lograron reducir esta pérdida de actividad mezclando las nanopartículas en distintos polímeros antes de la funcionalización. Uno de ellos fue el quitosano, que además de aumentar la durabilidad de las nanopartículas, ayudó a incrementar la actividad antibacteriana.

Aunque los mecanismos de acción de las nanopartículas de ZnO sobre los microorganismos no están bien dilucidados, se ha propuesto que su actividad antibacteriana estaría relacionada con la generación de especies reactivas de oxígeno o ROS (por sus siglas en inglés, *Reactive Oxygen Species*), la inhibición enzimática, la interrupción en los procesos de generación de *biofilms*, la desnaturalización de proteínas, la disrupción de la integridad de la membrana celular, la generación de interacciones electrostáticas y la solubilización de iones Zn^{+2} desde la bacteria al medio (Agarwal *et al.*, 2017; Ali *et al.*, 2016; Noorian *et al.*, 2020; Sirelkhatim *et al.*, 2015). En este caso, los datos obtenidos no son suficientes para proponer un mecanismo de acción.

4. Conclusiones

A partir de este estudio, se logró la síntesis de nanopartículas de ZnO a partir de extractos naturales obtenidos de plantas presentes en Antioquia como *Azadirachta indica* y *Aloe vera*, con co-precipitación. Se observó que, aunque los extractos presentan una concentración de fitoquímicos diferente, que es mayor para *A. indica*, esto no influyó significativamente en los rendimientos del proceso (masa de nanopartículas/volumen de síntesis), composición del nanomaterial, ni en la actividad antimicrobiana, lo que sugiere que es el tipo de fitoquímico (polifenoles posiblemente), mas no su concentración, lo que toma relevancia durante la síntesis, por lo que es posible que los fitoquímicos también afecten el tamaño de los cristallitos.

Entre las características más relevantes de las nanopartículas que determinan su funcionalidad o eficiencia, está el tamaño, el cual, en este, caso varió entre 200 nm y 300 nm. Esta característica, sumada a que se presentó aglomeración de partículas, pareció influir en el proceso de funcionalización del textil de algodón, e impidió una fijación estable y duradera. Se sugiere revisar las condiciones de síntesis, la concentración de nanopartículas en el baño y, en general, el proceso de impregnación en el textil, considerando la adición de aglutinantes o ligandos, con el fin optimizar la adherencia de las nanopartículas a las fibras, de modo que su concentración permanezca lo más estable posible durante un mayor número de ciclos de lavado; y que se incremente la actividad conferida.

Los textiles de algodón funcionalizados con nanopartículas de ZnO sintetizadas a partir de extractos de *A. indica* y *A. vera* presentaron actividad antibacteriana contra *Staphylococcus aureus*. Pese a que la prueba de durabilidad condujo a la pérdida importante de nanopartículas, aun con una menor concentración de nanomaterial, los textiles continuaron presentando actividad antibacteriana significativa, lo que muestra el potencial de las nanopartículas de ZnO sintetizadas con extractos de *A. vera* y *A. indica*, como agentes

antibacterianos para la industria textil. Es importante mencionar que solo se evaluaron diez ciclos de lavado, por lo que es posible que la actividad se mantenga con un número mayor de ciclos.

En caso de considerar el uso de nanopartículas de ZnO para la funcionalización de textiles a nivel comercial, es importante, además de durabilidad y actividad antibacteriana, garantizar inocuidad, es decir, que las nanopartículas no comprometan la salud del consumidor final. Para ello se deben realizar otras pruebas de calidad como citotoxicidad, irritación e influencia sobre la microbiota de la piel (Hilgenberg; Prange; Vossebein, 2016).

Agradecimientos

Los investigadores asociados a esta investigación agradecen al Sistema de Investigación e Innovación del SENA-SENNOVA por la financiación del proyecto y al Líder SENNOVA-CTGI 2019, Carlos Mario Chaparro Salas, por la gestión de recursos.

Referencias

- Agarwal, Happy; Kumar, Venkat; Shanmugam, Rajeshkumar (2017). A review on green synthesis of zinc oxide nanoparticles-An eco-friendly approach. *Resource-Efficient Technologies*, 3(4), 406-413. <https://doi.org/10.1016/j.reffit.2017.03.002>
- Agarwal, Happy; Menon, Soumya; Kumar, Venkat; Shanmugam, Rajeshkumar (2018). Mechanistic study on antibacterial action of zinc oxide nanoparticles synthesized using green route. *Chemico-Biological Interactions*, 286(4), 60-70. <https://doi.org/10.1016/j.cbi.2018.03.008>
- Ali, Khursheed; Dwivedi, Sourabh; Azam, Ameer; Saquib, Quaiser; Al-Said, Mansour; Alkhedhairi, Abdulaziz; Musarrat, Javed (2016). *Aloe vera* extract functionalized zinc oxide nanoparticles as nanoantibiotics against multi-drug resistant clinical bacterial isolates. *Journal of Colloid and Interface Science*, 472, 145-156. <https://doi.org/10.1016/j.jcis.2016.03.021>
- Arya, Sandeep; Mahajan, Prena; Mahajan, Sarika; Khosla, Ajit; Datt, Ram; Gupta, Vinay; ... Oruganti, Sai (2021). Review — Influence of Processing Parameters to Control Morphology and Optical Properties of Sol-Gel Synthesized ZnO Nanoparticles. *ECS Journal of Solid State Science and Technology*, 10(2), 023002. <https://doi.org/10.1149/2162-8777/abe095>
- Bandeira, Marina; Giovanela, Marcelo; Roesch-Ely, Mariana; Devine, Declan; da Silva Crespo, Janaina (2020). Green synthesis of zinc oxide nanoparticles: A review of the synthesis methodology and mechanism of formation. *Sustainable Chemistry and Pharmacy*, 15(enero), 100223. <https://doi.org/10.1016/j.scp.2020.100223>
- Basnet, Parita; Chanu, Ina; Samanta, Dhruvajyoti; Chatterjee, Somenath (2018). A review on bio-synthesized zinc oxide nanoparticles using plant extracts as reductants and stabilizing agents. *Journal of Photochemistry and Photobiology B: Biology*, 183, 201-221. <https://doi.org/10.1016/j.jphotobiol.2018.04.036>
- Becheri, Alessio; Dürr, Maximilian; Lo Nostro, Pierandrea; Baglioni, Piero (2008). Synthesis and characterization of zinc oxide nanoparticles: Application to textiles as UV-absorbers. *Journal of Nanoparticle Research*, 10(4), 679-689. <https://doi.org/10.1007/s11051-007-9318-3>

- Belay, Abebe; Mekuria, Melaku; Adam, Getachew (2020). Incorporation of zinc oxide nanoparticles in cotton textiles for ultraviolet light protection and antibacterial activities. *Nanomaterials and Nanotechnology*, 10, 1-8. <https://doi.org/10.1177/1847980420970052>
- Bello, Daniel; Carrera, Emilia; Díaz, Yuset (2006). Determinacion de azúcares reductores totales en jugos mezclados de caña de azúcar utilizando el método del acido 3,5 dinitrosalicílico. *Sobre Los Derivados de La Caña de Azúcar*, 40(2), 45-50.
- Bhuyan, Tamanna; Mishra, Kavita; Khanuja, Manika; Prasad, Ram; Varma, Ajit (2015). Biosynthesis of zinc oxide nanoparticles from *Azadirachta indica* for antibacterial and photocatalytic applications. *Materials Science in Semiconductor Processing*, 32, 55-61. <https://doi.org/10.1016/j.mssp.2014.12.053>
- Christy, Rosy; Lakshminarayanan, Srimathi; Durka, M.; Dinesh, A.; Babitha, N.; Arunadevi, S. (2019). Simple Combustion Synthesis, Structural, Morphological, Optical and Catalytic Properties of ZnO Nanoparticles. *Journal of Nanoscience and Nanotechnology*, 19(6), 3564-3570. <https://doi.org/10.1166/jnn.2019.16141>
- Cullity, Bernard; Stock, Stuart (2014). *Elements of X-ray diffraction* (3era ed.). Edinburgh Gate: Pearson Education Limited.
- Dhandapani, Perumal; Siddarth, Arun; Kamalasekaran, S.; Maruthamuthu, Saravana; Rajagopal, G. (2014). Bio-approach: Ureolytic bacteria mediated synthesis of ZnO nanocrystals on cotton fabric and evaluation of their antibacterial properties. *Carbohydrate Polymers*, 103(1), 448-455. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2013.12.074>
- Dharmasivam, Mahendiran; Subash, G.; Selvan, Arumai; Rehana, Dilaveez; Senthil-Kumar, Raju; Rahiman, Kalilur (2017). Biosynthesis of Zinc Oxide Nanoparticles Using Plant Extracts of *Aloe vera* and *Hibiscus sabdariffa*: Phytochemical, Antibacterial, Antioxidant and Anti-proliferative Studies. *BioNanoScience*, 7(3), 530-545. <https://doi.org/10.1007/s12668-017-0418-y>
- Dobrucka, Renata; Długaszewska, Jolanta (2016). Biosynthesis and antibacterial activity of ZnO nanoparticles using *Trifolium pratense* flower extract. *Saudi Journal of Biological Sciences*, 23(4), 517-523. <https://doi.org/10.1016/j.sjbs.2015.05.016>
- Dulta, Kanika; Koşarsoy-Ağçeli, Gozde; Chauhan, Parveen; Jasrotia, Rohit; Chauhan, P. K. (2021). A Novel Approach of Synthesis Zinc Oxide Nanoparticles by *Bergenia ciliata* Rhizome Extract: Antibacterial and Anticancer Potential. *Journal of Inorganic and Organometallic Polymers and Materials*, 31(1), 180-190. <https://doi.org/10.1007/s10904-020-01684-6>
- Elumalai, K.; Velmurugan, Sivasangari (2015). Green synthesis, characterization and antimicrobial activities of zinc oxide nanoparticles from the leaf extract of *Azadirachta indica* (L.). *Applied Surface Science*, 345, 329-336. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2015.03.176>
- Gómez-Garzón, Martha (2018). Nanomateriales, Nanopartículas y Síntesis verde. *Revista Repertorio de Medicina y Cirugía*, 27(2), 75-80. <https://doi.org/10.31260/repertmedcir.v27.n2.2018.191>
- Handago, Dawit; Zereffa, E. A.; Gonfa, Bedasa (2019). Effects of *Azadirachta Indica* Leaf Extract, Capping Agents, on the Synthesis of Pure and Cu Doped ZnO-Nanoparticles: A Green Approach and Microbial Activity. *Open Chemistry*, 17(1), 246-253. <https://doi.org/10.1515/chem-2019-0018>
- Hilgenberg, B.; Prange, Alexander; Vossebein, L. (2016). Testing and regulation of antimicrobial textiles. En A. Sun (Ed.), *Antimicrobial Textiles* (pp. 226-245). Cambridge: Elsevier.

- Hu, Rujui; Li, Jing; Zhao, Yuezen; Lin, Hua; Liang, Liu; Wang, Mimi; ... Yang, Mingming (2020). Exploiting bacterial outer membrane vesicles as a cross-protective vaccine candidate against avian pathogenic *Escherichia coli* (APEC). *Microbial Cell Factories*, 19(1), 1-17.
<https://doi.org/10.1186/s12934-020-01372-7>
- Ibrahim, Nabil; Abd El-Ghany, Nahed; Eid, Basma; Mabrouk, Eman (2018). Green options for imparting antibacterial functionality to cotton fabrics. *International Journal of Biological Macromolecules*, 111, 526-533. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2018.01.013>
- Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación [Icontec] (2016). NTC 6174:2016. *Textiles. Determinación de la actividad antibacteriana de productos textiles*. Bogotá: Icontec.
- Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación [Icontec] (2017). NTC 1155-3:2017. *Textiles. Ensayos de solidez del color. Parte 3: solidez del color al lavado. Método acelerado*. Bogotá: Icontec.
- Jayachandran, Ashwini; Ashwaty, T. R.; Nair, Achuthsankar (2021). Green synthesis and characterization of zinc oxide nanoparticles using *Cayratia pedata* leaf extract. *Biochemistry and Biophysics Reports*, 26, 100995. <https://doi.org/10.1016/j.bbrep.2021.100995>
- Lalithambika, K. C.; Thayumanavan, A.; Ravichandran, K.; Subramanian, Sriram (2017). Photocatalytic and antibacterial activities of eco-friendly green synthesized ZnO and NiO nanoparticles. *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, 28(2), 2062-2068.
<https://doi.org/10.1007/s10854-016-5767-8>
- Liu, Ying; Li, JinFeng; Ahn, JongChan; Pu, JianYu; Rupa, Esrat; Huo, Yue; Yang, Deok (2020). Biosynthesis of zinc oxide nanoparticles by one-pot green synthesis using fruit extract of *Amomum longiligulare* and its activity as a photocatalyst. *Optik*, 218, 165245.
<https://doi.org/10.1016/j.ijleo.2020.165245>
- Malik, Gulshan; Mitra, Jayeeta (2021). Zinc Oxide Nanoparticle Synthesis, Characterization, and Their Effect on Mechanical, Barrier, and Optical Properties of HPMC-Based Edible Film. *Food and Bioprocess Technology*, 14(3), 441-456. <https://doi.org/10.1007/s11947-020-02566-y>
- Mishra, Rajesh; Militky, Jiri (2019). *Nanotechnology in textiles: Theory and application*. Cambridge, MA: Woodhead Publishing.
- Muñoz, Laura (2019). Acabados Antimicrobianos en Textiles: Tendencias y Aplicaciones. *Encuentro SENNOVA del Oriente Antioqueño*, 5, 17-33.
- Muthu, Subramanian (2017). *Textiles and Clothing Sustainability*. Singapur: Springer.
<https://doi.org/10.1007/978-981-10-2188-6>
- Noorian, Seyyed; Hemmatinejad, Nahid; Navarro, Jorge (2020). Ligand modified cellulose fabrics as support of zinc oxide nanoparticles for UV protection and antimicrobial activities. *International Journal of Biological Macromolecules*, 154, 1215-1226.
<https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2019.10.276>
- Quiceno, Juan; Ospina, Leopoldo; Gómez, Dorely; Román, Melissa; Betancur, María; Cadavid, Natalia; ... Pássaro, Catarina (2017). *Manual para el análisis de biocompuestos en frutas. Aplicaciones en el Estudio de la Gulupa*. Rionegro: Servicio Nacional de Aprendizaje.
- Rajendra, Radhai; Balakumar, C.; Ahammed, Hasabo; Jayakumar, S.; Vaideki, K.; Rajesh, E. (2010). Use of zinc oxide nano particles for production of antimicrobial textiles. *International Journal of Engineering, Science and Technology*, 2(1), 202-208.
<https://doi.org/10.4314/ijest.v2i1.59113>

- Ramesh, M.; Anbuvarannan, M.; Viruthagiri, G. (2015). Green synthesis of ZnO nanoparticles using *Solanum nigrum* leaf extract and their antibacterial activity. *Spectrochimica Acta, Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy*, 136(PB), 864-870.
<https://doi.org/10.1016/j.saa.2014.09.105>
- Rasli, Wanie; Basri, Hatijah; Harun, Zawati (2020). Zinc oxide from aloe vera extract: two-level factorial screening of biosynthesis parameters. *Heliyon*, 6(1), e03156.
<https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2020.e03156>
- Saha, Joykrisna; Mondal, Ibrahim (2021). Antimicrobial textiles from natural resources: types, properties and processing. En I. Mondal (Ed.), *Antimicrobial Textiles from Natural Resources* (pp. 1-43). Cambridge, MA: Woodhead Publishing.
<https://doi.org/10.1016/B978-0-12-821485-5.00016-0>
- Salas, Gabriel; Guerrero, Victor; Rosas, Nelly (2016). Uso de Nanopartículas de ZnO en Tejidos de Algodón para Mejorar sus Propiedades de Protección Ultravioleta. *X Congreso de Ciencia y Tecnología*, 10, 16-21.
- Salat, Marc; Petkova, Petya; Hoyo, Javier; Perelshtein, Ilana; Gedanken, Aharon; Tzanov, Tzanko (2018). Durable antimicrobial cotton textiles coated sonochemically with ZnO nanoparticles embedded in an in-situ enzymatically generated bioadhesive. *Carbohydrate Polymers*, 189, 198-203.
<https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2018.02.033>
- Samat, Nurulain; Nor, Roslan (2013). Sol-gel synthesis of zinc oxide nanoparticles using *Citrus aurantifolia* extracts. *Ceramics International*, 39(Sup. 1), S545-S548.
<https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2012.10.132>
- Selim, Yasser; Azb, Maha; Ragab, Islam; Abd El-Azim, Mohamed (2020). Green Synthesis of Zinc Oxide Nanoparticles Using Aqueous Extract of *Deverra tortuosa* and their Cytotoxic Activities. *Scientific Reports*, 10(1), 1-9. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-60541-1>
- Sharma, Saurabh; Kumar, Kuldeep; Thakur, Naveen; Chauhan, S.; Chauhan, M. S. (2020). The effect of shape and size of ZnO nanoparticles on their antimicrobial and photocatalytic activities: a green approach. *Bulletin of Materials Science*, 43(1), 20.
<https://doi.org/10.1007/s12034-019-1986-y>
- Singh, Akhilesh; Pal, Priti; Gupta, Vinay; Yadav, Thakur; Gupta, Vishu; Singh, Satarudra (2018). Green synthesis, characterization and antimicrobial activity of zinc oxide quantum dots using *Eclipta alba*. *Materials Chemistry and Physics*, 203, 40-48.
<https://doi.org/10.1016/j.matchemphys.2017.09.049>
- Singh, Amit; Neelam; Kaushik, Mahima (2019). Physicochemical investigations of zinc oxide nanoparticles synthesized from *Azadirachta Indica* (Neem) leaf extract and their interaction with Calf-Thymus DNA. *Results in Physics*, 13, 102168.
<https://doi.org/10.1016/j.rinp.2019.102168>
- Singh, Ravindra; Shukla, Vineet; Yadav, Raghvendra; Sharma, Prashant; Singh, Prashant; Pandey, Avinash (2011). Biological approach of zinc oxide nanoparticles formation and its characterization. *Advanced Materials Letters*, 2(4), 313-317.
<https://doi.org/10.5185/amlett.indias.204>
- Sirelkhatim, Amna; Mahmud, Shahrom; Seeni, Azman; Kaus, Noor; Ann, Ling; Bakhori, Khadijah; ... Mohamad, Dasmawati (2015). Review on zinc oxide nanoparticles: Antibacterial activity and toxicity mechanism. *Nano-Micro Letters*, 7(3), 219-242.
<https://doi.org/10.1007/s40820-015-0040-x>

- Sohail, Muhammad; Rehman, Mubashar; Hussain, Syed; Huma, Zil-E; Shahnaz, Gul; Qureshi, Omer; ... Webster, Thomas (2020). Green synthesis of zinc oxide nanoparticles by Neem extract as multi-facet therapeutic agents. *Journal of Drug Delivery Science and Technology*, 59, 101911.
<https://doi.org/10.1016/j.jddst.2020.101911>
- Song, Xinyu; Padrão, Jorge; Ribeiro, Ana; Zille, Andrea (2021). Testing, characterization and regulations of antimicrobial textiles. En I. Mondal (Ed.), *Antimicrobial Textiles from Natural Resources* (pp. 485-511). Cambridge, MA: Woodhead Publishing.
<https://doi.org/10.1016/B978-0-12-821485-5.00012-3>
- Standard International (2007). ISO 20743:2007. *Textiles. Determination of antibacterial activity of textile products*. Recuperado de: <https://www.iso.org/standard/34261.html>
- Suganya, S.; Vivekanandhan, Singaravelu (2019). Neem (*Azadirachta indica*) gum assisted sol-gel synthesis and characterization of ZnO nanoparticles for photocatalytic application. *Journal of the Australian Ceramic Society*, 55(2), 433-442.
<https://doi.org/10.1007/s41779-018-0251-y>
- Tania, Imana; Ali, Mohammad (2020). Effect of the coating of zinc oxide (ZnO) nanoparticles with binder on the functional and mechanical properties of cotton fabric. *Materials Today: Proceedings*, 38(3-4), 2607-2611.
<https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.08.171>
- Uribe, Carmen; Meneses, Elsa; Brañez, Marco; Álvarez, Jessica; Román, Esmeralda; Murtua, Dora; ... Gómez, Mónica (2016). Funcionalización de textiles de algodón con nanopartículas de ZnO₂. *Revista Sociedad Química Perú*, 82(2), 216-231. Recuperado de
<http://www.scielo.org.pe/pdf/rsqp/v82n2/a12v82n2.pdf>
- Verbič, Anja; Gorjanc, Marija; Simončič, Barbara (2019). Zinc oxide for functional textile coatings: Recent advances. *Coatings*, 9(9), 17-23.
<https://doi.org/10.3390/coatings9090550>
- Yetisen, Ali; Qu, Hang; Manbachi, Ammir; Butt, Haider; Dokmeci, Mehmet; Hinestroza, Juan; ... Yun, Seok (2016). Nanotechnology in Textiles. *ACS Nano*, 10(3), 3042-3068.
<https://doi.org/10.1021/acsnano.5b08176>
- Zayed, Menna; Othman, Hanan; Ghazal, Heba; Hassabo, Ahmed (2021). *Psidium Guajava* leave extract as reducing agent for synthesis of zinc oxide nanoparticles and its application to impart multifunctional properties for cellulosic fabrics. *Biointerface Research in Applied Chemistry*, 11(5), 13535-13556.
<https://doi.org/10.33263/BRIAC115.1353513556>

IoT high-frequency electronic transformer with dimmable output voltage using PWM signals

Transformador electrónico de alta frecuencia IoT con voltaje de salida regulable mediante señales PWM

Nelson Trillos-León¹
Jaime Barrero-Pérez²
Julián Jaimes-Flórez³
David Rojas⁴

¹ Universidad Industrial de Santander (Colombia). Email: nelson.trillos@radiogis.uis.edu.co
orcid: <https://orcid.org/0000-0002-9292-2461>

² Universidad Industrial de Santander (Colombia). Email: jbarrero@uis.edu.co
orcid: <https://orcid.org/0000-0003-2443-8608>

³ Universidad Industrial de Santander (Colombia). Email: julian.jaimes2@correo.uis.edu.co
orcid: <https://orcid.org/0000-0003-3328-5180>

⁴ Universidad Industrial de Santander (Colombia). Email: david.rojas2@correo.uis.edu.co
orcid: <https://orcid.org/0000-0002-1662-3822>

Received: 23-11-2020 Accepted: 22-06-2021

How to quote: Trillo-León, Nelson; Barrero-Pérez, Jaime; Jaimes-Flórez, Julián; Rojas, David (2021) IoT high-frequency electronic transformer with dimmable output voltage using PWM signals. *Informador Técnico*, 85(2), 146 -159.
<https://doi.org/10.23850/22565035.3363>

Abstract

This work presents the design, simulation, and implementation of a low-power electronic transformer, which output effective voltage can be controlled wirelessly through WIFI, via a user interface on a mobile phone. The methodology used in this project consists of 4 stages, a rectifier, an inverter, the inverter's control system, and a ferrite reducer. The inverter has a full-bridge design and was implemented using MOSFET. The control system can vary the frequency and duty cycle of the output signals, by phase shifting the control signals, thus achieving the functionality of reducing the effective output voltage. Circuit design simulations were performed using PsPice Orcad. The implementation and the mathematical model of the built electronic transformer are carried out. The designed transformer operates with a maximum input voltage of 120 Vrms at 60 Hz at frequencies between 20 kHz and 30 kHz, which are controlled through the user interface; can reduce a 120 Vrms 60 Hz input signal to an effective voltage between 10 Vrms and 20 Vrms at a maximum power of 50 W. This project presents the feasibility of developing electronic transformers with variable output voltage, remotely controlled using IoT technology.

Keywords: control system; electronic transformer; full-bridge inverter; PWM; rectifier; remote control.

Resumen

Este trabajo presenta el diseño, simulación e implementación de un transformador electrónico de baja potencia, cuya salida de voltaje efectivo se puede controlar de forma inalámbrica a través de WIFI, por medio de una interfaz de usuario en un teléfono móvil. La metodología usada en este proyecto está conformada por 4 etapas, un rectificador, un inversor, un sistema de control de los inversores y un reductor de ferrita. El inversor tiene un diseño de puente completo y se implementó utilizando MOSFET. El sistema de control puede variar la

frecuencia y el ciclo de trabajo de las señales a la salida, cambiando de fase las señales de control, logrando así la funcionalidad de reducir el voltaje eficaz de salida. Se realizaron simulaciones del diseño circuital utilizando PsPice Orcad. Se realizó la implementación y el modelo matemático del transformador electrónico construido. El transformador diseñado opera con voltaje de entrada máximo de 120 Vrms a 60 Hz a frecuencias entre 20 kHz y 30 kHz, las cuales son controladas a través de la interfaz de usuario; puede reducir una señal de entrada de 120 Vrms 60 Hz a un voltaje eficaz entre 10 Vrms y 20 Vrms a una potencia máxima de 50 W. Este proyecto presenta la viabilidad de desarrollar transformadores electrónicos con voltaje de salida variable, controlados de forma remota por medio de tecnología IoT.

Palabras clave: control remoto; inversor de puente completo; PWM; rectificador; sistema de control; transformador electrónico.

1. Introduction

The electronic transformers convert voltage levels to another, depending on the spiral winding's ratio, components, circuit topology, and design. Principally, an electronic transformer is made for two insulated coils that are winding in a core of ferromagnetic material. Once an alternating current (AC) is applied to one of the coils, this induces current into the secondary coil. In transformer design theory, the operation frequency of a transformer is inversely proportional to its size and weight, better explained by Keke and Lin (2014), which means that if the electronic transformers work to high frequency, the size and weight are reduced (Battal; Balci; Sefa, 2021). This property of transformers is quite desirable and is being expanded in many different industries, some of such advancements are presented by Dujic, Kieferndorf, Canales and Drofeni (2012).

Electronic transformers are power circuits that combine a rectifier, an inverter, and a high-frequency transformer to convert voltage. First, the rectifier converts the power grid AC to DC; then the inverter commutes this input to the right frequency for the transformer, which does the voltage conversion in the end.

Firstly, the power coming from the electrical grid is rectified, transforming the AC input into DC. This current is then fed into the main block of the electronic transformer, the inverter, where through a play of switching (in this case MOSFET), the current converts into a high-frequency AC, which is then fed into a ferrite transformer that converts the effective voltage of the circuit to the desired value. The inverter has a control system (microcontroller) attached to it, which is isolated from the main circuit via a "protection circuit" that prevents power from the power grid to damage the control system. The control system determines the frequency of the inverter (usually greater than 20 kHz), which should be appropriate for the transformer used. Further, the control system can alter the duty cycle (DC) of the pulses that the inverter sends to the transformer, this equals to a variation of the effective voltage of the electronic transformer.

Firstly, the power from the grid is rectified, transforming the AC input to DC. These current supplies the main block of the electronic transformer, the inverter, which by doing a play with the switches (in this case MOSFET), transforms the current to high-frequency AC, which then connects to ferrite transformer, converting to the desired effective voltage. A ferrite block is used for cores of high-frequency transformers due to its electromagnetic properties, which are topic of extensive research. Zhang and Tseng (2006) study the dielectric effects of ferrite, He, Zhang, Zhang and Xie (2018) study the parasite current loss, Keke and Lin (2014) give a theoretical solution to the ratio between operative frequency and transformers power capacity, and Kumar (2016) tackles a design strategy step by step for high-frequency transformers, including core selection, several windings and wire width, losses, stored energy, and safety advice.

An inverter is a device that transforms an input DC voltage to asymmetric AC output voltage, for which it requires a control system. This control system (microcontroller) is isolated from the main circuit by a "protection circuit" that averts the current from the electrical grid to damage the control system. The inverter's

commutation frequency is dictated by the control system, which should be close to the operating frequency of the ferrite transformer. Furthermore, the control system can vary the duty cycle of the output voltage, which equals to varying the output effective voltage. The topologies used in the control implement pulse width modulation (PWM) (Basu; Mohan, 2014), as shown in the work of Mishima and Nakaoka (2009) where a half-bridge DC-DC converter is controlled by an asymmetric PWM scheme; in the work of York, Yu and Lai (2013) modulation is used to extend the resonating converters input range. On their part, Jain and Ayyanar (2011) use pulse modulation for an H-bridge control system, and Ismail Al-Saffar, Sabzali and Fardoun (2008) show a family of DC-DC converters, all using PWM.

Electronic transformers have been the topic of multiple studies for their small size, low cost, and high efficiency. Jirasereeamornkul, Boonyaroonate and Chamnongthai (2003) present an electronic transformer with an efficiency of 92 %, operating at 55 kHz for a halogen lamp. In Trillos-León, Barrero-Pérez and Gómez-Pinto (2020), a programmable electronic transformer with Half-Bridge inverter topology was developed, that is controlled with a microcontroller, and Nerone and Trevino (2001) present a self-oscillating electronic transformer with efficiency greater than 93 %. These works present great developments on the field and pretend to add by introducing variable outputs.

On the other hand, the inclusion of IoT systems is slowly becoming a common sight on transformers, especially on the topic of monitoring and safety such as in the works of Zhang, He, Du, Yuan, Li and Jiang (2020) and Dhanraj, Krishnamurthy, Ramanathan, Saravanan and Raman (2020). Also, for such ends, the use of BLYNK has gained certain popularity for prototype making and IoT implementation, as shown in Sutanto, Putra, Kuncahyojat and Agustin (2020).

This paper presents a low power, full-bridge, electronic transformer design, using MOSFET, similar to the works of Jirasereeamornkul *et al.* (2003), but using a full-bridge inverter like Ashour (2008), controlled in such a way that the output can be varied; supported with simulations and prototype results. The electronic transformer operates at 120 Vrms input and converts to a variable output voltage between 10 Vrms and 20 Vrms, which can be changed through Wi-Fi, via an app.

2. Methodology

The methodology used in this project consists of 4 stages, and is adapted from Ashour (2008), where the first stage is the electronic transformer design, composed of a cascade system and inverter circuit topology (Figure 1, red square). The second stage is the remote-control system, which allows to vary the PWM signals and controller the system remotely, (Figure 1, blue square). In the third stage is implemented the circuit protection, where the control system with the power system is isolated (Figure 1, green square). In the final stage, the simulations and implementation of the electronic transformer circuit and the experimental test are carried out.

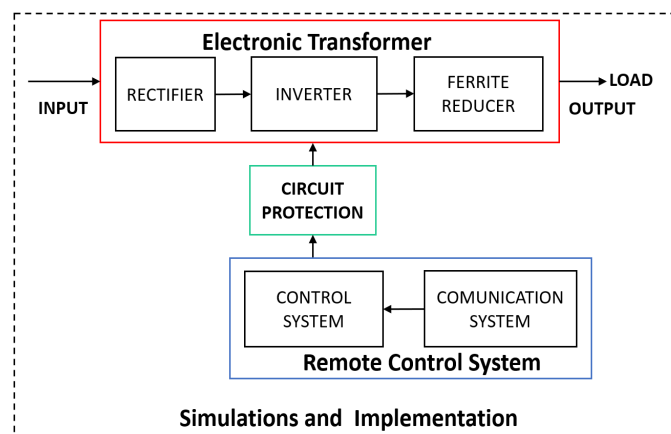


Figure 1. Block diagram of a remote electronic transformer.

Source: own elaboration.

2.1. Electronic Transformer Design

Electronic transformers are power electronic devices that convert an alternating voltage level to other, conserving the power (Mora, 2005). These transformers increase the frequency of operation through an inverter circuit, the inverter commutes the frequency according to the programming. These frequencies range between kHz to MHz.

Figure 1 shows the block diagram of the different stages of a remote electronic transformer. The signal input is alternating current (AC) of 60 Hz, this signal is adjusted for the cascade hardware of the electronic transformer according to the control signal proving of the remote-control system. The circuit protection is responsible for isolating the system control of the power circuit and giving strength to the control signals.

In this module, the cascade hardware will be treated; it is composed of a rectifier, an inverter, and a ferrite reducer. The rectifier adapts the AC input signal to the requirement of the inverter circuit, the inverter circuit is responsible for carrying out the high-frequency power switching process.

2.2. Rectifier

The electronic transformer has a rectifier with a small capacitor on its output, thus the rectified (but not filtered) voltage, which period is half of the main voltage, feeds the inverter (Polonskii, 2004). In this project, a full-wave rectifier circuit and a polyester condenser were used.

A series of simulations were carried out to determine the better value of the capacitor, to analyze the behavior of the input current when the prototype has a load of 50 W (maximum load). First, a large capacitor (1000[μ F]) and a very small capacitor (without C) gave high current peaks; but then with capacitors of 470[nF] and 100[nF] small current peaks were obtained. The capacitor 470[nF] was chosen because it has current peaks (IP) in the form of milliamps.

2.3. Inverter

As said by Triki, Bechouche, Seddiki and Abdeslam (2019), inverters are widely used as DC-AC converters, which (if they are good) should have sinusoidal output voltage and low total harmonic distortion. The topology used in this project is a full-bridge inverter or H-Bridge. This topology allows to take better advantage of the supply voltage, since the maximum value of the output voltage is the DC supply voltage, which allows a greater range of variation of the output voltage of the electronic transformer. The full-bridge inverter is composed of four switches, S_{1+} , S_{2+} , S_{1-} and S_{2-} as shown in Figure 2. When the switches S_{1+} and S_{2-} are activated simultaneously, the input voltage V_i appears across the load, if the switches S_{2+} and S_{1-} are active simultaneously, the voltage across the load is inverted and acquires the $-V_i$ value. The switches S_{1+} and S_{1-} can't be closed at the same time, just like the switches S_{2+} and S_{2-} , because they produced a short-circuit (Hart, 2010). Table 1 shows the different activation stages of the full-bridge inverter.

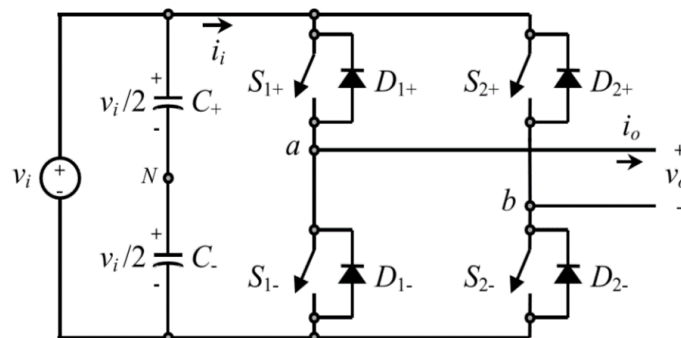


Figure 2. Monophasic full-bridge VSI.

Source: Rashid (2006).

Table 1. Switches states of a monophasic full-bridge VSI.

Status	V_o	Components driving
S_{1+} and S_{2-} closed, S_{1-} and S_{2+} open	V_i	S_{1+} and S_{2-} if $i_o > 0$ D_{1+} and D_{2-} if $i_o < 0$
S_{1-} y S_{2+} closed, S_{1+} and S_{2-} open	$-V_i$	D_{1-} and D_{2+} if $i_o > 0$ S_{1-} and S_{2+} if $i_o < 0$
S_{1+} and S_{2+} closed, S_{1-} and S_{2-} open	0	S_{1+} and D_{2+} if $i_o > 0$ D_{1+} and S_{2+} if $i_o < 0$
S_{1-} and S_{2-} closed, S_{1+} and S_{2+} open	0	D_{1-} and S_{2-} if $i_o > 0$ S_{1-} and D_{2-} if $i_o < 0$
S_{1+} , S_{2+} , S_{1-} and S_{2-} open	$-V_i$ V_i	D_{1-} and D_{2+} if $i_o > 0$ D_{1+} and D_{2-} if $i_o < 0$

Source: own elaboration based on Rashid (2006).

MOSFET transistors were chosen for commutation devices of the full-bridge inverter because these devices have high response speed, support high voltages and high currents, and have a low cost in the market. The chosen MOSFET has a voltage $V_{DS} = 400$ V, on-resistance $R_{DS(on)} = 0,55[\Omega]$, maximum gate voltage $V_{GS} = \pm 20$ V, drain current $I_D = 10$ [A]. The maximum operating frequency is 8.55 MHz. Because two of the MOSFETs are not grounded, it is necessary to use trip circuits that allow to apply a floating voltage. For pulse control, the respective PWM signals are generated with constant duty cycle of 50 %, varying their phase. The switching frequency ranges between 20 kHz and 30 kHz.

2.4. Ferrite Reducer

The ferrite reducer is a monophasic transformer with a ferrite core, which allows to increase or decrease an alternating current voltage, maintaining the power (W). This is shown by Equation (1), where Φ_m is the magnetic flux, considering the ferrite reducer as ideal with N_1 , N_2 spins and electromotive force (emf) on its primary and secondary coils, respectively, and knowing that voltage and emf are out of phase by 90° .

$$v_{1,2} = e_{1,2} = N_{1,2} \Phi_m \cos(\omega t) \quad (1)$$

Equation (2) shows the effective voltage, which is divided with each other, resulting in Equation (3), where m is the transformer's spin ratio (Mora, 2005). This spin ratio can also be written as a ratio of the inductances (L) between the primary and secondary coils, as shown in Equation (4), where μ is the core's magnetic permeability, A is the traverse area of the coil's wire and l is the length of the coil.

$$V_{1,2} = E_{1,2} = \frac{N_{1,2} \omega \Phi_m}{\sqrt{2}} = 4.44 f N_{1,2} \Phi_m \quad (2)$$

$$\frac{V_1}{V_2} = \frac{E_1}{E_2} = \frac{N_1}{N_2} = m \quad (3)$$

$$L = \frac{N^2 \mu A}{l} \quad ; \quad \sqrt{\frac{L_1}{L_2}} = m \quad (4)$$

This project used a transformer extracted from a halogen lamp CD00003902, that was characterized in the laboratory to obtain the range of work frequency with a test without load; the optimal work frequency was found to be between 10 kHz and 1 Mhz. Furthermore, the spin ratio was determined using Equation (4), with $L_1 = 9,6$ [mH] and $L_2 = 456$ [μH] resulting in $m = 4.58831$.

2.5. Remote Control System

Traditionally, the control of the bridge gates is done with self-oscillating switching systems, which are also being worked on nowadays by Zotov, Razinkin and Atuchin (2017). But to have more control over the prototype, a different approach was taken, using a microcontroller (μC) to coordinate the gates. To control the full-bridge commutation, an ESP32 microcontroller is used, due to its low cost and energy consumption. The control is done using 4 PWM signals with a max DC of 50 %, and a variable phase. Further, the ESP32 possesses a Wi-Fi module, which connects the control system to a local Wi-Fi network that communicates via an app to a mobile device, to allow better control during testing.

2.5.1. Control System

The ESP32 possesses a PWM module for motor control (MCPWM). This module can create three timers, which can create over six PWM signals that can be synchronized or offset by a certain degree (Espressif, 2018).

To control the full-bridge, four PWM signals were generated, one for each MOSFET, with an offset of π [rad] between, S_{1-} , S_{2+} and between S_{1+} , S_{2-} , so the inverter does not short circuit; this is done using function *mcpwm_set_duty_type()*. All signals have a duty cycle lesser than 50%, such that the dead time $T_d = 2$ [μs], this is done using the function *mcpwm_set_duty_in_us()*. To keep all signals synchronized to the same time frame, a fifth PWM signal was generated as an anchor for the other four, using function *mcpwm_sync_enable()* (Espressif, 2018).

The resulting output (V_o) signal is equal to $(S_{1+} \cap S_{2-}) \cup (S_{2+} \cap S_{1-})$. The duty cycle of this signal is controlled in the user interface using the function *mcpwm_deadtime_enable()*. Further, a 2[μs] offset is given to S_{1+} and S_{2-} to achieve the dead time on both sides of the pulses; $3\pi/4$ to π .

2.5.2. Communication System

To control the μC BLYNK was chosen to create the communication between the user and the electronic transformer. BLYNK is a free app that allows the creation of an intuitive user interface, which is great for fast IoT prototyping, the same reason why it is used by Hayaty and Mutmainah (2019) and Fang, Rahim and Naimah (2021). BLYNKI works by connecting the μC to their servers, via the internet, using them as a relay for the instruction put in the phone. Figure 3 shows a diagram of the communication system used to control the μC.

The user interface created has a slider for frequency control and a stepper for the DC control. This proved to be quite useful during testing, for a quick change in output voltage and operating frequency.

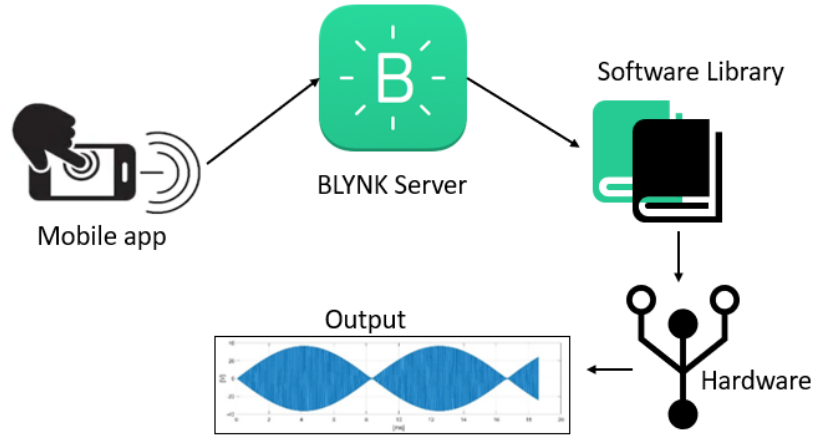


Figure 3. Communication system block.
Source: own elaboration.

2.6. Circuit Protection

To protect the transistors, a TLP driver (TLP250) was used, one connected to each MOSFET, which receives the PWM signal from the μC and adjusts it to the right voltage to switch on and off the MOSFETs. The TLP is a component that can protect the control system, due to its electrical isolation. Because two of the MOSFETs are not grounded, it is necessary to use trip circuits that allow applying a floating voltage, for this purpose, an unregulated DC/DC module is used (DCP010515B), followed by a regulation step using an LM (LM78L12); a set of these is connected to every MOSFET. Moreover, each converter has its input electrically isolated from its output, creating three power sources. This setup is powered by an external source.

3. Simulations and prototyping

PSpice (Orcad) was the software used for simulations. The input voltage was 120 Vrms, 60 Hz (the same as the electrical grid). For the control signal, a dead time of $T_m = 2 \text{ } [\mu\text{s}]$ was chosen; and the ratio of the transformer was chosen to be $m = 4.59$.

Figure 4 shows the different values of effective voltage at the output, for a resistive load of 10[Ω], 82[Ω], and 100[Ω], different duty cycles, and for commutation frequencies of 20 kHz and 30 kHz. Then the output voltages vary from 10 Vrms to 25 Vrms, in a way directly proportional to the duty cycle, without the commutation frequency or the load significantly affecting the output.

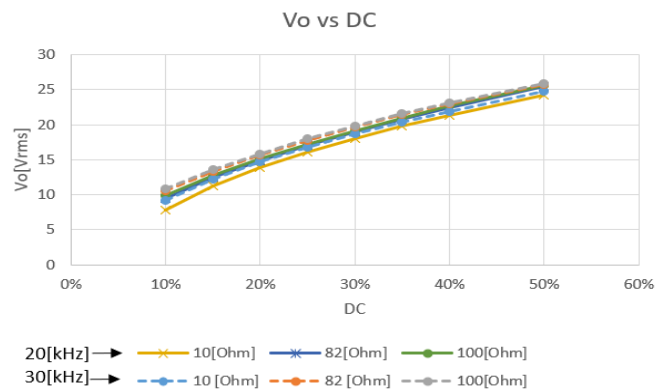


Figure 4. The effective voltage output signal.
Source: own elaboration.

Figure 5 shows the efficiency of the electronic transformer for resistive loads of 10[Ω], 82[Ω], and 100[Ω], different duty cycles, and for commutation frequencies of 20 kHz and 30 kHz. It can be observed that the efficiency of the circuit is directly linked to the duty cycle.

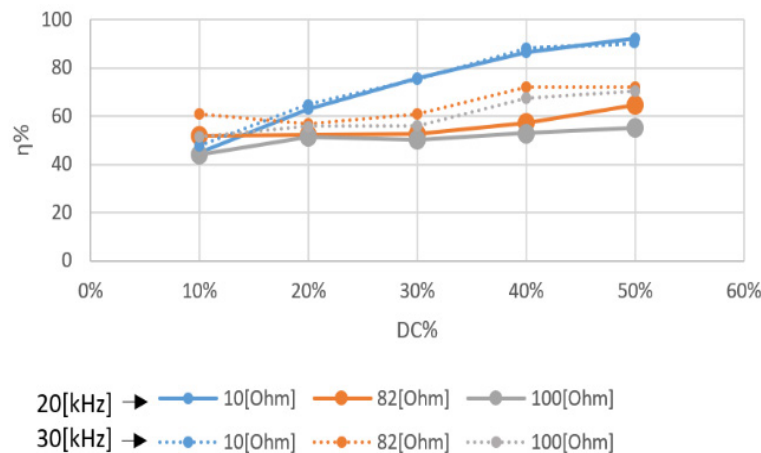


Figure 5. Electronic transformers efficiency for different duty cycles.
Source: own elaboration.

Similarly, Figure 6 presents the total harmonic distortion (THD) for loads of 10[Ω], 82[Ω], and 100[Ω], different duty cycles, and for commutation frequencies of 20 kHz and 30 kHz. The THD is inversely proportional to the duty cycle, achieving its minimum for a duty cycle of 20 %, and its maximum for a duty cycle of 40 %.

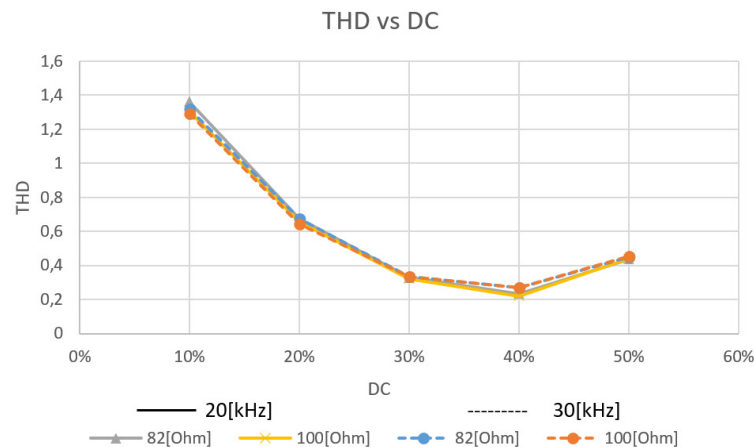


Figure 6. Electronic transformer total harmonic distortion.
Source: own elaboration.

Figure 7 shows the circuit schematic of the electronic transformer developed, where the connections between the different components are diagrammed.

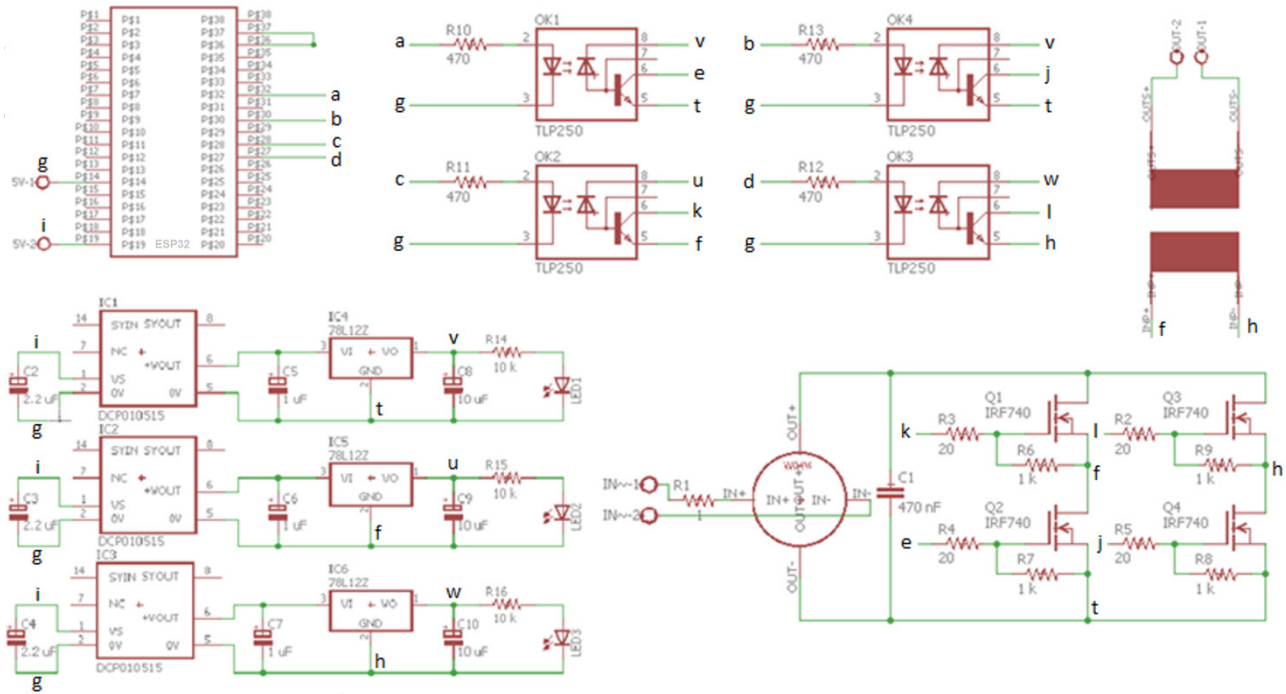


Figure 7. Schematic Circuit.

Source: own elaboration.

For implementation, a circuit board was designed and fabricated to accommodate, in an easily accessible way, the different stages of the electronic transformer. Finally, the PCB was assembled as seen in Figure 8.

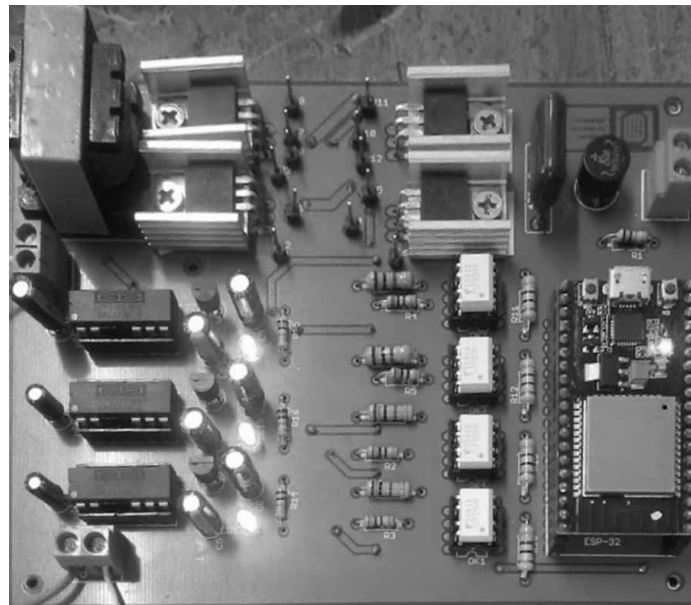


Figure 8. Circuit board.

Source: own elaboration.

4. Results

Two tests were made, one at low power (30 Vrms input) to check the correct operation of the control system, and another one at high power (120 Vrms), for the expected scenario for such an electronic transformer. Both tests were done for a commutation frequency of 20 kHz and 30 kHz, different resistive loads, and varying the duty cycle.

The high-power test was done using an input voltage of 120 Vrms and three resistive loads, while varying the output voltage by increasing or decreasing the duty cycle of the control signals. Figure 9 shows the behavior of the output signal for a resistive load of 82[Ω] with a duty cycle of 20 %; these results, obtained from an oscilloscope, were taken using an X10 probe, then the effective voltage is 15.1 Vrms.

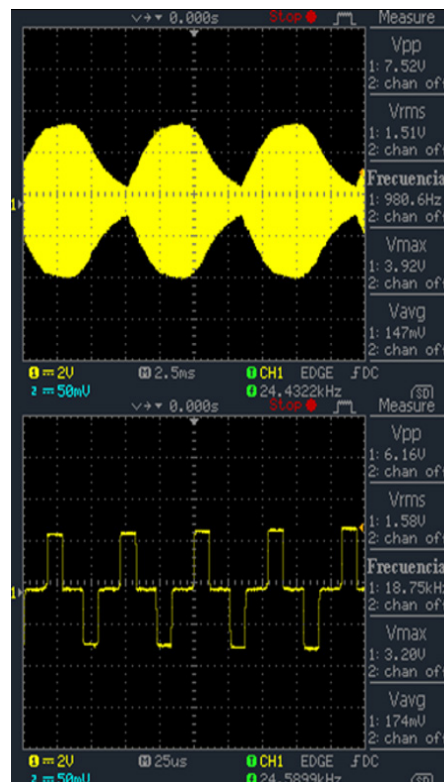


Figure 9. Result output signal.

Source: own elaboration.

Figure 10 shows the output effective voltage against the duty cycle for loads of 82[Ω] and 100[Ω], and commutation frequencies of 20 kHz and 30 kHz; the output voltage varied between 10,34 Vrms (duty cycle of 10 %) and 19,57 Vrms (duty cycle of 30 % to 35 %).

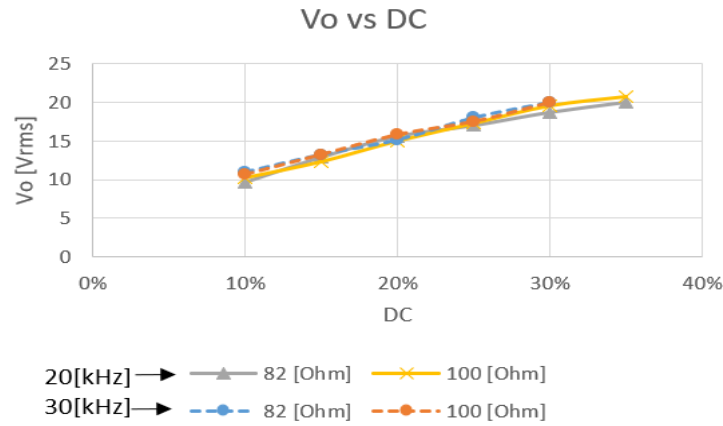


Figure 10. Output voltage against duty cycle.

Source: own elaboration.

Table 2 has the operation specifications of the prototyped electronic transformer, this includes input effective voltage, commutation frequency, topology, and maximum output power.

Table 2. Prototype properties.

Parameter	Value
Input Voltage	120 Vrms
Output Voltage	10 Vrms a 20 Vrms
Red Frequency	60 Hz
Switching frequency	20 kHz - 30 kHz
Duty cycle	10 % - 35 %
Topology	Full bridge
Maximum output power	51 W

Source: own elaboration.

The circuit operates at maximum efficiency for a commutation frequency of 20 kHz and a duty cycle of 25 % with an efficiency of 76.57 %. The optimal THD of 24.5 %, with a commutation frequency of 30 kHz and duty cycle of 35 %.The development of the electronic transformer was tested on a 50 W halogen lamp and a 12 V / 4 A AC motor and it worked correctly by lighting the lamp and turning the motor, respectively. Through MATLAB curve fitting tool, by inputting the experimental output from the low and high-power tests, Equation (5) was created to show the output voltage resulting from the input and duty cycle, has an R-squared fit of 0.9997. Figure 11 shows a graph of the equation (grid) superposed with the empirical results (circles).

$$V_o = 0.642 + 0.04161 \times V_i + -5.305 \times DC + 0.4368 \times V_i \times DC + 4.881 \times DC^2 \quad (5)$$

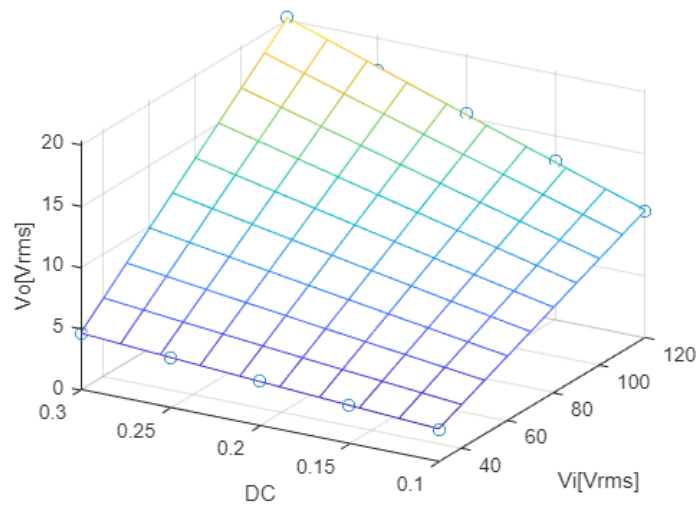


Figure 11. Mathematical modeling of the circuit.
Source: own elaboration.

Even though the prototype is designed for a maximum duty cycle of 50 %, the maximum we achieved during testing was 40 %, this is due to the MOSFET saturating, producing then a short circuit.

5. Conclusions

An electronic transformer was designed, and a prototype implemented, capable of reducing a 60 Hz AC by a given duty cycle value. This reduction can be expressed by Equation (7), which reveals the output effective voltage from the input voltage and duty cycle, making this equation valid for low and high voltage.

The control system consists of a μC that generates two PWM symmetric signals, with a maximum duty cycle of 49 %, a dead time of 2 $[\mu\text{s}]$, and a variable frequency (between 20 kHz and 30 kHz). The designed circuit works at optimal performance with a commutation frequency of 30 kHz and a duty cycle of 35 %, since is at this point that the THD is lowest (24.5 %), and the efficiency is the highest (76.57 %).

The electronic transformer was implemented using a full-bridge inverter and a cheap ESP32 μC . This μC has a Bluetooth and Wi-Fi module, which allowed us to control the output effective voltage using a mobile app.

To feed the drivers that isolate the control system from the rest of the circuit, a protection circuit was designed, using three-CD/CD converters (DCP010515B), which are fed using an external 5 V source, and generate three 15 V independent sources. This is convenient for the design, as it only needs a 5 V source instead of three 15 V ones.

References

Ashour, Hamdy (2008). A new electronic step-up/down voltage stabilizer topology based on the H-Bridge AC chopper. *12th International Middle-East Power System Conference* (pp. 600-604). Aswan, Egypt.
<https://doi.org/10.1109/MEPCON.2008.4562400>

- Basu, Kaushi; Mohan, Ned (2014). A Single-Stage Power Electronic Transformer for a Three-Phase PWM AC/AC Drive With Source-Based Commutation of Leakage Energy and Common-Mode Voltage Suppression. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 61(11), 5881-5893.
<https://doi.org/10.1109/TIE.2014.2311393>
- Battal, Funda; Balci, Selami; Sefa, Ibrahim (2021). Power electronic transformers: a review. *Measurement*, 171, 108848. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2020.108848>
- Dhanraj, Joshuva; Krishnamurthy, Balachandar; Ramanathan, Kuppan; Saravanan, A. K.; Raman, Jeya (2020). Design on IoT Based Real Time Transformer Performance Monitoring System for Enhancing the Safety Measures. *IOP Conference Series. Materials Science and Engineering*, 988(1), 012076.
<https://doi.org/10.1088/1757-899X/988/1/012076>
- Dujic, Drazen; Kieferndorf, Frederick; Canales, Francisco; Drofeni, Uwe (2012). Power electronic traction transformer technology. *Proceedings of The 7th International Power Electronics and Motion Control Conference* (pp. 636-642). Harbin, China.
<https://doi.org/10.1109/IPEMC.2012.6258820>
- Espressif (2018). *Espressif*. Retrieved from
<https://docs.espressif.com/projects/esp-idf/en/latest/esp32/api-reference/peripherals/mcpwm.html>
- Fang, Liew; Rahim, Resemi; Naimah, Siti (2021). Design of artificial piezo-leaf wind energy harvesting system monitoring based on Blynk apps. *AIP Conference Proceedings*, 2339(1), 20005.
<https://doi.org/10.1063/5.0044292>
- Hart, Daniel (2010). *Power Electronics*. Valparaiso, IN, USA: McGraw Hill.
- Hayaty, Mardhiya; Mutmainah, Ade (2019). IoT-Based electricity usage monitoring and controlling system using Wemos and Blynk application. *Jurnal Teknologi Dan Sistem Komputer*, 7(4), 161-165.
<https://doi.org/10.14710/jtsiskom.7.4.2019.161-165>
- He, Rongzhen; Zhang, Yanli; Zhang, Dianhai; Xie, Dexin (2018). An Improvement of Core Losses Estimation Model in Power Electronic Transformer. *IEEE Student Conference on Electric Machines and Systems* (pp. 1-5). Huzhou, China.
<https://doi.org/10.1109/SCEMS.2018.8624711>
- Ismail, Esan; Al-Saffar, Mustafa; Sabzali, Ahmad; Fardoun, Abbas (2008). A Family of Single-Switch PWM Converters With High Step-Up Conversion Ratio. *IEEE Transactions on Circuits and Systems I: Regular Papers*, 55(4), 1159-1171.
<https://doi.org/10.1109/TCSI.2008.916427>
- Jain, Amit; Ayyanar, Raja (2011). Pwm control of dual active bridge: Comprehensive analysis and experimental verification. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 26(4), 1215-1227.
<https://doi.org/10.1109/TPEL.2010.2070519>
- Jirasereeamornkul, Kamon; Boonyaroonate, Itsda; Chamnongthai, Kosin (2003). High-efficiency electronic transformer for low. *IEEE International Symposium on Circuits and Systems (ISCAS)* (p. 3). Bangkok, Thailand. <https://doi.org/10.1109/ISCAS.2003.1205029>
- Keke, Liu; Lin, Li (2014). Analysis of favored design frequency of high-frequency transformer with different power capacities. *International Conference on Power System Technology (POWERCON)* (pp. 2272-2278). Chengdu, China.
<https://doi.org/10.1109/POWERCON.2014.6993764>

- Kumar, Seshasai (2016). Design of high frequency power transformer for switched mode power supplies. *International Conference on Emerging Trends in Engineering, Technology and Science (ICETETS)* (pp. 1-5). Pudukkottai, India.
<https://doi.org/10.1109/ICETETS.2016.7603076>
- Mishima, Tomokazu; Nakaoka, Mutsuo (2009). A Novel High-Frequency Transformer-Linked Soft-Switching Half-Bridge DC-DC Converter With Constant-Frequency Asymmetrical PWM Scheme. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 56(8), 2961-2969.
<https://doi.org/10.1109/TIE.2009.2013692>
- Mora, Jesús (2005). *Maquinas Electricas*. Madrid, España: McGraw Hill.
- Nerone, Louis R.; Trevino, B. (2001). A new halogen electronic transformer. *Sixteenth Annual IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition* (pp. 461-466). Anaheim, CA, USA.
<https://doi.org/10.1109/APEC.2001.911687>
- Polonskii, M. (2004). Design procedure for dimmable electronic transformer. *IEEE International Conference on Industrial Technology* (pp. 695-700). Hammamet, Tunisia.
<https://doi.org/10.1109/ICIT.2004.1490159>
- Rashid, Muhammad (2006). *Power Electronics. Circuits, Devices and Applications*. New Jersey, NJ, USA: Pearson Prentice Hall.
- Sutanto, Erwin; Putra, Tomy; Kuncahyojat, Anindriyo; Agustin, Eva (2020). IoT based electricity leakage current monitoring using Blynk app. *AIP Conference Proceedings*, 2314(1), 40004.
<https://doi.org/10.1063/5.0034352>
- Triki, Yacine; Bechouche, Ali; Seddiki, Hamid; Abdeslam, Djaffar (2019). High Performance Control of Single-Phase Full Bridge Inverters Under Linear and Nonlinear Loads. *IECON 2019 - 45th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society* (pp. 400-405). Lisbon, Portugal.
<https://doi.org/10.1109/IECON.2019.8927102>
- Trillos-León, Nelson-Enrique; Barrero-Pérez, Jaime-Guillermo; Gómez Pinto, Jorge-Eliecer (2020). Diseño y construcción de un transformador electrónico 12 Vrms 50 W con control de frecuencia de conmutación programable. *Scientia et Technica*, 25(3), 358-366.
<https://doi.org/10.22517/23447214.24251>
- York, Ben; Yu, Wensong; Lai, Jason (2013). Hybrid-Frequency Modulation for PWM-Integrated Resonant Converters. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 28(2), 985-994.
<https://doi.org/10.1109/TPEL.2012.2201960>
- Zhang, Chaolong; He, Yigang; Du, Bolun; Yuan, Lifen; Li, Bing; Jiang, Shanhe (2020). Transformer fault diagnosis method using IoT based monitoring system and ensemble machine learning. *Future Generation Computer Systems*, 108, 533-545.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.future.2020.03.008>
- Zhang, Darning; Tseng, King-Jet (2006). Effect of high permittivity and core dimensions on the permeability measurement for Mn-Zn ferrite cores used in high-frequency transformer. *Third IEEE International Workshop on Electronic Design, Test and Applications (DELTA'06)* (p. 378). Kuala Lumpur, Malaysia.
<https://doi.org/10.1109/DELTA.2006.40>
- Zotov, Leonid-Grigoryevich; Razinkin, Vladimir P.; Atuchin, Victor V. (2017). Controllable electronic transformer based on the resonance structure with switching capacitor for low-rise buildings residential area power supply stabilization systems. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 91, 117-120.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2017.03.004>

Desarrollo de una herramienta tecnológica facilitadora de buenas prácticas agrícolas en los pequeños agricultores del Municipio de Argelia

Development of a technological tool to fulfill good agricultural practices for small farmers of Argelia town

Marisol Gómez-Ramírez¹
Nilson Mossos-Vivas²
Rodrigo Herrera-Ramírez³

¹ Institución Universitaria Antonio José Camacho (Colombia).
Correo electrónico: marisolgomez@admon.uniajc.edu.co
orcid: <https://orcid.org/0000-0001-6494-7904>

² Institución Universitaria Antonio José Camacho (Colombia). Correo electrónico: nmossosamon.uniajc.edu.co
orcid: <https://orcid.org/0000-0002-0266-5669>

³ Tecnoquimicas (Colombia). Correo electrónico: rherrera@tecnoquimicas.com
orcid: <https://orcid.org/0000-0002-0366-7674>

Recibido: 29-03-2021 Aceptado: 30-08-2021

Cómo citar: Gómez-Ramírez, Marisol; Herrera-Ramírez, Rodrigo; Mossos-Vivas, Nilson (2021). Desarrollo de una herramienta tecnológica facilitadora de buenas prácticas agrícolas en los pequeños agricultores del Municipio de Argelia. *Informador Técnico*, 85(2), 160 -171. <https://doi.org/10.23850/22565035.3642>

Resumen

En el presente trabajo se tiene como objetivo diseñar e implementar una herramienta tecnológica para el control y seguimiento de las buenas prácticas agrícolas en los pequeños agricultores de frutas y hortalizas en el Valle del Cauca. Se presenta el desarrollo de una investigación del tipo aplicada, que se apoyó en la revisión de la literatura sobre buenas prácticas agrícolas (BPA), el estudio de las entidades y estándares que existían para la certificación de BPA, y encuestas los agricultores sobre el conocimiento y apropiación de herramientas tecnológicas para facilitar las BPA. Se siguieron los pasos de metodología de desarrollo de software ICONIX, que involucra las etapas de análisis de requerimientos, análisis y diseño preliminar, análisis detallado, codificación y pruebas al sistema. Finalmente se desarrolló una aplicación web facilitadora de las BPA que permite el seguimiento a las prácticas agrícolas, incluyendo un registro constante de las tareas que los agricultores realizan sobre sus cultivos, condición indispensable en estos procesos de certificación. La herramienta permite a los pequeños agricultores llevar un mejor manejo de la información de los procesos sobre los cultivos, tener disponibles consultas sobre la trazabilidad de los productos y el histórico de los lotes de la finca.

Palabras clave: certificación; ICONIX; labores agrícolas; normatividad; trazabilidad, buenas prácticas agrícolas, BPA.

Abstract

The objective of this work is to design and implement a technological tool for the control and monitoring of good agricultural practices in small fruit and vegetable farmers in Valle del Cauca. It shows the development of applied research, supported by a literature review on good agricultural practices (GAP), a study of the

entities and standards related to GAP certification, and surveys of farmers on the knowledge and appropriation of technological tools to facilitate GAP. The steps of the ICONIX software development methodology were followed, which involve the stages of requirements analysis, preliminary analysis and design, detailed analysis, coding, and system testing. Finally, a GAP facilitating web application was developed that allows monitoring of agricultural practices, including a constant record of the tasks that farmers perform on their crops, an essential condition in these certification processes. The application allows small farmers to better manage the information of the processes on the crops and have data available on the traceability of the products and the history of the farm's lands.

Keywords: agricultural work; certification; ICONIX; regulations; traceability; good agricultural practices; GAPs.

1. Introducción

La agricultura es la base de la alimentación de las personas, y de ella depende la salud y bienestar de todos los consumidores; no obstante, se han presentado numerosos casos en los que la integridad física de los consumidores se ha visto afectada, ya sea por enfermedades transmitidas por el mal manejo de los alimentos, o por el exceso de uso de productos químicos, principalmente plaguicidas. Es debido a ello que entidades de gobierno y privadas han empezado a crear la normatividad al respecto para poder asegurar que los productos cumplan con los estándares de calidad e inocuidad alimentaria.

Las Buenas Prácticas Agrícolas (BPA) son un conjunto de actividades que van desde la planeación del cultivo hasta la cosecha, el empaque y transporte del alimento, entre otros, con el fin de asegurar la inocuidad del alimento, el cuidado del medio ambiente, la seguridad y bienestar de los trabajadores (Izquierdo; Rodríguez, 2006). El objetivo de esta investigación es desarrollar una herramienta tecnológica para llevar buenas prácticas en las labores agrícolas, articulada en una aplicación *web responsive*, que permita a los pequeños agricultores realizar sus labores agrícolas teniendo en cuenta las BPA.

2. Marco teórico

2.1. Labores agrícolas

La finca es una unidad de producción, que cuenta con determinada cantidad de recursos agropecuarios y/o agroforestales que hay que aprovechar para obtener beneficio, ya sea para un grupo particular o familiar (Balmaceda, 2006). Las fincas están divididas en porciones de terrenos, llamados lotes, cada uno de los cuales está destinado a un cultivo en particular. Cada lote tiene unas características propias, como el tamaño, nombre, su foto, área, y fecha de creación, entre otros (Food and Agriculture Organization [FAO], 2012). Sobre el lote se llevan a cabo las siguientes labores agrícolas:

- Sembrar: actividad que consiste en plantar un cultivo en un lote vacío. Para registrar ello se deberá seleccionar la semilla a utilizar en la siembra y la cantidad de semilla sembrada (kg semilla por hectárea) (Martínez; Sosa; Garay, 2012).
- Regar: consiste en administrar el agua del lote, la finca debe tener un permiso de uso de este recurso.
- Fertilizar: es la aplicación de un fertilizante al lote. Es importante tener en cuenta en esta actividad el modo de aplicación del fertilizante (que puede ser: manual, con máquina, o al voleo) (FAO, 2012).

- Fumigar: es la aplicación de un plaguicida a un cultivo de la finca, que debe quedar registrada, con uso exclusivo de plaguicidas aprobados para la fumigación (Martínez *et al.*, 2012).
- Cosechar: es la separación del fruto de la planta madre, que se retira del campo. Este proceso depende de diferentes factores, como la fragilidad y el manejo de la planta y del fruto, durante y después de la cosecha, y la necesidad de que el método de cosecha cumpla con las normas del mercado (Castellanos; Vejarano; Flórez, 2012).
- Desinfección del suelo: consiste en limpiar el suelo para disminuir su carga patógena.

2.2. Buenas prácticas agrícolas

El Instituto Colombiano Agropecuario (ICA), dependencia del Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural de Colombia, que tiene por objeto la prevención, vigilancia y control de los riesgos sanitarios, biológicos y químicos para las especies vegetales, con el fin de proteger la salud de las personas, animales y plantas, define en la resolución 030021 de 2017, las buenas prácticas agrícolas (BPA) así: “son tareas orientadas a la sostenibilidad ambiental, económica y social para los procesos productivos de la explotación agrícola que garantizan la calidad e inocuidad de los alimentos y de los productos no alimenticios” (Instituto Colombiano Agropecuario [ICA], 2017 p.1).

Dentro de las BPA está contemplado el manejo del suelo, que tiene que ver con la conservación de las características físicas y químicas de este para que haya una buena producción (Pacheco, 2005); el conocimiento de la historia del terreno para establecer posibles riesgos biológicos o químicos, que puedan afectar la inocuidad de los alimentos (Pacheco, 2005); el manejo del agua, para evitar pérdidas del líquido y el daño de los recursos, tanto superficiales como hídricos (Ciro; Villegas, 2009). Por otro lado, la producción de cultivos se relaciona con la selección de la variedad a sembrar, los cuidados con el cultivo y el manejo de plagas, que comprende la supervisión por parte del ingeniero agrónomo, quien debe garantizar que todos los insumos utilizados tengan el registro aprobado por el ICA y se compren a distribuidores permitidos (Ciro; Villegas, 2009). Finalmente, las BPA contemplan el bienestar de los trabajadores, que incluye la calidad de vida y las capacitaciones en cuanto al manejo de herramientas, agroquímicos y utensilios de trabajo, entre otros (FAO, 2012).

2.3. Normatividad en cuanto a BPA

La certificación en BPA es un reconocimiento que se da a los agricultores que realizan en sus fincas la implementación de ciertas medidas para garantizar la producción inocua de frutas y hortalizas en fresco (ICA, 2017), es decir, que todo el proceso cumple con los puntos o criterios de evaluación exigidos en la norma. En la Tabla 1 se muestran las diferentes normatividades que existen y las organizaciones que las emiten.

Tabla 1. Normas de certificación en BPA.

Norma	Emitida por
NTC 5400:2012: Norma Técnica Colombiana de buenas prácticas agrícolas para frutas, hierbas aromáticas culinarias y hortalizas frescas.	Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación Icontec
GlobalG.A.P. (antes EurepGAP): Normas Internacionales sobre las buenas prácticas agrícolas, ganaderas y de acuicultura (GAP) (Cofre, Riquelme, Engler, Jara-Rojas, 2012).	GlobalG.A.P.
Resolución 30021 de 2017.	Instituto Colombiano Agropecuario, ICA.

2.4. Metodología de desarrollo ICONIX

Es un proceso simplificado, comparado con otras metodologías, que reúne un conjunto de tareas de orientación con el fin de incluir todo el ciclo de vida de un proyecto (Iconix Brand Group, 2016). Fue creado por Rosenberg y Scott (2001) a partir de una síntesis del proceso unificado de tres investigadores: Rumbaugh, Jacobson y Booch (2004), que han dado soporte y conocimiento a la metodología ICONIX desde 1993. Muestra las actividades de cada fase y presenta una secuencia de pasos. Está adaptado a los patrones y ofrece el soporte del lenguaje unificado de modelado (UML). Comprende las etapas de análisis de requerimientos, análisis y diseño preliminar, análisis detallado, codificación y pruebas al sistema (Amavisca; García; Jiménez; Duarte, 2014).

2.5. Programas de desarrollo utilizado

A continuación, se presentan los diferentes programas utilizados en el *backend* para la creación de la aplicación:

Node.js: es un entorno de ejecución de código JavaScript, que utiliza un modelo asíncrono y dirigido por eventos. Es de código abierto y permite construir y configurar un servidor web asíncrono (Teixeira, 2012).

- **Express:** es una librería de aplicaciones web para Node.js, que proporciona funciones para el desarrollo de aplicaciones web y móviles de forma fácil y segura.
- **Handlebars.js:** es un motor de plantillas de JavaScript, que permite crear y formatear código HTML, para generar contenido dinámico a partir de los datos.
- **MySQL:** es un sistema de gestión de bases de datos de código abierto, que utiliza un modelo relacional para almacenar los datos. Entre sus principales ventajas está que evita la redundancia, conserva la integridad de los datos y cuenta con el lenguaje de consulta estándar sobre los datos, denominado SQL (MySQL.com, 2021).

3. Metodología

La propuesta de creación de una herramienta tecnológica facilitadora de BPA en los pequeños agricultores da lugar a un desarrollo de investigaciones de tipo aplicado, que se apoya en la revisión de la literatura, de las entidades y estándares existentes para la certificación de las normas existentes como las del ICA, del Icontec y de GlobalG.A.P (Rincón; Figueredo; Salazar, 2015), donde se encuentra que esta última es la más utilizada en los mercados de exportación (Cerquera, 2015), por lo cual se tomó como referente para la elaboración de la herramienta digital. También se realizó una encuesta a los agricultores del municipio de Argelia, sobre el conocimiento y apropiación de herramientas tecnológicas para facilitar la BPA. Se revisó la norma de GlobalG.A.P y se siguieron los pasos de metodología de desarrollo de software ICONIX. En la primera etapa, denominada “análisis de requerimientos”, se elaboraron los requerimientos funcionales del sistema (ver Tabla 2).

Tabla 2. Requerimientos funcionales del sistema.

Nombre	Descripción
R01. Registrar labores	Registra la ejecución de una de las labores descritas anteriormente
R02. Registrar personal	Tener información básica de los trabajadores
R03. Generar histórico del lote	Dado el nombre de una finca, mostrar los lotes y de allí seleccionar uno para ver su histórico, es decir, todo lo que se ha hecho ahí en un rango de fechas (fecha inicial-fecha final)
R04. Consultar trazabilidad del producto	Se deberá poder consultar la información histórica de un producto

Fuente: elaboración propia.

La aplicación está concebida para que sea utilizada por el administrador y los trabajadores de la finca. Puede ser utilizada en un navegador web de un computador o celular inteligente, debido a que es una aplicación *web responsive*. Una conexión a internet sería requerida para poder interactuar con la aplicación. En esta etapa también se elaboró el diagrama de clases básico (ver Figura 1).

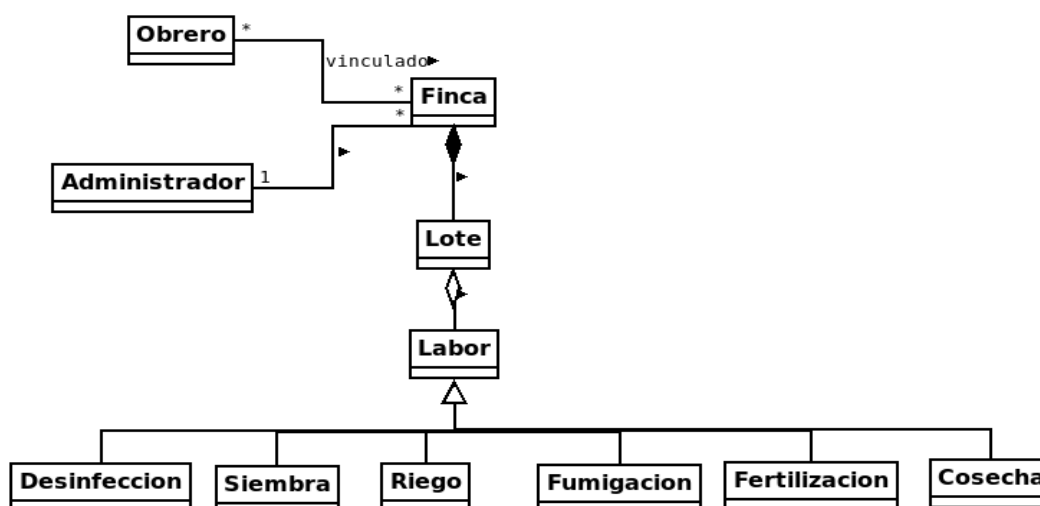


Figura 1. Diagrama de clases.
Fuente: elaboración propia.

Los prototipos de la interfaz se muestran en las Figuras 2, 3, 4 y 5.

La interfaz muestra un encabezado con el texto "app-GAP" y un menú hamburguesa. El título principal es "Ingreso". Debajo del título, hay dos campos de entrada: "Correo electrónico" y "Clave". Debajo de los campos, hay un botón verde con el texto "Ingresar".

Figura 2. Pantallazo de ingreso al sistema.
Fuente: elaboración propia.



The screenshot shows the main interface of the 'app-GAP'. At the top, there is a dark header with 'app-GAP' and a menu icon. Below this, there are tabs for 'Finca' and 'Fincas'. The 'Finca' tab is active, displaying the name 'Carmelita' with a house icon and a green eye icon. A photograph of a farm with banana trees and a white house is shown. Below the photo, there is a section with the following details: 'Ubicación: Valle del Cauca/Jamundí/Carrera 50', 'Descripción: Finca la hermosa', and 'Administrador: Administrador de Finca'.

Figura 3. Pantallazo Principal de la Finca.
Fuente: elaboración propia.



The screenshot shows a form titled 'Registrar Fertilización' with a green leaf icon. The form is divided into sections: 'Detalles del proceso' and 'Responsable'. The 'Responsable' field is filled with 'admin@usa.net'. The 'Fecha' (Date) field is filled with '03/18/2020' and the 'Hora' (Time) field is filled with '08:25:45 AM'. The 'Estado del clima' (Weather state) field is a dropdown menu with 'Soleado' (Sunny) selected. The 'Fertilizante' (Fertilizer) field is a dropdown menu with 'BASFOLIAR LIQUIDO' selected. The 'Modo de aplicación' (Application method) field is a dropdown menu with 'Elige el modo de aplicación' (Choose the application method) selected. The 'Cantidad' (Quantity) field is partially visible at the bottom.

Figura 4. Formulario de registro de la labor Fertilización.
Fuente: elaboración propia.



Figura 5. Pantallazo de mensaje de alerta.
Fuente: elaboración propia.

Y, finalmente se presenta el diagrama de casos de uso básico, para mostrar el comportamiento que se espera del sistema, describiendo las acciones y objetivos de este (Figura 6).

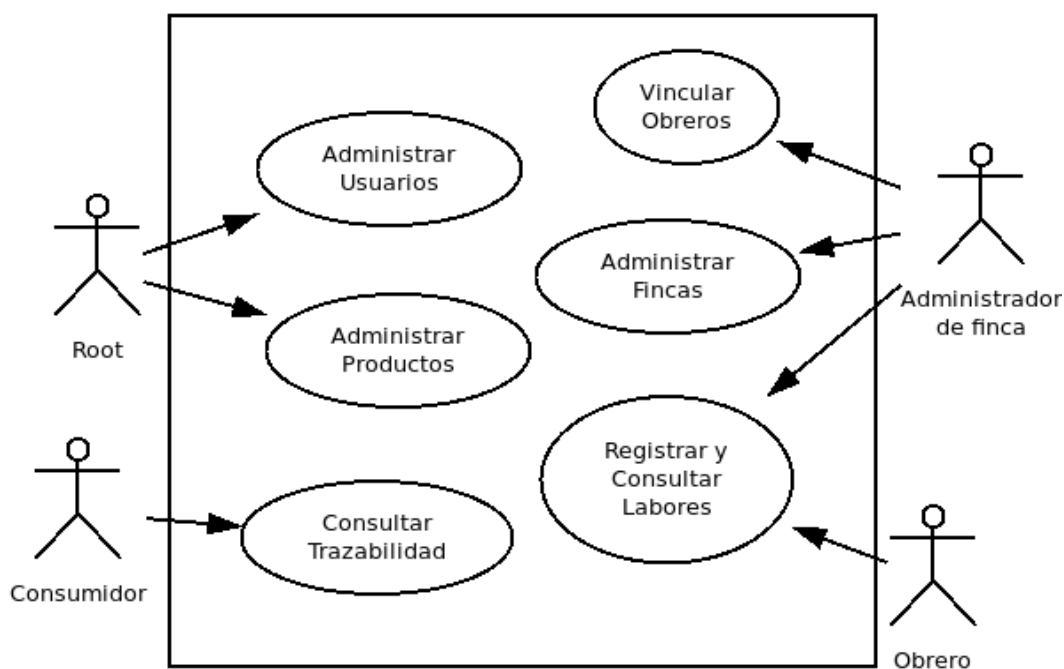


Figura 6. Diagrama de casos de uso.
Fuente: elaboración propia.

Luego, en la etapa de análisis y diseño preliminar, se realizó la especificación de los casos de uso detallado, junto con el diagrama de robustez, mediante el cual se verifica si la especificación del caso de uso es correcta y completa.

A continuación, se presenta el diagrama de robustez del caso de uso “registrar fumigación” (Figura 7).

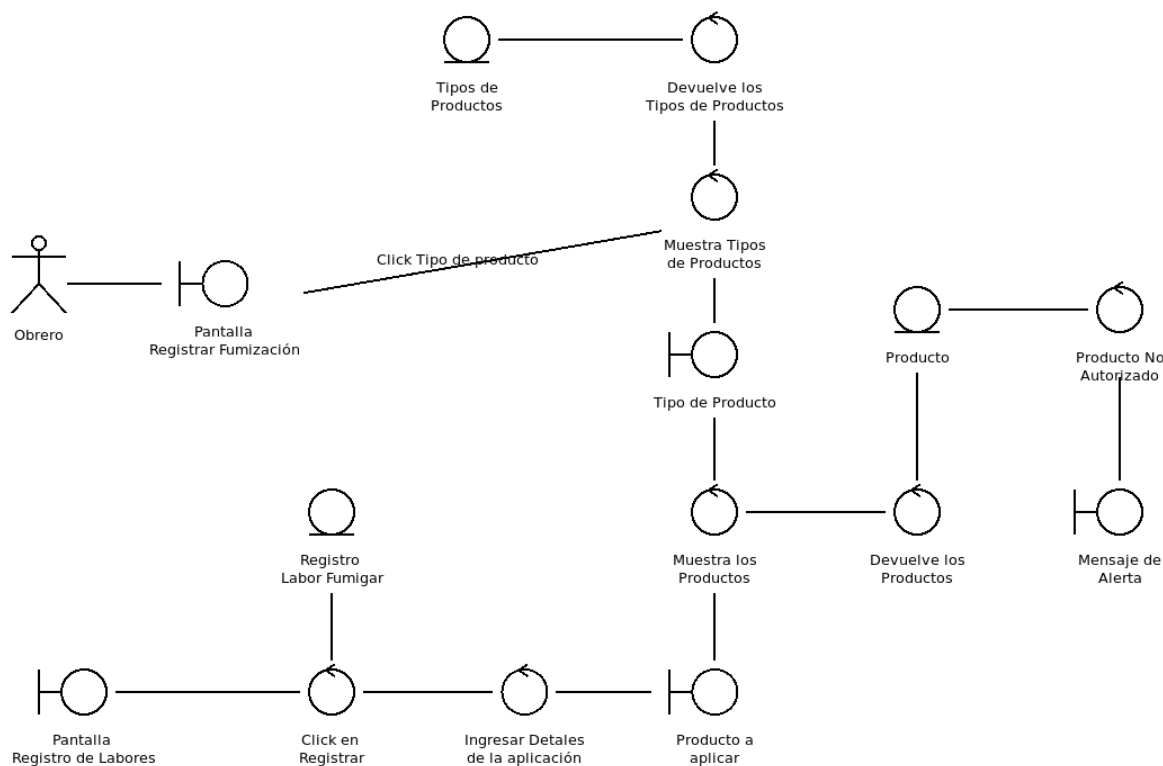


Figura 7. Diagrama de robustez de la labor registrar fumigación.

Fuente: elaboración propia.

En la etapa de diseño detallado, se realizaron también los diagramas de secuencia. A continuación, se presenta el de la labor de riego (Figura 8).

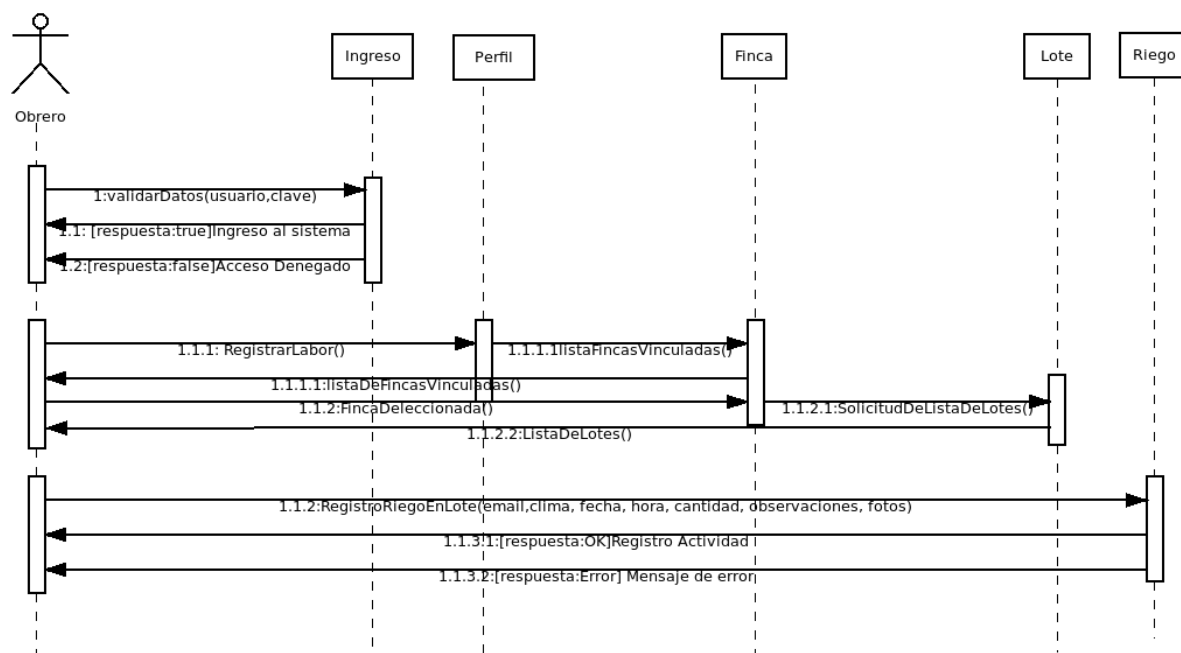


Figura 8. Diagrama de secuencia de la labor riego.

Fuente: elaboración propia.

Después de realizar el análisis y diseño, se pasó a la etapa de codificación. Previamente se realizó el diagrama de componentes (Figura 9), se configuró el servidor web en la herramienta Node.js, utilizando las librerías de Express, para el manejo de contenido dinámico en las páginas web, se utilizó la herramienta Handlebars.js, y para el almacenamiento de los datos se utilizó MySQL. Finalmente, se deben realizar las pruebas funcionales al sistema y la prueba de integración con los usuarios para verificar la aceptación de los resultados.

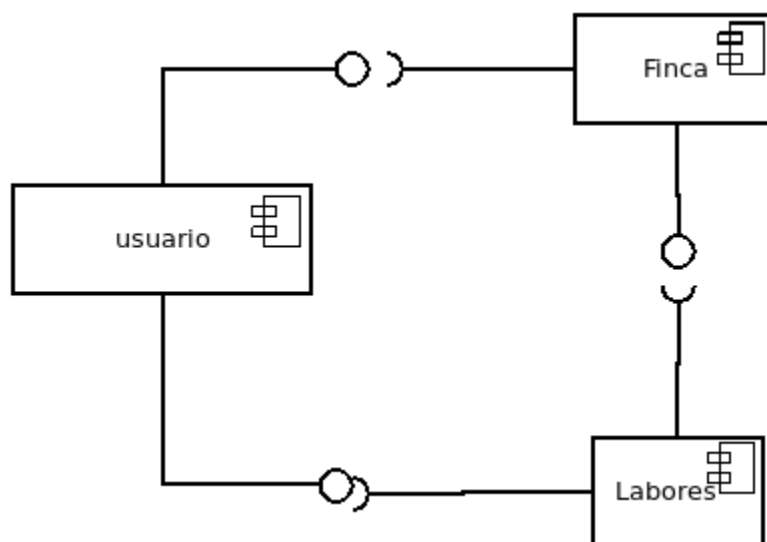


Figura 9. Diagrama de componentes.
Fuente: elaboración propia.

4. Resultados

Se realizó el desarrollo de una aplicación *web responsive*, que permite registrar las actividades agrícolas realizadas por los agricultores en el cultivo de sus productos, también permite a los administradores de la finca llevar un mejor control de esta, y al consumidor final le permite conocer la trazabilidad de un producto, es decir cómo se realizó todo el proceso desde la siembra hasta la cosecha. En las pruebas realizadas de usabilidad (Molich; Nilesen, 1990), de acuerdo con los 10 principios de Nielsen, se encontraron los siguientes porcentajes de respuesta (ver Tabla 3):

Tabla 3. Resultado de la encuesta de usabilidad.

Principio	Sí cumple (%)	A veces (%)	No cumple (%)	No respondió (%)
1. Visibilidad del estado del sistema: se informa al usuario sobre lo que está sucediendo (Nielsen; Molich, 1990)	60	40	0	0
2. Coincidencia entre el sistema y el mundo real: la aplicación usa un lenguaje claro y familiar al usuario (Nielsen, 1994)	40	50	10	0
3. Control y libertad del usuario: posibilidad de abandonar o de deshacer un proceso (Nielsen; Molich, 1990)	50	20	30	0
4. Consistencia y estándares: se siguen convenciones utilizadas en la industria agrícola (Nielsen, 1994)	60	30	0	10
5. Prevención de errores: se eliminan condiciones propensas a producir errores y se presentan opciones de confirmación de tareas (Nielsen, 1994)	0	80	10	10
6. Reconocimiento en lugar de recuperación: Se minimiza la carga de memoria del usuario (Molich; Nilesen, 1990)	60	30	0	10
7. Flexibilidad y eficiencia de uso: personaliza acciones frecuentes (Molich; Nilesen, 1990).	0	30	60	10
8. Diseño estético y minimalista: tener solo la información relevante (Nielsen; Molich, 1990)	70	20	10	0
9. Ayudar a reconocer, diagnosticar y recuperarse de errores: los mensajes de error deben expresarse en un lenguaje sencillo (Nielsen, 1994)	90	10	0	0
10. Ayuda y documentación: proporcionar documentación para ayudar al usuario a completar las tareas (Molich; Nilesen, 1990)	10	20	50	20

Fuente: elaboración propia.

La aplicación incluye un sistema de alertas que fue diseñado de acuerdo con algunos ítems de la norma de GlobalG.A.P. para frutas y hortalizas (Arias, 2012), estos permiten conocer cuando se está realizando una práctica inapropiada por parte del agricultor. Así mismo, utiliza una base de datos que fue diseñada con la información relevante para buenas prácticas agrícolas.

5. Conclusiones

La norma de GlobalG.A.P. para frutas y hortalizas es la más ampliamente utilizada en los procesos de certificación a nivel internacional, por eso se tomó como base para la construcción de la herramienta digital facilitadora de buenas prácticas agrícolas. Respecto a las pruebas de usabilidad, se puede concluir que los principios 1, 4, 6, 8 y 9 tienen una alta aceptación por parte de los usuarios, donde sobresalen el 8 y 9. Pero los principios 7 y 10 no tuvieron tan buena calificación, en el porcentaje de satisfacción están por debajo del 60 %. Y los principios 2, 3 y 5 están por debajo del 30 %, por lo tanto, se debe mejorar estos principios en la siguiente versión de la aplicación.

A partir de las pruebas realizadas por los usuarios, se evidenció que la herramienta digital facilita el seguimiento a las prácticas agrícolas, incluyendo un registro constante de las tareas que los agricultores realizan sobre sus cultivos, esto permite que tengan disponibles consultas sobre la trazabilidad de los productos y el histórico de los lotes de la finca, condición indispensable en los procesos de certificación.

Se espera que a través de la herramienta el agricultor se pueda preparar mejor para los procesos de certificación, dado que, si realiza una mala práctica en sus labores, el sistema le informa por medio de un mensaje de alerta.

La aplicación permite al consumidor final verificar la trazabilidad de los productos, de tal forma que se garantice la inocuidad y buena calidad de estos productos. Para que facilite las labores en la finca y los procesos de certificación de BPA, es indispensable que tanto los administradores como los trabajadores estén comprometidos con el uso de la aplicación, y que ingresen de forma correcta y completa la información.

Se desarrollo una herramienta tecnológica en el campo agrícola, para que los pequeños agricultores puedan acceder a registrar las labores de campo, facilitando los procesos de certificación en buenas prácticas agrícolas.

6. Referencias

- Amavisca, Laura; García, Abraham; Jiménez, Eusebio; Duarte, Gilda (2014). *Aplicación de la metodología semi-ágil ICONIX para el desarrollo de software: implementación y publicación de un sitio WEB para una empresa SPIN-OFF en el Sur de Sonora, México*. Guayaquil: Laccei.
- Arias, Juan (2012). *Seguimiento a los procesos de implementación y certificación de buenas prácticas agrícolas BPA en la norma GLOBALG.A. P en la producción de gulupa (Passiflora edulia) en el municipio de Ocaña, Norte de Santander* (tesis de pregrado). Universidad Francisco de Paula Santander, Ocaña, Colombia.
- Balmaceda, Alberto (2006). *Planificación de fincas*. Managua: Universidad Nacional Agraria.
- Castellanos, Moisés; Vejarano, Ivanna; Flórez, Edwin (2012). *Manual de cosecha y mercadeo*. Tegucigalpa: Secretaría de Educación República de Honduras.
- Cerquera, Jennifer (2015). *Normalización de Buenas Prácticas Agrícolas*. Fusagasugá: Universidad de Cundinamarca.
- Ciro, Piedad; Villegas, Bernardo (2009). *Mis Buenas prácticas agrícolas. Guía para agroempresarios*. Bogotá, Colombia: ICA.
- Cofre, Gabriela; Riquelme, Iván; Engler, Alejandra; Jara-Rojas, Roberto (2012). Adopción de Buenas Prácticas Agrícolas (BPA): costo de cumplimiento y beneficios percibidos entre productores de fruta fresca. *Idesia*, 30(3), 37-45.
- Food and Agriculture Organization (2012). *Manual para el Productor Hortofrutícola Buenas Prácticas Agrícolas*. Santiago: Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura.
- Iconix Brand Group (2016). *Manual Introductorio de Iconix*.
<http://ima.udg.edu/~sellares/EINF-ES2/Present1011/MetodoPesadesICONIX.pdf>
- Instituto Colombiano Agropecuario (2017). *Resolución 030021*. Bogotá: Instituto Colombiano Agropecuario.
- Izquierdo, Juan; Rodríguez, Marcos (2006). *Buenas Prácticas Agrícolas (BPA), en busca de sostenibilidad, competitividad y seguridad alimentaria. Resultados de la Conferencia Electrónica Regional. Grupo de Agricultura*. Santiago: Oficina Regional de la FAO para América Latina y el Caribe.
- Martínez, Cinthia; Sosa, Fredy; Garay, Cipriano (2012). *Manual de establecimiento de cultivos*. El Zamorano: Secretaría de Educación de Honduras.
- Molich, Rolf; Nielsen, Jakob (1990). Improving a human-computer dialogue. *Communications of the ACM* 33(3). 338-348. <https://doi.org/10.1145/77481.77486>

MySQL.com. (2021). *Manual MySQL*. Recuperado de:
<https://www.mysql.com/about>

Nielsen, Jakob (1994). *Enhancing the explanatory power of usability heuristics*. In: CHI '94: Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems (152-158). Boston, MA.
<https://doi.org/10.1145/191666.191729>

Nielsen, Jakob; Molich, Rolf (1990). *Heuristic evaluation of user interfaces*. In: CHI '90: Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems (249-256). Seattle, WA, EE.UU.
<https://doi.org/10.1145/97243.97281>

Pacheco, Anita (2005). *Buenas prácticas agrícolas sistema de aseguramiento de la inocuidad de los alimentos*. Bogotá: Instituto Colombiano Agropecuario.

Rincón, Nidia; Figueredo, Cesar; Salazar, Nubia (2015). Impacto de la aplicación de la norma GlobalGAP, en el sector agroalimentario Latinoamericano. *Rev. Colomb. Investig. Agroindustriales*, 2(1), 84-97.
<http://dx.doi.org/10.23850/24220582.173>

Rosenberg, Doug; Scott, Kendall (1999). *Applying Use Case Driven Object Modeling with UML: an Annotated e-Commerce Example*. Boston, MA: Addison-Wesley.

Rumbaugh, James; Jacobson, Ivar; Booch, Grady (2004). *The Unified Modeling Language Reference Manual*. Boston, MA: Addison-Wesley.

Teixeira, Pedro (2012). *Professional Node.js: Building Javascript Based Scalable Software*. Indianapolis, Indiana: Wiley.

Recubrimientos con cera de abeja, extractos de ajo y sauce para aumentar la vida postcosecha del banano Gran Enano

Beeswax coating, garlic, and willow extracts as preservatives for banana Grand Naine

Luis Cruz-Ortiz¹
Kimberly Escobar-Ventura²
Mariana Flores-Méndez³
Marcos Urbina-Reyes⁴
Alfredo Vázquez-Ovando⁵

¹Universidad Autónoma de Chiapas (México). Correo electrónico: cruzortizluisangel@gmail.com
orcid: <https://orcid.org/0000-0001-5013-3985>

²Universidad Autónoma de Chiapas (México). Correo electrónico: rositha07_jah@outlook.com

³Universidad Autónoma de Chiapas (México). Correo electrónico: marianafm44@gmail.com

⁴Universidad Autónoma de Chiapas (México). Correo electrónico: murbinar@unach.mx

⁵Universidad Autónoma de Chiapas (México). Correo electrónico: jose.vazquez@unach.mx
orcid: <https://orcid.org/0000-0003-1397-3349>

Recibido: 22/04/2021 Aceptado: 30/08/2021

Cómo citar: Cruz-Ortiz, Luis; Escobar-Ventura, Kimberly; Flores-Méndez, Mariana; Urbina-Reyes, Marcos; Vázquez-Ovando, Alfredo (2021). Recubrimientos con cera de abeja, extractos de ajo y sauce para aumentar la vida postcosecha del banano Gran Enano. *Informador Técnico*, 85(2), 172 - 183.
<https://doi.org/10.23850/22565035.3685>

Resumen

El objetivo de este trabajo fue evaluar el efecto de la cera de abeja como recubrimiento, y la aplicación de extractos de ajo y sauce en la conservación de banano Cavendish clon Gran Enano. Se emplearon 200 frutos sanos y en madurez fisiológica (40 por tratamiento) para ser sometidos a 5 tratamientos: T1 = testigo, T2 = cera de abeja, T3 = extracto de sauce 1:10 p/v, T4 = extracto de ajo 1:10 p/v, T5 = extracto de ajo combinado con cera de abeja. Los frutos tratados se almacenaron a temperatura ambiente. Cada 48 h se registró pérdida de peso (%), fructosa (°Brix), sólidos solubles totales (SST, °Brix), sacarosa (°Brix), color de la cáscara (G), firmeza (N), pH y acidez titulable (AT, %). Además, se realizó evaluación sensorial cuando los frutos alcanzaron la madurez de consumo. Todos los frutos tratados (T2-T5) mantuvieron el color verde durante el período de estudio. El uso de extracto de ajo y cera de abeja de manera individual y combinada ayudó a mantener por más tiempo la vida de anaquel de los frutos. El uso de extractos de sauce y de ajo dio como resultado frutos más dulces, con mayor olor a banano y miel, y con mayor masticabilidad. El uso de cera de abeja para recubrir frutos, así como de extractos de ajo y sauce, de manera individual y combinada, permite mantener por más tiempo las características físicas químicas y sensoriales de banano clon Gran Enano.

Palabras clave: firmeza; maduración; masticabilidad; pérdida de peso; postcosecha.

Abstract

The main objective was to evaluate the effect of beeswax as a coating, and the application of garlic and willow extracts in the conservation of the Cavendish banana clone Gran Naine. Two hundred healthy and mature green

fruits (40 per treatment) were used to undergo 5 treatments: T1 = control, T2 = beeswax, T3 = aqueous extract of willow 1:10 w/v, T4 = aqueous extract of garlic 1:10 w/v, T5 = aqueous extract of garlic combined with beeswax. The fruits were stored at room temperature. Weight loss (%), fructose (°Brix), total soluble solids (SST, °Brix), sucrose (°Brix), peel color (G), firmness (N), pH and titratable acidity (TA, %) were measured every 48 h. In addition, a sensory evaluation was performed when the fruits reached full maturity. All the treated fruits (T2-T5) maintained the green color during the study period. The use of garlic extracts (T3) and beeswax (T2) alone and in combination (T5) helped to maintain the shelf life of the fruits for longer. The use of aqueous extracts of willow and garlic resulted in sweeter fruits, with a greater smell of banana and honey, and with greater chewiness. The use of beeswax to coat fruits, as well as aqueous extracts of garlic and willow, individually and in combination, allows the physical, chemical, and sensory characteristics of the banana Gran Naine to be maintained for a longer time.

Keywords: firmness; maturation; chewiness; weight loss; postharvest.

1. Introducción

Las frutas climatéricas después de ser cosechadas continúan llevando a cabo sus procesos fisiológicos hacia la madurez comercial y también se encuentran expuestas a cambios o alteraciones provocadas por la actividad metabólica de diversos microorganismos (Martínez-González *et al.*, 2017). El banano (*Musa* sp.) es la fruta más consumida en el mundo, tiene gran demanda en el mercado por sus propiedades nutricionales y por sus características sensoriales, que resultan atractivas para los consumidores (Ramírez; García; Lindorf, 2012). Sin embargo, existen factores que aceleran la maduración poscosecha, entre ellos se encuentran la transpiración, respiración, daños físicos y enfermedades. Por lo tanto, se necesita manejo poscosecha para aumentar su vida después de ser cortada de la planta. La técnica más usada de conservación es la aplicación de refrigeración por encima de 12 °C, temperatura por debajo de esta, ocasionan daño a las frutas por frío (Villarroel *et al.*, 2016). Otras estrategias que se emplean para este propósito son el uso de inhibidores del etileno o plaguicidas sintéticos; sin embargo, existe una tendencia actual de uso de productos más naturales, debido a que la refrigeración supone un costo de inversión que muchas veces no puede ser asumido por pequeños productores (Zambrano *et al.*, 2017).

Entre las estrategias de menor costo y mayor sostenibilidad ambiental, el uso de recubrimientos comestibles representa una opción que ha mostrado incrementar la vida poscosecha de los frutos, conservando sus características sensoriales y minimizando el deterioro (Sapper; Chiralt, 2018). Los recubrimientos reducen la tasa respiratoria, la pérdida de peso y la degradación del color de los frutos, también mantienen la firmeza y, en algunos casos mejoran el sabor de los frutos. Dentro de los materiales usados para elaborar recubrimientos están las ceras de abeja, las cuales se ha reportado que mejoran los atributos en las frutas, controlan el desarrollo de los microorganismos causantes del deterioro, mejoran el brillo, disminuyen la pérdida de peso y mantienen la firmeza de la pulpa por un tiempo más largo (Eshetu; Ibrahim; Forsido; Kuyu, 2019). Se han empleado en naranja dulce (Shahid; Abbasi, 2011), guayaba (Ishak *et al.*, 2013), mango (Eshetu *et al.*, 2019), banano (Villarroel *et al.*, 2016), y chontaduro (*Bactris gasipaes*) (Tosne; Mosquera; Villada, 2014), mostrando en todos los casos, resultados positivos en las características de calidad de los frutos.

En la literatura también existe información sobre el uso de extractos vegetales para este propósito. El extracto de ajo (*Allium sativum*) se ha reportado como conservador natural, el cual cuenta con la capacidad de controlar el desarrollo de microorganismos que deterioran los alimentos (Juárez-Segovia *et al.*, 2019; Vwioko; Osemwegie; Akawe, 2020), adicionalmente, se ha demostrado que tiene capacidad antioxidante por el contenido de azufre orgánico (alil-cisteína, aliína, disulfuro de dialilo, trisulfuro de dialilo, ajoeno y alicina) (Suárez; Castro; Borja, 2014; Mahmoud; Ahmed; Abbas; Soliman, 2018). Existen reportes de que los compuestos antioxidantes resultan útiles para la conservación (Ulloa, Aguilar-Pusian; Rosas-Ulloa; Galvís-Ortiz; Ulloa-Rangel, 2009), los que permiten aumentar considerablemente la vida útil de los frutos (Ashwini; Nikhita, 2016, 2018). Mahmoud

et al. (2018) reportaron que el uso de extracto hexánico de ajo aplicado en peras reduce la pérdida de peso, así como la pudrición, los contenidos de pectina soluble total y la actividad de pectinasas, peroxidasas y polifenol oxidasas, además aporta mayores valores de firmeza de la fruta. Por otro lado, se ha reportado que el extracto de sauce (*Salix babylonica*) tiene alto contenido de ácido salicílico (Cuéllar; Sehtman; Donatti; Allevato, 2008), cuyo uso puede disminuir la pérdida de peso, mantener la firmeza de la pulpa y disminuir la respiración de frutos en la poscosecha (Báez-Sañudo *et al.*, 2018). Hasta donde tenemos conocimiento, no existen reportes de la aplicación de extractos de sauce en frutos para conservar la vida poscosecha. Por lo antes mencionado, el objetivo de este trabajo fue evaluar el efecto de la cera de abeja los extractos acuosos de ajo y sauce en la vida poscosecha de frutos de banano Cavendish clon Gran Enano almacenados a temperatura ambiente.

2. Materiales y métodos

2.1. Material biológico y tratamientos

Se utilizaron hojas de sauce (*Salix babylonica*) maduras, obtenidas de árboles plantados en el municipio de Villa Comaltitlán, México. Se adquirieron comercialmente bulbos sanos y libres de impurezas de ajo (*Allium sativum* L.), ecotipo Blanco Criollo en el mercado local, y la cera de abeja fue obtenida de apiarios del ejido Rio Florido, Tapachula, México. Las frutas de banano (*Musa* sp.) en madurez fisiológica se obtuvieron de la finca “La Esperanza”, ubicada en Ciudad Hidalgo, Chiapas, México. Se seleccionaron 200 frutos provenientes del mismo lote de corte, de tamaño homogéneo, sanos (40 por tratamiento) y libres de defectos, para ser sometidos a 5 tratamientos: T1 = testigo (sin tratamiento), T2 = recubrimiento con cera de abeja, T3 = aplicación de extracto de sauce (1:10 p/v), T4 = aplicación de extracto de ajo (1:10 p/v), T5 = aplicación de extracto de ajo + recubrimiento con cera de abeja.

2.2. Preparación de extracto de sauce

Se tomaron 100 g de hojas de sauce recién colectadas y se lavaron con agua potable. Posteriormente, en un vaso de precipitados se pusieron 800 mL de agua destilada y se calentaron a 100 °C. Cuando se alcanzó la ebullición, se pusieron las hojas y se mantuvieron por 5 min, después se filtraron con gasas para separar los sólidos, esto posteriormente se aforó a 1000 mL con agua destilada. La infusión se almacenó en congelación a -8 °C hasta la aplicación (menos de 12 h).

2.3. Preparación de extracto de ajo

Se pesaron 10 g de ajo sin cubierta y se mezclaron con 100 mL de agua destilada, se dejaron reposar 12 h, posteriormente la mezcla se molió usando licuadora a baja velocidad durante 1 min. Se filtró la solución con gasas estériles para separar los residuos de los bulbos de ajo. El extracto se almacenó en congelación a -8 °C hasta la aplicación (menos de 12 h).

2.4. Preparación de la emulsión de cera de abeja

Se calentó agua destilada hasta una temperatura de 65 °C en un vaso de precipitados de 1000 mL, luego se agregaron trozos de cera, con un agitador de cristal se mezcló hasta fundirla en su totalidad, se filtró con gasas estériles para separar los sólidos contaminantes. Se dejó solidificar a temperatura ambiente. Posteriormente, se pesaron 11,5 g de cera, que se fundieron a 90 °C en un vaso de precipitados de 500 mL, se agregaron 25 g de ácido esteárico y 7,5 g de trietanolamina para garantizar la formación de la emulsión. Se agitó la mezcla a 150 rpm durante 30 min y finalmente, se agregaron 450 mL de agua destilada tibia. La emulsión fue preparada en el momento de su uso y se aplicó antes de la solidificación de la cera.

2.5. Aplicación de extractos y recubrimientos en frutos

Los frutos de banano fueron lavados con agua destilada, luego sumergidos en una solución de cloro al 0,3 % v/v por 1 min. Posteriormente fueron separados del racimo de manera individual con una hoja de bisturí estéril y aleatoriamente asignados a cada uno de los 5 tratamientos. Con ayuda de una gasa estéril, se aplicaron la infusión de sauge (T3) y el extracto de ajo (T4 y T5) sobre la piel de las frutas hasta humedecerlas completamente. Se dejaron secar a temperatura ambiente (28-30 °C) durante 60 min y finalmente, se aplicó la emulsión de cera de abeja (T2 y T5) usando el mismo procedimiento con ayuda de gasa estéril. Los frutos recubiertos se almacenaron en estantes en un cuarto con temperatura ambiente (promedio de 30 °C) y HR de 85 %.

2.6. Evaluaciones fisicoquímicas de los frutos tratados

Durante diez días se evaluó cada 48 horas, la pérdida de peso (%) tomando como base el peso inicial menos los pesos en las diferentes fechas de muestreo del almacenamiento, usando balanza digital Adventurer, modelo AV264C (NJ, EUA) (Pérez; Aristizábal; Restrepo, 2016). Se determinaron los contenidos de los sólidos solubles totales (SST °Brix) usando el refractómetro Pal-1 Atago 3810 (Japón); fructosa (°Brix) y sacarosa (°Brix), usando refractómetros de la marca Hanna, modelos HI 96802 y HI96801 (Italia), respectivamente; previo a la determinación, los refractómetros se calibraron con agua destilada, posteriormente se preparó una suspensión de pulpa en agua (10 g de pulpa en 100 mL de agua destilada), a la cual se midieron los °Brix. El color de la cáscara se midió usando la aplicación Colormeter (Vistech.projects, GA, EUA) del sistema operativo Android, colocando los frutos en un recipiente totalmente cerrado de 45 x 15 x 10 cm, iluminado de manera continua con una lámpara de 7 W, donde se registraron los valores de cromaticidad G (verde a amarillo). Como referencia, los valores de G alcanzan un máximo de 255 (verde) y tienden a disminuir con la pérdida del tono. La firmeza se midió con un penetrómetro de mano (Try, Italia), que se tomó de forma vertical haciendo presión sobre la fruta hasta penetrar la cáscara con pulpa, lo que arrojó resultados en Newtons. Para el pH, se pesaron 10 g de la fruta macerada por unidad experimental, se mezclaron con 100 mL de agua destilada; se realizó la lectura directa de la solución con un potenciómetro Hanna HI98130 (Italia). Para la acidez titulable (AT, %), se pesaron 5 g de pulpa, se diluyeron en 100 mL de agua destilada y se tituló el sobrenadante con NaOH 0,1 N, usando fenolftaleína como indicador; donde los resultados se expresaron como porcentaje de ácido málico. Los parámetros de pérdida de peso y color se midieron a todos los frutos que conformaban cada tratamiento, mientras que para los demás parámetros se emplearon tres frutos por cada muestreo y tres mediciones por cada fruto (9 mediciones por muestreo).

2.7. Evaluación sensorial

Cuando los frutos de banano alcanzaron la madurez de consumo (en días distintos, según el tratamiento), se realizó la evaluación sensorial con ayuda de 25 panelistas no entrenados (consumidores). Los panelistas fueron 12 mujeres y 13 hombres, estudiantes universitarios de entre 18 y 24 años. A cada panelista se le presentaron muestras de aproximadamente 5 g de pulpa de banano en vasos de plástico de 29,5 mL tapados herméticamente. Se les pidió que destaparon los recipientes y evaluaran cada uno de los siguientes atributos de sabor (dulce, acidez y afrutado), olor (fermentado, ácido, banano y miel) y textura (dureza, masticabilidad y cremosidad). Se entregó a cada panelista una hoja por cada tratamiento, en donde se pidió que calificaran en una escala de 1 (menor) a 7 (máximo) el nivel de intensidad percibido para cada descriptor.

2.8. Análisis de datos

Los datos obtenidos de las variables fisicoquímicas evaluadas se sometieron a análisis de varianza y posterior comparación de medias por la prueba de Tukey ($\alpha = 0,05$), usando el programa InfoStat v. 2016 (Di Rienzo *et al.*, 2011). Con los datos sensoriales, primeramente, se verificó la ausencia de efecto del tiempo de evaluación (distinto para cada tratamiento), considerando cada tiempo como bloque, mediante la prueba de Friedman.

Teniendo en cuenta que los bloques no influyen en el juicio de los panelistas, los datos fueron analizados mediante una prueba no paramétrica de Kruskal Wallis y, cuando fue requerido, se realizó comparación *post hoc* por la prueba de Tukey ($\alpha = 0,05$).

3. Resultados y discusión

Los frutos de todos los tratamientos perdieron peso a medida que avanzó el tiempo de almacenamiento; los tratamientos de cera de abeja (T2), extracto de sauce (T3), extracto de ajo (T4) y extracto de ajo combinado con cera de abeja (T5) mostraron resultados significativos con menos pérdida entre el 8-10 %, mientras el testigo tuvo 13,5 % a los 10 días de almacenamiento (Figura 1). La pérdida de peso es principalmente, consecuencia de la transpiración (migración de agua desde los espacios intercelulares hasta la cutícula), la disolución y difusión de las moléculas de agua a través de la membrana cuticular y la desorción en la superficie exterior (Suseno; Savitri; Sapei; Padmawijaya, 2014; Tosne *et al.*, 2014). Kader (2002) menciona que la pérdida de peso del 10 % es un valor aceptable para frutos de banano.

Los frutos tratados con extracto de ajo (T4) mostraron mayor firmeza a los 10 días de almacenamiento con 40 N, en comparación con los frutos del testigo (18 N, Figura 1). Todos los frutos tratados (T2-T5) mostraron mayor firmeza con relación a los no tratados (testigo) para todos los días de almacenamiento, lo cual da cuenta de la efectividad de la cera y los extractos usados para retrasar la actividad de enzimas implicadas en la pérdida de firmeza, a saber, hidrolasas como poligalacturonasa (PG), pectinmetilesterasa (PME), pectato liasa (PL) y celulasas en la pulpa del fruto (Cano *et al.*, 1997; Imsabai; Ketsa; Van Doorn, 2006). Los valores de color de los frutos tratados se mantuvieron en un índice de cromaticidad G de 179-220, mientras que los del tratamiento testigo (T1) llegaron a valores bajos de 120, donde los valores menores fueron indicativos de mayor tono amarillo. El cambio de color que ocurre en la corteza de las frutas de banano durante la maduración se debe a la degradación de clorofila y desenmascaramiento de carotenoides en los plástidos (Clendennen; May, 1997; Yang; Song; Fillmore; Pang; Zhang, 2011). La acción de enzimas clorofilasas conlleva al desarrollo de coloración amarilla en la corteza, debido al desenmascaramiento y síntesis de *novο* de carotenoides (Castro; Jerz; Winterhalter; Restrepo, 2007).

Así mismo, los frutos tratados con cera de abeja (T2) y extracto de ajo combinado con cera de abeja (T5) mostraron menores contenidos de fructosa y SST, mientras que los frutos tratados con extracto de ajo (T4), cera de abeja (T2), o extracto de ajo combinado con cera de abeja (T5) obtuvieron los menores contenidos de sacarosa (Figura 2). El contenido de SST aumentó a partir del día 4 en los frutos no tratados (testigo), y después del día 8 en los frutos tratados (T2-T5). Este comportamiento se debe a la hidrólisis del almidón a azúcares a través del metabolismo primario para entregar sustrato respiratorio para las actividades biológicas de la fruta con el consiguiente aumento de dulzor (Passos, Mendes; Cunha; Pigozzi; Carvalho, 2016).

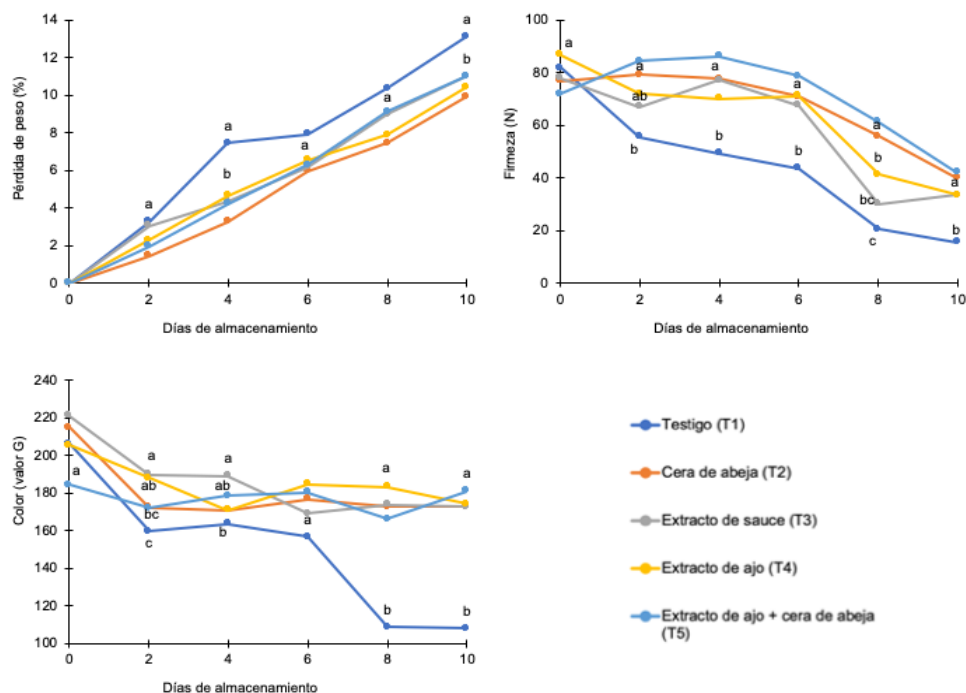


Figura 1. Comportamiento de la pérdida de peso, color de la cáscara (G), y firmeza (N) de los frutos de banano clon Gran Enano almacenados durante 10 días a temperatura ambiente.
Fuente: elaboración propia.

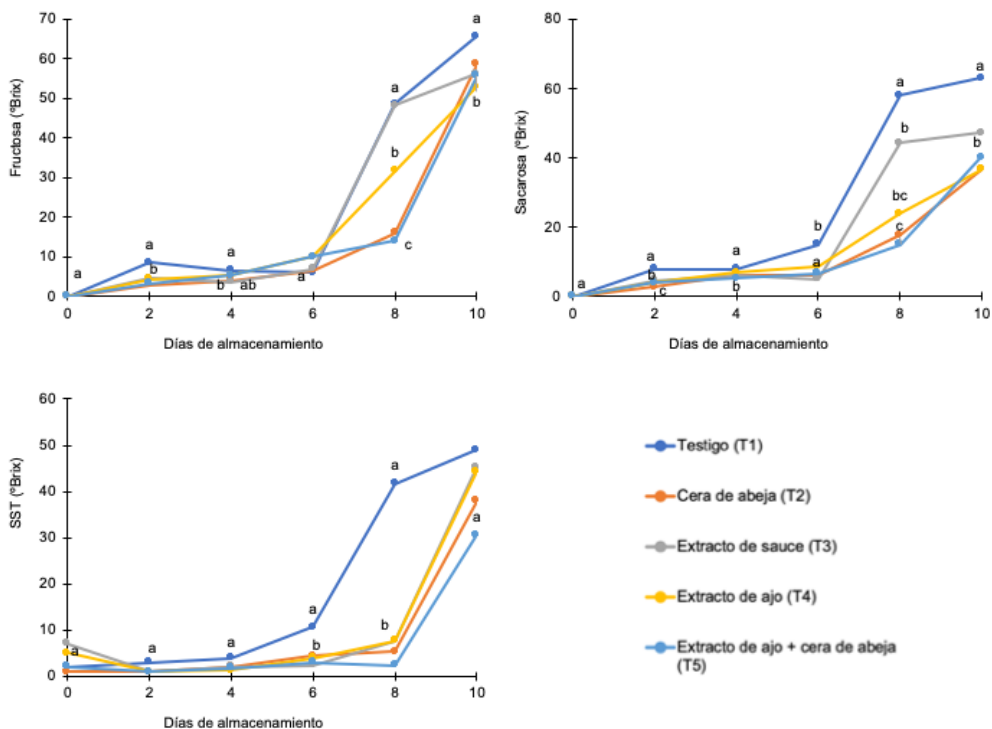


Figura 2. Dinámica de fructosa, sacarosa y sólidos solubles (°Brix) la pulpa de banano clon Gran Enano almacenados durante 10 días a temperatura ambiente.
Fuente: elaboración propia.

Los frutos recubiertos con cera de abeja (T2) y los tratados con extracto de ajo y cera de abeja (T5) presentaron valores bajos de AT a los 8 días de almacenamiento (Tabla 1), comparados con los reportados por García, Balaguera-López y Herrera (2012) en banano Bocadillo, cuyo valor fue de 0,32 %. Los valores de pH más altos se encontraron en los frutos tratados con extracto de ajo combinado con cera de abeja (T5) a los 8 días de almacenamiento, en un rango de 6,5 y 7 (Tabla 2). Estos datos son muy diferentes a los reportados en bananos Williams y Orito con pH de 5,22 y 4,93, respectivamente (Villarreal *et al.*, 2016). Botrel, Freire, Vasconcelos y Barbosa (2002), así como Silva *et al.* (2006) mencionan que los valores oscilaron entre 4,7 y 4,82 y entre 4,2 y 5,3, respectivamente. Lo anterior denota que el pH de la pulpa de los bananos de la variedad Gran Enano no sufre grandes variaciones durante la maduración comercial, y que los valores son más básicos en comparación con otras variedades.

Tabla 1. Contenido de ácido málico (%) medido como acidez titulable de la pulpa de banano clon Gran Enano tratado con diferentes estrategias de conservación poscosecha.

Días	Ácido málico (%)				
	Testigo (T1)	Cera de abeja (T2)	Extracto de sauce (T3)	Extracto de ajo (T4)	Extracto de ajo y cera de abeja (T5)
0	0,04±0,04 a	0,05±0,05 a	0,04±0,04 a	0,06±0,05 a	0,02±0,02 a
2	0,17±0,01 a	0,15±0,02 a	0,13±0,03 a	0,16±0,01 a	0,13±0,02 a
4	0,10±0,01 b	0,06±0,01 a	0,08±0,00 ab	0,10±0,01ab	0,08±0,02 ab
6	0,10±0,03 a	0,07±0,02 a	0,08±0,01 a	0,08±0,00 a	0,05±0,00 a
8	0,30±0,02 c	0,15±0,02 a	0,28±0,01 c	0,21±0,01 b	0,13±0,03 a
10	0,32±0,02 a	0,29±0,01 a	0,29±0,07 a	0,25±0,02 a	0,29±0,02 a

^{a-b} Valores seguidos con letras diferentes denotan diferencia significativa ($p < 0,05$) entre tratamientos de acuerdo con un diseño completamente al azar.

Fuente: elaboración propia.

Tabla 2. Evolución del pH de la pulpa de banano clon Gran Enano tratado con distintas estrategias y conservado en condiciones ambientales.

Días	pH				
	Testigo (T1)	Cera de abeja (T2)	Extracto de sauce (T3)	Extracto de ajo (T4)	Extracto de ajo y cera de abeja (T5)
0	6,45±0,17 a	6,32±0,05 a	6,915±0,14 a	7,01±0,14 a	6,29±0,00 a
2	5,94±0,03 a	6,31±0,03 d	6,08±0,03 ab	6,27±0,03 cd	6,15±0,03 bc
4	6,36±0,22 b	6,01±0,09 a	5,89±0,05 a	5,80±0,07 a	5,94±0,07 a
6	5,73±0,32 a	6,05±0,07 a	5,98±0,07 a	5,73±0,32 a	6,21±0,12 a
8	6,24±0,06 a	6,77±0,16 b	6,4±0,13 ab	6,75±0,24 b	7,20±0,09 c
10	6,75±0,15 a	6,48±0,03 a	6,65±0,30 a	6,51±0,05 a	6,47±0,18 a

^{a-c} Valores seguidos con letras diferentes denotan diferencia significativa ($p < 0,05$) entre tratamientos de acuerdo con un diseño completamente al azar.

Fuente: elaboración propia.

Aunque a partir del día 6 se mostraron cambios en el color de los frutos (Figura 1), la maduración completa se alcanzó hasta los 12 días para el tratamiento testigo (T1), cera de abeja (T2) al día 17, extracto de sauce (T3) al día 14, extracto de ajo (T4) al día 16, y extracto de ajo y cera de abeja (T5) hasta el día 18 de almacenamiento a temperatura ambiente (datos no mostrados). El aspecto visual de los frutos a los 14 días de almacenamiento se muestra en la Figura 3. Sanwal y Payasi (2007) usaron extracto de ajo combinado con metabisulfito de sodio para alargar la vida útil del banano 14 días en comparación con el testigo, que maduró a los 7 días. Así, también Banjoko, Olatidoye, Oyelola, Ajibosin y Adebayo (2019) demostraron que, usando jengibre combinado con extracto de ajo, se alarga la vida útil de banano hasta los 16 días en comparación con el testigo que maduró a los 6 días.



Figura 3. Frutos de banano clon Gran Enano tratados con distintas estrategias después de 14 días de almacenamiento a condiciones ambientales.

Fuente: elaboración propia.

Los frutos tratados con extracto de sauce (T3) y extracto de ajo (T4) obtuvieron el sabor más dulce, y mayor olor a banano y miel (Figura 4). Para los sabores afrutado y fermentado, no se encontró diferencia significativa ($p > 0,05$) entre tratamientos, así también para dureza, masticabilidad y cremosidad. Los frutos recubiertos con extracto de ajo combinados con cera de abeja (T5) tuvieron valores altos en sabor y olor para el atributo ácido, lo cual, sin embargo, no correlaciona del todo con los valores encontrados para la AT (Tabla 1). Tres de los cuatro tratamientos aplicados a los frutos no mostraron efecto negativo sobre la mayoría de los descriptores evaluados a los frutos de banano Gran Enano, a excepción de los tratados con cera de abeja (T2), los cuales resultaron un poco menos dulces, con menor olor a banano y ligeramente más ácidos, lo cual puede deberse a que el proceso normal de la maduración se vio alterado por interrupción en la transferencia de gases (Passos *et al.*, 2016). Al observar los resultados sensoriales desde la perspectiva global, los tratamientos con extractos de ajo (T3) y extracto de sauce (T4) tienden a tener mejor aceptabilidad, lo que se refleja en mejores evaluaciones; lo anterior coincide con los reportado por Banjoko *et al.* (2019), quienes obtuvieron mayor aceptabilidad usando extracto de jengibre en banano.

Se presume que los extractos de ajo y sauce tienen capacidad antioxidante, por eso se deduce que al usarlo como recubrimiento mejora la apariencia de los frutos (Suárez *et al.*, 2014). Hay muchos antioxidantes que alargan la vida útil de los frutos, como el ácido salicílico, ácido cítrico, ácido láctico, fenoles y flavonoides (Báez-Sañudo *et al.*, 2018). Además, se ha usado extracto de ajo para controlar microorganismos que dañan a los alimentos y alarga su la vida útil de los mismos (Bender-Bojalil; Bárcenas-Pozos, 2013). Los recubrimientos con cera de abeja hacen una barrera en los frutos y disminuyen el intercambio de gases, manteniendo las frutas hidratadas, y disminuyendo la pérdida de peso por más tiempo, además la cera se ha reportado como agente antiséptico (García *et al.*, 2012).

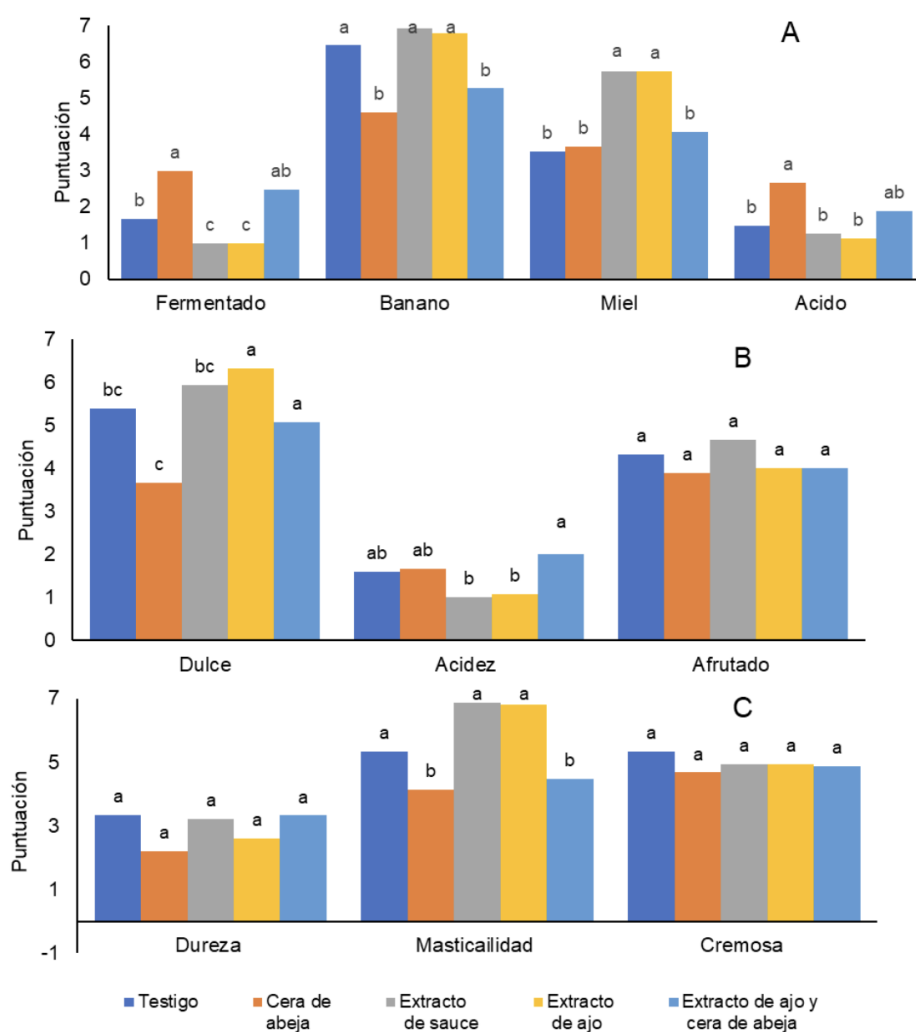


Figura 4. Evaluación sensorial de los atributos de olor (A), sabor (B) y textura (C) en pulpa de banano Gran Enano almacenados durante 10 días a temperatura ambiente.

Nota: Letras desiguales demuestran diferencias significativas entre tratamientos (prueba de Tukey, $p > 0,05$)

Fuente: elaboración propia.

4. Conclusiones

Los cuatro tratamientos evaluados lograron aumentar la vida útil de banano clon Gran Enano en comparación con el testigo, en distinto grado. La combinación de extracto de ajo y recubrimiento con cera de abeja permite mantener por más tiempo la vida de anaquel de los frutos. Los extractos de sauce y de ajo usados de manera individual permiten tener frutos con mejores características sensoriales. El uso de extractos de ajo y sauce y el recubrimiento con cera de abejas se pueden posicionar como alternativas de conservación de frutos frescos.

5. Referencias

- Ashwini, M.; Nikhita, Desai (2018). Biopreservative effect of plant extracts on the shelf life of mango cv Raspuri. *Journal of Pharmacognosy and Phytochemistry*, 7(6), 2245-2248.
- Ashwini, M.; Nikhita, Desai (2016). Biopreservation of guava by plant extracts. *Journal of Pure and Applied Microbiology*, 10(4), 2975-2980.
<http://doi.org/10.22207/JPAM.10.4.66>
- Báez-Sañudo, Reginaldo; Mercado-Ruiz, Jorge; García-Robles, Jesús; Valle-Sotelo, Edith; Falcón-Verdugo, Luis; Martínez-Gárate, Alonso; Herrera-Cebreros, Jesús; Anaya-Dyck, José (2018). Ácido acetilsalicílico y cubiertas comestibles para la conservación de frutos: Tomate como modelo. *Revista Iberoamericana de Tecnología Postcosecha*, 19(1), 74-87.
- Banjoko, I. O.; Olatidoye, Olawale; Oyelola, A. O.; Ajibosin, O. A.; Adebayo, Sijuwade (2019). Influence of aqueous extract of ginger and garlic on shelf life studies of plantain fingers (*Musa paradisiacal*) at ambient and refrigerated conditions. *EC Nutrition*, 14(3), 301-308.
- Bender-Bojalil, Denise; Bárcenas-Pozos, María (2013). El ajo y sus aplicaciones de alimentos. *Temas Selectos de Ingeniería de Alimentos*, 7(1), 25-36.
- Botrel, Neide; Freire, Murilo; Vasconcelos, Rafaela; Barbosa, Henriqueta (2002). Inibição do amadurecimento da banana-‘prata-anã’ com a aplicação do 1-metilciclopropeno. *Revista Brasileira de Fruticultura*, 24(1), 53-56.
<https://doi.org/10.1590/S0100-29452002000100012>
- Cano, Pilar; Ancos, Begoña; Matallana, María; Cámara, Montaña; Reglero, Guillermo; Tabera Javier (1997). Differences among Spanish and Latin-American banana cultivars: morphological, chemical and sensory characteristics. *Food Chemistry*, 59(3), 411-419.
[https://doi.org/10.1016/S0308-8146\(96\)00285-3](https://doi.org/10.1016/S0308-8146(96)00285-3)
- Castro, B.; Jerz, G.; Winterhalter, P.; Restrepo, R. (2007). Degradación de la clorofila en la corteza del baby banano (*Musa acuminata*) durante diferentes estados de maduración. En *Memorias VIII Congreso Nacional del Color* (pp. 19-21). Cartagena: Red Alfa Agrotech.
- Clendennen, Stephanie; May, Gregory (1997). Differential gene expression in ripening banana fruit. *Plant Physiology*, 115(2), 463-469.
<https://doi.org/10.1104/pp.115.2.463>
- Cuéllar, Liliana; Sehtman, Ariel; Donatti, Lucila.; Allevato, Miguel (2008). Ácido salicílico. *Acta Terapéutica Dermatológica*, 31, 108-112.
- Di Rienzo, J. A.; Casanoves, F.; Balzarini, M. G.; Gonzalez, L.; Tablada, M.; Robledo, C. W. (2011). *Infostat versión 2016*. Grupo InfoStat, FCA. Córdoba: Universidad Nacional de Córdoba, Argentina.
- Eshetu, Abonesh; Ibrahim, Ali; Forsido, Sirawdink; Kuyu, Chala (2019). Effect of beeswax and chitosan treatments on quality and shelf life of selected mango (*Mangifera indica* L.) cultivars. *Heliyon*, 5(1), e01116.
<https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2018.e01116>
- García, Juan; Balaguera-López, Helber; Herrera, Aníbal (2012). Conservación del fruto de banano bocadillo (*Musa AA Simmonds*) con la aplicación de permanganato de potasio (KMnO₄). *Revista Colombiana de Ciencias Hortícolas*, 6(2), 161-171.
<https://doi.org/10.17584/rcch.2012v6i2.1974>

- Ishak, Ruzaina; Norizzah, A.; Halimahton, M.; Cheow, C.; Sikin, Adi; Noorakmar, A.; Mohd, Adi (2013). Utilisation of palm-based and beeswax coating on the postharvest-life of guava (*Psidium guajava* L.) during ambient and chilled storage. *International Food Research Journal*, 20(1), 265-274.
- ImSabai, Wachiraya; Ketsa, Saichol; Van Doorn, Wouter (2006). Physiological and biochemical changes during banana ripening and finger drop. *Postharvest Biology and Technology*, 39(2), 211-216.
<https://doi.org/10.1016/j.postharvbio.2005.10.001>
- Juárez-Segovia, K.; Díaz-Darcía, E.; Méndez-López, M.; Pina-Canseco, M.; Pérez-Santiago, A.; Sánchez-Medina, M. (2019). Efecto de extractos crudos de ajo (*Allium sativum*) sobre el desarrollo *in vitro* de *Aspergillus parasiticus* y *Aspergillus niger*. *Polibotánica*, 47(8), 99-111.
<https://doi.org/10.18387/POLIBOTANICA.47.8>
- Kader, Adel (2002). *Postharvest technology of horticultural crops* (3ra ed.). Berkeley: Universidad de California.
- Mahmoud, Gehan; Ahmed, Samar; Abbas, Mohamed; Soliman, Amira (2018). Effect of garlic and onion extracts as a preharvest applications on the post-harvest quality and oxidative enzyme activity of pearfruit during cold storage. *Journal of Biological Chemistry & Environmental Science*, 13(4), 329-356.
- Martínez-González, Mónica; Balois-Morales, Rosendo; Alia-Tejacal, Irán; Cortes-Cruz, Moises; Palomino-Hermosillo, Yolotzin; López-Gúzman, Graciela (2017). Poscosecha de frutos: maduración y cambios bioquímicos. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 19, 4075- 4087.
<https://doi.org/10.29312/remexca.v0i19.674>
- Passos, Flavia; Mendes, Fabricia; Cunha, Mariana; Pigozzi, Mariana; Carvalho, André (2016). Propolis extract in postharvest conservation banana 'prata'. *Revista Brasileira de Fruticultura*, 38(2), e-931.
<https://doi.org/10.1590/0100-29452016931>
- Pérez, Andrés; Aristizábal, Iván; Restrepo, Jorge (2016). Conservación de mango tomy Atkins mínimamente procesado mediante la aplicación de un recubrimiento de aloe vera (*Aloe barbandensis* Miller). *Revista de la Facultad de Ciencias Farmacéuticas y Alimentarias*, 23(1), 65-77.
<http://doi.org/10.17533/udea.vitae.v23n1a07>
- Ramírez, Maribel; García, Eva; Lindorf, Helga (2012). Análisis de patrones morfológicos y anatómicos en la embriogénesis somática del banano Williams (AAA). *Revista Colombiana de Biotecnología*, 14(1), 41-52.
- Sanwal, Girdhay; Payasi, Anarag (2007). Garlic extract plus sodium metabisulphite enhances shelf life of ripe banana fruit. *International Journal of Food Science and Technology*, 42(3), 303-311.
<https://doi.org/10.1111/j.1365-2621.2006.01222.x>
- Sapper, Mayra; Chiralt, Amparo (2018). Starch-based coatings for preservation of fruits and vegetables. *Coatings*, 8(152), 2-20.
<https://doi.org/10.3390/coatings8050152>
- Shahid, Muhammad; Abbasi, Nadeem (2011). Effect of bee wax coatings on physiological changes in fruits of sweet orange CV. "blood red". *Sarhad Journal of Agriculture*, 27(3), 385-394.
- Silva, Cíntia; Lima, Luciana; Santos, Haydee; Camili, Elisangela; Vieira, Cássia; Martin, Cristhiane; Vieites, Rogério (2006). Amadurecimento da banana-prata climatizada em diferentes dias após a colheita. *Ciência e Agrotecnologia*, 30(1), 103-111.
<https://doi.org/10.1590/S1413-70542006000100015>
- Suárez, Silvia; Castro, Américo; Borja, Neptalí (2014). Actividad antioxidante in vitro de un extracto acuoso de *Allium Sativum* variedad Huaralino. *Revista de la Sociedad Química del Perú*, 30(4), 308-316.

- Suseno, Natali; Savitri, Emma; Sapei, Lnny; Padmawijaya, K. (2014). Improving shelf-life of Cavendish banana using chitosan edible coating. *Procedia Chemistry*, 9, 113-120.
<https://doi.org/10.1016/j.proche.2014.05.014>
- Tosne, Zulma; Mosquera, Silvio; Villada, Héctor (2014). Efecto de recubrimiento de almidón de yuca y cera de abejas sobre el chontaduro. *Biotecnología en el Sector Agropecuario y Agroindustrial*, 12(2), 30-39.
- Ulloa, José; Aguilar-Pusian, J.; Rosas-Ulloa, Petra; Galavíz-Ortíz, K.; Ulloa-Rangel, B. (2009). Effect of soaking conditions with citric acid, ascorbic acid and potassium sorbate on the physicochemical and microbiological quality of minimally processed jackfruit. *CYTA-Journal of Food*, 8(3), 193-199.
<https://doi.org/10.1080/19476330903348791>
- Villarroel, José; Zambrano, Margott; Abasolo-Pacheco, Fernando; Pico, Luis; Pico, Boívar; Moreira, Mercedes (2016). Uso de ceras naturales como medio de conservación de banano (*Musa acuminata*). *Biotecnia*, 19(1), 3-9.
<https://doi.org/10.18633/biotecnia.v19i1.362>
- Vwioko, Dennis; Osemwegie, Omorefosa; Akawe, Juliet (2020). The effect of garlic and ginger phytonics on the shelf life and microbial contents of homemade soursop (*Annona muricata* L.) fruit juice. *Biokemistri*, 25(2), 31-38.
<https://www.ajol.info/index.php/biokem/article/view/94976>
- Yang, Xiaotang; Song, Jung; Fillmore, Shery; Pang, Xuequn; Zhang, Zhaoqi (2011). Effect of high temperature on color, chlorophyll fluorescence and volatile biosynthesis in green-ripe banana fruit. *Postharvest Biology and Technology*, 62(3), 246-257.
<https://doi.org/10.1016/j.postharvbio.2011.06.011>
- Zambrano, Judit; Valera, Anne; Maffei, Miguel; Materano, Willian; Quintero, Ibis; Graterol, Karen (2017). Efecto de un recubrimiento comestible formulado con mucílago del cactus (*Opuntia elatior* Mill.) sobre la calidad de frutos de piña mínimamente procesados. *Bioagro*, 29(2), 129-136.

Principales NTC y protocolos de caracterización en productos derivados de caña de azúcar

Main NTC and characterization protocols in products derived from sugar cane

Leonardo Moreno-Chacón¹
Diego Suarez- Peñaranda²

¹Servicio Nacional de Aprendizaje SENA; Universidad Industrial de Santander (Colombia).
Correo electrónico: anlmoreno@sena.edu.co; almorenoch@unal.edu.co
orcid: <https://orcid.org/0000-0002-1402-6178>

²Servicio Nacional de Aprendizaje SENA (Colombia). Correo electrónico: dfsuareszp@sena.edu.co
orcid: <https://orcid.org/0000-0002-3139-4239>

Recibido: 15-03-2021 Aceptado: 11-08-2021

Cómo citar: Moreno-Chacón, Leonardo; Suarez- Peñaranda, Diego (2021). Principales NTC y protocolos de caracterización en productos derivados de caña de azúcar. *Informador Técnico*, 85(2), 184-218.
<https://doi.org/10.23850/22565035.3631>

Resumen

Los productos derivados de la caña de azúcar (*Saccharum officinarum* L) conforman una de las agroindustrias rurales de mayor tradición en Colombia. Con el fin de establecer los principales indicadores y protocolos que permitan la caracterización bromatológica, fitoquímica y antioxidante de productos derivados de *S. officinarum*, se realizó un rastreo bibliográfico a través de la base documental del Icontec y Scopus, en el periodo comprendido entre enero de 1990 y febrero de 2021. Lo anterior, bajo lineamientos que permitieran establecer un panorama mundial sobre las tendencias de investigación y desarrollo, análisis de productos finales e identificación de los principales protocolos normalizados y no normalizados. Fue así como se lograron identificar las principales NTC (Normas Técnicas Colombianas) y los protocolos más empleados para la cuantificación de los indicadores fisicoquímicos y de algunos metabolitos de interés, confirmando y estableciendo sus efectos positivos para la salud animal y humana, como potenciador inmunológico, antitóxico, citoprotector, anticariógeno y antioxidante. Adicionalmente, se logró determinar que los metales pesados (plomo, mercurio, cadmio, arsénico), furfural, 5-hidroximetilfurfural y acrilamida son los principales contaminantes sobre los cuales se debe establecer una estrategia de mitigación. Con esto, se hace evidente la necesidad de generar una política nacional que posibilite cuantificar los indicadores fisicoquímicos exigidos, el contenido de compuestos bioactivos y la presencia de contaminantes peligrosos en los productos derivados de la caña de azúcar, con el fin de dar cumplimiento a la normativa legal para la distribución y comercialización de productos azucarados en el mercado nacional e internacional y, por qué no, iniciar su diversificación.

Palabras clave: acrilamida; anticancerígeno; antioxidante; metales pesados; panela; *Saccharum officinarum* L.

Abstract

Products derived from sugar cane (*Saccharum officinarum* L) make up one of the rural agro-industries with the longest tradition in Colombia. In order to establish the main indicators and protocols that allow the bromatological, phytochemical and antioxidant characterization of products derived from *S. officinarum*, a bibliographic search was carried out through the Icontec and Scopus documentary bases, in the period between January of 1990 and

February 2021. The foregoing, under guidelines that would allow establishing a global panorama on research and development trends, analysis of final products and identification of the main standardized and non-standardized protocols. This is how it was possible to identify the main CTS (Colombian Technical Standards) and the most used protocols for the quantification of physicochemical indicators and of some metabolites of interest, confirming and establishing their positive effects for animal and human health, as an immunological enhancer, antitoxic, cytoprotective, anticariogenic and antioxidant. Additionally, it was possible to determine that heavy metals (lead, mercury, cadmium, arsenic), furfural, 5-hydroxymethylfurfural and acrylamide are the main pollutants on which a mitigation strategy should be established. With this, it becomes evident the need to generate a national policy that makes it possible to quantify the required physicochemical indicators, the content of bioactive compounds and the presence of dangerous contaminants in products derived from sugar cane, in order to comply with the legal regulations for the distribution and commercialization of sugary products in the national and international market and, why not, start their diversification.

Keywords: acrylamide; anticancer; antioxidant; heavy metals; panela; *Saccharum officinarum* L.

1. Introducción

En las décadas recientes, la inserción en el mercado internacional de productos agroindustriales de origen colombiano ha sido uno de los principales objetivos del Gobierno Nacional y de los gobiernos regionales. La cadena agroindustrial rural de los productos derivados de caña de azúcar merece atención, y que se le ofrezcan planes y posibilidades de mejora, de tal forma que las pequeñas unidades productivas agrícolas puedan mantener, optimizar o aumentar su participación en los mercados de una manera más dinámica, sostenible y rentable, mediante la realización de actividades de transformación e incorporación de valor a las materias primas agrícolas que generan.

De la caña de azúcar se elaboran diferentes tipos de productos, entre los más representativos se encuentran mieles crudas de caña, mieles refinadas de caña, melazas, miel para fermentación alcohólica, panela en bloque, panela pulverizada, panela en cubos, azúcar sin refinar, azúcar refinada, batidos, entre otros (Jaffé, 2012). Cada uno de ellos tiene unas características de elaboración, empaque y de procesamiento diferentes, pero no existe claridad sobre los requerimientos para su comercialización legal y segura, cada empresa que compra impone sus requerimientos y precio.

Las Normas Técnicas Colombianas (NTC) pueden dar un poco de luz sobre algunos parámetros mínimos de verificación para lograr una circulación segura de los productos, pero no se han difundido entre los productores, se encuentran desactualizadas, usan técnicas analíticas básicas y rudimentarias, entre otras desventajas; pero, sí son exigidas por entidades de regulación, como el Instituto Nacional de Vigilancia de Medicamentos y Alimentos (Invima), o por los compradores. Adicionalmente, estas NTC no exploran grupos de moléculas de interés creciente, como lo son fenoles, metabolitos antioxidantes, aminoácidos libres, entre otros; así mismo, no contemplan, por ejemplo, la cuantificación de furfural, 5-hidroximetilfurfural o acrilamida, moléculas tóxicas que se han detectado en algunos productos derivados de *S. officinarum*, sobre todo en los productos en los que, en su proceso de fabricación, se incrementa de forma considerable debido al poco control en la temperatura de procesamiento (Mesias; Delgado-Andrade; Gómez-Narváez; Contreras-Calderón; Morales, 2020).

Así mismo, es conocido que el sector productivo en nuestro país aún no tiene la cultura de calidad en sus procesos, implementa poco los sistemas normativos que permitan asegurar la inocuidad de los alimentos y cumplir con los estándares de calidad a través del análisis de sus productos. Según la Encuesta de Desarrollo e Innovación Tecnológica, EDIT (Departamento Administrativo Nacional de Estadística [DANE], 2013), que adelantó el Departamento Administrativo Nacional de Estadística (DANE), en el periodo 2005-2012, la cantidad de empresas que manifestaron haber obtenido algún tipo de certificación de calidad, bien sea de proceso o

de producto, se mantuvo por debajo del 25 % del total de empresas encuestadas. Una de las falencias que conllevan a esta situación es el bajo nivel de desarrollo de los servicios para la determinación de la calidad, como ensayos de laboratorio, calibración de equipos, normalización, acreditación, entre otros. Al presentarse deficiencias en la capacidad técnica de los laboratorios, se tiene como resultado una baja oferta de ensayos acreditados y concentración geográfica en ciudades capitales, lejos de los trapiches y centros de producción, lo cual incrementa los costos para los empresarios que desean garantizar la calidad de sus productos para comercializar en el territorio nacional o extranjero (Castro; Arboleda; Balcázar; Estupiñán, 2013; Consejo Nacional de Política Económica y Social [Conpes], 2016). De igual forma, en la EDIT (DANE, 2020) del periodo 2018-2019 se identifica como un obstáculo asociado al entorno, la baja oferta de servicios de inspección, pruebas, certificación y verificación por más del 50 % de las empresas encuestadas.

Lo anterior pone de manifiesto la necesidad de generar un programa estratégico nacional que posibilite cuantificar los indicadores exigidos en las diferentes NTC, así como otros parámetros fisicoquímicos, como el contenido de compuestos bioactivos y la presencia de contaminantes peligrosos en los productos derivados de la caña de azúcar, que se generan en diferentes regiones de Colombia, con el fin de dar cumplimiento a la normativa legal para la distribución y comercialización de productos azucarados en el mercado nacional e internacional, e iniciar la diversificación de sus usos. A continuación, se presentará una revisión de las NTC vigentes, y de los protocolos de caracterización bromatológica, nutricional, fitoquímicos y de capacidad antioxidante de productos derivados de *S. officinarum*, con el objeto de verificar su vigencia y posibilidad de renovación o modificación.

2. Metodología

La revisión de las NTC se realizó en la página del Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación, Icontec (2021), usando las siguientes palabras claves de rastreo: mieles de caña, caña de azúcar y panela. Por su parte, los reportes de investigación se rastrearon mediante fuentes primarias contenidas en la plataforma de bases de datos Scopus. Las palabras claves de cada aspecto explorado se reportan en la Tabla 1. El periodo de observación fue el comprendido entre enero de 1990 y febrero de 2021. Los criterios de selección aplicados para los artículos de investigación constaban de una serie de requerimientos donde eran necesarias al menos tres citaciones, una descripción de la técnica y metodología especificada, y que proporcionaran resultados cuantitativos y soportados por análisis estadísticos. Para los artículos de revisión y capítulos de libros, se estableció que las fuentes de los fundamentos teóricos no debían superar el rango temporal establecido.

Tabla 1. Palabras claves de cada una de las líneas generales de búsqueda en los aspectos explorados en mieles de caña y derivados de panela en la plataforma Scopus.

Líneas generales	Palabras claves
Determinación de tendencias mundiales de investigación y desarrollo, con énfasis en bromatológica, nutricional, fitoquímicos y de capacidad antioxidante.	Panela Muscovado Raw sugar Brown sugar Sugar cane Sugar cane extracts
Análisis de posibles productos finales, con énfasis en bromatológica, nutricional, fitoquímicos y de capacidad antioxidante.	Sugar cane products Sugar cane juice Crude sugarcane bagasse Sugarcane Straw
Identificación de las capacidades nacionales.	Evaluado dentro de las demás líneas generales, haciendo exploración de los reportes generados en Colombia.

Fuente: elaboración propia.

3. Resultados

A continuación, se presentan los resultados de la búsqueda realizada en las plataformas de datos Icontec y Scopus.

3.1. Normas Técnicas Colombianas

La búsqueda exclusiva de las NTC arrojó el listado de normas vigentes para los diferentes productos derivados de *S. officinarum*, que se encuentran en las Tablas 2 y 3. Estas normas se pueden clasificar en dos grupos, uno relacionado con la caracterización de parámetros fisicoquímicos y otro que busca establecer y medir la inocuidad microbiana del producto.

Dentro del primer tipo (Tabla 2) se destaca la NTC 1779:2017 (Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación [Icontec], 2017a), esta norma presenta el método de Lane y Eynon como forma de determinación de monosacáridos (azúcares reductores), se fundamenta en la capacidad de los monosacáridos para reducir una solución de cobre bajo condiciones básicas y de calentamiento, y usa como referencia The International Commission for Uniform Methods of Sugar Analysis-ICUMSA GS 4/3-7:2011 (International Commission for Uniform Methods of Sugar Analysis [ICUMSA], 2011a). Asimismo, la NTC 570:2012 (Icontec, 2012a), que muestra la forma de determinar el porcentaje o contenido de ceniza en azúcar, mieles, jarabes y jugos de caña por la metodología de cenizas sulfatadas y por el método conductimétrico. Se basa en ICUMSA-GS3/4/7/8-11:2000 (ICUMSA, 2000), ICUMSA-GS 2/3/ 9-17:2011 (ICUMSA, 2011b) e ICUMSA-GS 1/3/4/7/8-13:1994 (ICUMSA, 1994).

Por su parte, NTC 1856:2010 (Icontec, 2010) presenta dos formas de determinar el dióxido de azufre, en forma cualitativa y cuantitativa. La prueba cualitativa se realiza con un papel de almidón yodurado, se prepara humedeciendo papel de filtro con una solución de almidón al 1 %, con una gota de solución de interés, si el producto contiene ácido sulfuroso, el papel impregnado con solución toma un color pardo más o menos intenso por acción del ácido sulfúrico que se desprende. Esta reacción es muy sensible. La determinación cuantitativa se basa en el tratamiento de una solución de azúcar acidulada que arrastra el anhídrido sulfuroso por destilación, recogiénolo sobre una solución de yodo. Se valora el exceso de yodo y se calcula el dióxido de azufre a partir del yodo cuantificado. Por otro lado, para el mismo parámetro, existe la NTC 5970:2012 (Icontec, 2012b), que emplea como referencia ICUMSA GS 2/1/7-33:2009 (ICUMSA, 2009a). En un método espectrofotométrico, después de una reacción con formaldehído, el complejo formado de sulfito/rosanilina se cuantifica espectrofotométricamente a una longitud de onda de 560 nm.

La NTC 6385:2020 (Icontec, 2020a) establece el método espectrofotométrico rápido de almidón de SPRI para determinar almidón soluble en azúcar y otros materiales de proceso (jugos y mieles). Se añaden yoduro potásico (KI) y yodato potásico (KIO₃) a la muestra. Dado que el almidón se compone de amilosa y amilopectina, el yodo reacciona con la amilosa para formar un complejo azul/púrpura. La lectura espectrofotométrica se realiza a 600 nm. La NTC 1846:2020 (Icontec, 2020b) establece las exigencias que debe cumplir y las pruebas a las cuales debe someterse la miel virgen de caña de azúcar (*S. officinarum*). Usa como referencia las NTC 440:2015 (Icontec, 2015), para productos alimenticios. Métodos de ensayo: NTC 573:2013 (Icontec, 2013), Azúcar. Terminología: NTC 587:1994 (Icontec, 1994a), Industrias alimentarias e industrias de bebidas. Melaza de caña: NTC 1779:2017 (Icontec, 2017a), Meladura y mieles de caña. Método para determinar azúcares reductores totales en meladura y mieles de caña, después de hidrólisis por el procedimiento Lane y Eynon a volumen constante: NTC 1856:2010 (Icontec, 2010), Bebidas alcohólicas, Miel de caña, y Determinación del dióxido de azufre. Y, por último, la NTC 1311:2009 (Icontec, 2009) es la que proporciona las exigencias y los métodos que debe cumplir la panela destinada para el consumo humano, en ella se consignan los protocolos para la identificación de colorantes cualitativamente, la determinación de materia extraña, contenido de humedad, ceniza, azúcares totales, reductores y fósforo, así como la de los metales calcio, sodio, potasio y hierro, y de los metales pesados plomo y arsénico.

Tabla 2. Normas Técnicas Colombianas vigentes para los diferentes productos derivados de *S. officinarum* relacionadas con parámetros fisicoquímicos.

NTC	Título	Objeto
NTC 1779:2017 (Icontec, 2017a)	Meladura y mieles de caña. Método para determinar azúcares reductores totales en meladura y mieles de caña, después de hidrólisis por el procedimiento Lane y Eynon a volumen constante.	Esta norma establece el método para determinar los azúcares totales expresados como reductores en mieles de caña por el método de Lane-Eynon (modificado).
NTC 570:2012 (Icontec, 2012a)	Azúcar, mieles, jarabes y jugos de caña, métodos de ensayo para determinar cenizas.	Establece los métodos de ensayo para determinar cenizas por gravimetría y por conductimetría, en cualquier tipo de azúcar, jugos, jarabes y mieles de caña.
NTC 1856:2010 (Icontec, 2010)	Bebidas alcohólicas, mieles de caña, determinación del dióxido de azufre.	Establece los métodos para determinar cualitativa y cuantitativamente el contenido de dióxido de azufre en mieles de caña.
NTC 6385:2020 (Icontec, 2020a)	Azúcar. Determinación de almidón soluble en azúcar y materiales de proceso mediante el método rápido de almidón de SPRI.	La presente norma establece el método rápido de almidón de SPRI, para determinar almidón soluble en azúcar y otros materiales de proceso (jugos y mieles).
NTC 1846:2020 (Icontec, 2020b)	Miel virgen de caña de azúcar.	Esta norma establece los requisitos que debe cumplir y los ensayos a los cuales debe someterse la miel virgen de caña de azúcar (<i>Saccharum officinarum</i> L.), que se utiliza como materia prima para la industria.
NTC 5970:2012 (Icontec, 2012b)	Azúcar, jugos y jarabes de caña, determinación de sulfito con el método colorimétrico de rosanilina.	Establece el método de ensayo para la determinación colorimétrica de SO ₂ y es aplicable a jugos y jarabes y a azúcar blanco, blanco especial, refinado y crudo.
NTC 3442:2011 (Icontec, 2011)	Bebidas alcohólicas, tafias de caña.	Establece los requisitos y los métodos de ensayo que deben cumplir las tafias de caña empleadas en la elaboración de rones y de algunas bebidas alcohólicas que por sus características requieren de esta materia prima.
NTC 410:1999 (Icontec, 1999)	Bebidas alcohólicas, aguardiente de caña, caña, cachaza o branquiña.	Establece los requisitos y los ensayos que debe cumplir la bebida alcohólica denominada aguardiente de caña, caña, cachaza o branquiña.
NTC 440:2015 (Icontec, 2015)	Productos alimenticios, métodos de ensayo.	Establece los métodos de ensayo para determinar las características físicas y químicas de los productos alimenticios.
NTC 573:2013 (Icontec, 2013)	Azúcar, terminología.	Establece las definiciones de los términos más empleados en la industria azucarera de caña.

NTC	Título	Objeto
NTC 587:1994	Industrias alimentarias e industrias de bebidas, melaza de caña.	Esta norma establece los requisitos que debe cumplir la melaza de caña empleada en la alimentación animal y producción de alcoholes, levaduras e industrias afines.
NTC 2369:1994 (Icontec, 1994b)	Industrias alimentarias, floculantes derivados de la acrilamida utilizados en la clarificación del agua potable y de los jugos y jarabes de la caña de azúcar.	Establece definiciones y clasificación, condiciones generales, requisitos, ensayos, empaque, rotulado y precauciones de manejo.
NTC 1311:2009 (Icontec, 2009)	Productos agrícolas, panela.	Establece los requisitos y los ensayos que debe cumplir la panela destinada para el consumo humano.

Fuente: elaboración propia.

La inocuidad de los productos derivados de *S. officinarum* se establecen por las normas de la Tabla 3. En ellas se describe cómo realizar el recuento de coliformes, *Escherichia coli*, mohos, levaduras y bacterias mesófilas.

Tabla 3. Normas Técnicas Colombianas vigentes para los diferentes productos derivados de *S. officinarum* relacionadas con parámetros de inocuidad.

NTC	Título	Objeto
NTC 3953:2017 (Icontec, 2017b)	Azúcar, jugos, meladuras y mieles de caña, determinación de coliformes y <i>Escherichia coli</i> , técnica del número más probable (NMP).	Esta norma da directrices generales para realizar el recuento de coliformes y <i>Escherichia coli</i> en azúcar granulado, azúcar líquido, azúcar pulverizado, jugos, meladuras y mieles de caña mediante el cálculo del número más probable (NMP).
NTC 3954:2017 (Icontec, 2017c)	Azúcar, jugos, jarabes y mieles de caña, determinación de mohos y levaduras, método de recuento en placa.	Esta norma establece el método para determinar el recuento de mohos y levaduras en azúcar granulado, azúcar líquido, jugos, meladuras y mieles de caña por la técnica de recuento en placa.
NTC 6086:2017 (Icontec, 2017d)	Azúcar, jugos, meladuras y mieles de caña, detección y recuento de coliformes o <i>Escherichia coli</i> o ambos, método de recuento en placa.	Establece el método de ensayo para detectar y contar coliformes, <i>Escherichia coli</i> o ambos en azúcar granulado, azúcar líquido, jugos, meladuras y mieles de caña por la técnica de recuento en placa.

NTC	Título	Objeto
NTC 3908:2017 (Icontec, 2017e)	Azúcar, jugos, meladuras y mieles de caña, recuento de bacterias mesófilas aerobias, método de recuento en placa.	Establece el método de ensayo para determinar el recuento de bacterias mesófilas aerobias en azúcar granulado, azúcar líquido, jugos, meladura y mieles de caña por la técnica de recuento en placa.

Fuente: elaboración propia.

Los planes de muestreo u otra toma de muestras se pueden regir por los establecidos en la:

- NTC-ISO 2859 (Icontec, 2002) partes 1, 2, 3 o 4: procedimientos de muestreo para inspección por atributos. Parte 1: planes de muestreo determinados por el nivel aceptable de calidad (NAC) para inspección lote a lote.
- NTC-ISO 3951-1, 2, 3, 4 y 5 (Icontec, 2009): procedimientos de muestreo para inspección por variables. Parte 1: especificación para planes de muestreo simple clasificados por nivel aceptable de calidad (NAC) para inspección lote a lote para una característica de calidad única y un solo NAC.

3.2. Rastreo fuentes en plataforma Scopus

Durante los años 1990 a 2021 (febrero), en la plataforma de bases de datos Scopus, se encontraron los siguientes resultados para las palabras clave de cada una de las líneas generales en los aspectos explorados en mieles de caña y derivados.

- **Determinación de tendencias mundiales de investigación y desarrollo**

- **Panela:** arrojó 485 documentos primarios, 228 documentos secundarios y 300 patentes. Dentro de los documentos primarios, desde el año 2017, se vienen presentado más de 40 reportes por año, en el año 2020 se registró el mayor número, con 55 reportes. Entre los países, Brasil y Colombia presentan el mayor número de reportes, con 87 y 76, respectivamente. En cuanto al tipo de documentos, se presenta la cifra mayoritaria en los del tipo artículo 375, así mismo, el área de estudio más referenciada son las ciencias agrícolas y biológicas con 241, seguida de las ciencias sociales, con 80 reportes. El resumen de la información se reporta en la Figura 1.

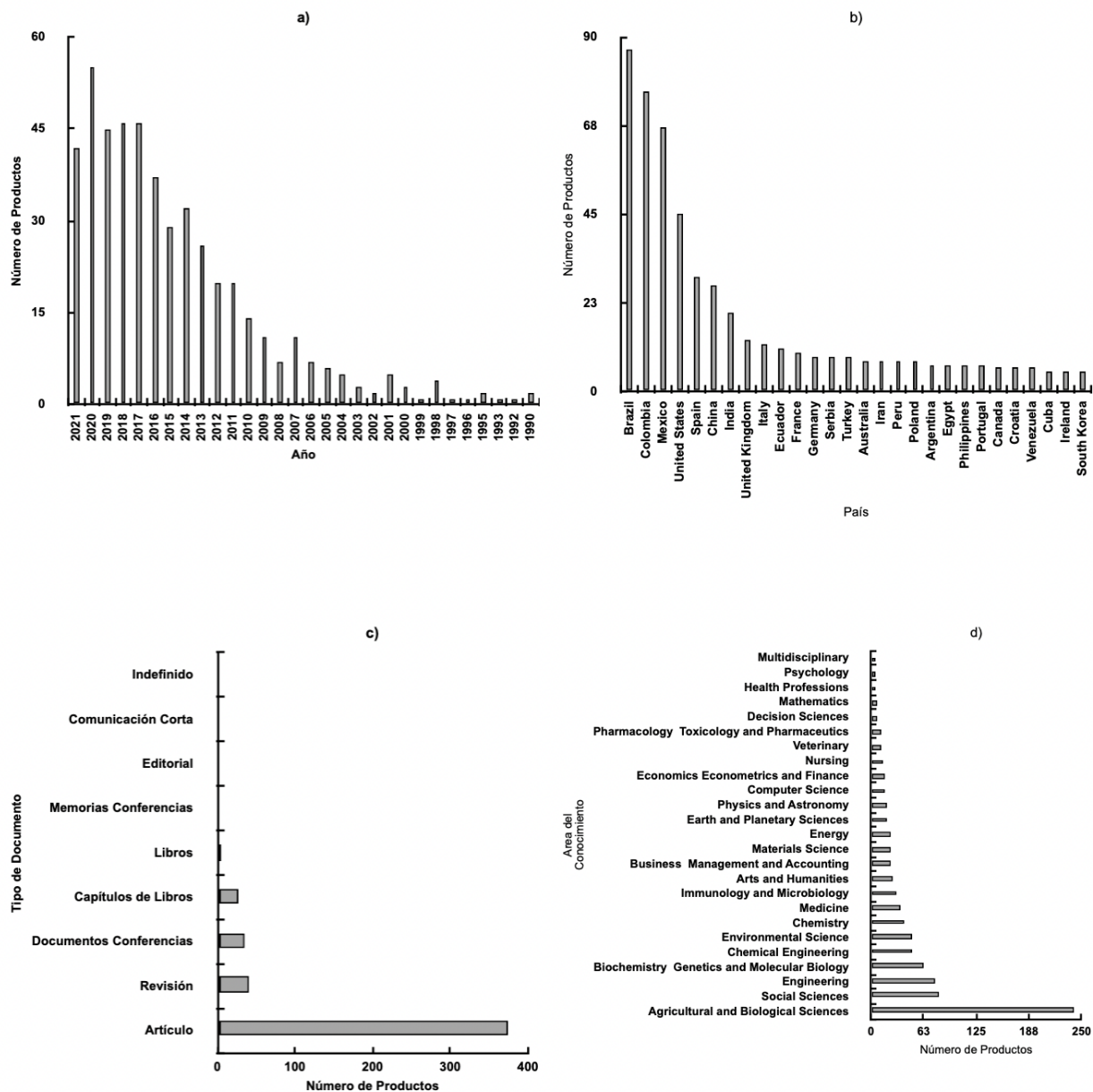


Figura 1. Análisis de los documentos primarios encontrados para la palabra clave “panela” en la plataforma de bases de datos Scopus, organizados por: a) año, b) país, c) tipo de documento, d) área de conocimiento.

Fuente: elaboración propia.

- **Muscovado:** arrojó 21 documentos primarios, 4 documentos secundarios y 5216 patentes. En el conjunto de los documentos primarios, el año de mayor número de reportes es el 2021, con 4, de la misma forma se evidencia que después del año 2019 se viene incrementando dicho número de reportes. Los países que más han reportado documentos son Filipinas y China, con 5 y 3, respetivamente. Colombia presenta un reporte. El tipo de documentos más referenciados fueron los artículos, con 14. Dentro las áreas que tratan los documentos, se destacan las subáreas de ciencias agrícolas y biológicas con 11, y el área de genética bioquímica y biología molecular, con 4 reportes. El resumen de la información se reporta en la Figura 2.

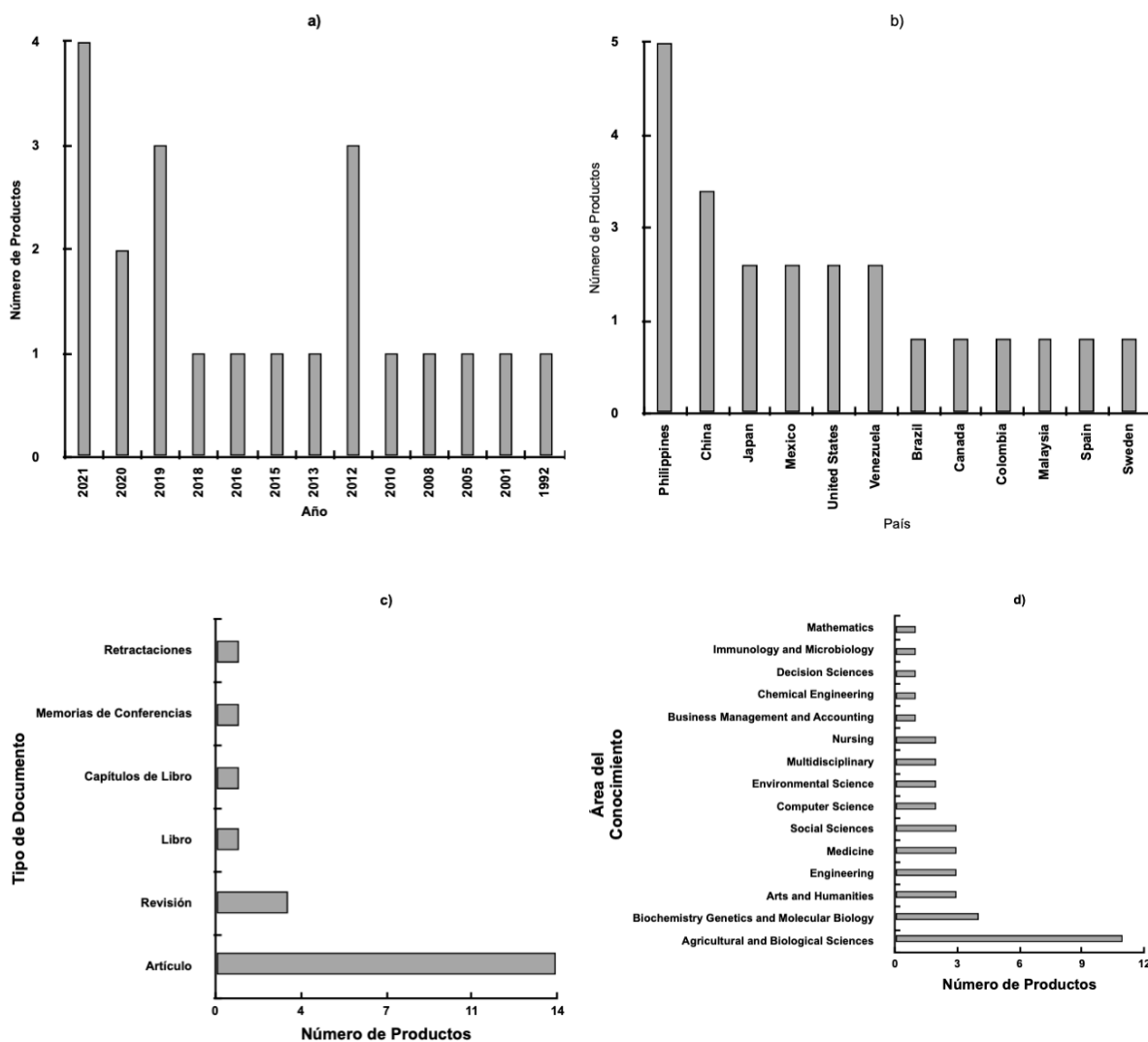


Figura 2. Análisis de los documentos primarios encontrados para la palabra clave “muscovado” en la plataforma de bases de datos Scopus, organizados por: a) año, b) país, c) tipo de documento, d) área de conocimiento

Fuente: elaboración propia.

- **Raw sugar:** arrojó 55.133 documentos primarios, 385 documentos secundarios y 277.163 patentes. A partir del año 2011, se han reportado más de 2.000 documentos por año, donde el año 2020 es el que presenta el mayor número, con 6.283. En lo que va del año 2021, se tienen 3.924. En los países, China presenta 8.782 y Estados Unidos 6.980. En Colombia se tienen 468, y es superada en América Latina por México con 1.039, y por Argentina con 473. En los tipos de documentos, los artículos presentan 40.789, las revisiones 6.935 y los capítulos de libro resultaron con 3.778. Son de interés particular las áreas en las cuales se encuentran estos documentos, se destacan las subáreas de ciencias agrícolas y biológicas con 21.205 y el área de genética bioquímica y biología molecular con 12.517, microbiología e inmunología con 5.794, medicina 3.824, y en farmacología, toxicología y farmacia con 2.702. El resumen de la información se reporta en la Figura 3.

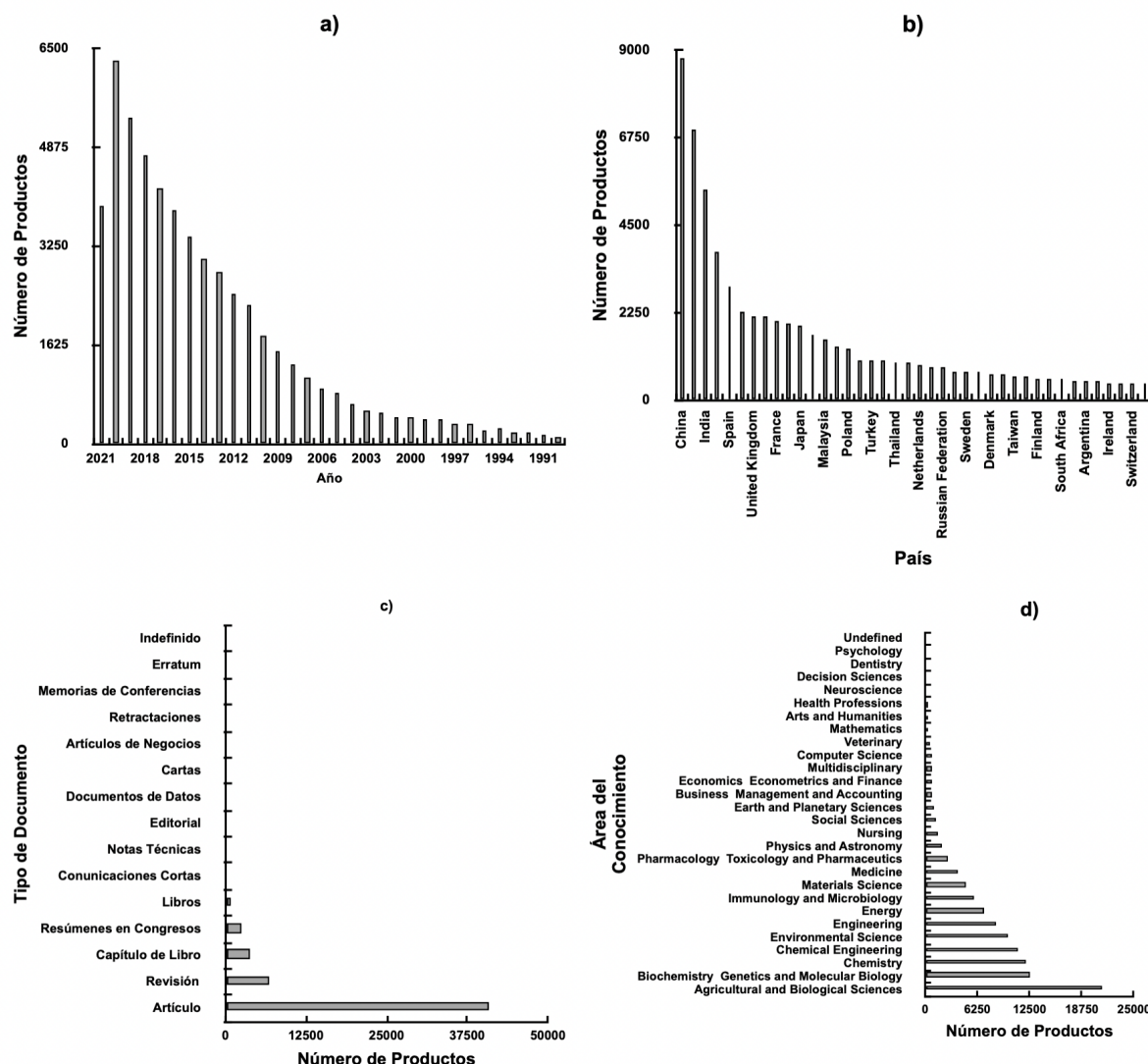


Figura 3. Análisis de los documentos primarios encontrados para la palabra clave "Raw sugar" en la plataforma de bases de datos Scopus, organizados por: a) año, b) país, c) tipo de documento, d) área de conocimiento.

Fuente: elaboración propia.

- **Brown sugar:** arrojó 186.850 documentos primarios, 263 secundarios y 220.484 patentes. Después del año 2014, se han presentado más de 10.000 reportes por año, donde el 2020 es el que más registra reportes, con 15.312, y 9.438 en lo que va del año 2021. Los países que reportan mayor número son Estados Unidos, China, Reino Unido y Alemania con 60.824, 20.159, 17.425 y 13.503, respectivamente. Colombia presenta 595 documentos. Los artículos son la forma más recurrente de reportar la información, con 129.918, seguidos de las revisiones, con 33.565. El área de genética bioquímica y biología molecular con 61.236 artículos, ciencias agrícolas y biológicas con 53.063, y medicina con 42.101. El resumen de la información se reporta en la Figura 4.

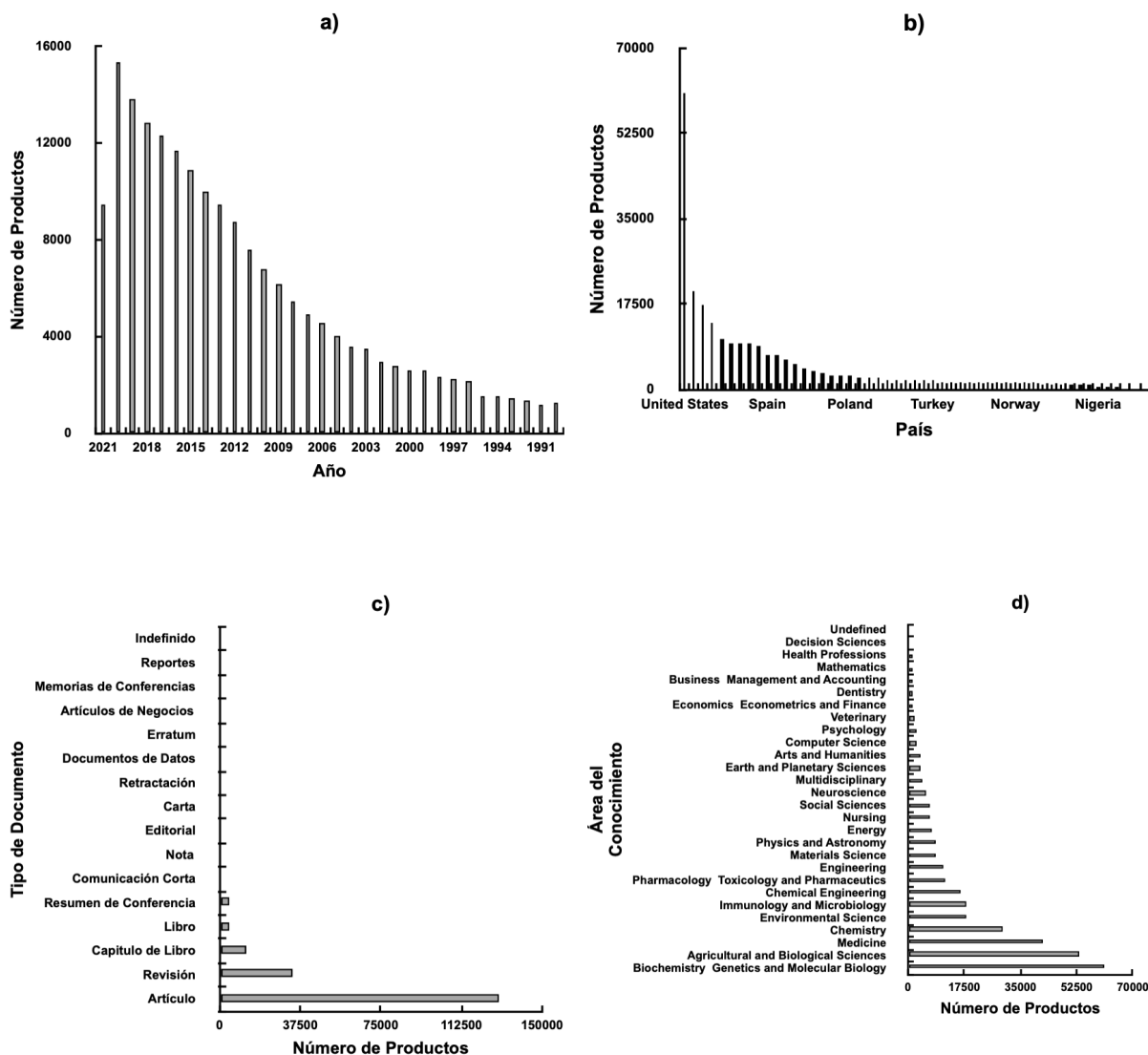


Figura 4. Análisis de los documentos primarios encontrados para la palabra clave "Brown sugar" en la plataforma de bases de datos Scopus, organizados por: a) año, b) país, c) tipo de documento, d) área de conocimiento.

Fuente: elaboración propia.

- *Sugar cane*: arrojó 61.663 documentos primarios, 6.039 documentos secundarios y 54.379 patentes. A partir del año 2012, se registran más de 3.000 reportes por año, el 2020 registra el mayor número con 5.074 reportes, en el año en curso van 3.043. Los países que más reportan documentos son Brasil y Estados Unidos con 11.838 y 9.259, respectivamente. Colombia presenta 885 registros. Los artículos son el tipo de documentos más publicado en este tema con 47.910, lo que representa alrededor del 78 %. Las áreas de publicaciones se centran en ciencias agrícolas y biológicas con 24.990, ciencias ambientales con 13.323 y genética bioquímica y biología molecular con 10.818. El resumen de la información se reporta en la Figura 5.

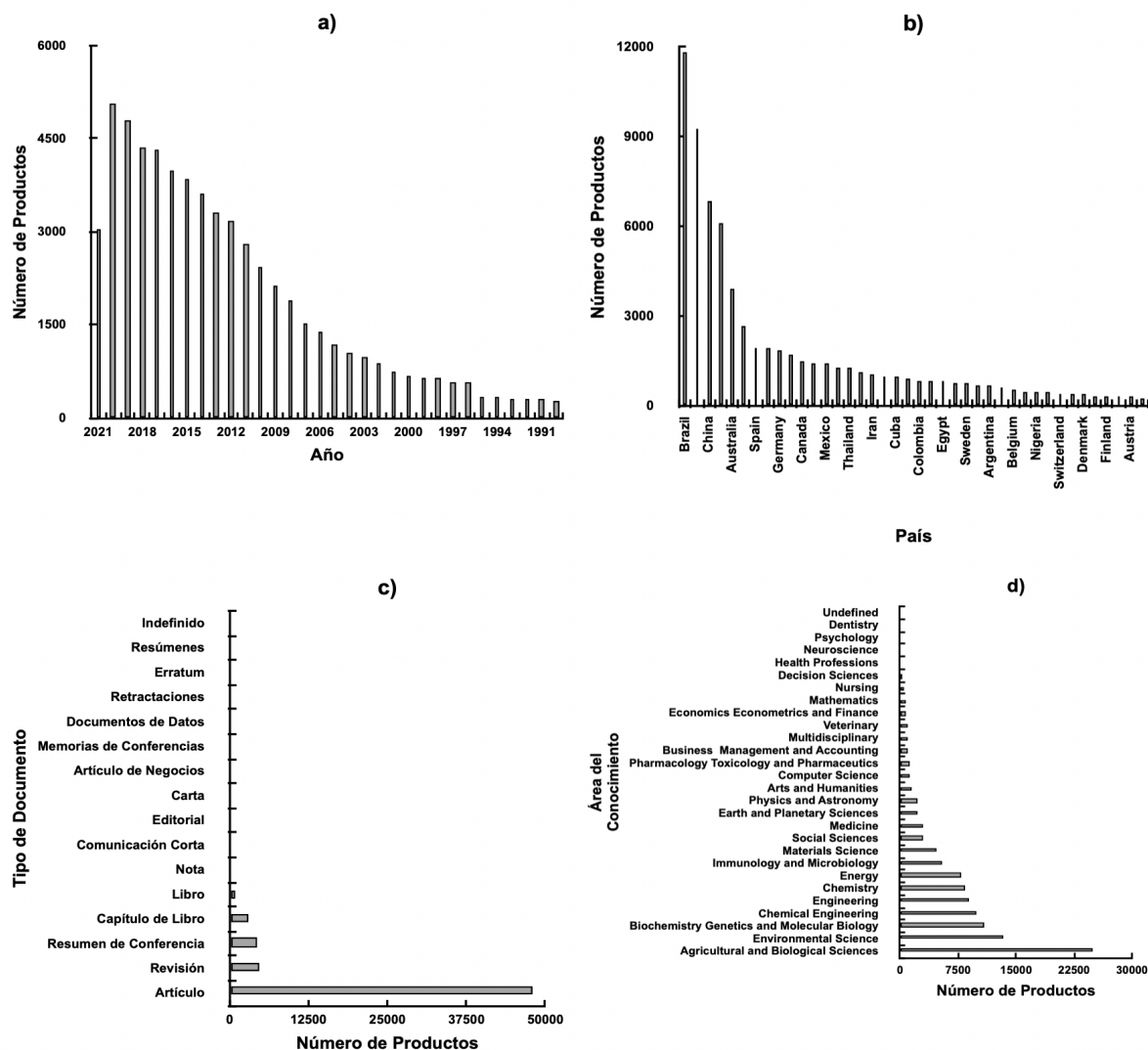


Figura 5. Análisis de los documentos primarios encontrados para las palabras clave "Sugar cane" en la plataforma de bases de datos Scopus, organizados por: a) año, b) país, c) tipo de documento, d) área de conocimiento.

Fuente: elaboración propia.

- *Sugar cane extracts*: arrojó 7.470 documentos primarios, 12 documentos secundarios y 27.466 patentes. Dentro de los años, se encuentra un incremento en el número de publicaciones, a partir del año 2013, pues se han tenido más de 400 por año. El año 2020 registra el mayor número con 751, en el año en curso van 517. Brasil lidera las publicaciones en este tema con el 18 % con 1.367 reportes, seguido de Estados Unidos con el 12 % representado en 906 documentos. Colombia registra 64 reportes. El tipo de documentos más generado son los artículos con 5.594, dentro de estos los que se relacionan con ciencias agrícolas y biológicas presentan el mayor número con 3216. El resumen de la información se reporta en la Figura 6.

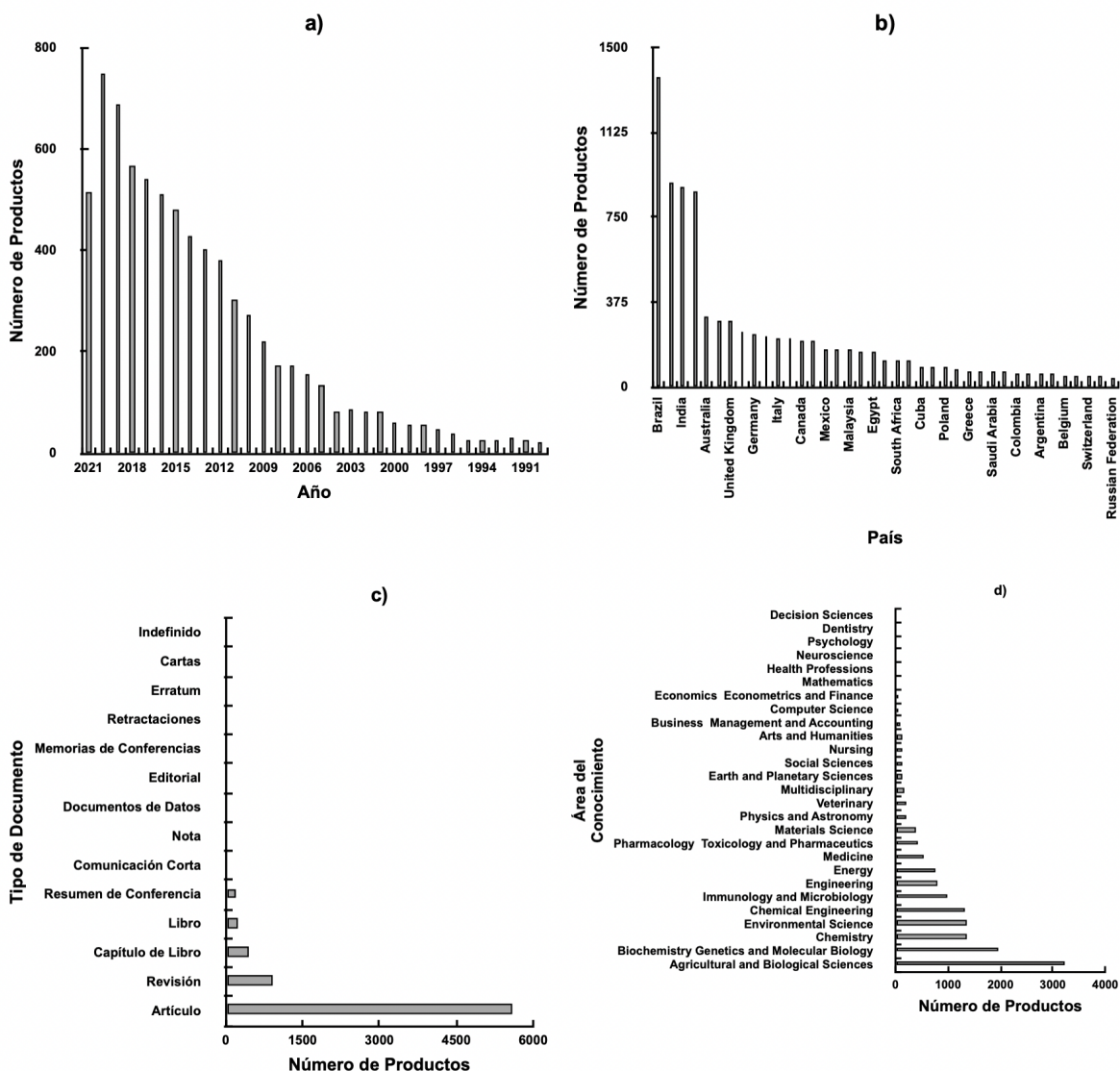


Figura 6. Análisis de los documentos primarios encontrados para las palabras "Sugar cane extracts" en la plataforma de bases de datos Scopus, organizados por: a) año, b) país, c) tipo de documento, d) área de conocimiento.

Fuente: elaboración propia.

• Análisis de posibles productos finales

- *Sugar cane products*: arrojó 28.152 documentos primarios, 135 documentos secundarios y 49.899 patentes. Desde el año 2016 se han presentado más de 2.000 reportes por año, el 2020 es en el que más han generado documentos con 2.864, en lo que va corrido del 2021 van 1.813 reportes. Entre los países con mayor número de documentos generados, se encuentra Brasil con 4.873, Estados Unidos con 4.119 y China con 3.518. Colombia registra 432 documentos. Los artículos son el tipo de documentos más generados con 20.833. El resumen de la información se reporta en la Figura 7.

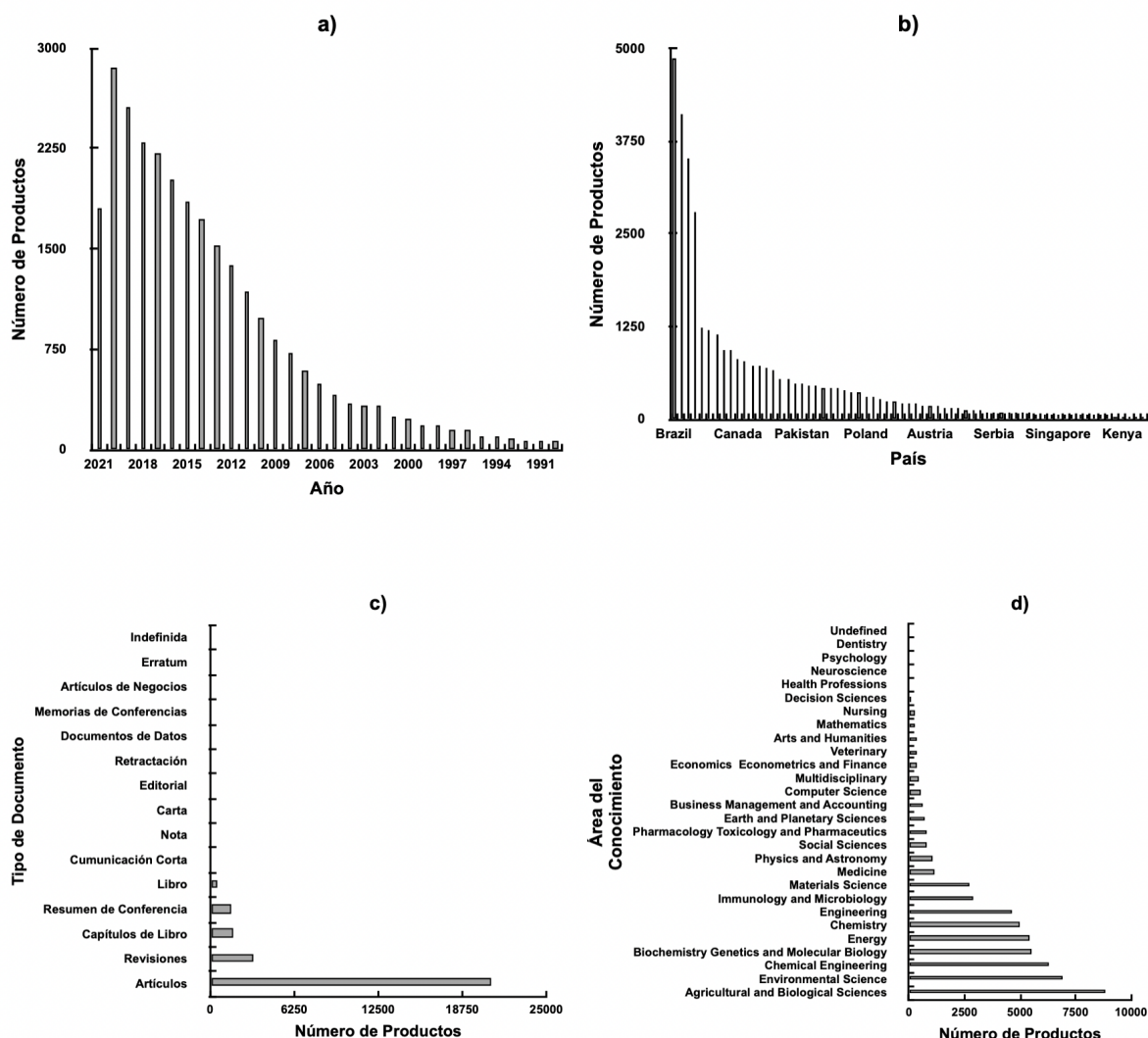


Figura 7. Análisis de los documentos primarios encontrados para las palabras “Sugar cane products” en la plataforma de bases de datos Scopus, organizados por: a) año, b) país, c) tipo de documento, d) área de conocimiento.

Fuente: elaboración propia.

- *Sugar cane juice*: arrojó 7.474 documentos primarios, 251 documentos secundarios y 10.775 patentes. Las publicaciones en esta línea se han incrementado en los últimos años, tal es así, que a partir del año 2017 se registran más de 500 por año y en el año 2020 se reportaron 666. La India registra el 16,6 % de las publicaciones con 1.237 y Colombia ha publicado el 2 % con 147 documentos. Los artículos constituyen el 75 % del tipo de documentos generados, representados en un total de 5.595. La subárea más explorada son las ciencias agrícolas y biológicas, que presentan el mayor número con 3.735. El resumen de la información se reporta en la Figura 8.

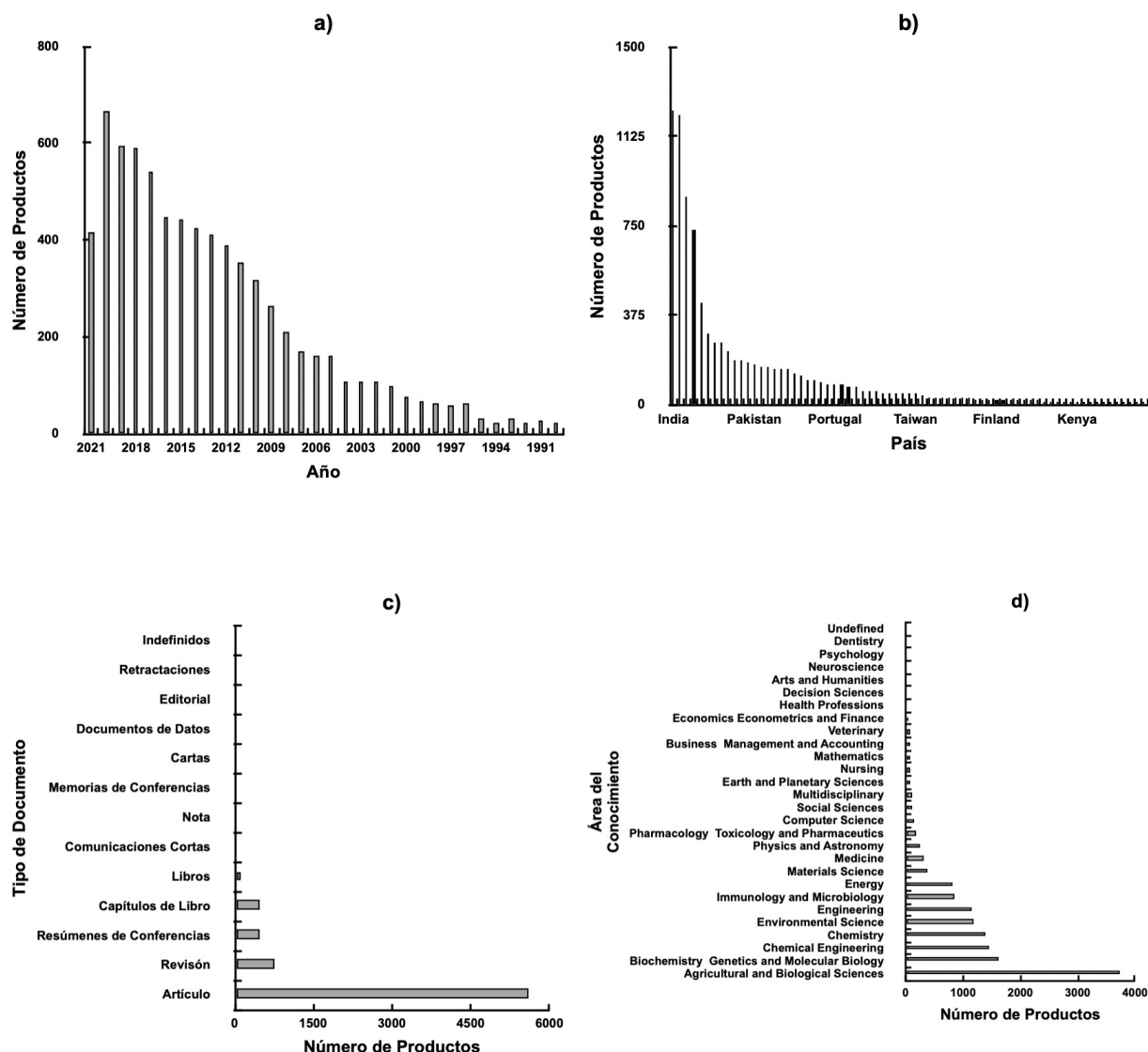


Figura 8. Análisis de los documentos primarios encontrados para la palabra “Sugar cane juice” en la plataforma de bases de datos Scopus, organizados por: a) año, b) país c), tipo de documento, d) área de conocimiento.

Fuente: elaboración propia.

- *Crude sugarcane bagasse*: arrojó 19.382 documentos primarios, 5 documentos secundarios y 2.289 patentes. Desde el año 2017 se vienen registrando más de 1.500 reportes por año, donde el 2020 es el que más documentos arroja. El país que más reportes presenta es Brasil con 3.961, seguido de China con 3.157 y Colombia registra 308 reportes. Los artículos siguen siendo la forma más empleada para reportar los hallazgos con 15.096. En las subáreas de mayor volumen de reportes, se encuentra la ingeniería química con 6.032, ciencias ambientales con 5.668 y energía con 5.468. El resumen de la información se reporta en la Figura 9.

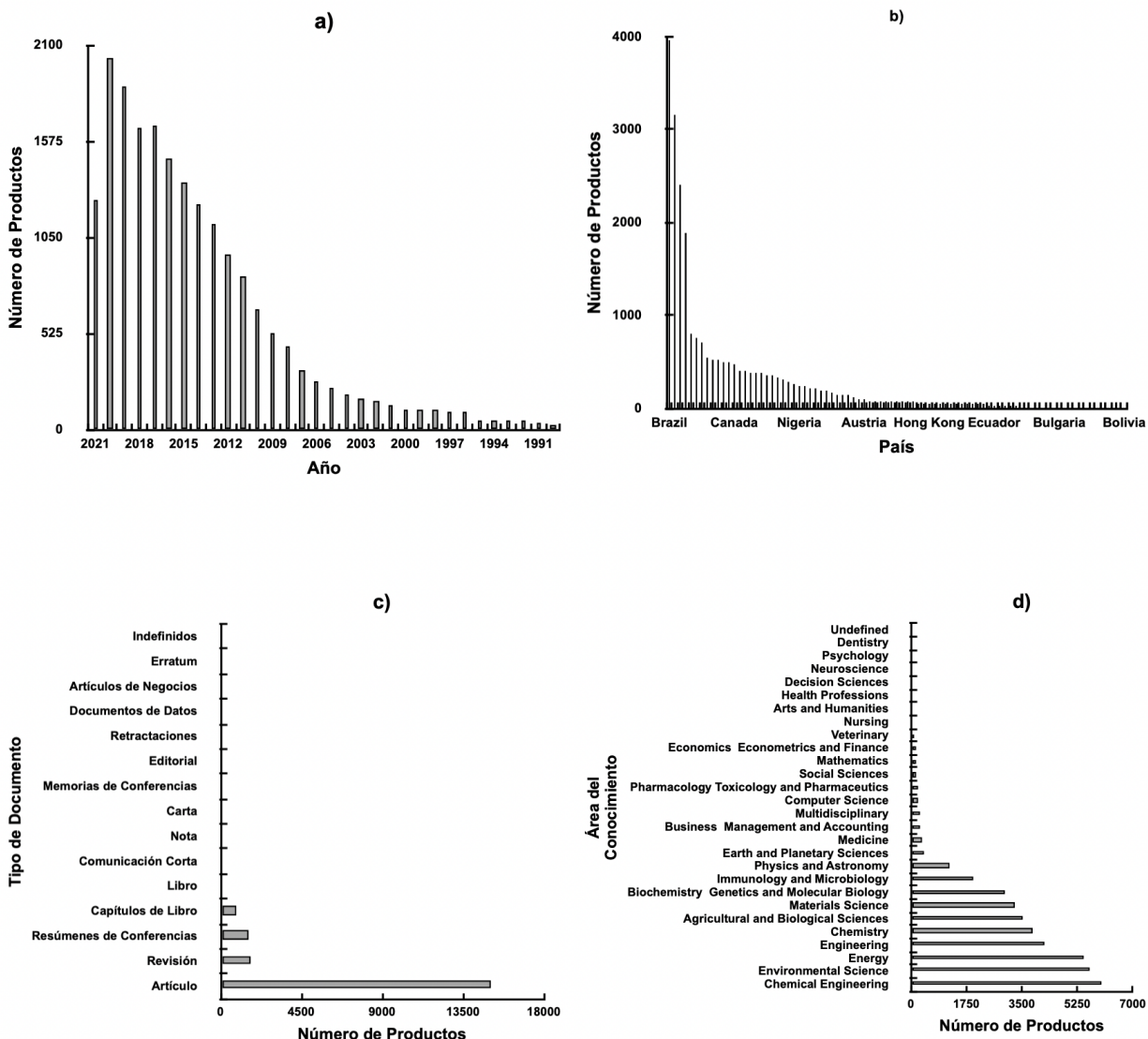


Figura 9. Análisis de los documentos primarios encontrados para la palabra "Sugarcane bagasse" en la plataforma de bases de datos Scopus, organizados por: a) año, b) país c), tipo de documento, d) área de conocimiento.

Fuente: elaboración propia.

- *Sugarcane straw*: arrojó 27.833 documentos primarios, 120 documentos secundarios y 6.891 patentes. Desde el año 2013 se presentan más de 1.000 reportes por año para esta palabra clave, el año con el mayor número de reportes fue el 2020 con 4.613, en el 2021, a la fecha, van 2.989. El país que más reportes presenta es China con 7.008, seguido por Brasil, India y Estados Unidos con 3.858, 3.788 y 2.883, respectivamente. Colombia reporta 289 documentos. Los artículos son la forma más recurrente de reporte con 21.948, seguidos de las revisiones con 3209 y de los capítulos de libros con 1.347. En las subáreas de estos documentos, se tiene que las ciencias ambientales tienen 9.995, energía 7.696 e ingeniería química 7.747. El resumen de la información se reporta en la Figura 10.

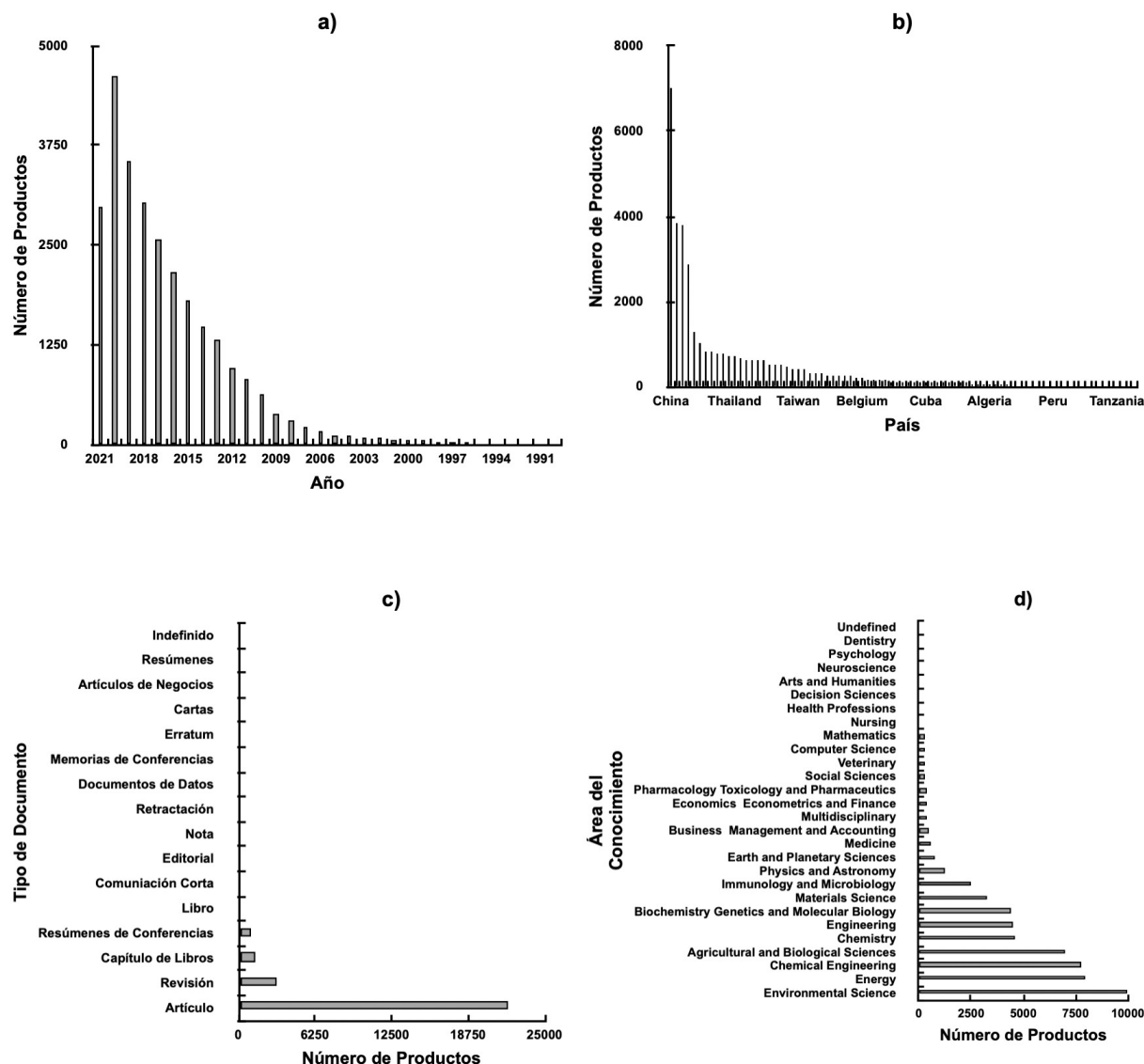


Figura 10. Análisis de los documentos primarios encontrados para la palabra Sugarcane straw en la plataforma de bases de datos Scopus organizados por: a) año, b) país c), tipo de documento, d) área de conocimiento.

Fuente: elaboración propia.

3.3. Otros protocolos de caracterización

Los protocolos que describen las diferentes NTC son de alcance limitado. Por lo tanto, a continuación, se describen los protocolos no contenidos en las NTC expuestas en las Tablas 2 y 3, o que no son usados como referencias para estas, los cuales pueden ser explorados para medir otros indicadores de calidad, de contenido de biomoléculas o de contaminantes relevantes para la industria de productos derivados del aprovechamiento de la caña de azúcar. Estos protocolos se pueden dividir en dos: normalizados y no normalizados.

- **Protocolos normalizados**

Este grupo de normas y protocolos corresponden a determinaciones que se referencian en Codex Alimentarius (Food and Agriculture Organization [FAO], 2019), para productos azucarados y mieles:

- **Contenido de Humedad:** esta determinación presenta varias opciones metodológicas para la matriz de azúcar o productos similares como la miel. Existe la ISO 1741:1980 (International Organization for Standardization [ISO], 1980a) e ISO 1742:1980 (ISO, 1989b), que determinan el contenido de agua por calentamiento en un horno de vacío para azúcares.

- **pH:** esta medición se realiza de forma potenciométrica por el método ICUMSA GS 1/2/3/4/7/8-23 (ICUMSA, 2009b).

- **Azúcares por HPLC:** la ISO 10504:2013 (ISO, 2013a) referencia la metodología para determinar los azúcares reductores, glucosa y fructosa, mediante HPLC con un detector de índice de refracción. Así mismo, puede ser usada para medir disacáridos, como la sacarosa u otros de interés. Es una técnica que permite medir monosacáridos, disacáridos y otros polisacáridos, con la cual se podría realizar la medición de los azúcares totales y reductores, en menor tiempo y de forma más precisa, repetible y reproducible.

- **Color:** ICUMSA GS9/1/2/3-8 (ICUMSA, 2011c) muestra una metodología para determinar el color de azúcares o mezclas de estas. Resulta importante determinar este parámetro, ya que la adición de colorantes es común en productos como la panela o los batidos, con el ánimo de engañar al consumidor simulando el color del producto.

- **Protocolos no normalizados**

En seguida, se presentan los posibles protocolos que se pueden adaptar para la medición de otros parámetros en productos derivados de caña de azúcar:

- **Azúcares por HPLC (Glyad, 2002)**

Se pesan 100 g de producto y se vierten en un matraz Erlenmeyer con tapón de vidrio de 250 mL, se disuelven con 200 mL de agua destilada. Luego, se vierten en un matraz volumétrico de 500 mL y se afora con agua destilada. La solución de muestra se filtra a través de membranas de 0,22 µm antes de la inyección. La separación cromatográfica de azúcares (sacarosa, fructosa y glucosa) se logra con un sistema HPLC en modo isocrático. Las muestras se analizan en una columna para carbohidratos (250 x 4,6 mm D.I., 5 µm) equipada con una columna de protección (12,5 x 4,6 mm D.I.). Las temperaturas de la columna y el detector de índice de refracción (RID) se fijan en 30 y 35 °C, respectivamente. La fase móvil está compuesta por acetonitrilo y agua (75:25, v/v), con un flujo de 1,0 mL/min. El volumen de inyección es de 10 µL. Se utiliza maltosa como estándar interno para la cuantificación. Se reporta el contenido como mg azúcar/100 g producto fresco.

- **Determinación del contenido fenólico total (TPC) y flavonoide total contenido (TFC)**

El TPC y TFC se miden utilizando el método establecido por Wang, Melnyk, Tsao, y Marcone (2011). Se calcula el TPC de cada muestra por la ecuación de regresión de la curva de calibración del ácido gálico-AG. Los resultados se expresan en miligramos de equivalentes de ácido gálico por 100 mg de peso seco de producto fresco (mg AG/100 mg). El TFC de cada muestra se calcula mediante la ecuación de regresión de la calibración de catequina. Los resultados se expresan como miligramos de catequina equivalentes/100 mg de producto fresco (mg CE/100 mg).

- Medición de la actividad antioxidante por absorción de radicales de oxígeno (ORAC)

La actividad antioxidante de los productos derivados de la caña de azúcar se determina por ensayo ORAC, como describen Wootton-Beard, Moran, y Ryan (2011) y Thaipong, Boonprakoba, Crosby, Cisneros-Zevallos, y Hawkins (2006). En el ensayo ORAC, todos los reactivos se preparan recién y se disuelven en tampón fosfato (75 mM, pH 7,4). El Trolox (utilizado como estándar) y las muestras se diluyen a concentraciones en serie con tampón fosfato y se transfieren 20 μ L a una placa de 96 pocillos de pared negra (Corning Scientific, Corning, NY, EE. UU.). Seguido de la adición de 200 μ L de sal sódica de fluoresceína (0,96 μ M). Después de la incubación de 20 min a 37 °C, se agregan 20 μ L de 119 mM Ácido 2,2'-azino-bis-(3-etilbenzotiazolina)-6- sulfónico-ABAP en cada pocillo. La intensidad de la fluorescencia se mide cada 5 min durante 35 ciclos a una longitud de onda de excitación de 485 nm y a una longitud de onda de emisión de 535 nm. Los resultados se expresan como equivalentes μ mol de Trolox por miligramo de producto fresco (μ mol TE/mg).

- Medición de la actividad antioxidante por capacidad de eliminación de radicales peroxilo (PSC)

En el ensayo de PSC (Shahidi; Zhong, 2015), 100 μ L de producto fresco o su extracto son añadidos en una microplaca negra de 96 pozos. Luego, se adicionan 100 μ L de 33,15 μ M Dicloro-dihidro-fluoresceína diacetato-DCFH y 50 μ L de ácido 2,2'-azino-bis-(3-etilbenzotiazolina)-6- sulfónico-ABAP 200 mM. La microplaca se incuba a 37 °C durante 40 min en oscuridad. La fluorescencia se mide a la longitud de onda de excitación de 485 nm y la longitud de onda de emisión de 535 nm. Se expresa la CE_{50} de la muestra y el valor PSC como equivalentes de μ mol de vitamina C-VC por mg de producto fresco (μ mol VC/mg).

- Determinación del potencial de reducción por el poder antioxidante reductor férrico (FRAP)

El ensayo FRAP se evalúa según el método de Benzie y Strain (1996). El reactivo FRAP se prepara el mismo día de la medición, se usan 200 μ L de reactivo FRAP y 200 μ L de muestra. Se incuba la mezcla a 37 °C durante 10 min en oscuridad. Se mide la absorbancia a 593 nm en relación con un blanco de reactivos también incubados a 37 °C. Se determinan los datos de FRAP para las muestras frente a un estándar de valor FRAP conocido, se suele usar sulfato ferroso-FeSO₄. Los resultados se expresan como mg FeSO₄/100 g peso fresco.

- Ensayo de peroxidación lipídica

Los ensayos de peroxidación lipídica se realizan según el protocolo propuesto por Jiang, Hunt, y Wolfe (1992). Fe³⁺ + generado mediante la oxidación de Fe²⁺ + por hidroperóxidos se puede determinar utilizando tintes sensibles al ion férrico como medida indirecta de concentración de hidroperóxido. Los resultados se expresan como mg Fe³⁺ /100 g peso fresco.

- Crecimiento bacteriano

El crecimiento bacteriano, según el método establecido por Zhao, Chen, Zhao, y Yu (2015), se utiliza para evaluar la actividad antimicrobiana de un extracto. Se sugiere probar las bacterias *Staphylococcus aureus*, *Listeria monocytogenes*, *Escherichia coli* y *Salmonella typhimurium*. En cajas de Petri pequeñas o en placas de crecimiento bacteriano, se ponen a crecer las bacterias a una concentración de 10⁶-10⁷ UFC/mL en agar suplementado con 200 μ L de extracto. Se utiliza agua estéril como control negativo y un antibiótico de amplio espectro como control positivo. Los platos se guardan en el refrigerador por 6 h a 4 °C y luego son incubados a 37 °C por 20 h. El efecto antibacteriano del extracto se evalúa midiendo y comparando los diámetros de las zonas de inhibición, todas las pruebas se deben realizar mínimo por triplicado.

- Concentración mínima inhibitoria bacteriana

Se determina utilizando inóculos estándar de 10⁵ UFC/mL de las siguientes bacterias sugeridas o con otras de interés: *S. aureus*, *L. monocytogenes*, *E. coli* y *S. typhimurium*. Se emplea el método de dilución

en serie de Nedorostova, Kloucek, Kokoska, Stolcova, y Pulkrabek (2009) y Andrews (2001). El medio de cultivo es suplementado con las siguientes concentraciones finales de extracto 0; 0,1562; 0,315; 0,625; 1,25; 2,5; 5,0 y 10,0 mg/mL. Después se incuba durante 18-24 h a 37 °C con agitación a 150 rpm, se determina la concentración más baja del extracto, necesario para inhibir visiblemente el crecimiento, mediante el conteo de bacterias mediante cámara de Neubauer. Se utiliza agua destilada esterilizada como control negativo y un antibiótico de amplio espectro como control positivo.

- La diversidad fenólica y derivados

El método fue reportado por Zheng *et al.* (2017), quienes emplearon espectrofotometría de masas de alta resolución-HRMS y resonancia magnética nuclear protónica hidrógeno-deuterio-HDNMR. Los autores informan que los compuestos fenólicos libres se extraen del producto en polvo o en estado líquido de acuerdo con un método previamente informado por Wen *et al.* (2015). La muestra (100 g) se extrae dos veces con 1,5 L de una mezcla 1:1:1 de acetona 40 %, metanol 40 % y ácido clorhídrico 5 % en agua, en condiciones de oscuridad durante 12 h a temperatura ambiente. Después, la suspensión se combina y se centrifuga a 3.500 rpm durante 20 min a 4 °C. A continuación, se recoge el sobrenadante y se concentra a menos de 5 mL por un rotaevaporador a máximo 40 °C al vacío. El extracto es llevado a un volumen final de 25 mL con la adición de una solución de metanol al 20 %, y se almacena a -40 °C hasta su posterior análisis.

El residuo semisólido es recolectado para la extracción de compuestos fenólicos ligados, los cuáles se extraen de los residuos después de la extracción de fenoles libres de acuerdo con un método reportado previamente por Adom y Liu (2002) y Wang, Chen, Xie, Ju, y Liu (2013). Los residuos son digeridos en una botella de 50 mL que contiene 20 mL de hidróxido de sodio 2 M con una velocidad de agitación de 60 rpm a temperatura ambiente durante 1,5 h bajo atmósfera de nitrógeno. Posteriormente, la mezcla se neutraliza con ácido clorhídrico 1 M y se extrae con hexano para eliminar los lípidos de la mezcla. Luego, se extrae con 20 mL de acetato de etilo cinco veces. Se reúnen las fracciones extraídas y se ponen en el rotaevaporador a máximo 40 °C al vacío. Los fenoles ligados se reconstituyen a 10 mL con la adición de metanol al 20 %. Los extractos se almacenan a -40 °C hasta su posterior análisis. La corrida se hace en una columna ZORBAX RRHD SB-C18 (50 x 2,1 mm D.I., 1,8 µm), Agilent Corporation, EE. UU). La columna se mantiene a 20 °C y a un caudal de 0,2 mL/min.

- La diversidad de derivados de tipo fitoesteroides por HPLC

El análisis se realiza de acuerdo con lo propuesto por Novak *et al.* (2017). Una muestra de 100 g de producto se deposita en un matraz aforado con 200 mL etanol anhidro. Luego, se colocan en un baño de ultrasónico a 40 kHz durante 1 h a 50 °C. Después se filtra. Se añade etanol anhidro hasta llegar a volumen final del extracto de 250 mL. La identificación y cuantificación de fitoesteroides se lleva a cabo según el método de Indyk, Lawrence, y Broda (1993). La separación se realiza en un Luna 5l Columna C-18 (250 x 4,6 mm D.I., Phenomenex Ltd.) usando fases móviles: metanol y agua en una relación 100:4 (en volumen). El volumen de inyección es de 20 µL, el caudal de 1,2 mL/min y la longitud de onda utilizada para la detección debe ser 205 nm. Todos los análisis se realizan a una temperatura de 30 °C. La cuantificación se basa en una calibración externa y las concentraciones finales se expresan como mg/100 g de muestra.

- Determinación de acrilamida por cromatografía líquida de alta resolución (HPLC)

Las muestras se recolectan en diferentes etapas del proceso de elaboración de la panela (extracción, prelimpieza, clarificación y encalado, evaporación y concentración, punteo y batido), para posteriormente ser analizadas por HPLC según el método establecido por Vargas, Talero, Trujillo, y Caballero (2014), por lo cual se realiza el siguiente procedimiento: para las muestras líquidas se toman 10,00 mL de jugo de caña y se disuelven en 100 mL de agua desionizada y filtrada. En cuanto a las muestras sólidas, se pesan 10,00 g en las etapas de evaporación y concentración (mieles) y en la de punteo y batido (panela),

para posteriormente ser pulverizadas en un molino con cuchillas extrafinas; consecutivamente se disuelven en 100 mL de agua tipo HPLC y se centrifugan a 4.000 rpm durante 30 min, para retirar la mayor parte de sólidos presentes; cada muestra se inyecta al equipo por triplicado, posteriormente, se extraen los datos reportados por el equipo de las áreas bajo la curva, y de esta manera se interpola en la ecuación de la recta, y se determina la concentración de analito presente en cada una de las muestras. Se emplea una columna C18 (150 x 4,6 mm, D.I.) tamaño de partícula 5 µm, a una temperatura de 23 °C y un flujo de 0,5 mL/min, con un detector UV-Vis a 210 nm. El volumen de inyección es de 20 µL, se realiza una elución isocrática con acetonitrilo: agua, 1:24 (v/v). Para realizar la corrida cromatográfica, se inyectaron cada uno de los estándares de acrilamida y las muestras de panela o productos derivados de caña. El tiempo de corrida es de 6 min para los estándares de acrilamida, debido a que después de este tiempo no aparecían más señales; y 30 min para las muestras, para observar si aparecían nuevas señales durante este tiempo de corrida. Se prepara una solución stock de acrilamida, 100 mg/kg utilizando reactivo grado analítico, acrilamida electroforesis 99,9 % Merck, esta disolución se prepara empleando un balón aforado clase A. Posteriormente se hacen disoluciones a diferentes concentraciones de 0; 4; 1; 2; 5; y 10 mg/kg respectivamente con lo cual se obtiene la curva de calibración para la cuantificación de acrilamida en las muestras. Las concentraciones finales se expresan como mg/100 g de muestra.

4. Discusión de resultados

Luego del rastreo de información, se pudo establecer que se han utilizado otras cuatro especies del género *Saccharum* para la producción de mieles de caña o azúcar: *S. barberi*, conocida como “caña india” o caña “fina”; *S. robustum*; *S. sinense*, conocida como “caña china”; y *S. spontaneum*, que se conoce como “caña silvestre” y se utiliza con fines de hibridación (FAO, 2014; Jaffé, 2012). Enfocados en la cadena productiva de *S. officinarum*, se identificaron algunas problemáticas tecnológicas y de mercado (FAO, 2014). Los problemas centrales están referidos a la baja competitividad de los trapiches pequeños, a la deficiente calidad de los productos derivados, falta de homogeneidad, a los daños ambientales por el consumo de leña y caucho en las hornillas, a las restricciones para ampliar el mercado debido a las exigencias dadas por la normativa legal para la comercialización de productos azucarados (FAO, 2014), y a la necesidad de verificar la diversidad fenólica, metabolitos antioxidantes y la presencia de oligoelementos tóxicos, como los metales pesados o la acrilamida.

Las NTC establecen un punto de partida válido y vigente para el inicio del proceso de caracterización de los productos derivados de *S. officinarum*, pero no es suficiente debido al limitado conjunto de parámetros que evalúan. Según lo rastreado en el organismo Icontec (Tablas 2 y 3), para los productos de mieles de caña, el conjunto de NTC se puede dividir en dos grupos, uno relaciona la caracterización de algunos parámetros fisicoquímicos (Tabla 2) y otro pretende determinar la inocuidad microbiana del producto (Tabla 3). Dentro del primer grupo de NTC permiten cuantificar algunos parámetros fisicoquímicos y contenidos de moléculas de seguimiento, mayoritariamente azúcar y etanol, entre ellas se registran la NTC 1779:2017 (Icontec, 2017a), NTC 570:2012 (Icontec, 2012a), NTC 1856:2010 (Icontec, 2010) y NTC 6385:2020 (Icontec, 2020a) (Tabla 2). Los ensayos y parámetros que deben cuantificarse y reportarse para establecer las características físicas y químicas de los productos derivados de caña de azúcar, como por ejemplo en jugos, jarabes, fermentados alcohólicos y los diversos tipos de azúcar blanco, blanco especial, refinado y crudo se registran en las NTC 1846:2020 (Icontec, 2020b), NTC 3442:2011 (Icontec, 2011) y NTC 440:2015 (Icontec, 2015) (Tabla 2). Los requisitos o terminología se consignan en las NTC 587:1994 (Icontec, 1994a) y NTC 573:2013 (Icontec, 2013). La determinación de aditivos, lo muestran las NTC 5970:2012 (Icontec, 2012b) y NTC 2369:1994 (Icontec, 1994b) (Tabla 2). Por último, en cuanto a la Panela, se tiene la NTC 1311:2009 (Icontec, 2009), la cual establece los requisitos y los ensayos que debe cumplir la panela destinada para el consumo humano (Tabla 2).

Al ahondar en el contenido de algunas NTC, por ejemplo, la NTC 1779:2017 (Icontec, 2017a), por medio de la cual se determina el contenido de azúcares reductores, se puede notar que muestra una secuencia metodológica que puede llevar a que se presenten varias fuentes de error, lo cual hace que la técnica presente un amplio rango de incertidumbre asociado. Algunas fuentes de incertidumbre son la preparación de solución Fehling A y B, titulación de una solución en ebullición, el material volumétrico diverso y el punto final de la titulación. La cromatografía líquida HPLC con detector de índice de refracción es una alternativa fiable, robusta y con menor grado de incertidumbre asociado, así como lo describe la ISO 10504:2013 (ISO, 2013a), que además, ofrece menor tiempo de análisis, produce menos residuos y permite cuantificar en una sola corrida el conjunto de azúcares.

Por su parte, la NTC 1856:2010 (Icontec, 2010) presenta dos formas de determinar el dióxido de azufre, las dos metodologías son de uso recurrente, no solo en la industria de azúcares, sino en otros alimentos. Su adaptación resulta muy compleja en los laboratorios, debido a sus requerimientos en términos de equipamientos, preparación de soluciones, falsos positivos e interferentes. Las alternativas normalizadas que se presentan son igualmente dispendiosas: la ISO 5379:2013 (ISO, 2013b) presenta la determinación por acidimetría y nefelometría; la ICUMSA GS 2/3-35 (ICUMSA, 2011e) y Nordic Committee on Food Analysis (1990), en su NMKL 135, presentan una determinación por un método enzimático de difícil manejo, aunque menos dispendioso que la ISO 5379:2013 (ISO, 2013b); la AOAC Official Method 990.28 presenta la determinación por el método de Monier-Williams, el cual también resulta complejo de adaptar y obtener mediciones reproducibles. Existen otros métodos no normalizados como el de Ho-Soo *et al.* (2014), donde se emplea HPLC, pero son aún metodologías en proceso de validación y adaptación a las matrices alimentarias complejas. Esta determinación continúa siendo un desafío para la química analítica.

Por último, la NTC 1311:2009 (Icontec, 2009), además de presentar las problemáticas asociadas a las determinaciones anteriormente mencionadas, muestra un criterio cualitativo, el color por medio del ensayo de tinción de lana. Para determinar el color existen protocolos normalizados que se deben adoptar, ya que es crucial, en la industria de la panela, determinar la inclusión mal intencionada de colorantes para engañar al consumidor simulando un color óptimo del producto, se puede y se debe implementar dentro de la NTC 1311:2009 (Icontec, 2009) la ICUMSA GS9/1/2/3-8 (ICUMSA, 2011d), que muestra como determinar el color de azúcares o mezclas de estas. En el segundo grupo, se encuentran las NTC que tienen por objetivo la determinación de algunos microorganismos perjudiciales para la salud humana, entre ellos la *Escherichia coli*, mohos, levaduras y bacterias mesófilas aerobias, consignadas en las normas NTC 3953:2017 (Icontec, 2017b), NTC 3954:2017 (Icontec, 2017c), NTC 6086:2017 (Icontec, 2017d) y NTC 3908:2017 (Icontec, 2017e) (Tabla 3).

Son claras, entonces, las limitaciones de las NTC, en cuanto a que, si bien responden a generar estándares básicos para la comercialización de productos derivados de *S. officinarum*, no contemplan la cuantificación de vitaminas, antioxidantes, fenoles, antocianinas o fitoesteroles, ni de un contaminante como la acrilamida, pero ¿por qué resulta relevante medir estos grupos de moléculas? Revisemos alguna evidencia científica que nos puede ayudar a contestar esta pregunta.

Las mieles de caña y los productos que se elaboran a partir de ella, como la panela, poseen gran potencial en términos nutricionales y comerciales. En términos nutricionales, su participación en el consumo diario de edulcorantes calóricos (g/ persona/día) para 2007 fue de 46 % en Myanmar, 20 % en Bangladesh, 19 % en Colombia, 10 % en India y 10 % en Pakistán (Jaffé, 2012). La sacarosa es el componente más importante de los derivados de jugo de caña, entre 76,55 y 89,48 %, seguido de azúcares reductores (3,69 a 10,5 %) y agua (1,5 a 15,8 %). El rango relativamente grande de contenido de humedad se debe a las diferencias en las condiciones del proceso de fabricación de este producto principalmente artesanal. El contenido de minerales (cenizas) es relativamente alto (0,3-3,6 %). El contenido de proteínas oscila entre el 0,37 y el 1,7 % y las grasas entre el 0 y el 0,1 %.

La diferencia básica entre los derivados de jugo de caña y azúcar refinada es la presencia en el primero de azúcares reductores y de importantes cantidades de minerales y otros constituyentes menores, como los fenoles, así como lo reportan Semwal, Jai Singh, Kumar, y Malik (2021). La diferencia nutricional y funcional dependerá principalmente, de la determinación de este grupo de componentes menores (Shaheen et al., 2013; Nimrouzi et al., 2014). Al menos dos azúcares raros o complejos con potencial funcional se han identificado en los derivados de jugo de caña. D-psicosa, un epímero C-3 de D-fructosa, es uno de ellos, presente en pequeñas cantidades en alimentos con carbohidratos comerciales o productos agrícolas. Tiene 70 % del dulzor de la sacarosa, pero sin calorías (Cheung et al., 2012). Se ha encontrado que en los derivados de jugo de caña se presentan cantidades relativamente altas de ella. En modelos animales se ha afirmado que la D-psicosa tiene propiedades antihiper glucémicas y efectos antiaterosclerosis (Cheung; Oh; Lee, 2012).

Por su parte, un estudio temprano en 1949 con ratas anémicas indicó que el hierro en la panela se absorbe fácilmente y produce niveles altos de hemoglobina en 18 días (Jaffé; Ochoa, 1949). Dos estudios apoyan estos hallazgos en humanos. Olivares, Pizarro, Hertrampf, Fuenmayor y Estévez (2007) encontraron que la adsorción de hierro de la sopa de fideos de trigo fue significativamente mayor cuando es consumida con limonada endulzada con panela (11 %), en comparación con la misma comida sin limonada. El análisis se realizó con 13 mujeres y fue medida por un método doble isotópico. Arcanjo, Pinto, Arcanjo y Amancio (2009) registraron un aumento estadísticamente significativo de hemoglobina en niños en edad preescolar, asociado al consumo de una bebida de panela con ácido ascórbico. Las estrategias actuales se centran en la mejora de las dietas y los patrones dietéticos, así como en la fortificación de alimentos con hierro y la suplementación directa de la ingesta de hierro (World Health Organization [WHO], 2001); y, más recientemente, en la denominada biofortificación, que busca aumentar el contenido de hierro en cultivos básicos, por medios genéticos o por fertilización (Sautter; Gruissem, 2010). El desarrollo de productos de consumo masivo basados en las mieles de caña, o en alguno de los derivados de caña, podrá ser una estrategia relativamente barata y adaptada al mercado, que podría ser industrial y comercialmente atractiva. Así mismo, reportan Watanabe, Nakabaru, Taira, Ueno, Kawamitsu (2016) y Scheid *et al.* (2020), pero en un cultivo de basidiomicetos.

El efecto cariostático de las mieles de caña y los derivados de caña se debe presumiblemente a su contenido de fosfatos. Pero en un efecto sinérgico de la adición de fosfatos a una dieta de azúcar morena sobre la inhibición de la caries dental en hámsteres sugirió la presencia de sustancias bioactivas adicionales (Stralfors, 1966). Esto también se ha encontrado en una colaboración de la Universidad Ryukyus y Toiyo Kagaku Co. de Japón, quienes informaron del aislamiento de dos compuestos bioactivos fenólicos de la melaza de caña de azúcar, que tienen propiedades inhibitorias contra las bacterias cariogénicas *Streptococcus mutans* y *Streptococcus sobrinus* comparables a los agentes antibacterianos comerciales (Takara; Otsuka; Wada; Iwasaki; Yamashita, 2007) por efecto de la inhibición de la glucosiltransferasa.

La actividad antioxidante y citoprotectora también se encuentra en la azúcar morena producida a partir de panela, lo que sugiere que los compuestos bioactivos detrás de estas propiedades se transfieren de las mieles de caña (Seguí; Calabuig-Jiménez; Betoret; Fito, 2015). Investigadores del Instituto Central de Investigación Tecnológica de Alimentos y la Universidad de Mysore, India, informaron que una concentración de azúcar morena de 4 mg/mL proporcionó una protección del 97 % en un modelo de investigación de oxidación de células NIH 3T3 (Harish Nayaka; Sathisha; Manohar; Chandrashekar; Dharmesh, 2009). Por otro lado, un grupo de la Ehine Graduate School of Medicine y la Foundation of International Oriental Medicine Research demostró que la aplicación tópica durante 19 semanas de la fracción no azucarada de la azúcar morena previno el envejecimiento crónico de la piel inducido por los rayos UVB en un modelo in vivo con ratones sin pelo que poseían melanina (Sumiyoshi; Hayashi; Kimura, 2009). Se sugiere que esto puede deberse a la inhibición del aumento en la expresión de la metaloproteína-2 de la matriz y del factor de crecimiento endotelial vascular (Harish Nayaka et al., 2009). Resultados similares reportan Zhao et al. (2018) y, Uchenna, Adaeze y Steve (2015). Investigadores de universidades japonesas, egipcias, finlandesas, surcoreanas, tailandesas y de una

empresa azucarera japonesa han demostrado que azúcar morena producida a partir de panela tiene efectos reconstituyentes funcionales y morfológicamente en intestinos de pollo, con consecuencias significativas para el aumento de peso corporal, lo que indica un posible papel en nutrición animal (El-Abasy *et al.*, 2004; Amer *et al.*, 2004).

Se han reportado efectos anticancerígenos de los derivados de la caña de azúcar. Yoshimoto, Kurata, Fujii, y Hou (2008) encontraron, en experimentos *in vitro* e *in vivo*, que el vinagre de caña de azúcar deprimió una mutación inducida en *Salmonella typhimurium* TA98. El componente bioactivo, 3', 5'-di-O-metiltricetina es el 3', 5'-di-O-metil o tricetina, extraído por cromatografía, estimado como fenólico, deprimió efectivamente la proliferación de una línea celular de leucemia promielocítica. Su administración a ratones con una dieta al 5 % estimuló significativamente la actividad de las células asesinas y mostró una tendencia a deprimir la proliferación de células tumorales. El extracto fenólico que contiene los glucósidos de tricetina (5,7,4-trihidroxi-3,5-dimetoxiflavona), apigenina (4, 5,7-trihidroxi-flavona) y luteolina (3, 4, 5,7-tetradihidroxi-flavona), extraídos del jugo de caña de azúcar por un grupo brasileño, mostró actividad antiproliferativa *in vitro* contra varias líneas celulares de cáncer humano de mama, con una mayor selectividad hacia células de la línea NIC/ADR resistentes (Duarte-Almeida; Novoa; Linares; Lajolo; Genovese, 2006).

La sacarosa es el componente más importante de los derivados de jugo de caña, entre 76,55 y 89,48 %, seguida de azúcares reductores (3,69 a 10,50 %) y agua (1,50 a 15,80 %). El rango relativamente grande de contenido de humedad se debe a las diferencias en las condiciones del proceso de fabricación de este producto principalmente artesanal. El contenido de minerales (cenizas) es relativamente alto (0,3-3,6 %). El contenido de proteínas oscila entre el 0,37 y el 1,7 % y las grasas entre el 0 y el 0,1 %. No se ha reportado fibra dietaria. La diferencia básica entre los derivados de jugo de caña y azúcar refinada es la presencia en el primero de azúcares reductores y de importantes cantidades de minerales y otros constituyentes menores. La diferencia nutricional y funcional dependerá entonces, de la determinación de este grupo de componentes menores (Guerra; Mujica, 2010; Instituto Colombiano de Bienestar Familiar [ICBF], 2014; Rodríguez; Segura, 2004; Waheed; Ahmad, 2008).

Para los minerales en los derivados de jugo de caña, se tienen rangos para el calcio, el cloruro y el potasio del orden de 100 mg/100 g, seguidos de fósforo, sodio y magnesio del orden de 10 mg/100 g, cobre y hierro del orden de 1 mg/100 g, manganeso y zinc del orden de 0,1 mg/100 g y cromo y cobalto en un orden de 0,01 a 0,001 mg/100 g (Guerra; Mujica, 2010; ICBF, 2014; Rodríguez; Segura, 2004; Waheed; Ahmad, 2008).

En cuanto al contenido de vitaminas presentes en los derivados de jugo de caña, la vitamina A se reporta en un rango de 1,90 mg/100 g, carotenos 80,75 µg/100 g, vitamina B1 0,03 mg/100 g, vitamina B2 0,07 mg/100 g, vitamina B3 2,14 mg/100 g, vitamina B5 0,70 mg/100 g, vitamina B6 0,25 mg/100 g, vitamina B9 3,33 µg/100 g, vitamina C 4,23 mg/100 g, vitamina D2 2,17 mg/100 g y vitamina E 55,65 mg/100 g (ICBF, 2014; Shaheen *et al.*, 2013; Singh *et al.*, 2015; Waheed; Ahmad, 2008).

La actividad antioxidante de los derivados de jugo de caña ha sido cuantificada por ensayos de eliminación de radicales libres, estas medidas son difíciles de comparar debido a diferentes metodologías y unidades de medida, pero está claro que presenta importantes capacidades antioxidantes. El estudio publicado por Payet, Shum-Cheong-Sing, y Smadja (2005) mostró que por el método de DPPH se obtiene un 22,1 % y por el de ABTS, entre un 47,1-51,3 % de inhibición. Harish Nayaka *et al.* (2009), por el método de DPPH, reportan 7,81 µg/ml EC50. Okabe *et al.* (2008), por el método de DPPH, evidencian 935,67 mmol trolox equivalente/100 g. Phillips, Carlsen, y Blomhoff, (2009), por el método de RAP, reportan 0,204 mmol/100 g. La importancia relativa de esta capacidad antioxidante ha sido abordada parcialmente por Phillips *et al.* (2009), quienes calcularon que el aumento en el contenido de antioxidantes que resultaría de la sustitución del azúcar refinado por azúcar de caña en bruto sería de 0,1 a 0,2 mmol por día. La ingesta de antioxidantes provenientes de los derivados de jugo

de caña sería similar al aporte de té o frutas, que se consideran altos en antioxidantes (Phillips *et al.*, 2009). Está claro que reemplazar el azúcar refinado con derivados de jugo de caña puede contribuir significativamente al contenido acumulativo de antioxidantes de la dieta.

Desde 2006, se han publicado al menos ocho informes sobre actividad antioxidante en hojas de caña de azúcar, otras partes de la planta, jugo de caña de azúcar y melaza (Abbas *et al.*, 2013). Esta actividad ha sido cuantificada mediante ensayos de actividad captadora de radicales y otros, como DPPH, capacidad reductora férrica del plasma (FRAP), ácido β -caroteno/linoleico y reducción de fosfomolibdeno. Todos estos estudios coinciden en la actividad antioxidante relativamente alta de la caña de azúcar, el jugo de caña de azúcar y la melaza, y en su potencial importancia funcional. La actividad antioxidante se correlaciona significativamente con el contenido fenólico total medido por el ensayo de Folin-Ciocalteu (Harish Nayaka *et al.*, 2009; Payet *et al.*, 2005). Otros estudios identifican compuestos antioxidantes fenólicos individuales en la planta de caña de azúcar y jugo de caña de azúcar (Abbas *et al.*, 2013, 2014; Vila; Colombo; de Lira; Yariwake, 2008).

En cuanto a los contenidos de otras moléculas bioactivas, Payet *et al.* (2005) reportan 25,96 mg ácido gálico equivalente/100 g, y Harish Nayaka *et al.* (2009) 3873 mg ácido gálico equivalente/100 g. Así mismo, se ha informado la presencia de al menos 15 agliconas fenólicas (Galvez; Kwon; Genovese; Lajolo; y Shetty, 2008; Harish Nayaka *et al.*, 2009; Payet *et al.*, 2005), identificadas y cuantificadas por HPLC o RMN. Los compuestos fenólicos en la caña de azúcar han sido tradicionalmente de interés para los tecnólogos del azúcar como una de las causas del color en los productos de la caña de azúcar. Se ha identificado una gran variedad de pigmentos vegetales y colorantes naturales en las hojas y el jugo de la caña de azúcar (Paton; Doun, 1992). La propia planta de caña suministra principalmente pigmentos vegetales de bajo peso molecular: flavonoides, clorofilas, carotenos, xantofilas y compuestos fenólicos, que aportan aproximadamente el 30 % de todo el color del azúcar en bruto. El resto lo proporcionan los colorantes de alto peso molecular, muchos de ellos producto de transformaciones químicas durante el procesamiento de la caña (Paton; Doun, 1992).

Se han identificado más de veinte aminoácidos en los derivados de jugo de caña, el 70-80 % de ellos son Ácido aspártico-Asp, Asparagina-Asn, Ácido glutámico-Glu y Glutamina-Gln (Nakasone; Ikema; Kobayashi, 1990). Se sugiere que los aminoácidos juegan un papel importante en la formación de aroma de la panela. La presencia de aminoácidos se confirmó indirectamente cuando se detectó acrilamida en los derivados de jugo de caña (Hoenicke; Gattermann, 2005). Se sospecha que esta sustancia es cancerígena y se forma cuando los carbohidratos y el aminoácido asparagina se someten a altas temperaturas, como durante el horneado, la fritura y el asado (Dybing *et al.*, 2005).

Se han identificado treinta compuestos volátiles en los derivados de jugo de caña mediante cromatografía de gases acoplada a un espectrómetro de masas (GC-MS), la mayoría son furanos, furanonas, 2-acetilpirrol o 5-(hidroximetil) furfural, producto de la degradación térmica de carbohidratos vía caramelización o reacciones de Maillard durante el proceso de fabricación (Payet *et al.*, 2005). Las reacciones de Maillard glucosa-aminoácidos también producen aromas diferentes dependiendo del aminoácido presente (Wong; Aziz; Mohamed, 2008).

Jaffé (2012), en una revisión, identificó 27 reportes de una amplia gama de efectos en la salud de los derivados de jugo de caña o sus extractos, en modelos de investigación *in vitro* o en animales. Dentro de eso, solo dos artículos informan ensayos con humanos. Los compuestos bioactivos propuestos como posibles causas son minerales: Fe, Cr y P en forma de fosfatos y compuestos fenólicos. En dos casos se han identificado polifenoles bioactivos específicos, como la tricina, apigenina y luteolina. La evidencia más fuerte de un efecto sobre la salud es el aumento de en la formación de hemoglobina y glóbulos rojos causado por su contenido de hierro, reportado en humanos por al menos dos artículos (Jaffé, 2012). La relación de causa y efecto entre el consumo de hierro y el aumento de hemoglobina y glóbulos rojos ha sido aceptada por la Agencia Europea de

Seguridad Alimentaria y, por lo tanto, las afirmaciones en este sentido están permitidas en Europa (European Food Safety Agency [EFSA], 2014). El aumento estadísticamente significativo de hemoglobina en niños en edad preescolar después del consumo de una bebida fortificada con los derivados de jugo de caña o sus extractos ha sido demostrado (Arcanjo *et al.*, 2009), lo que los llevó a considerarlo como un fortificante alimentario (Nishad; Selvan; Mir; Bosco, 2017; Arcanjo; Amancio; Braga, 2013). También se han reportado efectos antiaterogénicos (Penson; Banach, 2021).

En Pakistán se han detectado oligoelementos tóxicos como arsénico, bromo, mercurio, antimonio y selenio por medio de cromatografía de intercambio aniónico de alto rendimiento con detector de conductividad (HPAEC-CD) en los derivados de jugo de caña o sus extractos (Waheed; Ahmad, 2008), pero su contenido está dentro de los niveles de tolerancia humana. Asimismo, se ha encontrado acrilamida (Hoenicke; Gattermann, 2005), un producto del proceso de fabricación, y su formación puede reducirse o evitarse controlando algunos parámetros del proceso (Dybing *et al.*, 2005). En un estudio reciente, Mesias *et al.* (2020) muestran evidencia concreta de la evolución en la formación de la acrilamida, a medida que se van incremento los °Brix, pH, azúcares reductores, furfural, pardeamiento y fenoles; y disminuyen la humedad y el contenido de asparagina. Es así, como se determinó que la muestra de jugo fresco recién exprimido y jugo clarificado y procesado a temperaturas menores de 100 °C no contenían niveles de acrilamida; en contraste, con las muestras de jugo concentrado a más de 100 °C hasta lograr 60-65 °Brix, y en la muestra de panela en bloque producida a más de 120 °C, donde se encontraron niveles de 298±31 µg acrilamida/kg producto y 890±15 µg acrilamida/kg producto, respectivamente. Lo cual corrobora la evidencia antes reportada sobre el efecto de los tratamientos térmicos en la producción de acrilamida, por ejemplo, en el estudio de Vargas *et al.* (2014) se reportan 800 µg acrilamida/kg producto panela; en azúcar sin refinar se reportan 140 µg acrilamida/kg producto (Hoenicke; Gattermann, 2005); en panela en bloque se reportan 540 µg acrilamida/kg producto (Gómez-Narváez *et al.*, 2019).

5. Conclusiones

Lo anteriormente descrito muestra un panorama reciente de los diferentes metabolitos de los productos derivados de *S. officinarum*. Son claros los efectos positivos para la salud de las mieles de caña y sus derivados. Queda en evidencia la necesidad de reformular las NTC que determinan los parámetros mínimos en los productos derivados de caña de azúcar, lo anterior, no con el ánimo de generar otro impedimento a la cadena productiva, sino todo lo contrario, con el fin de generar un valor agregado a los productos, en términos de aprovechamiento integral de las propiedades biológicas, nutracéuticas y biofuncionales del conjunto de metabolitos. Estas cuantificaciones generarán un valor agregado a los productos y les darán el peso nutricional suficiente para negociar mejores precios, así como, la opción de pensar en nuevos productos para el mercado. Este esfuerzo debe venir acompañado de una caracterización nacional y concertada con el sector productivo, que posibilite el estudio de las potencialidades de las subregiones de cultivo, por ejemplo, en la Hoya del Río Suarez que abarca sectores de los Departamentos de Santander, Boyacá y Cundinamarca o en las zonas de Valle del Cauca o Antioquia. Se sugiere, como mínimo, que los parámetros de contenido de fenoles totales, capacidad antioxidante y acrilamida, sean adicionados a las NTC 1311:2009 (Icontec, 2009), y se inicie el estudio de la posible incorporación al otro grupo de normas de caracterización de los productos derivados de *S. officinarum* descritas en la Tabla 2 y 3, o generar un nuevo grupo de NTC que estandaricen su medición empleando las normas disponibles para azúcares o productos similares, derivadas de entidades como ISO, ICUMSA o la International Sugar Organization.

6. Agradecimientos

Los autores expresan su agradecimiento a la Coordinación Nacional de Sennova por la financiación del proyecto SGPS 6383, que permitió el montaje de la infraestructura del laboratorio de servicios tecnológicos del Centro Agroturístico de San Gil. También agradecen el apoyo de las profesionales Nelly Quiroga Sarmiento, subdirectora (e); Tulio Rodríguez Bautista, subdirector (e) y Luz Marina Arenas Villar, coordinadora misional, por toda su gestión, que permitió recibir los recursos y realizar su ejecución para adquirir la infraestructura del proyecto de servicios tecnológicos, enfocado al sector productivo de panela y derivados.

7. Referencias

- Abbas, Syed; Ahmed, Sundus; Sabir, Syed; Shah, Asad; Awan, Shahid; Gohar, M.; Khan, M. F.; Rao, Aurangzeb. (2013). Antioxidant activity, repair and tolerance of oxidative DNA damage in different cultivars of Sugarcane (*Saccharum officinarum*) leaves. *Australian Journal of Crop Science*, 7, 40-45. R
- Abbas, Syed; Sabir Syed; Ahmad, Syed; Boligon, Aline; Athayde, Margareth (2014). Phenolic profile, antioxidant potential and DNA damage protecting activity of sugarcane (*Saccharum officinarum*). *Food Chemistry*. 15(147), 10-16.
<https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2013.09.113>
- Adom, Kafui; Liu, Rui. (2002). Antioxidant activity of grains. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 50(21), 6182-6187.
<https://doi.org/10.1021/jf0205099>
- Amer, Said; Na, Ki-Jeong; El-Abasy, Moshira; Motobu, Maki; Koyama, Yukari; Koge, Kenji; Hirota, Yoshikazu. (2004). Immunostimulating effects of sugar cane extract on X-ray radiation induced immunosuppression in the chicken. *International Immunopharmacology*, 4(1), 71-77.
<https://doi.org/10.1016/j.intimp.2003.10.006>
- Andrews, Jennifer. (2001). Determination of minimum inhibitory concentrations. *Journal of Antimicrobial Chemotherapy*, 48(1), 5-16,
https://doi.org/10.1093/jac/48.suppl_1.5
- Arcanjo, Francisco; Amancio, Olga; Braga, Josefina. (2013). Evaporated sugarcane juice as a food fortificant. En V. Preedy, R. Srirajaskanthan, y V. B. Patel (Eds.), *Handbook of Food Fortification and Health* (pp. 105-111). Nueva York: Springer.
- Arcanjo, Francisco; Pinto, Vicente; Arcanjo, María; Amancio, Olga (2009). Effect of a beverage fortified with evaporated sugarcane juice on hemoglobin levels in preschool children. *Revista Panameña de Salud Pública*, 26, 350-354.
- Benzie, Iris; Strain, J. J. (1996). The ferric reducing ability of plasma (FRAP) as a measure of “antioxidant power”: the FRAP assay. *Analytical Biochemistry*, 239(1), 70-76.
<https://doi.org/10.1006/abio.1996.0292>
- Castro, Felipe; Arboleda, Óscar; Balcázar, Álvaro; Estupiñán, Fernando. (2013). *Evaluación institucional y de resultados del Subsistema Nacional de la Calidad. Informe final*. Bogotá: Fedesarrollo.
- Cheung, Min-Yu; Oh, Deok-Kun; Lee, Ki Won. (2012). Hypoglycemic health benefits of D-psicose. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 60(4), 863-869.
<https://doi.org/10.1021/jf204050w>
- Consejo Nacional de Política Económica y Social [Conpes]. (2016). *Conpes 3866. Política nacional de desarrollo productivo*. Bogotá: Departamento Nacional de Planeación.

- Departamento Administrativo Nacional de Estadística. (2013). *Encuesta de Desarrollo e Innovación Tecnológica EDIT, 2005-2012*. Recuperado de <https://www.dane.gov.co/index.php/estadisticas-por-tema/tecnologia-e-innovacion/encuesta-de-desarrollo-e-innovacion-tecnologica-edit>
- Departamento Administrativo Nacional de Estadística. (2020). *Encuesta de Desarrollo e Innovación Tecnológica EDIT, 2018-2019*. Recuperado de <https://www.dane.gov.co/index.php/estadisticas-por-tema/tecnologia-e-innovacion/encuesta-de-desarrollo-e-innovacion-tecnologica-edit>
- Duarte-Almeida, Joaquim; Novoa, Alexis; Linares, Adyary; Lajolo, Franco; Genovese, María. (2006). Antioxidant activity of phenolic compounds from sugarcane juice. *Plant Foods for Human Nutrition*, 61, 187-192. <https://doi.org/10.1007/s11130-006-0032-6>
- Dybing, Erik; Farmer, P. B.; Anderson, Melvin; Fennell, Timothy; Lallje, Sam; Müller, D. J. G.; Olin, S.; Petersen, B. J.; Schlatter, J.; Scholz, Gabriele; Scimeca, Joseph; Slimani, Nadia; Törnqvist, Margareta; Tuijelaars, S.; Verger, Philippe. (2005). Human exposure and internal dose assessments of acrylamide in food. *Food Chemical Toxicology*, 43(3), 365-410. <https://doi.org/10.1016/j.fct.2004.11.004>
- El-Abasy, Moshira; Motobu, Maki; Nakamura, Kikuyasu; Koge, Kenji; Onodera, Takashi; Vainio, Olli; Toivanen, Paavo; Hirota, Yoshikazu. (2004). Preventive and therapeutic effects of sugar cane extract on cyclophosphamide-induced immunosuppression in chickens. *International Immunopharmacology*, 4(8), 983-990. <https://doi.org/10.1016/j.intimp.2004.01.019>
- European Food Safety Agency. (2014). Scientific opinion on the substantiation of a health claim related to iron and contribution to normal formation of hemoglobin and red blood cells pursuant to Article 14 of regulation (EC) No 1924/2006. *EFSA Journal*, 12(1), 3355. <https://doi.org/10.2903/j.efsa.2014.3515>
- Food and Agriculture Organization (2019). *Codex Alimentarius. Recommended methods of analysis and sampling, adopted by the 42nd Session of the Codex Alimentarius Commission in 2019*. Recuperado de http://www.fao.org/fileadmin/user_upload/agns/pdf/CXS_234e.pdf
- Food and Agriculture Organization of the United Nations. (2014). *Producción de panela como estrategia de diversificación en la generación de ingresos en áreas rurales de América Latina*. Recuperado de http://www.fao.org/fileadmin/user_upload/ags/publications/AGSF_WD6s.pdf
- Galvez, Lena; Kwon, Young-In; Genovese, María; Lajolo, Franco; Shetty, Kalidas. (2008). Antidiabetes and antihypertension potential of commonly consumed carbohydrate sweeteners using in-vitro models. *Journal of Medicinal Food*, 11(2), 337-348. <http://doi.org/10.1089/jmf.2007.689>
- Glyad, V. M. (2002). Determination of monosaccharides, disaccharides, and oligosaccharides in the same plant sample by High-Performance Liquid Chromatography. *Russian Journal of Plant Physiology*, 49(2), 277-282. <https://doi.org/10.1023/A:1014870011027>
- Gómez-Narváez, F; Mesías, Marta; Delgado-Andrade, Cristina; Contreras-Calderón, José; Ubillús, Fabiola; Cruz, Gastón; Morales, Francisco. (2019). Occurrence of acrylamide and other heat-induced compounds in panela: Relationship with physicochemical and antioxidant parameters. *Food Chemistry*, 301, 125-256. <http://doi.org/10.1016/j.foodchem.2019.125256>
- Guerra, María; Mujica, Virginia. (2010). Physical and chemical properties of granulated cane sugar “panelas”. *Ciência e Tecnologia de Alimentos*, 30(1), 250-257. <http://doi.org/10.1590/S0101-20612010005000012>

- Harish Nayaka, M. A.; Sathisha, U. V.; Manohar, M. P.; Chandrashekar, K. B.; Dharmesh, Shylaja. (2009). Cytoprotective and antioxidant activity studies of jaggery sugar. *Food Chemistry*, 115(1), 113-118.
<https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2008.11.067>
- Hoenicke, K.; Gatermann, R. (2005). Studies on the stability of acrylamide in food during storage. *Journal of AOAC International*, 88(1), 268-273.
- Ho-Soo, Lim; Sung-Kwan, Park; So-Hee, Kim; Sung-Bong, Song; Su-Jin, Jang; Meehye, Kim. (2014). Comparison of four different methods for the determination of sulfites in foods marketed in South Korea. *Food Additives & Contaminants: Part A*, 31(2), 187-196.
<https://doi.org/10.1080/19440049.2013.857048>
- Indyk, H. E., Lawrence, Broda. (1993). The micronutrient content of bovine whole milk powder: influence of pasture feeding and season. *Food Chemistry*, 46(4), 389-396.
[https://doi.org/10.1016/0308-8146\(93\)90010-D](https://doi.org/10.1016/0308-8146(93)90010-D)
- Instituto Colombiano de Bienestar Familiar. (2014). *Tabla de composición de alimentos colombianos*. Recuperado de http://alimentoscolombianos.icbf.gov.co/alimentos_colombianos/consulta_alimento.asp
- Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación. (2021). *Icontec*.
<https://www.icontec.org/>
- Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación. (2009). *Norma Técnica Colombiana, NTC-ISO 3951-1, 2, 3, 4 y 5: Procedimientos de muestreo para la inspección por variables*. Recuperado de <https://www.icontec.org/rules/procedimientos-de-muestreo-para-la-inspeccion-por-variables-parte-2-especificacion-general-para-los-planes-de-muestreo-simples-tabulados-segun-el-nivel-aceptable-de-calidad-nac-para-la-inspeccion/>
- Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación. (1994a). *Norma Técnica Colombiana, NTC 587:1994. Industrias alimentarias e industrias de bebidas. melaza de caña*. Recuperado de <https://tienda.icontec.org/gp-industrias-alimentarias-e-industrias-de-bebidas-melaza-de-cana-ntc587-1994.html>
- Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación (1994b). *Norma Técnica Colombiana, NTC 2369:1994. Industrias alimentarias. Floculantes derivados de la acrilamida utilizados en la clarificación del agua potable y de los jugos y jarabes de la caña de azúcar*. Recuperado de <https://tienda.icontec.org/gp-industrias-alimentarias-floculantes-derivados-de-la-acrilamida-utilizados-en-la-clarificacion-del-agua-potable-y-de-los-jugos-y-jarabes-de-la-cana-de-azucar-ntc2369-1994.html>
- Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación. (1999). *Norma Técnica Colombiana, NTC 410:1999. Bebidas alcohólicas. aguardiente de caña. Caña, cachaza o branquiña*. Recuperado de <https://tienda.icontec.org/gp-bebidas-alcoholicas-aguardiente-de-cana-cana-cachaza-o-branquiña-ntc410-1999.html>
- Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación. (2002). *Norma Técnica Colombiana, NTC-ISO 2859-1:2002. Procedimientos de muestreo para inspección por atributos. parte 1: planes de muestreo determinados por el nivel aceptable de calidad -nac- para inspección lote a lote*. Recuperado de <https://tienda.icontec.org/gp-procedimientos-de-muestreo-para-inspeccion-por-atributos-parte-1-planes-de-muestreo-determinados-por-el-nivel-aceptable-de-calidad--nac--para-inspeccion-lote-a-lote-ntc-iso2859-1-2002.html>

- Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación. (2009). *Norma Técnica Colombiana, NTC 1311:2009. Productos agrícolas. Panela*. Recuperado de <https://tienda.icontec.org/gp-productos-agricolas-panela-ntc1311-2009.html>
- Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación. (2010). *Norma Técnica Colombiana, NTC 1856:2010. Bebidas alcohólicas. Mieles de caña. determinación del dióxido de azufre*. Recuperado de <https://tienda.icontec.org/gp-bebidas-alcoholicas-mieles-de-cana-determinacion-del-dioxido-de-azufre-ntc1856-2010.html>
- Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación. (2011). *Norma Técnica Colombiana, NTC 3442:2011. Bebidas alcohólicas. Tafías de caña*. Recuperado de <https://tienda.icontec.org/gp-bebidas-alcoholicas-tafias-de-cana-ntc3442-2011.html>
- Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación. (2012a). *Norma Técnica Colombiana, NTC 570:2012. Azúcar, mieles, jarabes y jugos de caña. métodos de ensayo para determinar cenizas*. Recuperado de <https://tienda.icontec.org/gp-azucar-mieles-jarabes-y-jugos-de-cana-metodos-de-ensayo-para-determinar-cenizas-ntc570-2012.html>
- Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación. (2012b). *Norma Técnica Colombiana, NTC 5970:2012. Azúcar, jugos y jarabes de caña. determinación de sulfito con el método colorimétrico de rosanilina*. Recuperado de <https://tienda.icontec.org/gp-azucar-jugos-y-jarabes-de-cana-determinacion-de-sulfito-con-el-metodo-colorimetrico-de-rosanilina-ntc5970-2012.html>
- Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación (2013). *Norma Técnica Colombiana, NTC 573:2013. Azúcar. Terminología*. Recuperado de <https://tienda.icontec.org/gp-azucar-terminologia-ntc573-2013.html>
- Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación. (2015). *Norma Técnica Colombiana, NTC 440:2015. Productos alimenticios. Métodos de ensayo*. Recuperado de <https://tienda.icontec.org/gp-productos-alimenticios-metodos-de-ensayo-ntc440-2015.html>
- Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación. (2017a). *Norma Técnica Colombiana, NTC 1779:2017. Meladura y mieles de caña. Método para determinar azúcares reductores totales en meladura y mieles de caña, después de hidrólisis por el procedimiento Lane & Eynon a volumen constante*. Recuperado de <https://tienda.icontec.org/gp-meladura-y-mieles-de-cana-metodo-para-determinar-azucares-reductores-totales-en-meladura-y-mieles-de-cana-despues-de-hidrolisis-por-el-procedimiento-lane-eynon-a-volumen-constante-ntc1779-2017.html>
- Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación. (2017b). *Norma Técnica Colombiana, NTC 3953:2017. Azúcar, jugos, meladuras y mieles de caña. Determinación de coliformes y Escherichia coli. técnica del número más probable (nmp)*. Recuperado de <https://tienda.icontec.org/gp-azucar-jugos-meladuras-y-mieles-de-cana-determinacion-de-coliformes-y-escherichia-coli-tecnica-del-numero-mas-probable-nmp-ntc3953-2017.html>
- Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación. (2017c). *Norma Técnica Colombiana, NTC 3954:2017. Azúcar, jugos, jarabes y mieles de caña. determinación de mohos y levaduras. Método de recuento en placa*. Recuperado de <https://tienda.icontec.org/gp-azucar-jugos-jarabes-y-mieles-de-cana-determinacion-de-mohos-y-levaduras-metodo-de-recuento-en-placa-ntc3954-2017.html>

- Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación. (2017d). *Norma Técnica Colombiana, NTC 6086:2017. Azúcar, jugos, meladuras y mieles de caña. detección y recuento de coliformes o Escherichia coli o ambos. Método de recuento en placa*. Recuperado de <https://tienda.icontec.org/gp-azucar-jugos-meladuras-y-mieles-de-cana-deteccion-y-recuento-de-coliformes-o-escherichia-coli-o-ambos-metodo-de-recuento-en-placa-ntc6086-2017.html>
- Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación. (2017e). *Norma Técnica Colombiana, NTC 3908:2017. Azúcar, jugos, meladuras y mieles de caña. recuento de bacterias mesófilas aerobias. Método de recuento en placa*. Recuperado de <https://tienda.icontec.org/gp-azucar-jugos-meladuras-y-mieles-de-cana-recuento-de-bacterias-mesofilas-aerobias-metodo-de-recuento-en-placa-ntc3908-2017.html>
- Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación. (2020a). *Norma Técnica Colombiana, NTC 6385:2020. Azúcar. Determinación de almidón soluble en azúcar y materiales de proceso mediante el método rápido de almidón de spri*. Recuperado de <https://tienda.icontec.org/gp-azucar-determinacion-de-almidon-soluble-en-azucar-y-materiales-de-proceso-mediante-el-metodo-rapido-de-almidon-de-spri-ntc6385-2020.html>
- Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación. (2020b). *Norma Técnica Colombiana, NTC 1846:2020. Miel virgen de caña de azúcar*. Recuperado de <https://tienda.icontec.org/gp-miel-virgen-de-cana-de-azucar-ntc1846-2020.html>
- International Commission for Uniform Methods of Sugar Analysis. (1994). *GS 1/3/4/7/8-13. Determinación de cenizas conductimétricas en azúcar crudo, azúcar moreno, jugo, jarabe y melaza-Oficial*. Recuperado de <https://www.icumsa.org/index.php?id=931>
- International Commission for Uniform Methods of Sugar Analysis. (2000). *GS3/4/7/8-11. Determinación de cenizas sulfatadas en azúcar moreno, jugos, jarabes y melazas-Oficial*. Recuperado de <https://www.icumsa.org/index.php?id=1301>
- International Commission for Uniform Methods of Sugar Analysis. (2009a). *GS 2/1/7-33. Determinación de sulfito por el método colorimétrico de rosanilina en azúcar blanco-Oficial*. Recuperado de <https://www.icumsa.org/index.php?id=1067>
- International Commission for Uniform Methods of Sugar Analysis. (2009b). *GS 1/2/3/4/7/8-23. Determinación del pH por un método directo - en azúcar crudo, melaza, jugos y jarabes-Oficial*. Recuperado de <https://www.icumsa.org/index.php?id=935>
- International Commission for Uniform Methods of Sugar Analysis. (2011a). *GS 4/3-7. Determinación de azúcares reductores totales en melaza y jarabes refinados después de hidrólisis por el procedimiento Lane & Eynon contante-Oficial (de referencia)*. Recuperado de <https://www.icumsa.org/index.php?id=1375>
- International Commission for Uniform Methods of Sugar Analysis. (2011b). *GS 2/3/ 9-17. Determinación de cenizas conductimétricas en productos de azúcar refinada y azúcar blanco de plantación-Oficial*. Recuperado de <https://www.icumsa.org/index.php?id=1058>
- International Commission for Uniform Methods of Sugar Analysis. (2011c). *GS9/1/2/3-8. Determinación del color de la solución de azúcar a pH 7,0 mediante el método tampón MOPS-Oficial*. Recuperado de <https://www.icumsa.org/index.php?id=1717>
- International Commission for Uniform Methods of Sugar Analysis. (2011d). *GS9/1/2/3-8. The Determination of Sugar Solution Colour at pH 7.0 by the MOPS Buffer Method-Official (Reference) Method*. Recuperado de <https://www.icumsa.org/index.php?id=1717>

- International Commission for Uniform Methods of Sugar Analysis. (2011e). GS 2/3-35. *Determinación de sulfito en productos de azúcar refinado con excepción del azúcar moreno por un método enzimático-Oficial. Determinación de sulfito en azúcares moreno*. Recuperado de <https://www.icumsa.org/index.php?id=1068>
- International Organization for Standardization. (1980a). ISO 1741:1980. *Dextrose. Determination of loss in mass on drying. Vacuum oven method*. Recuperado de <https://www.iso.org/standard/6362.html>
- International Organization for Standardization. (1980b). ISO 1742:1980. *Glucose syrups. Determination of dry matter. Vacuum oven method* Recuperado de <https://www.iso.org/standard/6363.html>
- International Organization for Standardization. (2013a). ISO 10504:2013. *Starch derivatives. Determination of the composition of glucose syrups, fructose syrups and hydrogenated glucose syrups. Method using high-performance liquid chromatography*. Recuperado de <https://www.iso.org/standard/50792.html>
- International Organization for Standardization. (2013b). ISO 5379:2013. *Starches and derived product. Determination of sulfur dioxide content. Acidimetric method and nephelometric method*. Recuperado de <https://www.iso.org/ru/standard/50791.html>
- Jaffé, Walter. (2012). Health Effects of Non-Centrifugal Sugar (NCS): A Review. *Sugar Tech*, 14(2), 87-94.
- Jaffé, Walter; Ochoa. A. E. (1949). El papelón como fuente de hierro en la dieta popular Venezolana. *Revista de la Sociedad Venezolana de Química*, 21, 1-7.
- Jiang, Zhen-Yue; Hunt, James; Wolff, Simon. (1992). Ferrous ion oxidation in the presence of xylenol orange for detection of lipid hydroperoxide in low density lipoprotein. *Analytical Biochemistry*, 202(2), 384-389. [https://doi.org/10.1016/0003-2697\(92\)90122-N](https://doi.org/10.1016/0003-2697(92)90122-N)
- Mesias, Marta; Delgado-Andrade, Cristina; Gómez-Narváez, Faver; Contreras-Calderón, José; Morales, Francisco. (2020). Formation of Acrylamide and other Heat-Induced Compounds during Panela Production. *Foods (Basel, Switzerland)*, 9(4), 531. <https://doi.org/10.3390/foods9040531>
- Nakasone, Y.; Ikema, Y.; Kobayashi, A. (1990). Changes in the composition of amino acids during manufacturing process of non-centrifugal cane sugar (Kokuto). *The Science Bulletin of the College of Agriculture, University of Ryukyus*, 35, 35-39.
- Nedorostova, Lenka; Kloucek Pavel; Kokoska, Ladislav; Stolcova, Milusa; Pulkrabek, Josef. (2009). Antimicrobial properties of selected essential oils in vapour phase against food borne bacteria. *Food Control*, 20, 157-160. <https://doi.org/10.1016/j.foodcont.2008.03.007>
- Nimrouzi, Majid; Sadeghpour, Omid; Imanieh, Mohammad-Hadi; Shams-Ardekani, Mohammadreza; Zarshenas, Mohammad; Salehi, Alireza; Mohamad-Bagher, Minaei. (2014). Remedies for Children Constipation in Medieval Persia. *Journal of Evidence-Based Complementary and Alternative Medicine*, 19(2), 137-143. <https://doi.org/10.1177/2156587214524579>
- Nishad, Jyoti; Selvan, Cynthia; Mir, Shabir; Bosco, Sowriappan. (2017). Effect of spray drying on physical properties of sugarcane juice powder (*Saccharum officinarum* L.). *Journal of Food Science and Technology*, 54(3), 687-697. <https://doi.org/10.1007/s13197-017-2507-x>
- Nordic Committee on Food Analysis [NMKL]. (1990). NMKL 135. *Sulphite. Enzymatic determination in foods*. Recuperado de <https://www.nmkl.org/index.php/en/publications/item/sulfit-enzymatisk-bestamning-i-livsmedel-nmkl-135-1990>

- Novak, Ana; Gutiérrez-Zamora, Mercè; Domenech, Lluís; Suñé-Negre, Josep; Miñarro, Montserrat; García-Montoya, Encarna; Llop, Josep; Ticó, Josep; Pérez-Lozano, Pilar. (2017). Development and validation of a simple high-performance liquid chromatography analytical method for simultaneous determination of phytosterols, cholesterol and squalene in parenteral lipid emulsions. *Biomedical Chromatography*, 32(2), e4084. <https://doi.org/10.1002/bmc.4084>
- Okabe, Takafumi; Toda, Takayoshi; Inafuku, Massashi; Wada, Koji; Iwasaki, Hironori; Oku, Hirosuke. (2008). Antiatherosclerotic function of Kokuto, Okinawan noncentrifugal cane sugar. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 57(1), 69-75. <https://doi.org/10.1021/jf802796m>
- Olivares, Manuel; Pizarro, Fernando; Hertrampf, Eva; Fuenmayor, Guillermo; Estévez, Edmundo. (2007). Iron absorption from wheat flour: Effects of lemonade and chamomile infusion. *Nutrition*, 23, 296-300. <https://doi.org/10.1016/j.nut.2006.04.014>
- Paton, N. H.; Doung, M. (1992). Sugarcane phenolics and first expressed juice colour. Part III. Role of chlorogenic acid and flavonoids in enzymic browning of cane juice. *Journal International Sugar*, 94, 170-176.
- Payet, Bertrand; Shum-Cheong-Sing, Alain; Smadja, Jacqueline. (2005). Assessment of antioxidant activity of cane Brown sugars by ABTS and DPPH radical scavenging Assays: determination of their polyphenolic and volatile constituents. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 53, 10074-10079. <https://doi.org/10.1021/jf0517703>
- Penson, Peter; Banach, Maciej. (2021). Natural compounds as anti-atherogenic agents: Clinical evidence for improved cardiovascular outcomes. *Atherosclerosis*, 316, 58-65. <https://doi.org/10.1016/j.atherosclerosis.2020.11.015>
- Phillips, Katherine; Carlsen, Monica; Blomhoff, Rune. (2009). Total antioxidant content of alternatives to refined sugar. *Journal of the Academy of Nutrition and Dietetics*, 109, 64-71. <https://doi.org/10.1016/j.jada.2008.10.014>
- Rodríguez, Antonio; Segura, M. (2004). Panela granulada ecológica. *Antenor Orrego*, 15(22), 43-55.
- Sautter, Christof; Gruissem, Wilhelm. (2010). Iron biofortification of rice by targeted genetic engineering. *ISB. News Report*. Recuperado de <https://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.614.4228&rep=rep1&type=pdf>
- Scheid, Simone; Faria, Maria; Velásquez, Leonardo; do Valle, Juliana; Gonçalves, Affonso; Dragunski, Douglas; Colauto, Nelson; Linde, Giani. (2020). Iron biofortification and availability in the mycelial biomass of edible and medicinal basidiomycetes cultivated in sugarcane molasses. *Scientific Reports*, 10(1), 12875. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-69699-0>
- Seguí, Lucía; Calabuig-Jiménez, Laura; Betoret, Noelia; Fito, Pedro. (2015). Physicochemical and antioxidant properties of non-refined sugarcane alternatives to white sugar. *International Journal of Food Science*, 50(12), 2579-2588. <https://doi.org/10.1111/ijfs.12926>
- Semwal, Pooja; Jai Singh, Ranjana; Kumar, Amit; Malik, Jitender. (2021). Pharmacognostical Exploration of *Saccharum officinarum*. *Scholars International Journal of Traditional and Complementary Medicine*, 4(4), 53-60. <https://doi.org/10.36348/sijtcm.2021.v04i04.003>
- Shaheen, Nazma; Rahim, Abu; Mohiduzzaman, Cadi; Bari, Latiful; Tukun, Avonti; Mannan, M. A.; Bhattacharjee, Lalita; Stadlmayr, Barbara. (2013). *Food composition table for Bangladesh*. Institute of Nutrition and Food Science, University of Dhaka, Bangladesh. Recuperado de http://www.fao.org/fileadmin/templates/food_composition/documents/FCT_10_2_14_final_version.pdf

- Shahidi, Fereidoon; Zhong, Ying. (2015). Measurement of antioxidant activity. *Journal of functional foods*, 18, 757-781. <https://doi.org/10.1016/j.jff.2015.01.047>
- Singh, Amandeep; Lal, Uma; Mukhtar, Hayat; Singh, Prabh; Shah, Gagan; Dhawan, Ravi (2015). Phytochemical profile of sugarcane and its potential health aspects. *Pharmacognosy reviews*, 9(17), 45–54. <https://doi.org/10.4103/0973-7847.156340>
- Stralfors, A. (1966). Inhibition of hamster caries by substances in brown sugar. *Archives of Oral Biology*, 11, 61–622. [https://doi.org/10.1016/0003-9969\(66\)90228-7](https://doi.org/10.1016/0003-9969(66)90228-7)
- Sumiyoshi, Maho; Hayashi, Teruaki; Kimura, Yoshiyuki. (2009). Effects of the non-sugar fraction of brown sugar on chronic ultraviolet B irradiation-induced photoaging in melanin-possessing hairless mice. *Journal of Natural Medicines*, 63, 130-136. <https://doi.org/10.1007/s11418-008-0301-9>
- Takara, Kensaku; Otsuka, Keiko; Wada, Koji; Iwasaki, Hironori; Yamashita, Masatsugu. (2007). 1,1-Diphenyl-2-picrylhydrazyl radical scavenging activity and tyrosinase inhibitory effects of constituents of sugar cane molasses. *Bioscience, Biotechnology, and Biochemistry*, 71, 183-191. <https://doi.org/10.1271/bbb.60432>
- Thaipong, Kriengsak; Boonprakoba, Unaroj; Crosby, Kevin; Cisneros-Zevallos, Luis; Hawkins, David. (2006). Comparison of ABTS, DPPH, FRAP, and ORAC assays for estimating antioxidant activity from guava fruit extracts. *Journal of Food Composition and Analysis*, 19, 669-675. <https://doi.org/10.1016/j.jfca.2006.01.003>
- Uchenna, Eneh; Adaeze, Okechukwu; Steve, Adindu. (2015). Phytochemical and antimicrobial properties of the aqueous ethanolic extract of *Saccharum officinarum* (sugarcane) bark. *Journal of Agricultural Science*, 7(10), 291. <https://doi.org/10.5539/jas.v7n10p291>
- Vargas, J. J; Talero, Y. V; Trujillo, F; Caballero, L. R. (2014). Acrylamide Determination in the Sugar Cane Juice Process by the Liquid Chromatography Technique. *Revista Ciencia en Desarrollo*, 5, 99-105. <https://doi.org/10.19053/01217488.3664>
- Vila, Fabiana; Colombo, Renata; de Lira, Tatiana; Yariwake, Janete. (2008). HPLC microfractionation of flavones and antioxidant (radical scavenging) activity of *Saccharum officinarum* L. *Journal of the Brazilian Chemical Society*, 19, 903-908.
- Waheed, Shahida; Ahmad, Shujaad. (2008). Instrumental neutron activation analysis of different products from the sugarcane industry in Pakistan – Part 1: essential elements for nutritional adequacy. *Journal of AOAC International*, 91(2), 392-399.
- Wang, Lifeng; Chen, Jingyi; Xie, Huihui; Ju, Xingrong; Liu, Rui. (2013). Phytochemical profiles and antioxidant activity of adlay varieties. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 61(21), 5103-5113. <https://doi.org/10.1021/jf400556s>
- Wang, Sunan; Melnyk, John; Tsao, Rong; Marcone, Massimo. (2011). How natural dietary antioxidants in fruits, vegetables and legumes promote vascular health. *Food Research International*, 44(1), 14-22. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2010.09.028>
- Watanabe, Kenta; Nakabaru, Mai; Taira, Eizo; Ueno, Masami; Kawamitsu, Yoshinobu. (2016). Relationships between nutrients and sucrose concentrations in sugarcane juice and use of juice analysis for nutrient diagnosis in Japan. *Plant Production Science*, 19(2), 215-222. <https://doi.org/10.1080/1343943X.2015.1128106>
- Wen, Lingrong; Guo, Xingbo; Liu, Rui; You, Lijun; Abbasi, Arshad; Fu, Xiong. (2015). Phenolic contents and cellular antioxidant activity of Chinese hawthorn "*Crataegus pinnatifida*". *Food Chemistry*, 186, 54-62. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2015.03.017>

- Wong, Kam; Aziz, Suraini; Mohamed, Suhaila. (2008). Sensory aroma from Maillard reaction of individual and combinations of amino acids with glucose in acidic conditions. *International Journal Food Science Technology*, 43(9), 1512-1519.
<https://doi.org/10.1111/j.1365-2621.2006.01445.x>
- Wootton-Beard, Peter; Moran, Aisling; Ryan, Lisa. (2011). Stability of the total antioxidant capacity and total polyphenol content of 23 commercially available vegetable juices before and after in vitro digestion measured by FRAP, DPPH, ABTS and Folin–Ciocalteu methods. *Food Research International*, 44(1), 217-224. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2010.10.033>
- World Health Organization. (2001). *Iron deficiency anaemia. Assessment, prevention and control. A Guide for programme managers*. WHO/NHD/01.3. Recuperado de https://www.who.int/nutrition/publications/micronutrients/anaemia_iron_deficiency/WHO_NHD_01.3/en/
- Yoshimoto, M.; Kurata, R.; Fujii, M.; Hou, D. X. (2008). In vitro and in vivo anticarcinogenesis of sugarcane-vinegar. XXVII International Horticultural Congress. *Acta Horticulturae*, 765, 17-22.
<https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2008.765.1>
- Zhao, Yi; Chen, Mingshun; Zhao, Zhenzhang; Yu, Shujuan. (2015). The antibiotic activity and mechanisms of sugarcane (*Saccharum officinarum* L.) bagasse extract against food-borne pathogens. *Food Chemistry*, 185, 112-118. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2015.03.120>
- Zhao, Zhenzhang; Huaifeng, Yan; Rui, Zheng; Muhammad, Saeed; Xiong, Fu; Zi, Tao; Zhanying, Zhang. (2018). Anthocyanins characterization and antioxidant activities of sugarcane (*Saccharum officinarum* L.) rind-extracts. *Industrial Crops and Products*, 113, 38-45.
<https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2018.01.015>
- Zheng, Rui; Su, Shan; Zhou, Huifang; Yan, Huaifeng; Ye, Junhua; Zhao, Zhengang; You, Lijun; Fu, Xiong. (2017). Antioxidant/antihyperglycemic activity of phenolics from sugarcane (*Saccharum officinarum* L.) bagasse and identification by UHPLC-HR-TOFMS. *Industrial Crops and Products*, 101, 104-1147.
<https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2017.03.012>

Degradación del polietilentereftalato por medio de microorganismos

Polyethylene terephthalate degradation by microorganisms

Diana Bermúdez-Morera¹
Juan Sandoval-Herrera²

¹Universidad de América (Colombia). Correo electrónico: diana.bermudez@estudiantes.uamerica.edu.co
orcid: <https://orcid.org/0000-0003-1093-2533>

²Universidad de América (Colombia). Correo electrónico: juan.sandoval@profesores.uamerica.edu.co
orcid: <https://orcid.org/0000-0001-8957-1421>

Recibido: 22-02-2021 Aceptado: 07-07-2021

Como citar: Bermúdez-Morera, Diana; Sandoval-Herrera, Juan (2021). Degradación del polietilentereftalato por medio de microorganismos. *Informador Técnico*, 85(2), 219 - 229.
<https://doi.org/10.23850/22565035.3592>

Resumen

La alta demanda de plásticos como el PET y el escaso conocimiento sobre la economía verde o el reciclaje ha incrementado los efectos adversos al medio ambiente por acumulación incontrolada de residuos plásticos que terminan en las fuentes hídricas. Dentro de las estrategias que se han estudiado para controlar este problema, la degradación mediante microorganismos ha dado óptimos resultados en eficiencia y economía. Mediante una revisión bibliográfica, se especifica el mecanismo (enzimas) para la degradación del PET, teniendo en cuenta las principales condiciones de cultivo y del microorganismo, el pretratamiento que se debe realizar al PET y los porcentajes de degradación alcanzados. También se presentan las aplicaciones industriales de los posibles subproductos para su aprovechamiento y disminución de la contaminación.

Palabras clave: contaminación; degradación; bacterias; hongos; microalgas; PET; desarrollo sustentable.

Abstract

The high demand for plastics such as PET and the scant knowledge about the green economy, or recycling, has increased the adverse effects on the environment due to the uncontrolled accumulation of plastic waste that ends up in water sources. Among the strategies studied to control this problem, degradation by microorganisms has given optimal results in efficiency and economy. We specify the mechanism (enzymes) for the degradation of PET by using a bibliographic review considering the main culture conditions and the microorganism, the pretreatment carried out on PET, and the degradation percentages achieved. We also present the industrial applications of the possible by-products for their use and reduction of pollution.

Keywords: contamination; degradation; bacteria; fungi; microalgae; PET; sustainable development.

1. Introducción

El PET es un polímero plástico que se obtiene a partir del etileno y el paraxileno, compuesto principalmente por etilenglicol y ácido tereftálico, aunque también se obtiene por otra vía, cuando este reacciona con dimetil tereftalato (Webb; Arnott; Crawford; Ivanova, 2013). Presenta gran transparencia y resistencia al desgaste, así como al ataque de productos químicos, rayos UV, humedad, entre otros factores (Ahmed *et al.*, 2018). Esta

gran resistencia hace que dure más de 700 años en degradarse; adicionalmente, se libera micro plásticos que quedan en el ambiente y pueden generar afectaciones en la salud, se ha convertido en un gran problema de contaminación ambiental.

Aunado a lo anterior, la acumulación de PET, así como de otros plásticos, se ha incrementado a lo largo de los años en todo el mundo (Ru; Huo; Yang, 2020). En el caso particular del PET, este se emplea como envase para muchos productos (Goel; Jayal; Negi; Saravanan; Zaidi, 2014; Wei; Zimmermann, 2017) que, luego de ser distribuidos y consumidos, terminan siendo desechados por el usuario final (Valderrama-Ocoró; Chavarro-Guzmán; Osorio-Gómez; Peña-Montoya, 2018). Según Papadopoulou, Hecht y Buller (2019), tan solo el 10 % del PET usado para empaques se recicla actualmente.

El problema no es solo la acumulación en vertederos, sino que terminan en fuentes de agua en las que sus consecuencias son la muerte de animales por ingestión, daños hormonales, problemas de crecimiento, diversos tipos de cáncer, etc. Al final terminan en el mar, y crean esas grandes “islas artificiales”, con consecuencias conocidas sobre los ecosistemas marinos (Ioakeimidis *et al.*, 2016; Kumar; Anjana; Hinduja; Sujitha; Dharani, 2020).

Para tratar de controlar este problema, se han buscado alternativas a los métodos tradicionales de tratamiento y/o valorización: incineración, reciclaje químico (Khoonkari; Haghighi; Sefidbakht; Shekoochi; Ghaderian, 2015) y mecánico, o inclusive disposición en rellenos sanitarios (Ru *et al.*, 2020). Se pretende que las nuevas estrategias no generen más subproductos contaminantes ni mayor huella de carbono, y que operen con menores tiempos y costos (Farzi; Dehnad; Fotouhi, 2019). A este respecto, cobra importancia la degradación que realizan microorganismos mediante enzimas que liberan, y que rompen los enlaces de los plásticos para usar los productos de degradación en su propio crecimiento (Wei; Zimmermann, 2017).

En general, estas enzimas se pueden dividir en dos grandes grupos: esterasas y lipasas. Bacterias como *Pseudomonas*, *Bacillus*, *Candida* y *Burkholderia* son importantes fuentes de lipasas y esterasas, pero se prefieren hongos como *Trichoderma*, *Aspergillus*, *Fusarium*, *Alternaria* y *Penicillium*, por su adaptabilidad a condiciones extremas (Malafatti-Picca *et al.*, 2019). A medida que crecen las hifas de hongos, como *Aspergillus*, *Fusarium*, *Paecilomyces* y *Penicillium*, rompen la estructura polimérica, al tiempo que secretan enzimas hidrolíticas como esterasa, catalasa, cutinasa, entre otras (Hyde *et al.*, 2019). Algunas enzimas, provenientes, en su mayoría, de microorganismos termofílicos prefieren la superficie del PET de menor cristalinidad, debido a que presenta mayor movilidad en su cadena y facilita la degradación (Fecker *et al.*, 2018).

La cutinasa TfCut2 es, también, una enzima que rompe los enlaces ésteres del PET, y es liberada por la actinobacteria *Thermobifida fusca* (Furukawa; Kawakami; Tomizawa; Miyamoto, 2019). *Thermomonospora curvata* libera las esterasas Tcur127 y Tcur128 (Wei *et al.*, 2014). *Thermobifida halotolerans* libera la esterasa Thh_Est, capaz de hidrolizar PET, así como ácido poliláctico (Ribitsch *et al.*, 2012). *Ideonella sakaiensis* según, Palm *et al.* (2019), libera PETasa y MHETasa, donde la primera parece tener gran afinidad por el PET de alta cristalinidad a temperatura ambiente (Fecker *et al.*, 2018), mientras que la segunda es crucial porque degrada el producto intermedio MHET a TPA y etilenglicol. Papadopoulou *et al.* (2019) presenta un listado de algunas enzimas, con sus respectivos microorganismos productores, que se han usado para degradación del PET.

Para tener un panorama acerca de la degradación de plásticos, específicamente el PET, por medio de diversos microorganismos, se presentan en este trabajo los resultados de la revisión bibliográfica alrededor de estos aspectos: condiciones de desarrollo del cultivo, condiciones de degradación del plástico, métodos para determinar la degradación, y factores clave que se deben tener en cuenta para la implementación de esta tecnología.

2. Metodología

Para el desarrollo de la investigación, se realizó consulta bibliográfica de artículos y tesis en *Scopus*, *Science Direct* y *Springer Link*. Los términos de búsqueda iniciales fueron: “*Bioegradation of PET*”, “*PET*” y “*Biodegradation*”. Después se aplicaron filtros como: tipo de documento (“*document type*”): “artículo”; área temática o subdisciplina: ciencias medioambientales; ciencia de materiales e ingeniería química. Para organizar la información recolectada, se tuvieron en cuenta factores comunes de estudio por parte de los investigadores, como el pretratamiento del PET, las variables que manejaron para el desarrollo del microorganismo, y la implementación del proceso de degradación del PET.

3. Resultados

La búsqueda con “*Biodegradation*” and “*PET*” arrojó estos resultados: 4515 en *Science Direct*, 287 en *Springer Link* y 312 en *Scopus*. Luego de aplicar los filtros de artículo de acceso libre y disciplina Ingeniería química, se redujeron a 198, 54 y 62, respectivamente; no obstante, se revisaron sus resúmenes, y se identificaron los que tuvieran más relación con el tema. La búsqueda “*Biodegradation of PET*” generó menos resultados: 23 en *Science Direct*, 2 en *Springer Link* y 11 en *Scopus*. Al aplicar filtros, se redujo a 1 artículo en *Science Direct*, los mismos 2 de *Springer Link* y 3 en *Scopus*. A partir de las referencias de cada uno de ellos, se cruzó la información con la búsqueda inicial y se clasificó la documentación final.

3.1. Condiciones del cultivo

En la Tabla 1 se muestran las principales condiciones que han manejado varios autores para el desarrollo de los cultivos de diversos microorganismos usados para degradar PET. En algunas ocasiones, como en el trabajo de Sowmya, Krishnappa y Thippeswamy (2014), las muestras provenían de pantanos, y se separaban y preservaban en el laboratorio en condiciones de temperaturas bajas.

Tabla 1. Condiciones de cultivo para diversos microorganismos.

Microorganismo	Medio de cultivo	Temperatura de incubación o de preservación (°C)	Tiempo (horas)	Referencia
Trichoderma reesei, T. atroviride y T. vens (hongo)	30 g de extracto de malta y 20 g de agar por litro de agua	25-28 °C	No indica	Espino-Rammer <i>et al.</i> (2013)
Trichoderma harzianum (hongo)	0,3 g de NH ₄ NO ₃ , 0,5 g de K ₂ HPO ₄ , 0,1 g de NaCl, 0,02 g de MgSO ₄ ·7H ₂ O, 2 g de agar, 0,5 g de polietileno, y 100 mL de agua destilada	4	No indica	Sowmya <i>et al.</i> (2014)
Pleurotus ostreatus (hongo)	TDA: extracto de trigo, dextrosa y agar	4	3 meses	de Faria, Wisbeck y Pereira (2015)

Microorganismo	Medio de cultivo	Temperatura de incubación o de preservación (°C)	Tiempo (horas)	Referencia
Comamonas testosteroni (bacteria)	NH ₄ Cl, KH ₂ PO ₄ , Na ₂ HPO ₄ , NaCl, MgSO ₄ ·7H ₂ O	37	48	Gong <i>et al.</i> (2018)
Thermobifida fusca (bacteria)	Sacarosa, NaNO ₃ , K ₂ HPO ₄ , MgSO ₄ ·7H ₂ O, KCl, FeSO ₄ ·7H ₂ O, extracto de levadura y peptona.	50	48	Billig, Thorsten, Birkemeyer y Zimmermann (2010)
Phaeodactylum tricornutum (microalga)	f/2: sal marina, HCl, NaH ₂ PO ₄ , NH ₄ Cl y NaNO ₃		24	Moog <i>et al.</i> (2019)
Spirulina sp. (microalga)	NaCl, KCl, MgSO ₄ ·7H ₂ O, CaCl ₂ ·2H ₂ O, NaHCO ₃ , NaNO ₃ , NaH ₂ PO ₄ , Na ₂ EDTA, FeCl ₃ ·6H ₂ O, vitaminas B ₁ y B ₁₂ (Hadiyanto; Widayat; Kumoro, 2012)	24-26 °C	14 días	Khoironi, Anggoro y Sudarno (2019)
Chlorella vulgaris (microalga)	BG11: NaNO ₃ , K ₂ HPO ₄ ·3H ₂ O, MgSO ₄ ·7H ₂ O, CaCl ₂ ·2H ₂ O, entre otros		30 días	Falah <i>et al.</i> (2020)

Fuente: elaboración propia.

El medio de cultivo debe contener ciertos nutrientes para que el microorganismo pueda multiplicarse; por ejemplo, nitrógeno, fósforo y carbono. Sin embargo, algunos autores suprimieron la fuente de carbono para estimular la degradación del PET (Sowmya *et al.*, 2014; Moog *et al.*, 2019). La temperatura es fundamental para el crecimiento de los microorganismos, y se observa que el valor más usado está alrededor de 37 °C. La mayoría de los microorganismos, al ser mesófilos, suelen tener una mejor adaptación al medio en temperaturas que se encuentren entre 25 y 35 °C; no obstante, tienen la capacidad de adaptarse a máximas temperaturas según el lugar en el que se sitúen (Vieira; Nahas, 2005). Para la microalga *Phaeodactylum tricornutum* (Moog *et al.*, 2019) así como para *Chlorella vulgaris* (Falah *et al.*, 2020), el medio de cultivo y las condiciones requeridas por las bacterias y los hongos son diferentes, requiriendo sales y vitaminas, además de mayor tiempo de incubación. Otros factores fundamentales para el proceso de degradación son temperatura, humedad y pH. Este último, afecta el crecimiento del microorganismo y, por ende, afecta directamente la degradación. A mayor grado de humedad, mayor será la actividad hidrolítica del microorganismo (Iram; Riaz; Iqbal, 2019).

3.2. Mecanismo de la degradación

Según Nisticò (2020), la biodegradación de los plásticos requiere de una aproximación inicial del microorganismo a la superficie del polímero, luego la secreción interna o externa de enzimas (agentes de biodegradación) y de

polisacáridos (agentes de adhesión); después, la despolimerización enzimática hasta obtener oligómeros; y, finalmente, la mineralización de los oligómeros hasta formar biomasa, CO_2 , H_2O y CH_4 , aunque esto varía según la composición del polímero. Para Lee y Liew (2020), una segunda etapa después de la aproximación inicial consiste en la formación de una biocapa del microorganismo en la superficie del polímero. En la Figura 1 se observa el mecanismo general de reacción de las enzimas que produce *I. sakaiensis* para degradar el PET.

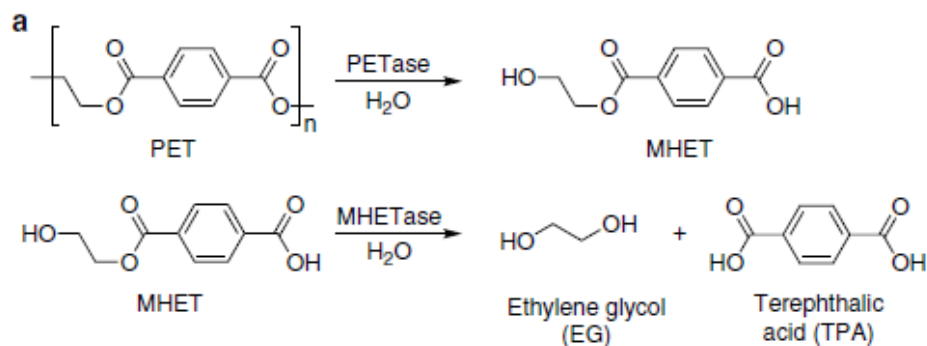


Figura 1. Degradación del PET a Etilenglicol y ácido tereftálico.

Fuente: Palm et al. (2019).

En primera instancia, se hidroliza la cadena del polímero, formando ácido carboxílico e hidroxilos, logrando aumentar la interacción entre la enzima y la superficie, debido a que las moléculas de agua disminuyen la fuerza entre los enlaces de hidrógeno, a permitiendo que las cadenas de polímeros sean más flexibles, donde las enzimas encuentran mayor accesibilidad (Kawai; Kawabata; Oda, 2019).

3.3. Pretratamiento del PET

El tratamiento general del PET consiste en lavar con agua destilada o etanol, secar un tiempo mínimo de 24 horas, y finalmente cortar, triturar o moler, dependiendo de los autores (Khoironi; Anggoro; Sudarno, 2019; Falah et al., 2020). Sin embargo, según Wilkes y Aristilde (2017), el pretratamiento del PET favorece la degradación. Dentro de esos métodos de pretratamiento se tienen, principalmente, radiación ultravioleta (Roberts et al., 2020), oxidación térmica y fotoxidación. Lo que se busca con estos métodos es alterar la naturaleza de los polímeros en cuanto a presencia de grupos funcionales, rompimiento en cadenas más cortas, disminuyendo la cristalinidad, entre otros, para facilitar el ataque enzimático (Ahmed et al., 2018). Al tener partículas de menor diámetro, se genera mayor susceptibilidad para que ocurra el proceso de hidrólisis enzimática y aumente la degradación (Wei; Zimmermann, 2017).

3.4. Evaluación de la degradación

Se han utilizado diversos métodos para determinar la degradación del PET: turbidez (Wei et al., 2014), calorimetría diferencial de barrido (Goel et al., 2014; de Castro; Carniel; Nicomedes Junior; da Conceição Gomes; Valoni, 2017) y densidad óptica. Otro análisis de gran uso es la espectroscopía infrarroja por transformada de Fourier (FTIR), que permite determinar el cambio de la estructura mediante estrechamiento de la banda identificadora del grupo carbonilo, lo que demuestra un ataque químico o biocatalítico (Donelli; Freddi; Nierstrasz; Taddei, 2010; Sowmya et al., 2014). También se ha verificado el cambio de la superficie del PET mediante microscopía espacial de barrido (SEM), por ejemplo, en Sowmya et al. (2014), Goel et al. (2014), o Falah et al. (2020). Según Sowmya et al. (2014), a medida que aumenta el porcentaje de degradación, los cambios superficiales son mucho más notorios, en forma de fisuras, descamación y corrugaciones, principalmente.

Para evaluar cuantitativamente la degradación, se usa la Ecuación (1) para determinar el porcentaje de pérdida de peso del PET:

$$Pp (\%) = \frac{Pi - Pf}{Pi} * 100 \quad (1)$$

Donde:

Pp: Pérdida de peso en porcentaje (%).

Pi: Peso inicial de la muestra de PET (mg).

Pf: Peso final de la muestra de PET (mg).

En la Tabla 2 se presentan algunos resultados representativos de porcentajes de degradación.

Tabla 2. Valores representativos de biodegradación de plásticos.

Enzima	Microorganismo	Pérdida de peso	Condiciones de reacción	Referencia
Lacasa	<i>Trichoderma harzianum</i>	40 %	No indica T; t: 90 d; discos de bolsas de polietileno de 1 cm de diámetro con y sin pretratamiento. Mejor resultado con tratamiento UV	Sowmya <i>et al.</i> (2014)
NR	<i>Pleurotus Flórida</i>		T: 20°C; t: 120 d; películas de 4 cm ² de PET virgen	Koschevic (2015)
TfH BTA-2	<i>Thermobifida fusca</i> DSM43793		T: 55 -65 °C; t: 48 h; películas de PET amorfo	Then <i>et al.</i> (2015)
Tfu_0882	<i>Thermobifida fusca</i> YX		T: 55-65 °C; t: 48 h;	Then <i>et al.</i> (2015)
TfCut1	<i>Thermobifida fusca</i> KW3		T: 55-65 °C; t: 48 h;	Then <i>et al.</i> (2015)
TfCut2	<i>Thermobifida fusca</i> YX		T: 65-80 °C; t: 48 h;	Then <i>et al.</i> (2015)
Petasa	<i>Ideonella sakaiensis</i>	0,13 mg cm ⁻² d ⁻¹	T: 30 °C; 42 d	Yoshida <i>et al.</i> (2016)
Cutinasa	<i>Thermobifida fusca</i>		T: 40-70 °C	Furukawa <i>et al.</i> (2019)
NR	<i>Streptomyces</i>		T: 28°C; t: 18 días; partículas de 212 mm	Farzi <i>et al.</i> (2019)
PETasa	<i>Ideonella sakaiensis</i>	NR	T: 30 °C; t: 36 h; películas de PET amorfo	Wang <i>et al.</i> (2020)

Fuente: elaboración propia.

3.5. Perspectivas de aplicación industrial

Dentro de las ventajas que tiene la biodegradación del PET, se cuenta que es una tecnología ecoamigable, tiene bajo costo, y los pocos subproductos que genera (Grigore, 2017) pueden utilizarse para varias aplicaciones. Mediante la degradación biológica también se disminuyen los contaminantes que se generan en procesos de

degradación química, especialmente debido al pH neutro que se debe manejar en el mismo (Carr; Clarke; Dobson, 2020). Pero una de sus desventajas principales es el alto tiempo que se debe invertir para lograr el mismo porcentaje de degradación que con tecnologías químicas y térmicas (Samak *et al.*, 2020). Las alternativas al proceso tradicional de degradación del PET, que emplea microorganismos completos y puros desde su cultivo, consisten en la utilización de consorcios de microorganismos (Goel *et al.*, 2014; Roberts *et al.*, 2020) y la acción directa de enzimas, como, por ejemplo, en de Castro *et al.* (2017), donde se reportó que entre 16 enzimas, obtenidas de diferentes microorganismos, la que mejores resultados presentó fue la cutinasa de la *Humicola insolens*; la modificación genética, alteración molecular o clonación de genes de enzimas (Ma *et al.*, 2018; Wei *et al.*, 2019; Al-Kanany; Rasha, 2020; Yan, Wei; Cui; Bornscheuer; Liu, 2020); el uso de plantas en consorcio con microorganismos como bacterias y hongos, como es el caso del trabajo de Janczak, Hryniewicz, Znajewska y Dąbrowska (2018); o la aplicación de métodos de cribado, basados en placa agar, como lo plantean Molitor *et al.* (2010) para *Pseudomonas*. Dentro de los resultados recientes más destacados está el trabajo de Turner *et al.* (2020), quienes reportan haber alcanzado 90 % de degradación del PET en 10 horas con enzimas hidrolasas mejoradas genéticamente. Un reto a futuro es encontrar más microorganismos y enzimas que sean capaces de degradar el PET a temperaturas más altas (Hiraga; Taniguchi; Yoshida; Kimura; Oda, 2019).

4. Conclusiones

La biodegradación del PET es una alternativa eficiente y ecoamigable para la gestión responsable de residuos de envases. Los factores de mayor importancia a la hora de alcanzar mejores eficiencias son, el establecimiento de las condiciones adecuadas para el cultivo y desarrollo del microorganismo, y un pretratamiento que incluya mínimamente lavado y disminución de tamaño de la partícula. Además, en el proceso de degradación, la concentración inicial del microorganismo debe ser alta, y la temperatura óptima para su metabolismo. No obstante, la ingeniería genética aporta en este sentido, mediante el desarrollo de cepas mejoradas, la expresión de genes a través de enzimas de otros microorganismos, o el uso de consorcios de microorganismos para alcanzar mejores resultados en menos tiempo.

Es importante que los microorganismos se inoculen en medios de cultivo que permitan lograr el crecimiento óptimo o se realice la adaptación prolongada a nuevos sustratos para evitar muerte microbiana. El tiempo de incubación de los hongos es mayor al de las bacterias, debido a que los hongos, al ser eucariotas pluricelulares tienen un sistema complejo con mayor cantidad de organelos, en comparación con los microorganismos procariotas (bacterias), más sencillos. Este factor se ve ligado a la biodegradación, donde se debe tener en cuenta que, a mayor concentración de microorganismos, mayor será la biodegradación.

Referencias

- Ahmed, Temoor; Shahid, Muhammad; Azeem, Farrukh; Rasul, Ijaz; Shah, Asad Ali; Noman, Muhammad; ... Sher, Muhammad (2018). Biodegradation of plastics: current scenario and future prospects for environmental safety. *Environmental Science and Pollution Research*, 25(8), 7287-7298.
<https://doi.org/10.1007/s11356-018-1234-9>
- Al-Kanany, Fadhil; Othman, Rasha (2020). Cloning and Expression of *Pseudomonas aeruginosa* AlkB Gene in *E. coli*. *Journal of Pure and Applied Microbiology*, 14(1), 389-396.
<https://doi.org/10.22207/JIPAM.14.1.40>
- Billig, Susan; Thorsten, Oeser; Birkemeyer, Claudia; Zimmermann, Wolfgang (2010). Hydrolysis of cyclic poly (ethylene terephthalate) trimers by a carboxylesterase from *Thermobifida fusca* KW₃. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 87(5), 1753-1764.
<https://doi.org/10.1007/s00253-010-2635-y>

- Carr, Clodagh; Clarke, David; Dobson, Alan (2020). Microbial Polyethylene Terephthalate Hydrolases: Current and Future Perspectives. *Frontiers in Microbiology*, 11, 571265.
<https://doi.org/10.3389/fmicb.2020.571265>
- de Castro, Aline; Carniel, Adriano; Nicomedes, José; da Conceição-Gomes, Absai; Valoni, Érika (2017). Screening of commercial enzymes for poly (ethylene terephthalate) (PET) hydrolysis and synergy studies on different substrate sources. *Journal of Industrial Microbiology and Biotechnology*, 44(6), 835-844.
<https://doi.org/10.1007/s10295-017-1942-z>
- de Faria, Paulo; Wisbeck, Elisabeth; Pereira, Luciana (2015). Biodegradação de polipropileno reciclado (ppr) e de poli (tereftalato de etileno) reciclado (petr) por *Pleurotus ostreatus*. *Matéria*, 20(2), 452-459.
<https://doi.org/10.1590/S1517-707620150002.0045>
- Donelli, Ilaria; Freddi, Giuliano; Nierstrasz, Vincent; Taddei, Paola (2010). Surface structure and properties of poly-(ethylene terephthalate) hydrolyzed by alkali and cutinase. *Polymer Degradation and Stability*, 95(9), 1542-1550.
<https://doi.org/10.1016/j.polymdegradstab.2010.06.011>
- Espino-Rammer, Liliana; Ribitsch, Doris; Przylucka, Agnieszka; Marold, Annemarie; Greimel, Katrin; Herrero-Acero, Enrique; ... Druzhinina, Irina (2013). Two novel class II hydrophobins from *Trichoderma* spp. stimulate enzymatic hydrolysis of poly (ethylene terephthalate) when expressed as fusion proteins. *Applied and Environmental Microbiology*, 79(14), 4230.
<https://doi.org/10.1128/AEM.01132-13>
- Falah, Wajeeha; Chen, Fu-Jia; Zeb, Bibi; Hayat, Tahir; Mahmood, Qaisar; Ebadi, Abdolghaffar; ... Li, En-Zhong (2020). Polyethylene Terephthalate Degradation by Microalga *Chlorella vulgaris* Along with Pretreatment. *Materiale Plastice*, 57(3), 260-270.
<https://doi.org/10.37358/MP.20.3.5398>
- Farzi, Ali; Dehnad, Alireza; Fotouhi, Afsaneh (2019). Biodegradation of polyethylene terephthalate waste using *Streptomyces* species and kinetic modeling of the process. *Biocatalysis and Agricultural Biotechnology*, 17, 25-31.
<https://doi.org/10.1016/j.bcab.2018.11.002>
- Fecker, Tobias; Galaz-Davison, Pablo; Engelberger, Felipe; Narui, Yoshie; Sotomayor, Marcos; Parra, Loreto; Ramírez-Sarmiento, César (2018). Active site flexibility as a hallmark for efficient PET degradation by *I. sakaiensis* PETase. *Biophysical Journal*, 114(6), 1302-1312.
<https://doi.org/10.1016/j.bpj.2018.02.005>
- Furukawa, Makoto; Kawakami, Norifumi; Tomizawa, Atsushi; Miyamoto, Kenji (2019). Efficient degradation of poly (ethylene terephthalate) with *Thermobifida fusca* cutinase exhibiting improved catalytic activity generated using mutagenesis and additive-based approaches. *Scientific Reports*, 9(1), 1-9.
<https://doi.org/10.1038/s41598-019-52379-z>
- Goel, Reeta; Jayal, Priyanka; Negi, Harshita; Saravanan, P. R.; Zaidi, M. G. H. (2014). Comparative in situ PET biodegradation assay using indigenously developed consortia. *International Journal of Environment and Waste Management*, 13(4), 348-361.
<https://doi.org/10.1504/IJEWPM.2014.060441>
- Gong, Jixian; Kong, Tongtong; Li, Yuqiang; Li, Qiujin; Li, Zheng; Zhang, Jianfei (2018). Biodegradation of microplastic derived from poly (ethylene terephthalate) with bacterial whole-cell biocatalysts. *Polymers*, 10(12), 1326.
<https://doi.org/10.3390/polym10121326>

- Grigore, Madalina (2017). Methods of recycling, properties and applications of recycled thermoplastic polymers. *Recycling*, 2(4), 24.
<https://doi.org/10.3390/recycling2040024>
- Hadiyanto, Hadiyanto; Widayat, Widayat; Kumoro, Andri Cahyo (2012). Potency of microalgae as biodiesel source in Indonesia. *International Journal of Renewable Energy Development*, 1(1), 23-27.
<https://doi.org/10.14710/ijred.1.1.23-27>
- Hiraga, Kazumi; Taniguchi, Ikuo; Yoshida, Shousuke; Kimura, Yoshiharu; Oda, Kohei (2019). Biodegradation of waste PET: A sustainable solution for dealing with plastic pollution. *EMBO Reports*, 20(11), e49365.
<https://doi.org/10.15252/embr.201949365>
- Hyde, Kevin; Xu, Jianchu; Rapior, Sylvie; Jeewon, Rajesh; Lumyong, Saisamorn; Niego, Allen Grace; ... Stadler, Marc (2019). The amazing potential of fungi: 50 ways we can exploit fungi industrially. *Fungal Diversity*, 97, 1-136.
<https://doi.org/10.1007/s13225-019-00430-9>
- Ioakeimidis, Christos; Fotopoulou, Kalliopi; Karapanagioti, Hrisi; Geraga, Maria; Zeri, Christina; Papatheodorou, George (2016). The degradation potential of PET bottles in the marine environment: An ATR-FTIR based approach. *Scientific Reports*, 6(1), 1-8.
<https://doi.org/10.1038/srep23501>
- Iram, Darakhsanda; Riaz, Rafi; Iqbal, Rana (2019) Usage of Potential Micro-organisms for Degradation of Plastics. *Open Journal of Environmental Biology*, 4(1), 7-15.
<https://doi.org/10.17352/ojeb.000010>
- Janczak, Katarzyna; Hryniewicz, Katarzyna; Znajewska, Zuzanna; Dąbrowska, Grazyna (2018). Use of rhizosphere microorganisms in the biodegradation of PLA and PET polymers in compost soil. *International Biodeterioration & Biodegradation*, 130, 65-75.
<https://doi.org/10.1016/j.ibiod.2018.03.017>
- Kawai, Fusako; Kawabata, Takeshi; Oda, Masayuki (2019). Current knowledge on enzymatic PET degradation and its possible application to waste stream management and other fields. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 103, 4253-4268.
<https://doi.org/10.1007/s00253-019-09717-y>
- Khoironi, Adian; Anggoro, Sutrisno; Sudarno, Sudarno (2019). Evaluation of the interaction among microalgae *Spirulina* sp, plastics polyethylene terephthalate and polypropylene in freshwater environment. *Journal of Ecological Engineering*, 20(6), 161-173.
<https://doi.org/10.12911/22998993/108637>
- Khoonkari, Mohammad; Haghighi, Amir; Sefidbakht, Yahya; Shekoohi, Khadijeh; Ghaderian, Abolfazl (2015). Chemical recycling of PET wastes with different catalysts. *International Journal of Polymer Science*, 2015.
<https://doi.org/10.1155/2015/124524>
- Koschevic, Marivane (2015). *Biodegradation of PET (polyethylene terephthalate) by ligninolytic fungi* (tesis de pregrado). Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Panamá.
- Kumar, Ganesh; Anjana, K.; Hinduja, M.; Sujitha, K; Dharani, G. (2020). Review on plastic wastes in marine environment–Biodegradation and biotechnological solutions. *Marine Pollution Bulletin*, 150, 110733.
<https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2019.110733>
- Lee, Alicia; Liew, Mei (2020). Ecologically derived waste management of conventional plastics. *Journal of Material Cycles and Waste Management*, 22, 1-10.
<https://doi.org/10.1007/s10163-019-00931-4>

- Ma, Yuan; Yao, Mingdong; Li, Bingzhi; Ding, Mingzhu; He, Bo; Chen, Si; ... Yuan, Yingjin (2018). Enhanced poly (ethylene terephthalate) hydrolase activity by protein engineering. *Engineering*, 4(6), 888-893.
<https://doi.org/10.1016/j.eng.2018.09.007>
- Malafatti-Picca, Lusiane; de Barros-Chaves, Michel-Ricardo; de Castro, Aline; Valoni, Érika; de Oliveira, Valéria-Maia; Marsaioli, Anita-Jocelyne; ... Attili-Angelis, Derlene (2019). Hydrocarbon-associated substrates reveal promising fungi for poly (ethylene terephthalate) (PET) depolymerization. *Brazilian Journal of Microbiology*, 50(3), 633-648.
<https://doi.org/10.1007/s42770-019-00093-3>
- Molitor, Rebecka; Bollinger, Alexander; Kubicki, Sonja; Loeschcke, Anita; Jaeger, Karl-Erick; Thies, Stephan (2020). Agar plate-based screening methods for the identification of polyester hydrolysis by *Pseudomonas* species. *Microbial Biotechnology*, 13(1), 274-284.
<https://doi.org/10.1111/1751-7915.13418>
- Moog, Daniel; Schmitt, Johanna; Senger, Jana; Zarzycki, Jan; Rexer, Karl-Heinz; Linne, Uwe; ... Maier, Uwe (2019). Using a marine microalga as a chassis for polyethylene terephthalate (PET) degradation. *Microbial Cell Factories*, 18(1), 171.
<https://doi.org/10.1186/s12934-019-1220-z>
- Nisticò, Roberto (2020). Polyethylene terephthalate (PET) in the packaging industry. *Polymer Testing*, 90, 106707.
<https://doi.org/10.1016/j.polymertesting.2020.106707>
- Palm, Gottfried; Reisky, Lukas; Böttcher, Dominique; Müller, Henrik; Michels, Emile; Walczak, Miriam; ... Weber, Gert (2019). Structure of the plastic-degrading *Ideonella sakaiensis* MHETase bound to a substrate. *Nature Communications*, 10(1), 1-10.
<https://doi.org/10.1038/s41467-019-09326-3>
- Papadopoulou, Athena; Hecht, Katrin; Buller, Rebecca (2019). Enzymatic PET degradation. *Chimia International Journal for Chemistry*, 73(9), 743-749.
<https://doi.org/10.2533/chimia.2019.743>
- Ribitsch, Doris; Herrero-Acero, Enrique; Greimel, Katrin; Dellacher, Anita; Zitzenbacher, Sabine; Marold, Annemarie; ... Guebitz, Georg (2012). A new esterase from *Thermobifida halotolerans* hydrolyses polyethylene terephthalate (PET) and polylactic acid (PLA). *Polymers*, 4(1), 617-629.
<https://doi.org/10.3390/polym4010617>
- Roberts, Cameron; Edwards, Sabrina; Vague, Morgan; León-Zayas, Rosa; Scheffer, Henry; Chan, Gayle; ... Mellies, Jay (2020). Environmental Consortium Containing *Pseudomonas* and *Bacillus* Species Synergistically Degrades Polyethylene Terephthalate Plastic. *Mosphere*, 5(6), e01151-20.
<https://doi.org/10.1128/mSphere.01151-20>
- Ru, Jiakang; Huo, Yixin; Yang, Yu (2020). Microbial degradation and valorization of plastic wastes. *Frontiers in Microbiology*, 11, 442.
<https://doi.org/10.3389/fmicb.2020.00442>
- Samak, Nadia; Jia, Yunpu; Sharshar, Moustafa; Mu, Tingzhen; Yang, Maohua; Peh, Sumit; Xing, Jianmin (2020). Recent advances in biocatalysts engineering for polyethylene terephthalate plastic waste green recycling. *Environment International*, 145, 106144.
<https://doi.org/10.1016/j.envint.2020.106144>
- Sowmya, H. V.; Krishnappa, Ramalingappa; Thippeswamy, B. (2014). Degradation of polyethylene by *Trichoderma harzianum*—SEM, FTIR, and NMR analyses. *Environmental Monitoring and Assessment*, 186(10), 6577-6586.
<https://doi.org/10.1007/s10661-014-3875-6>

- Then, Johannes; Wei, Ren; Oeser, Thorsten; Barth, Markus; Belisário-Ferrari, Matheus; Schmidt, Juliane; Zimmermann, Wolfgang (2015). Ca^{2+} and Mg^{2+} binding site engineering increases the degradation of polyethylene terephthalate films by polyester hydrolases from *Thermobifida fusca*. *Biotechnology Journal*, 10(4), 592-598.
<https://doi.org/10.1002/biot.201400620>
- Tournier, V.; Topham, C. M.; Gilles, A.; David, B.; Folgoas, C.; Moya-Leclair, E.; ... Marty, A. (2020). An engineered PET depolymerase to break down and recycle plastic bottles. *Nature*, 580(7802), 216-219.
<https://doi.org/10.1038/s41586-020-2149-4>
- Valderrama-Ocoró, María; Chavarro-Guzmán, Luz; Osorio-Gómez, Juan; Peña-Montoya, Claudia (2018). Estudio dinámico del reciclaje de envases pet en el Valle del Cauca. *Revista Lasallista de Investigación*, 15(1). <https://doi.org/10.22507/rli.v15n1a6>
- Vieira, Francisco; Nahas, Ely (2005). Comparison of microbial numbers in soils by using various culture media and temperatures. *Microbiological Research*, 160(2), 197-202.
<https://doi.org/10.1016/j.micres.2005.01.004>
- Wang, Nan; Guan, Feifei; Lv, Xiang; Han, Dongfei; Zhang, Yuhong; Wu, Ningfeng; ... Tian, Jian (2020). Enhancing secretion of polyethylene terephthalate hydrolase PETase in *Bacillus subtilis* WB600 mediated by the SP_{amy} signal peptide. *Letters in Applied Microbiology*, 71(3), 235-241.
<https://doi.org/10.1111/lam.13312>
- Webb, Hayden; Arnott, Jaimys; Crawford, Russell; Ivanova, Elena (2013). Plastic degradation and its environmental implications with special reference to poly (ethylene terephthalate). *Polymers*, 5(1), 1-18.
<https://doi.org/10.3390/polym5010001>
- Wei, Ren; Breite, Daniel; Song, Chen; Gräsing, Daniel; Ploss, Tina; Hille, Patrick; ... Zimmermann, Wolfgang (2019). Biocatalytic degradation efficiency of postconsumer polyethylene terephthalate packaging determined by their polymer microstructures. *Advanced Science*, 6(14).
<https://doi.org/10.1002/advs.201900491>
- Wei, Ren; Oeser, Thorsten; Then, Johannes; Kühn, Nancy; Barth, Markus; Schmidt, Juliane; Zimmermann, Wolfgang (2014). Functional characterization and structural modeling of synthetic polyester-degrading hydrolases from *Thermomonospora curvata*. *AMB Express*, 4(1), 44.
<https://doi.org/10.1186/s13568-014-0044-9>
- Wei, Ren; Zimmermann, Wolfgang (2017). Biocatalysis as a green route for recycling the recalcitrant plastic polyethylene terephthalate. *Microbial Biotechnology*, 10(6), 1302-1307.
<https://doi.org/10.1111/1751-7915.12714>
- Wilkes, Rebecca-Ann; Aristilde, Ludmilla (2017). Degradation and metabolism of synthetic plastics and associated products by *Pseudomonas* sp.: capabilities and challenges. *Journal of Applied Microbiology*, 123(3), 582-593.
<https://doi.org/10.1111/jam.13472>
- Yan, Fei; Wei, Ren; Cui, Qiu; Bornscheuer, Uwe; Liu, Ya-Jun (2020). Thermophilic whole-cell degradation of polyethylene terephthalate using engineered *Clostridium thermocellum*. *Microbial Biotechnology*, 14(2), 374-385.
<https://doi.org/10.1111/1751-7915.13580>
- Yoshida, Shosuke; Hiraga, Kazumi; Takehana, Toshihiko; Taniguchi, Ikuo; Yamaji, Hironao; Maeda, Yasuhito; ... Oda, Kohei (2016). A bacterium that degrades and assimilates poly (ethylene terephthalate). *Science*, 351(6278), 1196-1199.
<https://doi.org/10.1126/science.aad6359>

Equipo de gestión de reclamaciones contractuales como componente de gobernanza de los proyectos de infraestructura energética en Colombia

Contract claims management team as a governance component of energy infrastructure projects in Colombia

David Marmolejo-Carrasco¹
Abel Del Rio-Cortina²

¹Project Management Office S.A. (Colombia). Correo electrónico: marmitos@gmail.com
orcid: <https://orcid.org/0000-0003-4516-2057>

²Universidad EAN (Colombia). Correo electrónico: adelrioc2311@universidadean.edu.co
orcid: <https://orcid.org/0000-0002-9847-0769>

Recibido: 11-01-2021 Aceptado: 28-06-2021

Cómo citar: Marmolejo-Carrasco, David; Del Rio-Cortina, Abel (2021). Equipo de gestión de reclamaciones contractuales como componente de gobernanza de los proyectos de infraestructura energética en Colombia. *Informador Técnico*, 85(2), 230 -245.
<https://doi.org/10.23850/22565035.3577>

Resumen

Los proyectos de infraestructura energética en Colombia presentan reclamaciones contractuales de manera constante. Tradicionalmente, el equipo del proyecto y su director son los encargados de atender estas reclamaciones, sin que sean expertos en temas contractuales, legales o de gestión de reclamaciones. En los casos en que estas reclamaciones son atendidas por los departamentos legales de las organizaciones, se observa una falta de experticia en cuanto a la dinámica de las reclamaciones, enfocada en las características de los proyectos y en las necesidades de los equipos de proyectos. El objetivo de este artículo es analizar la importancia de la constitución de equipos de gestión de reclamaciones contractuales para proyectos de infraestructura energética como un componente de gobernanza. En esta investigación exploratoria se aplicó análisis de contenido mediante el software Maxqda Pro-2019 a casos representativos de reclamaciones contractuales, complementado con la revisión de artículos en revistas especializadas. Se analizaron cuarenta y ocho casos en entidades vinculadas descentralizadas del sector de minas y energía en Colombia, y se revisaron siete documentos en Science Direct, con los criterios de “Energy + Contracts”, “Energy + Projects”, y “Projects + Claims”. Como resultados relevantes, se generó una taxonomía de diez temas que evidencian la importancia de la propuesta del equipo de gestión de las reclamaciones, y se analizó la pertinencia de la creación de la oficina de gestión de reclamaciones de proyectos (CPMO).

Palabras clave: PMO; CPMO; taxonomía de temas contractuales; PMI.

Abstract

Energy infrastructure projects in Colombia present contractual claims constantly. Traditionally, the project team and its director oversee handling these claims, without being experts in contractual, legal, or claim management issues. In the cases in which these claims are managed by the legal departments of the organizations, there is a lack of expertise regarding claims management, focused on the characteristics of the projects and the

needs of the project teams. The objective of the article is to analyze the importance of setting up contractual claim management teams for energy infrastructure projects as a component of governance. In this exploratory research, we applied content analysis by the application of the software Maxqda Pro-2019 to representative cases of contractual claims, complemented by the review of articles from specialized journals. We located forty-eight cases in de-centralized related entities of the mining and energy sector in Colombia and reviewed seven documents in Science Direct, with the criteria of “Energy + Contracts”, “Energy + Projects”, “And” Projects + Claims “. As relevant results, it was generated a taxonomy of ten topics that show the importance of the proposal of the claims management team, and it was analyzed the relevance of the creation of the project claims management office (CPMO).

Keywords: PMO; CPMO; taxonomy of contractual issues; PMI.

1. Introducción

Es común que proyectos de infraestructura energética en Colombia tengan toda clase de problemas, de hecho, el PMBOK® contiene una serie de herramientas y técnicas para abordarlos (Project Management Institute [PMI], 2017), y la extensión para proyectos de construcción indica que son únicos por la serie de complejidades que presentan (PMI, 2017; Porras; Sánchez; Galvis, 2014). Ordinariamente, el director del proyecto se enfrenta a estos problemas con la ayuda del equipo del proyecto, en algunos casos, son tan complejos, que merecen atención por parte de personal especializado, que acude a juicio de expertos, pero que, para la propuesta del presente artículo, deberán ser tratados por personal perteneciente a la organización. Considerando lo anterior, el objetivo de la investigación es analizar la importancia de la constitución de equipos de gestión de reclamaciones contractuales para proyectos de infraestructura energética como un componente de gobernanza. En el documento se abordan diferentes posturas desde las que se plantea la hipótesis teórica de que la participación de un equipo de reclamaciones contractuales incide en el mejoramiento de la gobernanza de los proyectos de infraestructura energética.

La dirección de proyectos ha definido que en estos hay dos clases de procesos; los orientados al producto, que son plasmados al interior del ciclo de vida del proyecto, y varían según el área de aplicación y fase de dicho ciclo (PMI, 2017), y los procesos orientados a la dirección del proyecto que determinan su avance de manera eficaz en el transcurso de su ciclo de vida (PMI, 2017). Dentro de la dirección de proyectos, el PMI ha agrupado los procesos de gestión en grandes áreas del conocimiento, definidas como conceptos, términos y actividades al interior de un ámbito profesional, y de dirección de proyectos o al interior de un área de especialización para todo tipo de proyectos. En cuanto a los proyectos de construcción, se han definido áreas de conocimiento específicas debido a sus particularidades (PMI, 2017), estas son la gestión de la seguridad, la gestión del medio ambiente, la gestión de las finanzas y la gestión de reclamaciones. De esta manera, en el presente documento se desarrolló un análisis de los inconvenientes contractuales de casos identificados que se encuentran asociados a entidades vinculadas descentralizadas, en conjunto con la revisión de literatura resultante de la búsqueda en Science Direct con los criterios de “Energy + Contracts”, “Energy + Projects”, y “Projects + Claims”.

En primera instancia, se aplicó análisis de contenido a los casos y a la bibliografía, con el fin de determinar las principales causas de las reclamaciones contractuales; se presentaron los resultados de las causas de dichas reclamaciones y la disertación en cuanto a la creación de un equipo de gestión; se expusieron los fundamentos conceptuales de la propuesta, en conjunto con la conceptualización del equipo de gestión de reclamaciones contractuales; se plantearon los roles y responsabilidades del equipo; así como sus habilidades interpersonales; y, finalmente, se generó el cierre del documento, mostrando los aportes del equipo, propuesto al mejoramiento de la gobernanza de los proyectos del sector energético, llegando a la comprobación de la hipótesis correspondiente.

2. Aspectos metodológicos

En el sector energético colombiano, existen evidencias de inconvenientes que han desencadenado en reclamaciones contractuales, que pudiesen haber sido evitadas con un tratamiento apropiado desde un equipo de gestión. En este artículo se abordó la metodología de análisis de contenido (Barringer; Jones; Neubaum, 2005), mediante la aplicación del software Mazqda Pro-2019, planteando un estudio exploratorio (Hernández; Fernandez; Baptista, 2013), en el que se abordaron cuarentaiocho casos asociados a entidades vinculadas descentralizadas del sector de minas y energía, con veinte laudos arbitrales y veintiocho sentencias. En estos casos, se presentaron condiciones de cambios en el alcance, modificaciones en cuanto a las condiciones del sitio, atrasos significativos, inconvenientes con subcontratos (Odeh; Battaineh, 2002; Richter; Mitchell, 1982), variaciones contractuales, y/o trabajos adicionales (Chappell; Powell-Smith; Sims, 2008; Semple; Hartman; Jergeas, 1994), todo lo anterior, en escenarios no previstos en las condiciones iniciales de los proyectos. De este primer ejercicio, se determinaron las diez causas principales de las reclamaciones.

Además de los cuarentaiocho casos, se ubicaron documentos en Science Direct con los criterios de “Energy + Contracts”, “Energy + Projects” y “Projects + Claims”, donde se identificaron inicialmente quince documentos, para luego, pasar a siete artículos que fueron sometidos al análisis de contenido (Barringer *et al.*, 2005), con lo cual, se detectaron siete temas relacionados con gestión de reclamaciones contractuales en proyectos de construcción, y siete temas en referencia a gestión de reclamaciones contractuales en el sector energético.

3. Resultados

Al momento de revisar la literatura con respecto a la gestión de reclamaciones contractuales, se encontraron una serie de autores en concordancia con los planteamientos del PMI, que muestran situaciones recurrentes, como la necesidad de análisis cuantitativo de las implicaciones de la gestión de reclamaciones en proyectos de construcción (Adrian, 1988); beneficios de las aclaraciones precontractuales para evitar conflictos y reclamaciones (Aibinu, 2009); escenarios en los que, a pesar de que existen lecciones aprendidas documentadas en cuanto a reclamaciones contractuales, se siguen cometiendo errores muy similares (Mullen; Davison, 2009; Richter; Mitchell, 1982); énfasis en la disminución de reclamaciones contractuales como un nuevo proceso de los proyectos de construcción (Hartman, 1994; Richter, 1983); énfasis en la magnitud de las reclamaciones contractuales en los costos totales de los proyectos de construcción (McDuff; Ray, 2002; Semple *et al.*, 1994); necesidad de manejar parámetros bien definidos de gestión de reclamaciones (Mirza, 2005); y reclamaciones contractuales como tema inherente al desarrollo de los proyectos de construcción (Thomas, 2001).

El análisis de los diferentes temas, producto de la revisión bibliográfica, permitió corroborar las causas de las reclamaciones ubicadas en los casos y llegar, a la vez, a la comprobación de la hipótesis planteada, con lo cual, se evidenció que un equipo experto en reclamaciones contractuales, que participa activamente en los diferentes grupos de procesos, incide en el mejoramiento de la gobernanza de los proyectos de infraestructura energética.

En cuanto a los proyectos de construcción en el sector energético, la revisión documental permitió identificar otra serie de temas relevantes, como, por ejemplo, la importancia del análisis de las comunidades afectadas por los proyectos para mitigar situaciones que podrían desencadenar en reclamaciones (Rogers; Simmons; Convery; Weatherall, 2012); la manera en que el establecimiento de políticas claras incide en el mejoramiento de las condiciones de gestión de los proyectos y disminuye las reclamaciones contractuales (Abeelen; Harmsen; Worrell, 2013); los procesos de compensación financiera con respecto a stakeholders directamente afectados por proyectos de infraestructura energética, tocando el tema en específico de proyectos de energía marítima renovable, donde el análisis de las partes interesadas es esencial para el establecimiento de un ejercicio contractual que implique mitigación de riesgos en referencia a reclamaciones (Reilly; O'Hagan; Dalton, 2016); la importancia teórica y metodológica de la comprensión de los desafíos de la producción y

consumo energético con sus implicaciones sociales, económicas y ambientales, que, en últimas, requieren de análisis contractuales profundos en términos de proyectos (Lappe-Osthege; Andreas, 2017); la relevancia de los estudios de corte cuantitativo, en cuanto a la mitigación de riesgos financieros mediante el establecimiento de contratos de eficiencia de proyectos energéticos que involucren a diferentes interesados, con el fin de propender por el éxito de los proyectos (Lappe-Osthege; Andreas, 2017); la necesidad de la revisión exhaustiva de los aspectos legales para mejorar la efectividad de los proyectos y de las condiciones de generación de valor en el ciclo de vida de los entregables (Töppel; Tränkler, 2019); y, finalmente, la importancia del análisis contractual al momento de gestionar proyectos de producción energética comunitaria, donde este análisis es un soporte para la formulación y gestión efectiva de los proyectos (Elsner; Suárez, 2019).

El análisis exploratorio de los cuarentaiocho casos permitió la identificación de las diez causas principales de las reclamaciones: daños en infraestructura, desequilibrio económico, ilegalidad, errores contractuales, incumplimiento, nulidad, perjuicios, sobre costo, violación contractual, y teoría de la imprevisión (Tabla 1).

Tabla 1. Identificación de principales causas de las reclamaciones contractuales.

Stakeholders	Año	Tipo de providencia	Daños en infraestructura	Desequilibrio Económico	Ilegalidad	Errores Contractuales	Incumplimiento	Nulidad	Perjuicios	Sobre costo	Violación Contractual	Teoría de la Imprevisión
Consorcio grupo de Ingenieros vs. Ecopetrol.	1978	Lau					1		1			
Consorcio Pavimentos Colombia vs. Ecopetrol.	1988	Lau		1		1	1		1	1		
Ecopetrol vs. Stewart & Stevenson Operations Inc.	2000	Lau	1			1	1		1			
Sociedad Latiff Ingeniería Limitada vs. Ecopetrol.	2001	Lau		1		1	1	1	1	1		1
Consorcio Cosacol - Hanover vs. Ecopetrol.	2002	Lau		1			1		1	1		
Gases de Boyacá y Santander S.A. vs. Ecopetrol.	2003	Lau		1		1			1	1		
"Daip S.A." y Conequipos ING. Ltda vs. Ecopetrol.	2003	Lau		1			1			1		1
Consorcio Tibú vs. Ecopetrol.	2004	Lau					1					1
Merichem Company vs. Ecopetrol.	2005	Lau		1			1		1	1		1
Consorcio CCIM vs. Ecopetrol.	2005	Lau		1			1		1	1		
Alcanos de Colombia S.A. ESP vs. Ecopetrol.	2007	Lau	1							1		
Ecopetrol vs. Hupecol Caracara LLC – Cepsa Colombia S.A.	2009	Lau				1						
Mansarovar Energy Colombia Ltda vs. Ecopetrol.	2010	Lau				1						
Transgas de Occidente S.A. vs. Ecopetrol S.A.	2017	Lau		1				1	1	1		1
Serviport S.A. vs. Ecopetrol.	2017	Lau		1		1	1		1			1
Compañía de Electricidad del Cauca S.A. ESP CEC vs. CEDELCA.	2014	Lau					1		1			
DEPI Ltda vs. DISPAC S.A. E.S.P.	2007	Lau					1		1			
Interaseo S.A. E.S.P vs. DISPAC S.A. E.S.P.	2011	Lau				1						
DISPAC S.A. E.S.P. vs. Consultores Unidos S.A.	2011	Lau		1		1	1		1			

Stakeholders	Año	Tipo de providencia	Daños en infraestructura	Desequilibrio Económico	Ilegalidad	Errores Contractuales	Incumplimiento	Nulidad	Perjuicios	Sobrecosto	Violación Contractual	Teoría de la Imprevisión
Skanska Aktiebolag vs. Urrá S.A. ESP – Corelca.	2001	Lau	1						1	1		
Consorcio Protécnica LTDA vs. Ecopetrol	2002	Sen					1					
Ecopetrol vs. Liberty Seguros S.A.	2004	Sen					1	1				
Ever Alfonso Suarez Lagos vs. Ecopetrol.	2011	Sen				1	1		1			
Sociedad Latiff Ingeniería Limitada vs. Ecopetrol.	2012	Sen	1				1	1	1	1		1
Meta Petroleum Corp. Sucursal Colombia vs. Ecopetrol.	2014	Sen				1						
Aseguradora Colseguros S.A. vs. Ecopetrol.	2015	Sen	1				1	1	1			
Ecopetrol vs. Liberty Seguros S.A.	2015	Sen				1	1		1			
Sociedad Zuleta Holguín y Compañía S.A. vs. Ecopetrol.	2014	Sen		1				1	1			1
Ecopetrol vs. Gran Tierra Energy Colombia LTDA.	2015	Sen					1	1				
Industrias Crisaza S.A. vs. Ecopetrol.	2016	Sen				1	1		1			
Ecopetrol vs. Sociedad Tecni JB y MP LTDA.	2016	Sen	1				1		1	1		
Insurcol Ltda vs. Ecopetrol.	2016	Sen				1	1					
Montajes Técnicos Zambrano y Vargas MTZ LTDA vs. Ecopetrol.	2016	Sen	1		1					1		
Transportes Montejo LTDA vs. Ecopetrol.	2016	Sen				1	1		1			
Alvarado y During LTDA vs. Ecopetrol.	2016	Sen	1		1				1			
Elías Francisco Serpa Torres vs. Ecopetrol.	2017	Sen					1	1	1			
Transgas de Occidente S.A. vs. Ecopetrol.	2018	Sen				1						
Jose Milton Morales Rey vs. Ecopetrol.	2018	Sen	1						1			
Idrojet SRL vs. Ecopetrol.	2018	Sen	1				1		1			
Fluvial del Caribe S.A.S. vs. Ecopetrol.	2018	Sen				1		1				
Urrá S.A. ESP – Corelca vs. Ecopetrol.	2018	Sen				1		1	1			
Transgas de Occidente S.A. vs. Ecopetrol	2018	Sen	1									
Ecopetrol vs. Lucendy Duarte Narváez y otros.	2018	Sen						1	1			
Incopav S.A., Intricon S.A. y FM Ingeniería S.A. vs. Ecopetrol.	2018	Sen	1				1		1			
Edgar Mauricio Lozano Gómez vs. Ecopetrol.	2018	Sen				1	1	1	1			
Vibran S.A.S. vs. Ecopetrol.	2018	Sen	1					1		1		
Prago Ingeniería S.A.S. vs. Ecopetrol.	2019	Sen					1		1			
Interconexión Eléctrica S.A. – ISA S.A. vs. Atlas Ingeniería S.A.	2015	Sen					1		1			
Resultados			4	19	1	21	30	13	33	13	2	6

Fuente: elaboración propia mediante el análisis de los resultados del software Maxqda Pro-2019.

Los resultados del análisis exploratorio permitieron la construcción de un ranking de causas de reclamaciones contractuales, desde el que es posible profundizar en las causas consideradas recurrentes: perjuicios, incumplimiento y errores contractuales (Figura 1).

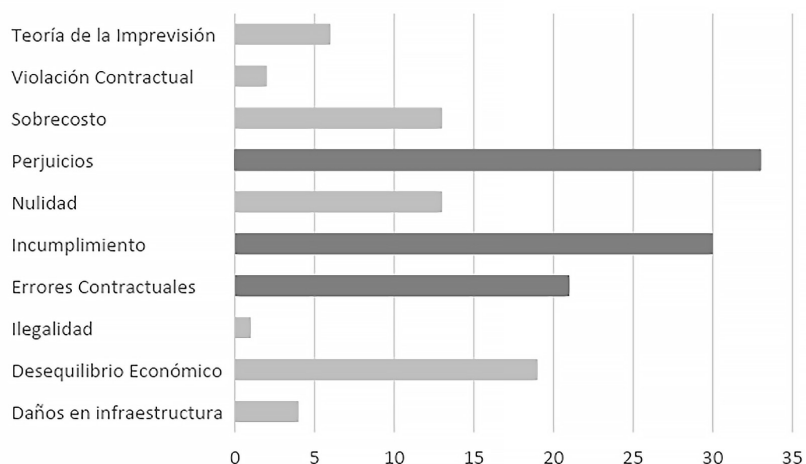


Figura 1. Ranking de causas de reclamaciones contractuales.

Fuente: elaboración propia.

La revisión bibliográfica permitió corroborar las diez causas de reclamaciones identificadas en los casos de laudos y sentencias, y, además, permitió evidenciar la necesidad de tratamiento de los factores que podrían representar riesgos de reclamaciones contractuales, donde resalta la causa de errores contractuales que en la Figura 1 aparece en tercer lugar en el ranking, por lo que es importante una anticipación basada en lecciones aprendidas, en el apoyo de un equipo experto en este tipo de situaciones, y en la gestión de las causas de las reclamaciones.

Además de lo anterior, el análisis detallado de los 20 laudos y las 28 sentencias permitió identificar a la empresa colombiana de Petróleos Ecopetrol S. A. como el principal *stakeholder* de estas providencias (Figura 2), con carácter de sujeto pasivo, altamente representativo, con un 73 % de casos en los que es sometido a reclamaciones contractuales; y, a su vez, sujeto activo, con una partición del 15 % como agente que genera reclamaciones, con lo cual, se evidenció que esta organización requiere de un mejor manejo contractual que podría ser optimizado con la propuesta del equipo de gestión de reclamaciones.

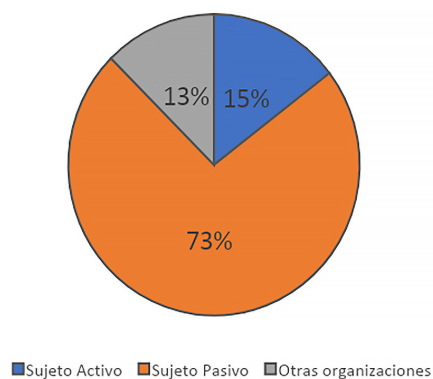


Figura 2. Participación de Ecopetrol S. A. en las providencias de reclamaciones contractuales.

Fuente: elaboración propia.

El panorama es desalentador, en la medida en que, de acuerdo con la revisión de los casos de reclamaciones, y considerando los autores mencionados anteriormente, los proyectos de construcción en general, y los proyectos de construcción en el sector energético, tienen una serie de características que propician reclamaciones contractuales; sin embargo, es posible disminuir la probabilidad de configuración de la teoría de la imprevisión y de otras causas del rompimiento del equilibrio económico de los contratos de proyectos, mediante la aplicación de buenas prácticas de gestión de proyectos y, de ser necesario, acudiendo a buenas prácticas de gestión de reclamaciones, con el fin de minimizar los impactos que se puedan generar tanto para el proyecto como para los diferentes *stakeholders*, sobre todo al tener que gestionar reclamaciones que surgen de la materialización de riesgos imprevistos (González; van der Weijde; Sauma, 2020; Marmolejo, 2016).

El análisis exploratorio evidenció la existencia de falencias en la definición de un subconjunto del equipo del proyecto, que sea encargado, en primera instancia, de identificar riesgos relacionados con reclamaciones contractuales y, luego, si se materializa algún riesgo, de gestionar las reclamaciones contractuales de manera efectiva (Marmolejo, 2016). Lo anterior es considerado teniendo en cuenta que las causas de las reclamaciones contractuales identificadas podrían ser abordadas de manera preventiva por el equipo de gestión de reclamaciones contractuales (González *et al.*, 2020).

De acuerdo con el PMBOK (PMI, 2017), el director del proyecto es el encargado de abordar las reclamaciones contractuales, por lo que deberá contar con habilidades, conocimientos y herramientas al respecto. Así, la propuesta base del presente artículo es el análisis de la importancia de la creación de un equipo de gestión de reclamaciones contractuales para proyectos del sector energético (González *et al.*, 2020), presentando los fundamentos en cuanto a atributos, características de sus integrantes y entorno. Como parte de la disertación que se generó de los hallazgos, se planteó la creación de un ente en temas de reclamaciones contractuales de características y responsabilidades similares a la Oficina de Gestión de Proyectos (PMO), que se denominaría Oficina de Gestión de Reclamaciones de Proyectos (CPMO), y que tendría contacto directo con un equipo especial al interior de los proyectos, encargado de gestionar los diferentes aspectos relacionados con las reclamaciones contractuales al nivel del proyecto.

Es de anotar que las organizaciones ejecutoras de proyectos en el sector minero, que fueron identificadas en los laudos y sentencias, basan su funcionamiento en las prácticas consignadas en el PMBOK, y que, aun siguiendo estos lineamientos, han presentado inconvenientes de errores contractuales, lo cual es parte del análisis exploratorio que lleva a la propuesta de una estructura que incremente las capacidades organizacionales para hacer frente a los marcos legales asociados a los proyectos del sector minero energético. Esta transición entre la manera en que se han desarrollado los procesos de formulación y gestión de proyectos del sector requiere de una visión que se aparte de las prácticas tradicionales inmersas en una lógica de isomorfismo institucional (DiMaggio; Powell, 1983), en la que se adoptan las prácticas aceptadas por la industria, hacia una perspectiva de isomorfismo competitivo (Fennell, 1980; Meyer, 1979), en la que se determinan acciones innovadoras acordes a los requerimientos del contexto, que, por lo general, van acompañadas con decisiones de identificación y vinculación del talento humano idóneo en un proceso relacionado con costos de transacción (Williamson, 1981), como soporte de incremento de capacidades organizacionales (Danielson; Doolittle; Bradley, 2007).

4. Estructura de gestión de reclamaciones contractuales

Se propone que la estructura de gestión de reclamaciones contractuales se encuentre bajo la dirección de la CPMO, la cual se plantea como un ente experto en procesos contractuales, de gestión de reclamaciones y en dirección de proyectos, que gestiona y aplica los activos de los procesos de la organización, el conocimiento, habilidades, herramientas y técnicas específicas en procesos de reclamaciones contractuales propios de la organización, y que monitorea el estado de estos en los proyectos que desarrolla la organización.

La CPMO, tal como sucede con la PMO (Cleland; Kerzner, 1985; Marmolejo, 2017), se define como un equipo de personas autorizadas para hablar de los proyectos, y un facilitador estratégico en términos de regulación y gobierno de la dirección de proyectos soportados en el ámbito contractual y de reclamaciones que rodea a los proyectos (González *et al.*, 2020), y que incide en el tratamiento de los riesgos del proyecto (Del Río; Cárdenas, 2018), a partir del análisis de los temas contractuales. La CPMO también se propone como una estructura organizacional independiente, que provee servicios de análisis contractual mediante el ejercicio de las funciones de ingeniería contractual, ingeniería de costos, ingeniería de programación, gestión de riesgos y gestión legal.

En ingeniería contractual, la CPMO se enfocaría en la evaluación de la documentación contractual pertinente, de acuerdo con la complejidad de los proyectos abordados; en ingeniería de costos, se desarrollarían evaluaciones de las estructuras de costos de los proyectos, con énfasis en los impactos posibles de los diferentes tipos de contratos relacionados con la gestión de los proyectos; en ingeniería de programación, se determinarían las interconexiones óptimas entre las actividades con la evaluación de las necesidades contractuales; en gestión de riesgos, se haría énfasis en posibles riesgos asociados a los diferentes marcos contractuales; y en gestión legal, se darían las recomendaciones pertinentes en cuanto a los procedimientos para la celebración de contratos idóneos, diseño de indicadores de seguimiento y establecimiento de protocolos de cierre contractual (Figura 3).

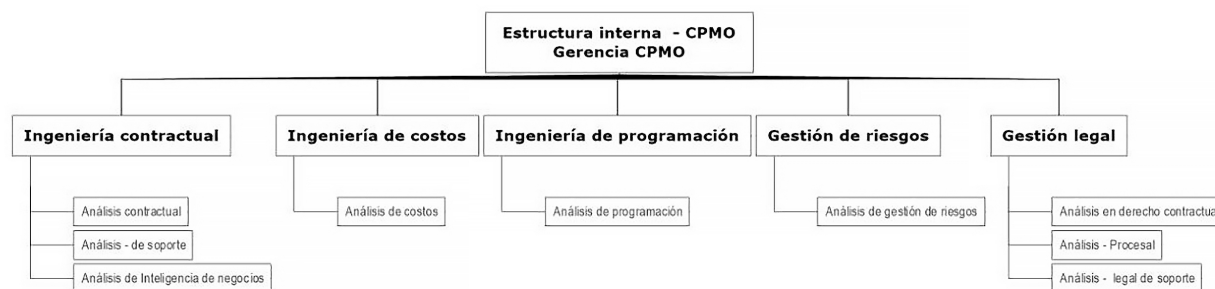


Figura 3. Estructura propuesta de la Oficina de Reclamaciones de Proyectos CPMO.

Fuente: elaboración propia.

En la estructura propuesta se requiere el incremento de competencias del equipo del proyecto, en cuanto a los procesos de gestión de reclamaciones contractuales, con el fin de integrarlos a los diferentes grupos de procesos de dirección de proyectos, para dar tratamiento a los riesgos relacionados con temas contractuales. Al interior de una estructura organizacional apropiada de reclamaciones contractuales, el equipo de gestión de reclamaciones, relacionado con la CPMO, debe brindar apoyo contractual y de gestión de reclamaciones de manera interna, como subconjunto del equipo del proyecto, en el mismo sentido en que el equipo de gestión, relacionado con la PMO, presta sus servicios en los procesos de dirección de proyectos. Se recomienda la apertura de un espacio en el gráfico en el que se evidencien las relaciones entre los interesados y el proyecto (PMI, 2017), para darle cabida al equipo de gestión de reclamaciones, que quede contenido en el equipo del proyecto, como un subconjunto diferenciado del equipo de dirección del proyecto, del director del proyecto y otros miembros del equipo, el cual posee una interfaz de relación directa con la CPMO, que está por fuera del equipo del proyecto, tal como la PMO, y se propone una mayor relación de trabajo y dependencia con la CPMO, lo que no se muestra entre el equipo de dirección de proyecto y la PMO.

En la medida en que en el PMBOK se define al equipo del proyecto, como "...individuos que tienen asignados roles y responsabilidades, quienes trabajan en conjunto para lograr un objetivo común del proyecto..." (PMI, 2017, p. 309), el equipo de gestión de reclamaciones contractuales es concebido como el conjunto de individuos, que tienen asignados roles y responsabilidades, en torno a la gestión de reclamaciones, quienes trabajan de manera coordinada para lograr un objetivo común del proyecto, enfocándose en la gestión de las

reclamaciones contractuales. En relación con las diferentes estructuras de la organización (Rad; Levin, 2002), identificadas como factores ambientales de la empresa que afectan la disponibilidad de los recursos e influyen en el modo de dirigir los proyectos (PMI, 2017), se definirá la posición del equipo de gestión de reclamaciones dependiendo de cada forma de estructura organizacional.

En una estructura organizacional funcional clásica (Figura 4), el equipo de gestión de reclamaciones tiene las mismas limitaciones de un equipo de proyecto. Sin embargo, este equipo, puede depender directamente de la CPMO o del gerente legal de la compañía, por lo que tendrá un importante apoyo del área jurídica de la organización y responderá ante dicha autoridad. Este, quizás, sea el caso en que el equipo de gestión de reclamaciones tenga mayor influencia en las decisiones del proyecto, debido a las ventajas conocidas para este tipo de organización, como que los expertos funcionales que estarán a la mano del equipo de gestión del proyecto serán acogidos por el equipo de gestión de reclamaciones contractuales, tomando lo mejor del área funcional, y especialmente del área jurídica, que tradicionalmente tienen mucha influencia sobre decisiones contractuales en un proyecto independiente de la estructura organizacional del mismo.

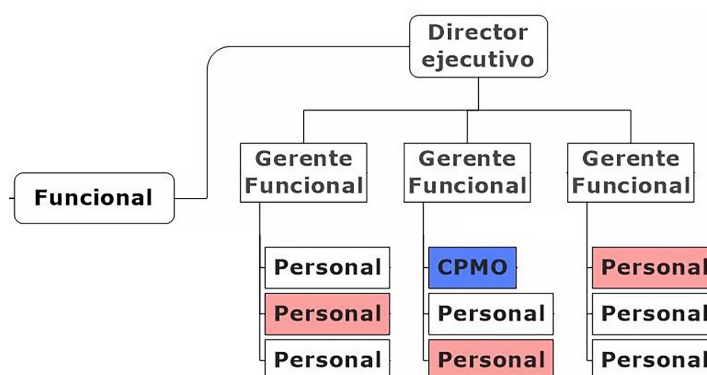


Figura 4. CPMO en la estructura funcional.

Fuente: elaboración propia basada en el PMBOK 2017.

Al interior de una estructura funcional clásica, el director del proyecto, en algunos casos, tendrá tan poca autoridad que el equipo de gestión de reclamaciones podrá tener mayor influencia en las decisiones contractuales, por ejemplo, como se ha dicho, con un poder delegado desde el área funcional jurídica (PMI, 2013). En cuanto a las organizaciones matriciales (Figura 5), por ser de carácter intermedio, no hay muchas características a señalar.

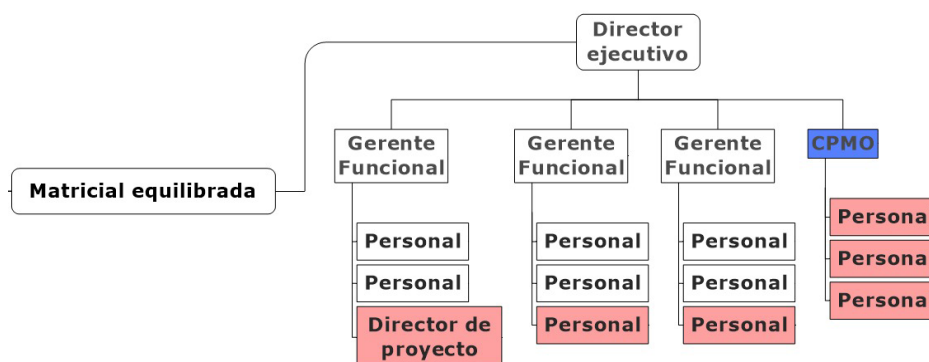


Figura 5. CPMO en la estructura matricial.

Fuente: elaboración propia basada en el PMBOK 2017.

Sobre las organizaciones orientadas a proyectos (Figura 6), estas presentan ventajas, como que a menudo el equipo del proyecto se encuentra en un solo lugar (PMI, 2017), e interactúa con los miembros del equipo de gestión de reclamaciones, y da lugar a una “sala de guerra” como parte de la estrategia de ubicación (PMI, 2013). En esta sala de guerra contractual se publicarían datos como los retrasos en el cronograma, reclamaciones pendientes, estrategias contractuales, valores y tiempos reclamados, decisiones de pagar o no pagar, premios pendientes, incumplimientos, entre otros aspectos.

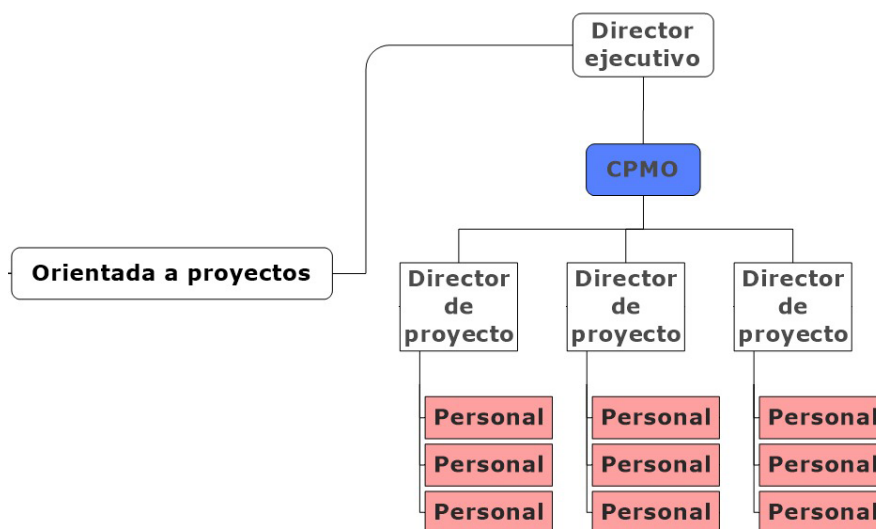


Figura 6: CPMO en la estructura orientada a proyectos.

Fuente: elaboración propia basada en el PMBOK 2017.

Tal como se muestra en el PMBOK, estas organizaciones cuentan con “unidades organizacionales denominadas departamentos” (PMI, 2013), de lo que se entiende que el equipo de gestión de reclamaciones tendría una figura organizacional de departamento de reclamaciones, que “pueden reportar directamente al director del proyecto o bien prestar servicios de apoyo a varios proyectos” (PMI, 2013). Ahora bien, una vez analizada la interfaz externa al equipo del proyecto con el equipo de gestión de reclamaciones, quedarían por definir las relaciones entre el equipo de dirección del proyecto, el director del proyecto, y otros miembros del equipo, con el propuesto del equipo de gestión de reclamaciones. En ese sentido, es el director del proyecto quien debe direccionar la relación entre el equipo de gestión de reclamaciones y otros componentes del equipo del proyecto. El equipo de gestión de reclamaciones puede verse en algún momento como un equipo virtuoso, conformado con las estrellas del equipo del proyecto, haciendo de la gestión de reclamaciones un deporte, defendiendo los intereses del propietario del proyecto, cumpliendo metas y plazos, fomentando y confiando en sus talentos (Mishra; Soota, 2006). También pudiera verse al equipo de gestión de reclamaciones como de alto desempeño, donde existen vínculos integrados en torno a las reclamaciones contractuales, coexistencia de métodos individuales y métodos comunes, sumado a la innovación, con una comunicación basada en la aceptación incondicional, relaciones de corresponsabilidad, solidaridad, apoyo y, ante todo, una resolución de conflictos de manera anticipada (Fischer; Boynton, 2005; PMI, 2013). El Project Management Institute define un rol como “la función asumida por o asignada a una persona en el ámbito del proyecto (PMI, 2017), y responsabilidad como “las tareas asignadas y el trabajo que se espera que realice un miembro del equipo del proyecto a fin de completar las actividades programadas” (PMI, 2017).

En el sentido estricto, hablar de los roles deseables en el equipo de gestión de reclamaciones sería considerar, por ejemplo, la participación del director de gestión contractual, los ingenieros contractuales, ingenieros de programación contractual, ingenieros de análisis del contrato, abogados contractuales, abogados auxiliares, abogados analistas, auxiliares y otros. Bien pudiera el presente trabajo relacionar una lista de cargos a suplir en materia contractual para un proyecto, pero se alejaría de dar los lineamientos generales para la conformación de un equipo de gestión de reclamaciones contractuales, que es el real objetivo del artículo. En este documento, se presentan algunos elementos que servirán para que el lector, con sus propias condiciones, establezca los roles a partir de unas responsabilidades y objetivos definidos de manera general para este tipo de equipos, los cuales también tendrán que ser particularizados a las condiciones de cada proyecto que se gestione.

Así como el objetivo principal del equipo del proyecto es darle cumplimiento al alcance del mismo, mediante una entrega final (Cleland; Kerzner, 1985; PMI, 2013), el objetivo principal del equipo de gestión de reclamaciones contractuales es darle cumplimiento al alcance del proyecto, mediante la entrega final, con el debido tratamiento y manejo adecuado de las reclamaciones contractuales ocurridas para darles un cierre apropiado. Es importante, también, que el equipo de gestión de reclamaciones contractuales, tal como el equipo del proyecto, tenga su misión, metas y objetivos claros, con el fin de mantener el rumbo (Fischer; Boynton, 2005; Uribe; Molina; Contreras; Barbosa; Espinosa, 2013).

Tal como se trata profundamente al momento de resolver las reclamaciones contractuales de construcción internacionales (Lewis, 2007), pero sin mencionar roles y responsabilidades directamente a un equipo, el equipo de gestión de reclamaciones contractuales deberá tener roles y responsabilidades definidas para preparar las reclamaciones, realizar acuerdos de negociación, preparar documentos como mecanismos alternativos de solución de conflictos, y evitar futuras reclamaciones. Complementando lo anterior, el equipo de gestión de reclamaciones contractuales tradicionalmente tendrá tareas de monitoreo de retrasos e interrupciones encaminadas a la prevención de la reclamación, formulación y presentación de las reclamaciones, respuesta a reclamaciones y contrademandas; y, finalmente, mediante diferentes análisis, podrá evitar, resolver y liquidar disputas (Lewis, 2007; Uribe *et al.*, 2013).

El equipo de gestión de reclamaciones debería ser pacificador en los conflictos contractuales, trabajando constantemente por mejorar las relaciones entre las partes, y realizando algunos talleres y capacitaciones en materia contractual (Lewis, 2007). Los conflictos contractuales deben ser delegados al equipo de gestión de reclamaciones, de tal manera que el resto del equipo del proyecto se concentre en sus propias actividades, y mantengan muy buenas relaciones con los pares en los equipos de las contrapartes. El equipo de gestión de reclamaciones contractuales se concibe como un filtro ante los problemas que trascienden a aspectos técnicos y de dirección de proyectos, manteniendo la cordialidad, las buenas relaciones y, en especial, manteniendo a todos trabajando en lo suyo, pero consiguiendo lo que se quiere de las contrapartes o limitando la presión que estos reciben de las negociaciones (Richter, 1983). Tal como sucede con el director del proyecto, el equipo de gestión de reclamaciones debe tener un balance o equilibrio entre sus habilidades éticas, interpersonales y conceptuales para analizar las situaciones contractuales e interactuar con el resto del equipo del proyecto y contratistas (PMI, 2017).

Se resumen las habilidades interpersonales del director del proyecto en unas específicas de la gestión de reclamaciones contractuales, que son consideradas como las más relevantes, lo cual no significa que no sean necesarias las no traídas al contexto del presente artículo. Por ello, se seleccionan como habilidades idóneas y relevantes en materia contractual, el desarrollo del espíritu de equipo, la comunicación, la influencia, la toma de decisiones, la negociación, la gestión de conflictos y el entrenamiento. El desarrollo del espíritu de equipo en gestión de reclamaciones tiene que ver con esas personas unidas por los objetivos definidos anteriormente en el presente artículo. El trabajo conjunto con el líder y otros interesados es direccionado en materia contractual. Si bien es cierto que el equipo de gestión de reclamaciones contractuales es un conjunto diferente, aunque contenido por el equipo del proyecto, se debe trabajar en conjunto con los diferentes organismos del proyecto y todos los interesados (PMI, 2017). Como lo propone el Project Management Institute (PMI, 2017), el desarrollo del espíritu

de equipo consiste en 1) afrontar tareas de manera conjunta, tales como preparar y responder reclamaciones y negociaciones, solucionar conflictos, evitar reclamaciones, monitorear retrasos e interrupciones, formular y presentar reclamaciones, y evitar, resolver y liquidar disputas; y 2) asumir procesos coordinadamente, tales como los enunciados en el PMBOK y procesos de gestión de reclamaciones contractuales. El desarrollo del espíritu de equipo también implica la necesidad de reafirmar el carácter colectivo, no individual, ni personas trabajando independientemente, lo que requiere, a su vez, del respaldo de la alta dirección, con recompensas y reconocimientos adecuados, haciendo énfasis en la necesidad de esta habilidad interpersonal en las fases iniciales del proyecto para evitar al máximo las reclamaciones en las siguientes fases.

En relación con la habilidad interpersonal de comunicación, esta es indispensable para un equipo de gestión de reclamaciones contractuales. No por nada el Project Management Institute (PMI, 2017) la califica como una de las mayores y únicas razones del éxito o fracaso de un proyecto. Tal como sucede con el equipo del proyecto, “es esencial que exista una comunicación eficaz dentro del equipo del proyecto y entre el director del proyecto, los miembros del equipo y todos los interesados externos” (PMI, 2013), y como consecuencia, el equipo de gestión de reclamaciones deberá destacarse en mayor medida en esta habilidad. Gestionar reclamaciones es comunicarse, expresarse, hacerse entender, entender a los demás, aprender a leer y escuchar las pretensiones de otros y poder expresar las propias. Todo miembro del equipo de gestión de reclamaciones contractuales debe ser un excelente comunicador, por cualquier método o dimensión, y con el más eficiente modelo de comunicación (PMI, 2017; Thomas, 2001). Por ello, se perfila la importancia de la comunicación en el ámbito de las organizaciones (Baena; Montero, 2014; Rebeil; RuizSandoval, 1998; DiDonato, 1993; Rodríguez, 2015; Kase, 2008; Ongallo, 2008; van der Hofstadt, 2005), y en la misma magnitud, se considera relevante e importante para el proyecto que el equipo de gestión de reclamaciones posea destacables habilidades de comunicación.

Sobre la habilidad personal de influencia, el PMBOK dice que consiste en “compartir la autoridad y apoyarse en las habilidades interpersonales para hacer que otros cooperen en la consecución de metas comunes” (PMI, 2013, p. 515), lo cual, es ciertamente importante para un equipo de gestión de reclamaciones, puesto que facilita la cooperación de otros miembros del equipo del proyecto, con los del equipo de gestión de reclamaciones. Ahora bien, el carácter de una persona es la base de la credibilidad y habilidad de persuasión (Ongallo, 2008), por lo que el equipo de gestión de reclamaciones contractuales deberá mantener una unidad de carácter en aras de poder influir en la totalidad del equipo del proyecto. Por otra parte, la toma de decisiones es una habilidad interpersonal que debe estar presente en todo miembro del equipo de gestión de reclamaciones, y el PMBOK señala los estilos básicos de toma de decisiones utilizados normalmente por los directores del proyecto (PMI, 2017), así como cuatro factores principales que afectan el estilo de toma de decisiones: “las restricciones de tiempo, la confianza, la calidad y la aceptación” (PMI, 2013, p. 516), pero en materia de toma de decisiones contractuales, se evidencian vacíos.

En lo que respecta a gestión de reclamaciones, es preciso acudir a herramientas conceptuales más elaboradas para la toma de decisiones. Por ejemplo, se propone el uso de modelos matemáticos para la toma de decisiones, con los cuales se resuelven problemas complejos que superan modelos cualitativos (Rebeil; RuizSandoval, 1998). En los proyectos, y en especial, en el ámbito contractual, se presentan numerosas variables, en problemas en los que intervienen varias personas o grupos, y existen dinámicas de cambios considerables, presentándose alternativas múltiples, que, en cuanto al éxito de los proyectos, requieren de modelos que permitan análisis cuantitativo para la toma de decisiones (van der Hofstadt, 2005). Esta clase de soluciones cuantitativas para la toma de decisiones, compartida por diversos autores (van der Hofstadt, 2005), es utilizada en teoría de juegos, y es muy afín a una relación contractual, y a usos de los métodos cuantitativos en organizaciones que han dado éxito.

Adicionalmente, la negociación como habilidad interpersonal debe ser desarrollada por todos los integrantes del equipo de gestión de reclamaciones contractuales. La misma es definida como “la estrategia que consiste en dialogar con las partes que tienen intereses compartidos u opuestos, con el propósito de lograr un compromiso o llegar a un acuerdo” (PMI, 2013, p. 517), por lo que está muy acorde con lo necesario en

materia de gestión de reclamaciones, dada la misma definición de reclamación. En ese sentido, la negociación es la habilidad interpersonal que se encuentra por excelencia en la gestión de reclamaciones, y es esta habilidad la que debe destacarse en un miembro del equipo de gestión de reclamaciones. Por lo anterior, el equipo de gestión de reclamaciones deberá contar con suficientes técnicas y tácticas de negociación (Kase, 2008), desarrollando principalmente la escucha activa. El equipo de gestión de reclamaciones deberá utilizar esta habilidad interpersonal durante todas las etapas del conflicto contractual, aplicando mecanismos, tales como la anticipación, la diferencia consciente pero no expresada, la discusión, la disputa y el conflicto abiertos (Rodríguez, 2015), pero siempre, teniendo en cuenta que los conflictos contractuales no deben afectar el ciclo de vida del proyecto, y ojalá no trascender al mismo.

Sobre la gestión de conflictos, es claro, tal como sucede en la totalidad del proyecto, que “los conflictos resultan inevitables en el ambiente de un proyecto” (PMI, 2013, p. 518). En materia contractual, los conflictos son también inevitables y son tratados por medio de la gestión de reclamaciones contractuales, para la cual se propone que sea precisamente el equipo de gestión de reclamaciones quien los gestione. En el mismo sentido, la guía de los fundamentos de dirección de proyectos indica que “dentro del ambiente de un proyecto, los conflictos pueden generar resultados disfuncionales” (PMI, 2013, p. 518), y con mayor motivo, los conflictos contractuales, lo que le da mayor respaldo a la propuesta de equipos de gestión de reclamaciones para que sea quien gestione este tipo de conflictos, dada su naturaleza contractual. Debido a esto, el equipo de gestión de reclamaciones contractuales deberá tener conocimientos del estado en que se encuentra en el conflicto, entendiendo lo que sucede, decidiendo lo que se va a hacer, y actuando en pro de la solución de los conflictos (Adrián; Andrés, 1999; Gallagher; Watson, 2011; Martínez, 2012).

5. Conclusiones

Hay requerimientos en cuanto a roles y responsabilidades para cierto tipo de proyectos, que no se suplen con los tradicionales equipos. Sin necesidad de acudir al juicio de expertos, es posible conformar subconjuntos del equipo del proyecto, que sean expertos en materia contractual, y que brinden apoyo al director. Estos expertos internos deberían estar familiarizados con diferentes parámetros relevantes para la gestión apropiada de los proyectos en el sector energético, como por ejemplo, la gestión de las comunidades de acuerdo con lo planteado por Rogers *et al.* (2012); la gestión de los diferentes interesados, considerando los planteamientos de Reilly *et al.* (2016); el equilibrio social, económico y ambiental, argumentado por Lappe-Osthege y Andreas (2017); el establecimiento de políticas institucionales claras como parte relevante de los activos de los procesos de las organizaciones, considerado por Abeelen *et al.* (2013); el análisis de los aspectos legales relacionados con el ciclo de vida de los proyectos y de los entregables, como recomiendan Töppel y Tränkler (2019); y, finalmente, el desarrollo de análisis contractual específico acorde a las complejidades de los proyectos del sector minero energético, como precisan Elsner y Suarez (2019), en cuanto producción energética comunitaria.

Los roles y responsabilidades de este tipo de equipos deben ser definidos, teniendo en cuenta los diferentes procesos de la gestión de reclamaciones contractuales. Así mismo, las habilidades interpersonales de cada uno de los integrantes del equipo de gestión de reclamaciones contractuales deben ir en la misma dirección con los temas que se van a abordar, y pueden ser definidas a partir de las habilidades interpersonales relativas al tema sobre el que han sido definidas en el PMBOK para el director del proyecto.

Indiscutiblemente, los conflictos contractuales y las reclamaciones se presentan a lo largo de cualquier proyecto de infraestructura del sector energético, lo cual, es evidenciado en los cuarentaiocho casos identificados entre laudos y sentencias, así como también, en el análisis de la literatura. Aunque las evidencias indican que los cuarentaiocho casos de laudos y sentencias hubiesen podido tener un mejor tratamiento de haber sido gestionados por el equipo de gestión de reclamaciones contractuales, dado que los elementos descritos en el presente artículo hubieran contribuido a afrontar de manera apropiada las situaciones presentes en los diferentes casos, se evidencia también que debido a los costos inmersos en la asunción de una nueva estructura, las

organizaciones inmersas en los laudos y sentencias tendrían que sopesar los costos de transacción (Williamson, 1981), en que incurrirían con el fin de transitar del isomorfismo institucional (DiMaggio; Powell, 1983) hacia el isomorfismo competitivo (Fennell, 1980; Meyer, 1979), en el tema de reclamaciones contractuales.

De acuerdo con los planteamientos presentados, el equipo de gestión de reclamaciones contractuales propuesto se convierte en la primera opción al momento de enfrentar las reclamaciones en proyectos de infraestructura en el sector energético; sin embargo, en el momento en que este tipo de proyectos presenten una configuración altamente compleja, y cuando los temas sean supremamente sensibles, puede que haga falta más que un equipo de gestión de reclamaciones, y que se deba llegar a las instancias de la CPMO como entidad que gobierne el proyecto desde un enfoque contractual y de gestión de reclamaciones.

6. Referencias

- Abeelen, Christiaan; Harmsen, Robert; Worrell, Ernst (2013). Implementation of energy efficiency projects by Dutch industry. *Energy Policy*, 63, 408-418.
<https://doi.org/10.1016/j.enpol.2013.09.048>
- Adrian, James (1988). *Construction claims: A quantitative approach*. Englewood Cliffs, NJ, EE. UU.: Prentice-Hall.
- Adrián, Luis; Andrés, Jaime (1999). 24 técnicas y tácticas para negociar. *Harvard Deusto Márketing y Ventas*, 35, 72-79.
- Aibinu, Ajibade (2009). Avoiding and mitigating delay and disruption claims conflict: Role of precontract negotiation. *Journal of Legal Affairs and Dispute Resolution in Engineering and Construction*, 1(1), 47-58.
[https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)1943-4162\(2009\)1:1\(47\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)1943-4162(2009)1:1(47))
- Baena, Guillermo; Montero, Sergio (2014). *Ciencias de la comunicación 1*. Ciudad de México, México: Grupo Editorial Patria.
- Barringer, Bruce; Jones, Foard; Neubaum, Donald (2005). A quantitative content analysis of the characteristics of rapid-growth firms and their founders. *Journal of Business Venturing*, 20(5), 663-687.
<https://doi.org/10.1016/j.jbusvent.2004.03.004>
- Chappell, David; Powell-Smith, Vincent; Sims, John (2008). *Building contract claims* (4ta ed.). Oxford, Inglaterra: Wiley-Blackwell.
- Cleland, David; Kerzner, Harold (1985). *A project management dictionary of terms*. Nueva York, NY, EE. UU.: Van Nostrand Reinhold.
- Danielson, Louis; Doolittle, Jennifer; Bradley, Renee (2007). Professional development, capacity building, and research needs: Critical issues for response to intervention implementation. *School Psychology Review*, 36(4), 632-637.
- Del Río, Abel; Cárdenas, Beitmantt (2018). Dinámica de sistemas: una forma de optimizar la gestión del riesgo. *Revista Escuela de Administración de Negocios*, número especial, 125-143.
<https://doi.org/10.21158/01208160.n0.2018.2021>
- DiDonato, Leonard (1993). Alternate methods to resolve contract disputes: Approaches to effective prevention. *Scholarly Journals*, G.2.1.
- DiMaggio, Paul; Powell, Walter (1983). The iron cage revisited: Institutional isomorphism and collective rationality in organizational fields. *American Sociological Review*, 48(2), 147-160.
<https://doi.org/10.2307/2095101>

- Elsner, Paul; Suarez, Suzette (2019). Renewable energy from the high seas: Geo-spatial modelling of resource potential and legal implications for developing offshore wind projects beyond the national jurisdiction of coastal States. *Energy Policy*, 128, 919-929.
<https://doi.org/10.1016/j.enpol.2019.01.064>
- Fennell, Mary (1980). The effects of environmental characteristics on the structure of hospital clusters. *Administrative Science Quarterly*, 25(3), 485-510.
<https://doi.org/10.2307/2392265>
- Fischer, Bill; Boynton, Andy (2005). Equipos virtuosos. *Harvard Deusto Business Review*, 141, 50-59.
- Gallagher, Charles; Watson, Hugh (2011). *Métodos cuánticos para la toma de decisiones en administración*. Ciudad de México, México: McGraw Hill Interamericana.
- González, Fabian; van der Weijde, Adriaan; Sauma, Enzo (2020). The promotion of community energy projects in Chile and Scotland: An economic approach using biform games. *Energy Economics*, 86, 104677.
<https://doi.org/10.1016/j.eneco.2020.104677>
- Hartman, Francis (1994). Reducing or eliminating construction claims: a new contracting process (NCP). *Project Management Journal*, 25(3), 25-31.
- Hernández, Roberto; Fernández, Carlos; Baptista, Pilar (2013). *Metodología de la investigación* (5ª Ed). México, McGraw Hill.
- Kase, Larina (2008). *Desarrolle sus habilidades de comunicación*. Ciudad de México, México: McGraw Hill.
- Lappe-Osthege, Teresa; Andreas, Jan (2017). Energy justice and the legacy of conflict: Assessing the Kosovo C thermal power plant project. *Energy Policy*, 107, 600-606.
<https://doi.org/10.1016/j.enpol.2017.03.006>
- Lewis, James (2007). *Fundamentals of Project Management* (3ra ed.). Nueva York, NY, EE. UU.: American Management Association.
- Marmolejo, David (2016). *Teoría de la imprevisión y conflicto armado en proyectos de infraestructura energética colombiana* (tesis de maestría). Universidad Santo Tomás de Aquino, Bogotá, Colombia.
- Marmolejo, David (2017). Gobernabilidad de proyecto: las relaciones entre el equipo del proyecto y los vendedores según el PMBOK®. *Daena: International Journal of Good Conscience*, 12(3), 256-271.
- Martínez, María (2012). *La negociación*. Madrid, España: Ediciones Díaz de Santos.
- McDuff, Charles; Ray, Michael (2002). Total cost construction claims tactics. *AACE International Transactions CD111*. Morgantown, WV, EE.UU.
- Meyer, John (1979). *The Impact of the Centralization of Educational Funding and Control on State and Local Organizational Governance*. Sanford, FL, EE. UU.: Institute for Research on Educational Finance and Governance.
- Mirza, Aslam (2005). *Construction project claim management*. PMI® Global Congress. Asia Pacific, Singapore. Newtown Square, PA, EE. UU.: Project Management Institute.
- Mishra, R. C.; Soota, Taurun (2006). *Modern project management*. Nueva Deli, India: New Age International.
- Mullen, John; Davison, Peter (2009). *Evaluating contract claims* (3ra ed.). Hoboken, NJ, EE. UU.: Wiley & Sons.
- Odeh, Abdalla; Battaineh, Hussien (2002). Causes of construction delay: traditional contracts. *International Journal of Project Management*, 20(1), 67-73.
[https://doi.org/10.1016/S0263-7863\(00\)00037-5](https://doi.org/10.1016/S0263-7863(00)00037-5)

- Ongallo, Carlos (2008). *Manual de Comunicación: Guía para gestionar el conocimiento, la información y las relaciones humanas en empresas y organizaciones* (2a ed.). Madrid, España: Librería-Editorial Dykinson.
- Porras, Hernán; Sánchez, Omar; Galvis, José (2014). Filosofía Lean Construction para la gestión de proyectos de construcción: una revisión actual. *Avances: Investigación en Ingeniería*, 11(1), 32-53.
<https://doi.org/10.18041/1794-4953/avances.1.298>
- Project Management Institute (2013). *Guía de los Fundamentos para la dirección de proyectos. Guía del PMBOK* (5ta ed.). Newtown Square, PA, EE. UU.: Project Management Institute.
- Project Management Institute (2017). *Guía de los Fundamentos para la dirección de proyectos. Guía del PMBOK* (6ta ed.). Newtown Square, PA, EE. UU.: Project Management Institute.
- Rad, Parviz; Levin, Ginger (2002). *The advanced project management office: A comprehensive look at function and implementation*. Abingdon, Inglaterra: CRC Press.
- Rebeil, Maria; RuizSandoval, Celia (1998). *El poder de la comunicación en las organizaciones*. Ciudad de México, México: Plaza y Valdés.
- Reilly, Kieran; O'Hagan, Anne; Dalton, Gordon (2016). Developing benefit schemes and financial compensation measures for fishermen impacted by marine renewable energy projects. *Energy Policy*, 97, 161-170.
<https://doi.org/10.1016/j.enpol.2016.07.034>
- Richter, Irvin (1983). *International construction claims: Avoiding & resolving disputes*. Nueva York, NY, EE. UU.: McGraw Hill.
- Richter, Irvin; Mitchell, Roy (1982). *Handbook of construction law and claims*. Nueva York, NY, EE. UU.: Reston Publishing Company.
- Rodríguez, Mauro (2015). *Manejo de problemas y toma de decisiones* (Vol. 8). Ciudad de México, México: Editorial El Manual Moderno.
- Rogers, Jennifer; Simmons, Eunice; Convery, Ian; Weatherall, Andrew (2012). Social impacts of community renewable energy projects: findings from a woodfuel case study. *Energy Policy*, 42, 239-247.
<https://doi.org/10.1016/j.enpol.2011.11.081>
- Semple, Cheryl; Hartman, Francis; Jergeas, George (1994). Construction claims and disputes: causes and cost/time overruns. *Journal of Construction Engineering and Management*, 120(4), 785-795.
[https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9364\(1994\)120:4\(785\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9364(1994)120:4(785))
- Thomas, Reg (2001). *Construction contract claims* (2da ed.). Nueva York, NY, EE. UU.: Palgrave.
- Töppel, Jannick; Tränkler, Timm (2019). Modeling energy efficiency insurances and energy performance contracts for a quantitative comparison of risk mitigation potential. *Energy Economics*, 80, 842-859.
<https://doi.org/10.1016/j.eneco.2019.01.033>
- Uribe, Ana; Molina, Juan; Contreras, Françoise; Barbosa, David; Espinosa, Juan (2013). Liderar equipos de alto desempeño: Un gran reto para las organizaciones actuales. *Universidad y Empresa*, 15(25), 53-71.
- van der Hofstadt, Carlos (2005). *El libro de las habilidades de comunicación* (2a ed.). Madrid, España: Ediciones Díaz de Santos.
- Williamson, Oliver (1981). The economics of organization: The transaction cost approach. *American Journal of Sociology*, 87(3), 548-577.
<https://www.jstor.org/stable/2778934>

Competencias digitales claves para mejorar la empleabilidad de aprendices del SENA con discapacidad

Key digital skills to improve the employability level of SENA apprentices with sensory disabilities

Oscar Carvajal-Clavijo¹

¹Servicio Nacional de Aprendizaje SENA (Colombia). Correo electrónico: Skarto@hotmail.com
orcid: <https://orcid.org/0000-0003-3115-2472>

Recibido: 26-05-2021 Aceptado: 23-08-2021

Cómo citar: Carvajal-Clavijo, Oscar (2021). Competencias digitales claves para mejorar la empleabilidad de aprendices del SENA con discapacidad. *Informador Técnico*, 85(2), 246 - 256.
<https://doi.org/10.23850/22565035.3797>

Resumen

Este documento se enfoca en establecer las competencias digitales claves que debe desarrollar el SENA hacia el 2025 para mejorar el nivel de empleabilidad de las personas en condición de discapacidad en la ciudad de Bogotá. Este objetivo es desarrollado y estimado a partir de la aplicación de herramientas de prospectiva estratégica de Michel Godet: análisis estructural (Micmac) y matriz de actores (Mactor). Los resultados obtenidos a partir de la información y los datos recolectados en la revisión bibliográfica sobre estudios de discapacidad, desempleo, tendencias tecnológicas, competencias laborales, y las encuestas y el método Delphi, aplicado a expertos y empresarios en el 2020, contribuirán a establecer las competencias digitales claves a corto, mediano y largo plazo, y cómo se deben integrar a los programas de formación ofertados a los aprendices del SENA en condición de discapacidad, para mejorar sus condiciones de empleabilidad.

Palabras clave: competencias digitales; discapacidad; prospectiva estratégica; empleo y formación profesional integral.

Abstract

This document focuses on establishing the key digital skills that SENA must develop by 2025 to reduce the unemployment rate among people with disabilities in the city of Bogotá. This objective is developed and estimated from the application of Michel Godet's strategic prospective tools: Cross-Impact Matrix Multiplication Applied to Classification (MICMAC), and Matrix of Alliances and Conflicts: Tactics, Objectives and Recommendations (MACTOR). The results obtained from the information and data collected in the bibliographic review on studies of disability, unemployment, technological trends and labor competencies, and the surveys and the Delphi method applied to experts and entrepreneurs in 2020, will help to establish the key digital skills in the short, medium, and long term, and how they should be integrated into the training programs offered to SENA apprentices with disabilities to improve their employability conditions.

Keywords: digital skills; disability; strategic prospective; employment and comprehensive professional training.

1. Introducción

Este documento se centra en establecer las competencias digitales claves hacia el 2025 que demandará el mercado laboral, y que deben desarrollar los aprendices del SENA en condición de discapacidad física y sensorial para mejorar su nivel de empleabilidad en la ciudad de Bogotá. Las competencias identificadas pueden ser integradas a los programas de formación que actualmente oferta la entidad a nivel de técnico, tecnólogo y de educación continua de manera transversal o específica, y constituye una mirada prospectiva frente a las necesidades futuras de los empresarios para afrontar los retos de las nuevas tecnologías en el marco de la revolución 4.0.

El problema central de la investigación es el bajo nivel de empleabilidad de las personas en condición de discapacidad, que se evidencia en el bajo desarrollo de competencias básicas, profesionales o técnicas y claves. Según el Ministerio de Salud Protección Social (2019), apenas el 42 % había aprobado básica secundaria, el 20 % básica secundaria, el 2 % técnico y tecnológico y 2 % universitario. En el 2018, el SENA dio un primer paso con la construcción del modelo de inclusión laboral de personas con discapacidad “Pacto de productividad”, donde se llevaron a cabo proyectos pilotos de inclusión laboral en 9 programas de formación titulada y 3 de complementaria relacionados con la logística empresarial, articulados con la Agencia Pública de Empleo, empresarios y alcaldías, donde se formaron 151 aprendices con discapacidad física y sensorial, y se registró un caso de éxito: el diseño de la aplicación “En lengua de signos”, una herramienta digital que contiene un diccionario interactivo con 130 señas del entorno de la logística empresarial. El desarrollo de proyectos similares en el área digital enmarcado en la revolución 4.0 contribuirá a reducir la tasa de desempleo y la informalidad que actualmente supera el 60 y 70 %, respectivamente. Se estima que el 12 % (71 % sin contrato) de esta población se encuentra trabajando, el 11 % estudiando, 16 % realiza oficios del hogar, el 3 % depende una pensión y el resto de las personas se encuentran en condición de dependencia económica o con ingresos tan precarios que no le permiten cubrir sus necesidades básicas. Este problema tiene efectos negativos en la calidad de vida de estas personas y sus familias, que se evidencian en desnutrición, afectaciones emocionales y psicológicas y mendicidad, y facilita situaciones de maltrato, abuso, y violencia, por lo que es perentorio solucionarlo sustituyendo el tradicional enfoque asistencialista por uno de empoderamiento derivado de los modelos biopsicosocial y del derecho.

En los últimos años, se han desarrollado diferentes estudios donde se aborda la inclusión laboral desde la perspectiva del desarrollo de competencias laborales a partir de procesos de formación. La documentación de experiencias exitosas en el campo de la ingeniería, el turismo y las empresas públicas, entre otras, establece la relación virtuosa entre el desarrollo de competencias y la posibilidad para una persona en condición de discapacidad de adquirir un empleo o emprender, basada en los conceptos de autonomía laboral e igualdad de derechos (Naranjo; Zorrilla, 2020; Mejía; Pérez, 2020; Sánchez; Román; Torres; Loarte, 2019; Moreno, 2019; Bergamino, 2018). Los estudios prospectivos para establecer las competencias claves en los diferentes perfiles ocupacionales permitirán anticiparse a los cambios y las tendencias del entorno para garantizar la pertinencia de los programas de formación en aras de responder a estas transformaciones organizacionales y mejorar las condiciones de empleabilidad, como lo evidencian los análisis prospectivos de las competencias genéricas Tuning-Alfa en la ciudad de Medellín para el 2032 y el de condiciones del mercado laboral colombiano para los egresados de la Facultad de Administración de la Universidad del Rosario del 2017, que serán un referente metodológico para la presente investigación. Sin embargo, para garantizar el éxito en los procesos de inclusión laboral, se deben impulsar procesos de educación, proyectos de ley, programas de responsabilidad por parte del Estado, organismos multilaterales, empresarios y organizaciones sociales, para modificar las percepciones y conductas en la sociedad, que imponen barreras y limitaciones de acceso al mercado laboral a este grupo poblacional (Giraldo; Sanmartín, 2020; Castellano; Quintana, 2020; Parra; Vargas; Woolcott, 2019).

El objetivo de la investigación es establecer las competencias digitales claves que debe desarrollar el SENA hacia el 2025 para mejorar las condiciones de empleabilidad de las personas en condición de discapacidad física y sensorial en la ciudad de Bogotá, para lo cual se analizaron las tendencias en materia laboral y ocupacional en un escenario de pospandemia con una proyección al 2025. Se identificaron las competencias digitales claves

a corto, mediano y largo plazo que serán demandadas crecientemente por el mercado laboral, y que deben ser integradas a los programas de capacitación y formación ofertados por la entidad a la población en condición de discapacidad para mejorar sus condiciones de empleabilidad. Por último, se identificaron los actores claves que son estratégicos en el diseño, la planeación y la ejecución de proyectos desde sus capacidades, objetivos y motivaciones para apoyar, promover y consolidar los procesos de inclusión laboral y emprendimiento impulsados por la entidad. La hipótesis central del estudio plantea que la formación en competencias digitales de la población en condición de discapacidad física y sensorial, que serán demandadas al 2025, permitirá mejorar sus condiciones de empleabilidad, facilitándoles el acceso a un empleo formal o desarrollar un emprendimiento sostenible que mejore su calidad de vida.

La estrategia de investigación contempla la utilización de metodologías y herramientas abordadas tradicionalmente en los estudios de prospectiva, donde se incluyen las herramientas de la batería de Michael Godet. Se utilizó la encuesta y la revisión bibliográfica como fuentes de recolección de información para establecer, bajo las tendencias del entorno y las dinámicas del mercado laboral, las competencias digitales que serán más demandadas por el mercado laboral hacia el 2025. Para la recolección de información se aplicó el método Delphi a 8 expertos del sector educativo y empresarial, quienes establecieron las variables y actores claves del proyecto con los métodos Micmac y Mactor.

Los resultados de la investigación son claves para el SENA y tienen implicaciones importantes en el diseño y la ejecución de los programas de formación ofertados por la institución a la población en condición de discapacidad, en la medida que son el resultado del análisis de las necesidades futuras de los empresarios y las tendencias sociales. La entidad será un eje clave en el desarrollo de mano de obra tecnológicamente capacitada para apoyar procesos de transformación digital en el sector productivo, al actuar con pertinencia para contribuir al desarrollo social, económico y tecnológico del país (Ley 119/1994).

2. Estado del arte

En la construcción del estado del arte se tuvieron en cuenta tres criterios para la selección de los trabajos de investigación que permiten analizar los procesos de inclusión laboral desde la perspectiva de mejorar la empleabilidad de las personas en condición de discapacidad física y sensorial en la ciudad de Bogotá. El primero, que el año de publicación comprendiera el periodo 2014-2020; el segundo, que los temas de empleo, inclusión laboral o competencias fueran claves o centrales en el documento; y, por último, para la consulta de los trabajos de investigación o artículos relacionados solo se tuvieron en cuenta bases de datos reconocidas a nivel mundial, estas fueron SciELO, Dialnet y Redalyc.

En cuanto a los autores, se encontró que, en los procesos de inclusión laboral, el desarrollo de competencias laborales es un eje fundamental para mejorar los niveles de empleabilidad de la población en condición de discapacidad afectada por el desempleo y la dificultad para generar emprendimientos sostenibles (Castellanos; Quintana, 2019). La publicación de casos de éxito en áreas como la ingeniería, turismo y empresas públicas demuestran que, a pesar de las dificultades propias del proceso de inclusión laboral, el acompañamiento y el desarrollo de procesos de formación permiten a las personas en esta condición acceder a un empleo formal y salir de una situación de informalidad o dependencia económica (Naranjo; Zorrilla, 2020; Mejía; Pérez, 2020; Sánchez *et al.*, 2019; Moreno, 2019; Bergamino, 2018).

En la literatura se aborda el análisis de los tipos de competencias laborales que pueden favorecer la inclusión en personas en condición de discapacidad a través de procesos de educación profesional y formación para el trabajo, donde se destaca la importancia de las competencias comunicativas, que comprenden el manejo de un segundo idioma y la capacidad de situarse en un contexto social y laboral; las competencias blandas, como habilidades comunicativas, de trabajo en equipo, flexibilidad y adaptabilidad frente a un determinado trabajo

y presentación personal del individuo y competencias ocupacionales y habilidades ciudadanas en personas en condición de discapacidad cognitiva leve (Mosquera; Velasco; Cruz, 2018; Pacheco, 2017; Chávez; Osses; Suazo, 2016). Desde un enfoque prospectivo, se han identificado las competencias claves en la administración de empresas a partir del proyecto Tuning-Alfa, que comprende las 47 competencias más importantes en esta disciplina y el estudio de escenarios de las condiciones futuras del mercado laboral, donde se concluyen que estarán determinadas por los procesos de globalización, la cultura del internet y la dinámica empresarial.

En torno a las competencias digitales requeridas en el mercado laboral existe una clasificación en duras o suaves, pero la Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económicos (OCDE) estableció un conjunto de categorías concretas que abarcan las competencias TIC: generales, específicas, complementarias y básicas, que serán el referente para el trabajo (OECD, 2019). Las áreas críticas de desarrollo en el marco de la transformación digital son la alfabetización de información y datos, comunicación y colaboración, creación de contenido digital, seguridad y solución de problemas. En las competencias digitales avanzadas están el uso de servicios en la nube y de dispositivos móviles, experiencia en la utilización de diversas plataformas, software libre y la capacidad de trabajar en forma fluida entre múltiples equipos, dominio de las herramientas ofimáticas, aplicaciones de videoconferencia y procesamiento de información (Guzmán, 2016).

El estudio de identificación de las competencias digitales claves hacia el 2025 es importante porque las dinámicas del entorno expuestas impiden que las personas en condición de discapacidad puedan acceder a un empleo formal y la formación en este tipo de áreas será un elemento estratégico para futuras iniciativas de inclusión laboral. En las próximas décadas, el teletrabajo y la cualificación en competencias digitales avanzadas serán un requisito en el perfil de los cargos y un factor diferencial en los procesos de selección. Hoy en día, se estima que al menos el 90 % de los cargos requieren algún tipo de competencia digital y en el futuro esta tendencia se acentuará (Jiménez, 2017; Padilla-Hernández; Gamiz-Sánchez; Romero-López, 2019; Martín, 2019; Pérez, 2020). La literatura consultada permite observar los impactos de los proyectos de ley y las iniciativas empresariales para facilitar el acceso de las personas en condición de discapacidad a las fuentes formales de empleo, pero ninguna desarrolla un análisis en torno al desarrollo de competencias tecnológicas y la mejora en las condiciones de empleabilidad de este grupo de personas (Luna-Ropero, 2020; Gómez, Cardona; Gañan, 2019).

Por último, se estudió el papel del teletrabajo en los procesos de inclusión laboral desde la dimensión tecnológica, donde existe un consenso frente a las ventajas que puede ofrecer, como el incremento de la productividad, la mayor equidad en los procesos de selección, reducir tiempos de desplazamientos y flexibilizar los horarios de trabajo. Sin embargo, los esquemas de flexibilidad mixto alternando trabajo en la oficina y el hogar, horarios flexibles de trabajo que reduzcan los tiempos de movilización, capacitación emocional y relaciones interpersonales son los más recomendados. Su implementación implica una ruptura con los esquemas tradicionales de dirección, supervisión y control basados en la presencialidad, y se pasa a dar protagonismo a la comunicación, la coordinación y la autonomía del trabajo. Es un proceso que genera beneficios en todos los niveles, pero en ciertas condiciones, su inadecuada implementación puede generar efectos contraproducentes para los objetivos de desarrollo y bienestar de las empresas (Zuluaga, 2018; Callejas; Gómez; Uribe; Vergel, 2017; Aquije, 2018; Contreras; Roza, 2015).

3. Método

La metodología de la investigación es propia de un estudio de tipo proyectivo-descriptivo, no experimental e inductivo, que busca, a partir de un análisis de los contextos económicos, tecnológicos y sociales, identificar las competencias laborales claves que serán demandadas por el sector productivo en un escenario definido para el 2025, y que deben ser un referente en los procesos de formación del SENA para garantizar la pertinencia de sus programas y proyectos.

El estudio prospectivo se desarrolló a partir de 3 áreas ocupacionales claves identificadas por el Observatorio Laboral y Ocupacional del SENA (2020), como son comercio electrónico, inteligencia artificial y trabajo en la nube, donde se experimentará, en un futuro cercano, una creciente demanda por las competencias digitales relacionadas con cada uno de sus oficios. En cada una de estas áreas se identificaron normas de competencia laboral relacionadas directa o indirectamente con el área digital en ocupaciones como ingeniero de software, analista de datos, big data e ingeniería de big data y analítica, diseñador de experiencia de usuario, diseño web y multimedia, analista de software, científico de datos, analista de seguridad en la nube, TI y *blockchain*, desarrollador de aplicaciones informáticas, digitales y Java, ingeniero y administrador de servicios en la nube, agente y asesor de *call centers*, analista de *analytics*, analista y asesor en marketing digital, analista de *e-commerce* e inteligencia de negocio TI, agente de servicio al cliente en plataformas digitales y *contact centers* especializados, técnico en ventas online y ventas por teléfono, y *broker* y administrador de redes sociales.

Por medio de la aplicación de un método Delphi, donde participaron 8 expertos del sector educativo y empresarial, como expertos con conocimiento en innovación, investigación, recursos humanos, pedagogía, comercio electrónico, negocios internacionales, alta gerencia, programación y tecnologías de la información y la comunicación, así como líderes del Sistema de Investigación, Innovación y Desarrollo Tecnológico del SENA y empresarios de la ciudad, se establecerán cuáles son claves y la prioridad para integrarlas a los procesos de formación integral, con proyección al 2025. En este proceso de reflexión prospectivo y participativo, los expertos, a partir de su conocimiento y percepción del futuro, y apoyados en herramientas de prospectiva de la batería de Michael Godet, como el Micmac y Mactor, permitirán, a partir de matrices de influencias directas e indirectas, establecer las competencias claves a corto, mediano y largo plazo en el escenario definido, y las relaciones de fuerza entre los actores, convergencias, divergencias, posturas y objetivos asociados.

4. Resultados

Los resultados en el proceso de investigación se dividen en tres partes, en las dos primeras se aborda el análisis de las competencias en los tres campos que se definieron como críticos para el 2025, como comercio electrónico, inteligencia artificial y trabajo en la nube; y en la última parte, el rol que juegan los actores identificados en la formación profesional integral con visión prospectiva que llevará a cabo la entidad en este campo.

4.1. Competencias en el área de comercio electrónico (variables)

En el análisis realizado a las 7 ocupaciones identificadas el área de comercio electrónico, establecidas en el informe del Observatorio Laboral y Ocupacional del SENA (2020), se pudieron identificar 15 competencias directa o indirectamente relacionadas con los procesos digitales que se pueden llevar a cabo en una organización. En la Figura 1, se presentan las influencias indirectas potenciales de las competencias identificadas en el área de comercio electrónico, a partir del número de interacciones en los nodos aquellas que serán claves para el 2025.

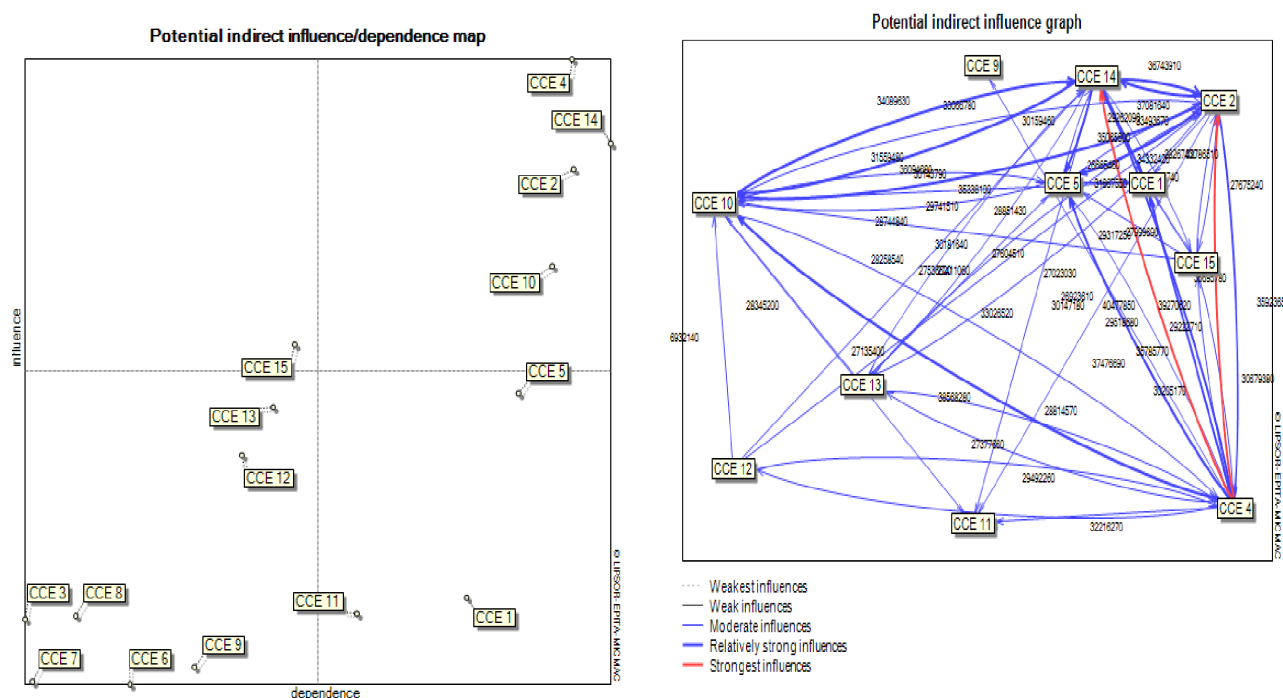


Figura 1. Influencias indirectas potenciales (MIIP) en el área de comercio electrónico.

Nota. Resultados obtenidos del software Micmac.

Fuente: elaboración propia.

En el corto, mediano y largo plazo, como lo establecen los mapas de influencias potenciales, directas e indirectas, consistentemente se señala 4 competencias claves para el SENA en el área de comercio electrónico que deben ser integradas a los programas de formación titulada y complementaria, dirigidos a la población con discapacidad. Estas competencias son la 2, 4, 10 y 14, que plantean desarrollar, ejecutar y evaluar estrategias y programas de comunicación digital diseñados para informar a los grupos de interés; preparar o comunicar programas y actividades de la industria de la comunicación gráfica y publicitaria en medios digitales; atender requerimientos de los clientes de acuerdo con procedimientos técnicos y normativa de procesos de negocios digitales; y, por último, gestionar campañas y lanzamientos de productos y servicios a través de los medios sociales.

4.2. Competencias en el área de inteligencia artificial y trabajo en la nube (variables)

En el análisis realizado a las 10 ocupaciones identificadas, las áreas de inteligencia artificial y trabajo en la nube, establecidas en el informe del Observatorio Laboral y Ocupacional del SENA (2020), se pudieron identificar 15 competencias directa o indirectamente relacionadas con los procesos digitales que se pueden llevar a cabo en una organización. En la Figura 2, se presentan las influencias indirectas potenciales de las competencias identificadas en las áreas inteligencia artificial y trabajo en la nube, a partir del número de interacciones en los nodos aquellas que serán claves para el 2025.

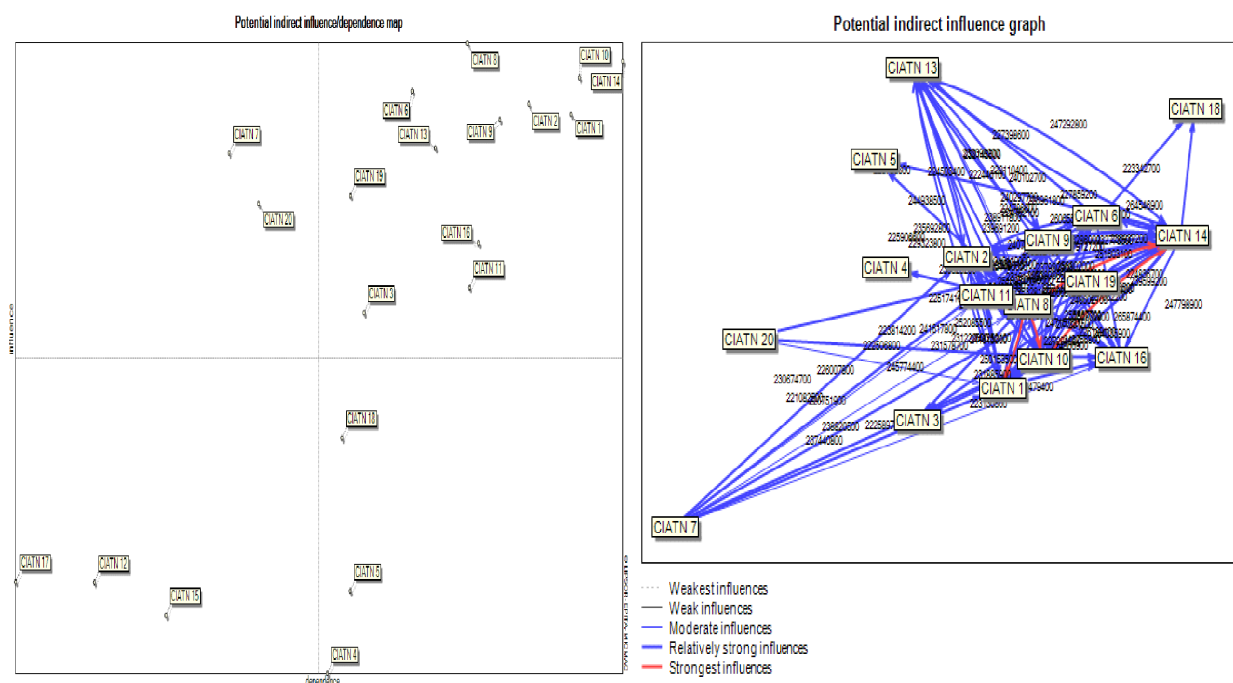


Figura 2. Influencia indirecta potencial (MIIP) en las áreas de inteligencia artificial y trabajo en la nube.

Nota. Resultados obtenidos del software Micmac.

Fuente: elaboración propia.

En el corto y mediano plazo, según los mapas de influencias directas e indirectas, las competencias claves son la 8, 10, 13, 14 y 16, que establecen diseñar aplicaciones informáticas de acuerdo con procedimientos y requisitos técnicos; construir proyectos de tecnología digital de acuerdo con procedimientos técnicos; probar la solución de tecnologías de la información y las comunicaciones digitales de acuerdo con herramientas de desarrollo, procedimientos y parámetros técnicos; medir los riesgos de acuerdo con metodología y procesos de negocio; e implementar el sistema de seguridad de la información de acuerdo con estándares y marcos de referencia.

En el largo plazo, el mapa de influencias indirectas potenciales señala que en los programas de formación relacionados con estas dos áreas, se deben integrar a las competencias mencionadas en el corto y mediano plazo, las competencias 1, 2, 3, 6, 9, 11, y 19, donde el aprendiz debe adquirir las habilidades para establecer requisitos de la solución de tecnologías de la información y las comunicaciones digitales de acuerdo con estándares y procedimientos técnicos; diseñar el sistema de seguridad de la información de acuerdo con estándares y marco de referencia; diseñar el centro de datos de acuerdo con modelos y estándares técnicos; desarrollar aplicaciones informáticas de acuerdo con el diseño y metodologías; formular el proyecto multimedia de acuerdo con metodologías y documentos de requisitos; construir estructuras de datos espaciales de acuerdo con normativa técnica y especificaciones del sistema de información geográfica; y, por último, gestionar riesgos de soluciones de tecnologías de la información y las comunicaciones de acuerdo con metodologías y estándares.

4.3. Actores claves en el desarrollo de los procesos de formación en competencias digitales

En el Mactor se relacionó la información sobre las relaciones de poder de cada uno de los actores claves a partir de sus objetivos, motivaciones, debilidades y fortalezas. En la Figura 3 se presenta el plano de influencias y dependencias, donde se pueden clasificar los actores según el rol que pueden desempeñar en los procesos de formación para el 2025.



Figura 3. Plano de influencias y dependencias entre actores.

Nota. Resultados obtenidos del software Mactor.

Fuente: elaboración propia.

En el cuadrante superior derecho se encuentran los actores dominantes, como la Dirección de Formación Profesional del SENA, los instructores y los aprendices en condición de discapacidad, debido a su autonomía y capacidad para diseñar y adaptar los programas de formación de la entidad con pertinencia a partir de las competencias identificadas por la entidad. En el cuadrante de actores autónomos se ubicaron la Corporación Discapacidad Colombia, el Observatorio Laboral y Ocupacional del SENA, el Comité Departamental de Discapacidad y la Secretaría de Integración Social de Bogotá, que tienen una baja influencia y dependencia en las decisiones que toman los demás actores y sus intereses. En el cuadrante de los dominados encontramos los empresarios bogotanos y el Ministerio de Trabajo, que dependen en gran medida de las decisiones que pueden tomar los actores dominantes. Se evidencia la baja cohesión entre los actores que trabajan por las personas en discapacidad en Bogotá, y la necesidad de fortalecer su trabajo cooperativo a futuro por medio de proyectos conjuntos permanentes y la centralización de sus acciones.

Se propone, en el marco del modelo de inclusión laboral de personas con discapacidad “Pacto de productividad”, desarrollar las competencias claves a corto plazo por medio de programas de formación complementaria, y en el mediano y largo plazo, a partir de los rediseños de los programas de formación técnica y tecnológica o el desarrollo de nuevos programas, incluir las competencias claves a mediano y largo plazo.

5. Conclusiones

El proceso de identificación de las competencias digitales claves a desarrollar en los aprendices del SENA en condición de discapacidad física y sensorial, en la ciudad de Bogotá para el 2025, fue un ejercicio que inició con la búsqueda de artículos, publicaciones e investigaciones en torno a la discapacidad y sus características, experiencias y procesos de inclusión laboral, y la relevancia de las competencias digitales en materia de empleabilidad, los cuáles permitieron definir el propósito y el alcance de la investigación, y la construcción del estado del arte. La revisión de los estudios ocupacionales con visión prospectiva, y en especial el informe Ocupaciones en Demanda y Post-pandemia, desarrollados por el Observatorio Laboral y Ocupacional del SENA (2020), fueron el insumo para definir las ocupaciones y, por lo tanto, las normas de competencia laboral que se pusieron a consideración de los expertos convocados. Esta información fue clave para delimitar el estudio, establecer el método, y la técnica de recolección de información. Finalmente, el ejercicio de recolección de información les permitió a los expertos establecer cualitativamente si las normas de competencia laboral relacionadas en cada ocupación eran claves y, adicionalmente, la prioridad para ser integradas en los programas de formación.

La información recolectada nos permitió concluir que para el 2025, en el corto y mediano plazo, las competencias digitales asociadas al desarrollo de procesos de comunicación digital, gráfica y publicitaria, el conocimiento de los requerimientos de los clientes en los negocios digitales, la gestión de campañas y lanzamientos de productos, y servicios a través de los medios sociales, el diseño de aplicaciones informáticas, el desarrollo de proyectos que involucren tecnologías digitales y su ejecución, y el dominio de los sistemas de seguridad de la información y la medición de los riesgos informáticos serán esenciales.

En el largo plazo, se establece la importancia de formar a los aprendices en condición de discapacidad en el diseño de soluciones en tecnologías de la información y las comunicaciones; diseñar sistemas de seguridad de la información; estructurar los centros de datos de acuerdo con modelos y estándares técnicos; desarrollar aplicaciones informáticas; formular proyectos multimedia; estructurar datos espaciales a partir de los sistemas de información geográfica; y por último, gestionar riesgos de soluciones de tecnologías de la información y las comunicaciones.

El fortalecimiento de la visión prospectiva del SENA, enfocada a identificar las competencias digitales claves que demandará el sector productivo en el corto, mediano y largo plazo, permitirá de manera anticipada diseñar o rediseñar los programas de formación para que respondan con pertinencia a las necesidades de los sectores productivos, lo cual puede ser replicado en otras instituciones de educación superior para posteriormente consolidarse como una política pública, que acople la demanda y la oferta en el mercado laboral y contribuya a mejorar las condiciones de empleabilidad y la calidad de vida de un segmento de la población tan vulnerable como las personas en condición de discapacidad.

La integración de competencias digitales en los programas de formación del SENA le permitirá al sector empresarial contar con aprendices capacitados en nuevas áreas de desarrollo tecnológico para apalancar procesos de innovación a lo largo de diferentes áreas funcionales como la prestación de servicio, marketing e investigación de mercados, procesos administrativos, financieros y contables que permitirán mejorar la posición competitiva de las empresas y el país. Sin embargo, esta investigación es un ejercicio exploratorio en torno a las competencias digitales y la empleabilidad desde una mirada prospectiva del SENA, y esto limita su aplicación a todo el sector educativo. Por esa razón, se requiere mejorar la cohesión entre los actores del sector educativo, tecnológico y empresarial para ampliar este tipo de estudios a otras instituciones de educación superior con un corte transversal a las diferentes profesiones, y contemplar la identificación de competencias digitales que puedan apoyar el desarrollo y crecimiento de otras áreas de la revolución 4.0 como realidad aumentada, internet de las cosas, simulación y sistemas de integración.

6. Referencias

- Aquije, Claudia (2018). Home office como estrategia para la motivación y eficiencia organizacional. *Graduate School of Business*, 18, 337-351.
https://www.palermo.edu/economicas/cbrs/pdf/pbr18/PBR_18_17.pdf
- Bergamino, Juan (2018). Discapacidad visual, competencias y empleabilidad en el Perú. *Revista de ciencias de la gestión*, 3, 84-108.
<https://doi.org/10.18800/360gestion.201803.004>
- Callejas, Harold; Gómez, Sandra; Uribe, Sandra; Vergel, Laura (2017). Teletrabajo como estrategia de empleabilidad para población con discapacidad. *Ingenio*, 14(1), 137-145.
<https://doi.org/10.22463/2011642X.2202>
- Castellanos, Adriana; Quintana, Paola (2019). La inclusión laboral de personas en condición de discapacidad. *Espirales revista multidisciplinaria de investigación científica*, 3(30). 76-86.
<https://doi.org/10.31876/er.v3i30.618>
- Chávez, Karina; Osses, Ernesto; Suazo, Daniela (2016). *Competencias académicas y acceso al mundo laboral de jóvenes y adultos con discapacidad intelectual leve y moderada* (tesis de pregrado). Universidad de Concepción, Los Ángeles, Chile.
- Congreso de la República de Colombia (1994). Ley 119 de 1994. Por la cual se reestructura el Servicio Nacional de Aprendizaje, SENA, se deroga el Decreto 2149 de 1992 y se dictan otras disposiciones. Diario Oficial No. 41.216, de 9 de febrero de 1994.
- Contreras, Orlando; Rozo, Ivanhoe (2015). Teletrabajo y sostenibilidad empresarial. Una reflexión desde la gerencia del talento humano en Colombia. *Suma de Negocios*, 6(13), 74-83.
<https://doi.org/10.1016/j.sumneg.2015.08.006>
- Giraldo, Sebastián; Sanmartín, Dany (2020). *Evolución de los derechos laborales de las personas en situación de discapacidad en Colombia* (tesis de pregrado). Universidad Cooperativa de Colombia, Medellín, Colombia.
- Gómez, Natalia; Cardona, Doris; Gañan, Jaime (2019). El concepto de discapacidad en las leyes relacionadas con el enfoque de derechos de la salud laboral en Colombia. *Revista de Derecho*, 52, 116-137.
- Guzmán, Alba (2016). Las competencias digitales del trabajador virtual la competitividad de la empresa del siglo XXI a partir del uso de las TIC. En R. Roig (Coord.), *Tecnología, innovación e investigación en los procesos de enseñanza-aprendizaje* (pp. 2559-2567). Madrid: Octaedro.
<https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=6022729>
- Jiménez, José (2 de noviembre de 2017). *Nuevo mercado laboral: Competencias Digitales y empleabilidad. Puentes digitales*.
<https://puentesdigitales.com/2017/11/02/nuevo-mercado-laboral-competencias-digitales-y-empleabilidad/>
- Luna-Ropero, Lissy (2020). Inclusión laboral de personas con discapacidades físicas, psíquicas y sensoriales en el marco de la ley 361 de 1997. *Jangwa Pana: Revista de Ciencias Sociales y Humanas*, 19(1).
<https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=7453299>
- Martín, Manu (3 de mayo de 2019). Las competencias digitales y la empresa - TIC y mentalidad digital. Semrush Blog. <https://es.semrush.com/blog/competencias-digitales/>

- Mejía, Natali; Pérez, Melisa (2020). *Inclusión laboral. Factores de éxito en la incorporación de personas con discapacidad. Caso EPM, Colombia* (tesis de maestría). Universidad EAFIT, Medellín, Colombia.
- Ministerio de Salud y Protección Social (2019). *Sala situacional de las personas con discapacidad*.
<https://www.minsalud.gov.co/sites/rid/Lists/BibliotecaDigital/RIDE/VS/MET/sala-situacional-discapacidad2019-2-vf.pdf>
- Moreno, Ricardo (2019). El emprendimiento como alternativa al empleo ordinario en las personas con discapacidad. *Revista de la Facultad de Derecho de México*, 69(273). 297-322.
<https://doi.org/10.22201/fder.24488933e.2019.273-1.68615>
- Mosquera, Maria; Velasco, Karol; Cruz, Eliana (2018). Competencias, estrategias y habilidades comunicativas: un reto para la educación. En: *Discapacidad e inclusión en la educación universitaria* (pp. 73-112). Colombia: Editorial Universidad Santiago de Cali.
- Naranjo, Bertha; Zorrilla, David (2020). La inclusión como eje transversal en el desarrollo de competencias de los ingenieros de sistemas. *Revista Boletín REDIPE*, 9(2). 173-180.
- Observatorio Laboral y Ocupacional (2020). *El COVID-19 y el mercado de trabajo en Colombia: Ocupaciones en demanda y post-pandemia*. Recuperado de:
https://observatorio.sena.edu.co/Content/pdf/ocupaciones_en_demanda_y_post-pandemia.pdf
- Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económicos (2019). *Estrategia de Competencias de la OCDE 2019. Competencias para construir un futuro mejor*. España: Fundación Santillana.
- Pacheco, Martha (2017). Educación y formación para el trabajo: inclusión social, productiva y económica. *Páginas de Seguridad Social*, 1(1). 167-210.
<https://doi.org/10.18601/25390406.n1.07>
- Padilla-Hernández, Angelina; Gámiz-Sánchez, Vanesa; Romero-López, Maria (2019). Competencia digital docente: apuntes sobre su conceptualización. *Virtualis. Revista de cultura digital*, 10(19).
- Padilla-Hernández, Angelina; Gámiz-Sánchez, Vanessa; Romero-López, María (2019). Competencia digital docente: apuntes sobre su conceptualización. *Virtualis*, 10(19).
<https://www.revistavirtualis.mx/index.php/virtualis/article/view/286/353>
- Parra, Angélica; Vargas, Liliana; Woolcott, Olenka (2019). La responsabilidad social del empleador (RSE) en Colombia frente a la discapacidad. *Opinión Jurídica*, 18(37), 135-155.
<http://www.scielo.org.co/pdf/ojum/v18n37/2248-4078-ojum-18-37-135.pdf>
- Pérez, Guillermo (2020). Las competencias digitales, claves para el futuro del trabajo. *Infojobs*.
<https://orientacion-laboral.infojobs.net/competencias-digitales-futuro-del-trabajo>
- Sánchez, Jefferson; Román, Rubén; Torres, Andrea; Loarte, Maruxi (2019). Inserción laboral y desarrollo profesional de las personas con discapacidades en Empresas Turísticas de la ciudad de Loja. *Revista Universidad y Sociedad*, 11(5). 201-205.
- Zuluaga, Margarita (17 de mayo de 2018). La organización virtual cambia paradigmas en relacionamiento. Universidad Eafit.
<https://www.eafit.edu.co/noticias/revistauniversidadeafit/171/la-organizacion-virtual-cambia-paradigmas-relacionamiento>