



**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE
HIDALGO**

**INSTITUTO DE CIENCIAS AGROPECUARIAS
Área Académica de Ingeniería Agroindustrial e
Ingeniería en Alimentos**

TÍTULO DE TESIS
**PROPIEDADES MECÁNICAS DE ESPUMAS
BIOACTIVAS DE ALMIDÓN ENRIQUECIDAS CON
ANTIOXIDANTES NATURALES DE CAFÉ GASTADO Y
BAGAZO DE NARANJA**

**PARA OBTENER EL GRADO DE
INGENIERO EN ALIMENTOS**

**PRESENTA
MAYRA DENISE PEÑA ISLAS**

**DIRECTOR
DR. APOLONIO VARGAS TORRES**

**CO- DIRECTOR
DR. ROMÁN LEYVA LÓPEZ**

Tulancingo de Bravo, Hidalgo., México, 16 de octubre de 2025



Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo

Instituto de Ciencias Agropecuarias

Institute of Agricultural Sciences

Área Académica de Ingeniería Agroindustrial e Ingeniería en Alimentos

Academic Area of Agroindustrial engineering and Food Engineering

Tulancingo de Bravo, Hidalgo., a 07 de Octubre de 2025

Asunto: Autorización de impresión

Mtra. Ojuky del Rocío Islas Maldonado

Directora de Administración Escolar de la UAEH

Por este conducto y con fundamento en el Título Cuarto, Capítulo I, Artículo 40 del Reglamento de Titulación, le comunico que el jurado que le fue asignado al pasante de Licenciatura en Ingeniería en Alimentos, **Mayra Denise Peña Islas**, quien presenta el trabajo de Tesis denominado **“Propiedades mecánicas de espumas bioactivas de almidón enriquecidas con antioxidantes naturales de café gastado y bagazo de naranja”**, que después de revisarlo en reunión de sinodales, ha decidido autorizar la impresión de este, hechas las correcciones que fueron acordadas.

A continuación, se anotan las firmas de conformidad de los miembros del jurado:

PRESIDENTE	Dr. Juan Pablo Hernández Uribe
SECRETARIO	Dr. Ricardo Omar Navarro Cortez
VOCAL 1	Dr. Apolonio Vargas Torres
VOCAL 2	Dr. Román Leyva López
SUPLENTE 1	Dra. Heidi María Palma Rodríguez

Sin otro particular por el momento, me despido de usted.

Atentamente
“Amor, Orden y Progreso”

Dra. Beatriz del Carmen Coutiño Laguna
Coordinador de Ingeniería en Alimentos.

Av. Universidad No. 133, Col. San Miguel Huatengo,
Santiago Tulantepec. C.P. 43775. Hidalgo, México
Teléfono: 77171720000 Ext. 42060
beatriz_coutino@uaeh.edu.mx

“Amor, Orden y Progreso”



2025



uaeh.edu.mx

AGRADECIMIENTOS

Quiero agradecer de todo corazón a mis padres, sin ellos esto no hubiera sido posible, gracias, por tanto, esto es dedicado a ustedes. De igual forma a mis hermanos, que estuvieron ahí siempre.

Agradecimientos especiales a mis amigos, a esas personas que están ahí, en los momentos de alegría, tristeza, y de muchas vivencias, dando su apoyo incondicional, que formaron parte de esto. Gracias a todos.

Gracias al cuerpo académico de investigación: Dr. Apolonio Vargas Torres, Dra. Heidi María Palma Rodrigue, Dr. Ricardo Omar Navarro Cortez y Dr. Juan Pablo Hernández Uribe, por enseñarme y brindarme las herramientas necesarias.

También al Dr. Román Leyva, gracias por aconsejarme, apoyarme y ser mi guía en este proceso.

Agradezco a cada una de las personas que han estado en mi vida en distintas etapas porque son la esencia de lo que soy y seré.

RESUMEN

Los compuestos de espuma de almidón ofrecen un material sustituto ecológico de los envases de un solo uso, derivados del petróleo, especialmente las espumas de poliestireno. Sin embargo, las propiedades físico-mecánicas se ven afectadas, aspectos que pueden solucionarse con un refuerzo lignocelulósico.

Se formularon diferentes espumas horneadas a base de almidón de maíz agregando residuos de la industria alimentaria: polvo de bagazo de naranja (BN) y polvo de café gastado (CG), mediante el proceso de termoprensado. Se evaluaron las propiedades físicas: densidad, cambio de color, propiedades mecánicas (esfuerzo a la ruptura, elongación al rompimiento y módulo de Young) y cinética de liberación de compuestos fenólicos totales.

La adición de residuos de la industria alimentaria presentó diferencias estadísticamente significativas ($p < 0.05$) sobre la densidad con respecto al control (almidón de maíz sin la adición de subproductos). De todos los tratamientos el que presentó mayor densidad fue el CG100 (espuma con 100% de polvo de café gastado) con un valor de 0.438 ± 0.019 g/mL, y el de menor densidad el control con un valor de 0.284 ± 0.013 g/mL. BN jugó un papel importante en la densidad, la adición de este en la formulación presentó valores mayores ($p < 0.05$) en comparación del control y del tratamiento CG100. La incorporación de estos subproductos resultó en una mayor densidad del material, una menor expansión de la espuma y la generación de diferencias de color visualmente perceptibles (ΔE). Las propiedades mecánicas de resistencia a la tracción (T_s) y elongación a la rotura (E_b) exhibieron una mejora con un aumento en el contenido de residuos de celulosa de café, lo que es indicativo de un aumento en el contenido de celulosa. Esta observación fue acompañada por una falta de efecto sobre la rigidez (Y_m). La liberación de compuestos fenólicos demostró un máximo a las 10 horas, seguido de una disminución, lo que indica una liberación inicial rápida y una posterior difusión restringida debido al agotamiento del contenido fenólico.

ÍNDICE GENERAL

1. INTRODUCCIÓN	8
2. MARCO TEÓRICO	10
2.1. Biopolímeros	10
2.1.1. Almidón.....	14
2.2. Naranja	18
2.2.1. Compuestos bioactivos.....	18
2.2.2. Residuos de naranja.....	20
2.3. Producción de café en México	24
2.3.1. Café gastado	26
2.4. Espumas biodegradables	29
3. JUSTIFICACIÓN	33
4. OBJETIVOS	35
4.1. Objetivo General	35
4.2. Objetivos específicos	35
5. MATERIALES Y MÉTODOS	36
5.1. Materiales	36
5.2. Obtención de la materia prima	36
5.3. Secado y tamizado	36
5.4. Preparación de masa	36
5.5. Proceso de termoprensado	40
5.6. Caracterización de espumas de almidón	40
5.6.1. Propiedades físicas	40
6. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	43
6.1. Densidad	43
6.2. Absorción de agua	44
6.3. Cambio de color	45

6.4. Propiedades mecánicas	49
6.5. Liberación de compuestos fenólicos.....	52
7. CONCLUSIONES.....	55
8. REFERENCIAS	56

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Aplicaciones de los residuos de cáscaras de naranja en el sector alimentario y no alimentario.	21
Tabla 2. Compuestos químicos y minerales encontrados en los posos de café gastado.	32
Tabla 3. Formulaciones de las espumas elaboradas a partir de almidón de maíz y harina de bagazo de naranja y de café gastado.	38
Tabla 4. Determinación de propiedades fisicoquímicas en espumas horneadas a partir de residuos alimentarios.	46
Tabla 5. Pruebas mecánicas en espumas horneadas a partir de residuos alimentarios.	51
Tabla 6. Liberación de compuestos fenólicos totales en las espumas bioactivas.	54

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Fuentes comunes de biopolímeros comestibles naturales a partir de residuos de biomasa agrícola, residuos de procesamiento de alimentos marinos y fuentes animales.	11
Figura 2. Monómero de algunos polímeros naturales.....	13
Figura 3. La estructura a macroescala de un gránulo de almidón (2–100 μm) está compuesta por anillos de crecimiento de tamaño submicrónico.	15
Figura 4. Estructura y composición química de la naranja (compuestos de interés en la industria alimentaria).	19
Figura 5. Anatomía de la fruta y semilla del café.	25
Figura 6. Posos de café gastado en la industria alimentaria.	28
Figura 7. Diagrama de flujo de la caracterización de espumas de almidón.....	37
Figura 8. Cafetería, Crepas y Waffles “Bubble Licious waffle & coffee”.....	39
Figura 9. Secado del café gastado.....	39
Figura 10. Incorporación de celulosa.....	42
Figura 11. Pasta formada previo al proceso de termoprensado.	42
Figura 12. Termoprensado de las espumas bioactivas.	42
Figura 13. Cambios de color en cada una de las formulaciones en masa (1) y en las espumas horneadas (2): A (control), B(BN100) y C(BN75CG25).	47
Figura 14. Cambios de color en cada una de las formulaciones en masa (1) y en las espumas horneadas (2): D(BN50CG50), E(BN25CG75), F(CG100).	48

1. INTRODUCCIÓN

Recientemente, la sustitución de polímeros derivados del petróleo por otros materiales ecológicos, como los polímeros biodegradables, ha atraído mucha atención. Los residuos de polímeros derivados del petróleo no son biodegradables y son difíciles de reciclar (Moreno et al., 2015; Saleh et al., 2017; Zhang et al., 2017). Normalmente, requieren más de 100 años para su degradación, generando tóxicos de forma no intencional (Balakrishnan et al., 2018). Debido a las preocupaciones ambientales, los biopolímeros producidos a partir de abundantes recursos naturales como almidón, fibra natural y residuos agrícolas son, por lo tanto, buenos materiales alternativos (Kotharangannagari et al., 2016; Kasemsiri, et al., 2017). Los materiales a base de almidón han demostrado un gran potencial, especialmente cuando un número creciente de países adoptó regulaciones para prohibir los plásticos convencionales desechables (Din et al., 2020).

El almidón se ha desarrollado ampliamente para la producción de polímeros biodegradables, especialmente para aplicaciones de envasado de alimentos, debido a sus excelentes propiedades: su capacidad para formar una matriz continua, su bajo coste, su baja densidad y su biodegradabilidad (Gomez-Luria et al., 2017; Prachayawarakorn & Hanchana, 2017). Actualmente, el envasado de alimentos se ha desarrollado para prolongar la vida útil y mejorar la calidad de los productos alimenticios. Por otro lado, la baja resistencia mecánica y la alta hidrofiliidad han limitado el uso del almidón para producir envases semirrígidos. Para mejorar estas características, se pueden añadir plastificantes y otros aditivos, como fibras, proteínas y lípidos, a la mezcla de almidón y agua (Soykeabkaew et al., 2015). Numerosos autores han reportado la mejora en las propiedades mecánicas de los empaques de almidón adicionados con diferentes tipos de fibras obtenidas de diversos residuos agroindustriales, como el bagazo de caña de azúcar (Cruz-Tirado et al., 2017; Debiagi et al., 2015), el bagazo de trigo (Bénézet et al., 2012), la cascarilla de maíz (Polat et al., 2013), el bagazo de malta (Mello & Mali 2014), el pseudotallo de banano (Jandas et al., 2012) y la corteza de coco (Kocaman et al., 2017), entre otros.

En los últimos años, los estudios sobre los residuos del procesamiento de cítricos han cobrado mayor popularidad, ya que estos subproductos constituyen una fuente prometedora de compuestos aprovechables gracias a sus propiedades tecnológicas y nutricionales. Se estima

que los residuos de cítricos a nivel mundial superan los 15 millones de toneladas, lo que representa un grave problema ambiental. Estos residuos consisten generalmente en la piel (albedo y flavedo), las semillas y la pulpa de la fruta que queda después de la extracción del jugo (Laufenberg et al., 2003). Una de las ventajas de este tipo de residuos es su contenido de fibra dietética, y en comparación con otras fuentes de fibra como los cereales, presenta una mayor cantidad de fibra soluble (Gorinstein et al., 2001; Larrea et al., 2005).

El café es una de las bebidas más populares del mundo debido a su agradable sabor y efecto estimulante. Durante la producción de café, se genera café molido gastado (CMG) como un residuo importante (Campos-Vega et al., 2015). CMG se ha utilizado para varias aplicaciones, es decir, producción de carbón activo, fase de refuerzo en compuesto de polímero y materia prima para extracciones de antioxidantes (Ballesteros et al., 2017; García-García et al. 2015; Shang et al., 2015; Liu et al., 2018). (Yen et al., 2005) informaron que el residuo de café tostado extraído con agua mostró el mayor rendimiento de antioxidantes para la protección de la oxidación lipídica en comparación con otros solventes orgánicos. Los componentes del residuo de café tostado extraído consistieron en compuestos fenólicos que incluyen ácido clorogénico y ácido cafeico, así como compuestos no fenólicos.

Por consiguiente, la investigación de estos subproductos como refuerzo en la producción de bioplásticos mediante termoformado podría ser una alternativa prometedora, ya que tendría un impacto positivo en el medio ambiente y añadiría valor a los productos. El objetivo de este estudio fue evaluar el efecto de la concentración de cáscara de naranja y residuos de café en las propiedades fisicoquímicas, las propiedades mecánicas y la tasa de liberación de fenoles totales en espumas bioactivas.

2. MARCO TEÓRICO

2.1. Biopolímeros

Los polímeros son materiales poliméricos que se ingieren fácilmente sin efectos adversos para el consumidor. En este ámbito, los polímeros naturales son de gran interés. Al utilizarse en envases, protegen los alimentos contra la pérdida de nutrientes, controlan el transporte de masa de la composición molecular del alimento desde el interior hacia el exterior y ralentizan los cambios adversos en el producto (Shit y Shah, 2014). Los polímeros biológicos pueden obtenerse de fuentes como plantas, animales, microbios y muchas más (Figura 1).

Un polímero biodegradable es aquel que puede ser degradado completamente por el medio ambiente, reduciendo así el impacto ambiental que estos materiales producen. Por lo tanto, de acuerdo con esta definición, cuando un envase plástico biodegradable es desechado al final de su vida útil, comienza a transformar su estructura molecular, y por lo tanto sus propiedades físicas y químicas, debido a la influencia de agentes ambientales. Así, el polímero es transformado en componentes menores como agua, dióxido de carbono y biomasa que finalmente se asimilan al medio ambiente (Labeaga Viteri, 2018).

Los polímeros naturales o de base biológica se derivan totalmente o en parte a partir de recursos renovables, biomasa o microorganismos y se pueden clasificar en tres grandes grupos: polímeros naturales (almidón y celulosa), polímeros sintetizados a partir de monómeros naturales (ácido poliláctico) y polímeros obtenidos de la fermentación microbiana (Shekar & Ramachandra, 2018). Los biopolímeros más abundantes son la celulosa, el almidón y el glucógeno.

En la industria, actualmente encontramos bioplásticos fabricados con almidón proveniente de distintas materias primas vegetales como la yuca, el maíz, el aguacate y la papa, los cuales se empezaron a desarrollar en búsqueda de disminuir el impacto ambiental que están generando los plásticos de un solo uso (Ghasemlou et al., 2022).



Figura 1. Fuentes comunes de biopolímeros comestibles naturales a partir de residuos de biomasa agrícola, residuos de procesamiento de alimentos marinos y fuentes animales.

Como componentes básicos del esqueleto de numerosas especies vivas, los polisacáridos podrían ser los biopolímeros naturales más abundantes en la Tierra. La gran mayoría de los polisacáridos alimentarios son de origen vegetal, incluyendo plantas terrestres y algas marinas (Bernarts et al., 2019). Además, algunos polisacáridos son de origen animal, típicamente la quitina y el quitosano. Otros polisacáridos animales incluyen el glucógeno, la heparina, el sulfato de condroitina, el ácido hialurónico, el sulfato de queratina, el mucopolisacárido ácido y el glicosaminoglicano, pero rara vez se utilizan en la industria alimentaria debido a su alto costo y baja accesibilidad.

Estructuralmente, los polisacáridos pueden ser de arquitectura lineal o ramificada, cargados o neutros, dependiendo de sus orígenes, estructuras químicas y factores ambientales. En algunos casos, los polisacáridos contienen simultáneamente grupos hidrófobos e hidrófilos en las mismas cadenas moleculares, que se denominan empíricamente polisacáridos anfífilos (Phillips & Williams, 2009). Además, debido a que los polisacáridos de origen natural a menudo contienen numerosos grupos $-OH$ (hidroxilo) y/o $-COOH$ (carboxilo) en sus cadenas moleculares, lo que permite que se introduzcan covalentemente grupos funcionales adicionales mediante métodos de modificación química (Xu et al., 2019). Cabe destacar que, sin embargo, muchos polisacáridos pueden poseer simultáneamente varias características estructurales (Chan et al., 2017).

Los polisacáridos son largas cadenas poliméricas de carbohidratos que se encuentran abundantemente en la naturaleza. Algunos de los polisacáridos comunes que están presentes en los residuos de cultivos son la celulosa y el almidón. La celulosa es la biomasa presente más abundantemente (Gutiérrez & Álvarez, 2017). Es un biopolímero cristalino obtenido principalmente de plantas leñosas, con un peso molecular de alrededor de 450-500 kDa. La celulosa está compuesta de múltiples bloques de glucopiranososa conectados a través de enlaces glucosídicos (Figura 2). Los derivados celulósicos se emplean en recubrimientos y películas comestibles. La celulosa y sus derivados cuando se calientan forman un gel y experimentan una termogelificación reversible (Williams & Phillips, 2021). Las películas celulósicas son flexibles, resistentes a los lípidos, solubles en agua, transparentes, insípidas y tienen una barrera de transferencia de oxígeno (García et al., 2002).

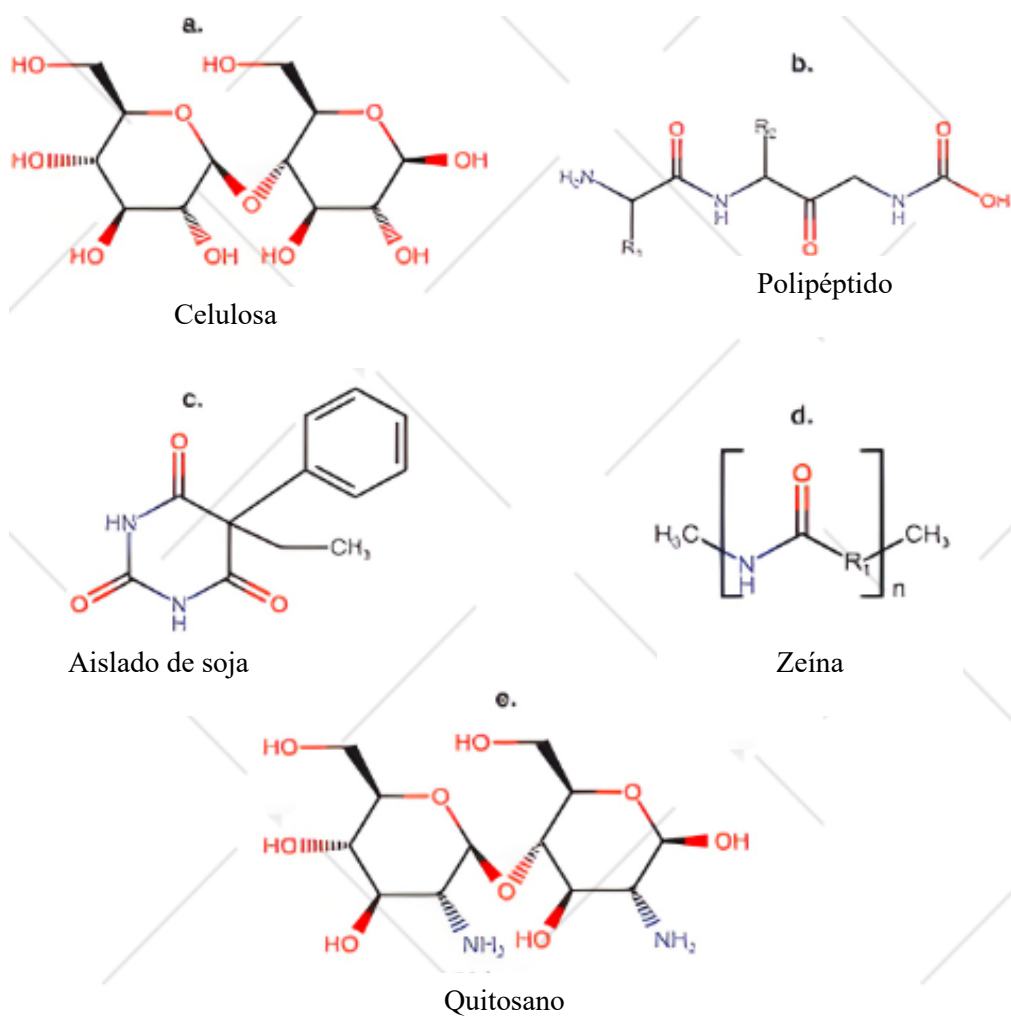


Figura 2. Monómero de algunos polímeros naturales. (Ishika Gupta, 2022)

2.1.1. Almidón

El almidón es un polisacárido presente en cultivos como el maíz, la papa y las legumbres. El almidón extraído de plantas se denomina almidón nativo, mientras que el almidón que ha sufrido una transformación se denomina almidón modificado. Se compone principalmente de dos macromoléculas glucosídicas: amilosa y amilopectina. La amilosa es un polímero lineal de unidades de glucosa unidas por enlaces glucósidos α -(1-4), mientras que la amilopectina es un polímero altamente ramificado de ramificaciones cortas de unidades de glucosa unidas por enlaces glucósidos α -(1-4) con enlaces glucósidos α -(1-6) entrelazados aproximadamente cada 22 unidades de glucosa (Parker y Ring, 2001; Shibamura et al., 1994). La Figura 3 muestra la estructura a macroescala de un gránulo de almidón (2–100 μ m) derivado de cadenas de amilopectina y amilosa de entre 0,1 y 1 nm de tamaño (Le Corre, Bras & Dufresne, 2010). La base de la estructura granular del almidón, con regiones cristalinas y amorfas alternadas, es la amilopectina, un componente altamente ramificado.

Una propiedad importante del almidón es la retrogradación. Al calentarse en agua, los gránulos de almidón forman una solución viscosa a medida que la amilosa se desprende de la estructura granular. Al enfriarse la solución, la amilosa y las cadenas lineales de las moléculas de amilopectina se retrogradan y reorganizan, adoptando una estructura aún más cristalina mediante enlaces de hidrógeno. La cristalización de la amilosa es más rápida que la de la amilopectina. La amilosa (temperatura de fusión de ~ 150 °C) es responsable de la dureza inicial del gel de almidón, mientras que la amilopectina (temperatura de fusión de ~ 50 -60 °C) es responsable de la cristalinidad a largo plazo y la estructura del gel (Hoseney, 2010). La amilosa/amilopectina del almidón varía según el origen botánico, con un rango general de 72 y 82% para la amilosa, y de 18 a 28% para la amilopectina (Montgomery & Senti, 1958). Sin embargo, el contenido de amilosa de algunos tipos mutantes de almidón, como el almidón de maíz ceroso, puede ser $<1\%$ (Lemos et al., 2019). La variabilidad en el contenido de amilosa/amilopectina del almidón determinará características como la capacidad de absorción de agua, la gelatinización, la retrogradación y el hinchamiento en diferentes condiciones de humedad y temperatura (Agarwal et al., 2021). Por lo tanto, la mayoría de los almidones utilizados en alimentos u otras aplicaciones industriales se modifican para lograr las propiedades y funcionalidades deseadas.

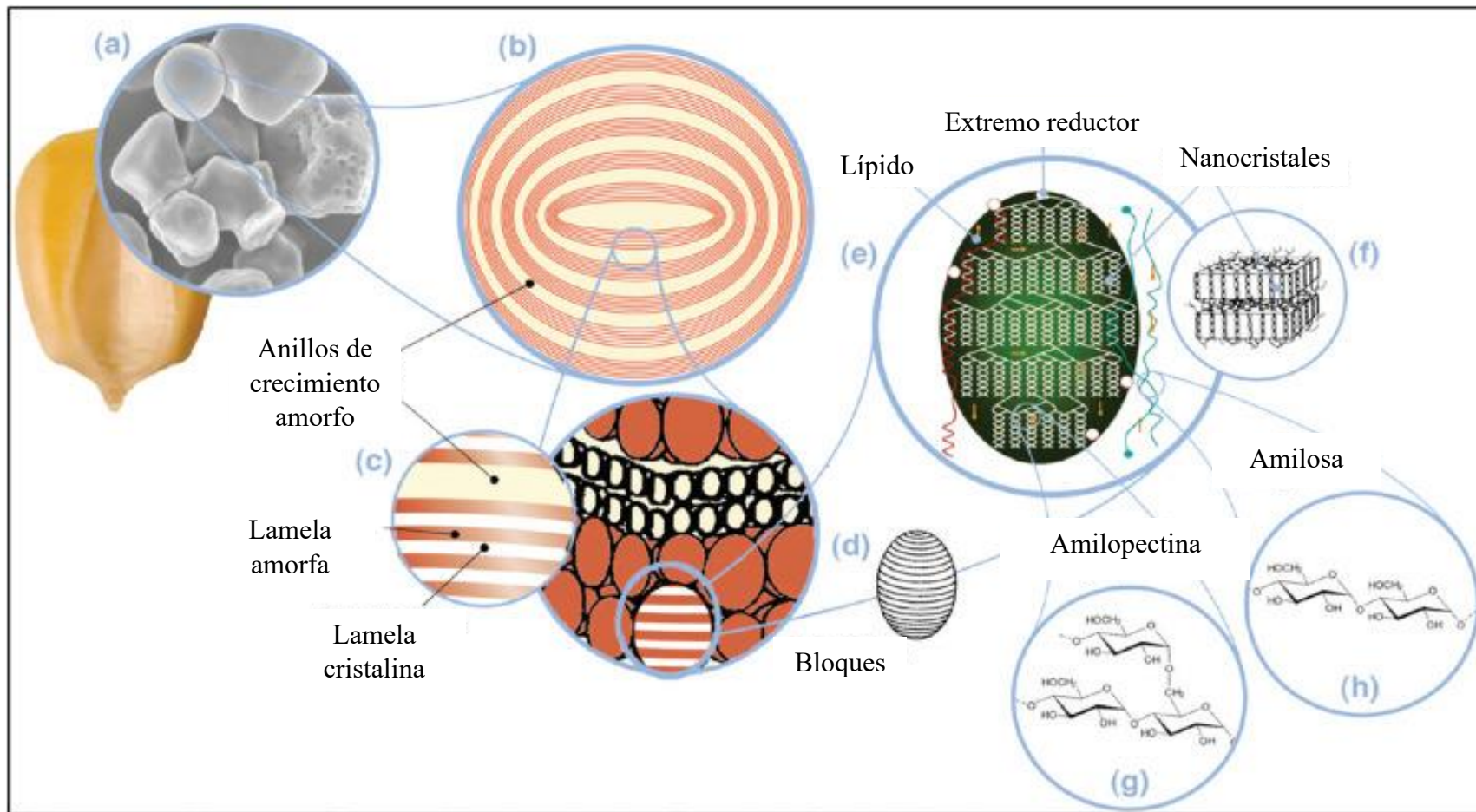


Figura 3. La estructura a macroescala de un gránulo de almidón (2–100 μm) está compuesta por anillos de crecimiento de tamaño submicrónico. (Donald, 1997).

2.1.1.1. Almidón de maíz

El maíz es el tercer cultivo de grano más importante del mundo, después del trigo y el arroz. El maíz se procesa para obtener una gran variedad de productos alimenticios e industriales, como almidón, edulcorantes, aceite de maíz, bebidas, alcohol industrial y biocombustible.

El almidón es un componente principal del maíz y constituye aproximadamente el 75% de su materia seca, que se acumula en el tejido del endospermo (Pollak et al., 2005; Burrell et al., 2003; Kaur et al., 2012).

El almidón se produce normalmente mediante el proceso de molienda húmeda (Zhang et al., 2021). En la molienda húmeda, el grano se remoja o se macera en agua y ácido sulfuroso diluido durante 24 a 48 h. Esta maceración facilita la separación del grano en muchos de sus componentes. Después de la maceración, la suspensión de maíz se procesa para separar el germen de maíz. Se extrae el aceite de maíz del germen y se segregan aún más los componentes restantes de almidón, gluten y fibra (Yu et al., 2021).

El almidón de maíz está compuesto de dos polímeros (homopolisacáridos), amilopectina y amilosa, que difieren en su longitud de cadena y grado de ramificación. La amilopectina es más ramificada (una cadena de enlaces α -D-(1-4) y α -D-(1-6)-glucosídicos) y normalmente constituye alrededor del 75% del gránulo de almidón. La amilosa es principalmente lineal (residuos de glucosa unidos a α -D-(1-4)) y constituye el 25% del gránulo de almidón (Jeon et al., 2010; Tetlow, 2011; Tayade et al., 2019). Estos dos polímeros tienen diferentes propiedades físicas, y la proporción de amilosa a amilopectina juega un papel clave en la apariencia, la estructura y la calidad del procesamiento industrial. Por lo tanto, gran parte del esfuerzo de mejoramiento para obtener propiedades distintivas del almidón ha involucrado cambiar las proporciones relativas de estos dos polímeros.

El desarrollo de materiales biodegradables a base de almidón se ha convertido en una opción sumamente atractiva, y la creación de plásticos a base de almidón está abordando una preocupación significativa relacionada con la salud del planeta (Ghanbarzadeh et al., 2010).

(Mendes et al. 2016) desarrollaron mezclas de polímeros biodegradables a partir de almidón de maíz y quitosano termoplástico mediante la técnica de expulsión. El resultado de este estudio confirmó que es posible producir mezclas eficaces de almidón de maíz y quitosano

mediante expulsión por una alta dispersión. Este tipo de mezcla tiene algunas aplicaciones potenciales en la formación de paquetes, especialmente donde una gran cantidad del polímero preparado es fundamental en comparación con el manejo de grupos (Mendes et al., 2016). Paiva et al., 2018) organizaron el soporte de almidón de maíz termoplástico con micropartículas de almidón/quitosano reticuladas. Las micropartículas de almidón de maíz y quitosano reticuladas con glutaraldehído y suministradas mediante la estrategia de intercambio soluble se leen como rellenos de fortificación para almidón de maíz termoplástico plastificado con glicerol. Se ha demostrado que la presencia de un 10 % p/p de quitosano en las micropartículas es fundamental para asegurar una reticulación exitosa, como lo demuestra la solvencia en agua (Paiva et al., 2018).

(Wang et al., 2017) crearon e investigaron las propiedades mecánicas y la solvencia de películas compuestas de almidón de maíz y colágeno en agua. La revisión de imágenes de microscopía electrónica reveló que las películas de almidón y colágeno presentaban una superficie más lisa en comparación con las películas de colágeno puro, que se volvieron más lisas tras el calentamiento.

Se han incorporado ácidos grasos a películas de biopolímeros para reducir su permeabilidad al vapor de agua, que es relativamente alta en películas basadas en polisacáridos, como el almidón de maíz, debido a su naturaleza altamente hidrofílica (Vieira et al., 2011). (Jiménez et al., 2010) analizaron el efecto de la recristalización en las propiedades de flexibilidad, ópticas y de inhibición del vapor de agua de películas de almidón de maíz que contienen grasas insaturadas. Películas de almidón que contienen glicerol se unieron con grasas insaturadas para disminuir su carácter higroscópico y mejorar la permeabilidad del vapor de agua.

(Khalil et al., 2018) sintetizaron películas compuestas con diferentes concentraciones de algas *K. alvarezii* y almidón de maíz. Encontraron que la mayor resistencia a la tracción y el mayor alargamiento posible a la rotura fueron una película compuesta con 3% de algas y 1% de almidón. Con la inclusión de algas marinas, se mejoraron tanto las características mecánicas como la dureza de los compuestos. Con el aumento de las concentraciones de almidón y algas marinas, la permeabilidad al vapor de agua de las películas compuestas también aumentó linealmente.

2.2. Naranja

Una de las frutas más producidas en el mundo es la naranja (*Citrus sinensis* L.). De acuerdo con (FAO, 2021); los cinco países principales productores de naranja a nivel mundial son: Brasil, China, India, Estados Unidos y México. En México, el Estado de Veracruz es el principal productor de este cítrico, en 2021 solo esta entidad federativa produjo el 50% de la oferta nacional; con una producción de 2 271 524 toneladas (SIAP, 2021).

De acuerdo con García-Salazar et al., (2021), en México el 56% de la producción se consume en fresco en los hogares, mientras que el 34% se destina para la extracción de jugo de manera industrial y el 10% restante es merma. De acuerdo con Cypriano et al., (2018) se estima que, durante el proceso industrial de la extracción de jugo de naranja, aceites esenciales y otros coproductos, aproximadamente el 50% del peso de la fruta (base húmeda) se convierte en bagazo (cáscara, pulpa, semillas y restos de membrana) (Figura 4). En consecuencia, en México anualmente se generan aproximadamente 800 000 toneladas de bagazo de naranja como residuo del procesamiento industrial de esa fruta. Particularmente, el manejo de grandes cantidades de bagazo es complicado debido a su pH ácido, gran humedad residual, contenido de aceites esenciales, y estacionalidad de la producción (Calabrò et al., 2020). La gestión de grandes volúmenes de bagazo es un problema económico y ambiental importante (Fazzino et al., 2021), especialmente en aquellas regiones donde el procesamiento industrial de esta fruta es una actividad económica sustancial. Este residuo aumenta cada año y representa un importante riesgo de contaminación para el suelo, agua y el ambiente de la región.

2.2.1. Compuestos bioactivos

Son aquellos que aportan un beneficio a la salud del cuerpo humano. Se encuentran en pequeñas cantidades en productos de origen vegetal y animal. Su ingesta se da por el avance científico que comprueba que al consumirlos se puede minimizar el riesgo de enfermedades (Herrera et al., 2014). En la naranja existen compuestos bioactivos como la vitamina C, carotenoides, fibra, compuestos fenólicos, flavanonas, antocianinas y el ácido hidrocínámico (Castro et al., 2016; Ordoñez et al., 2018).

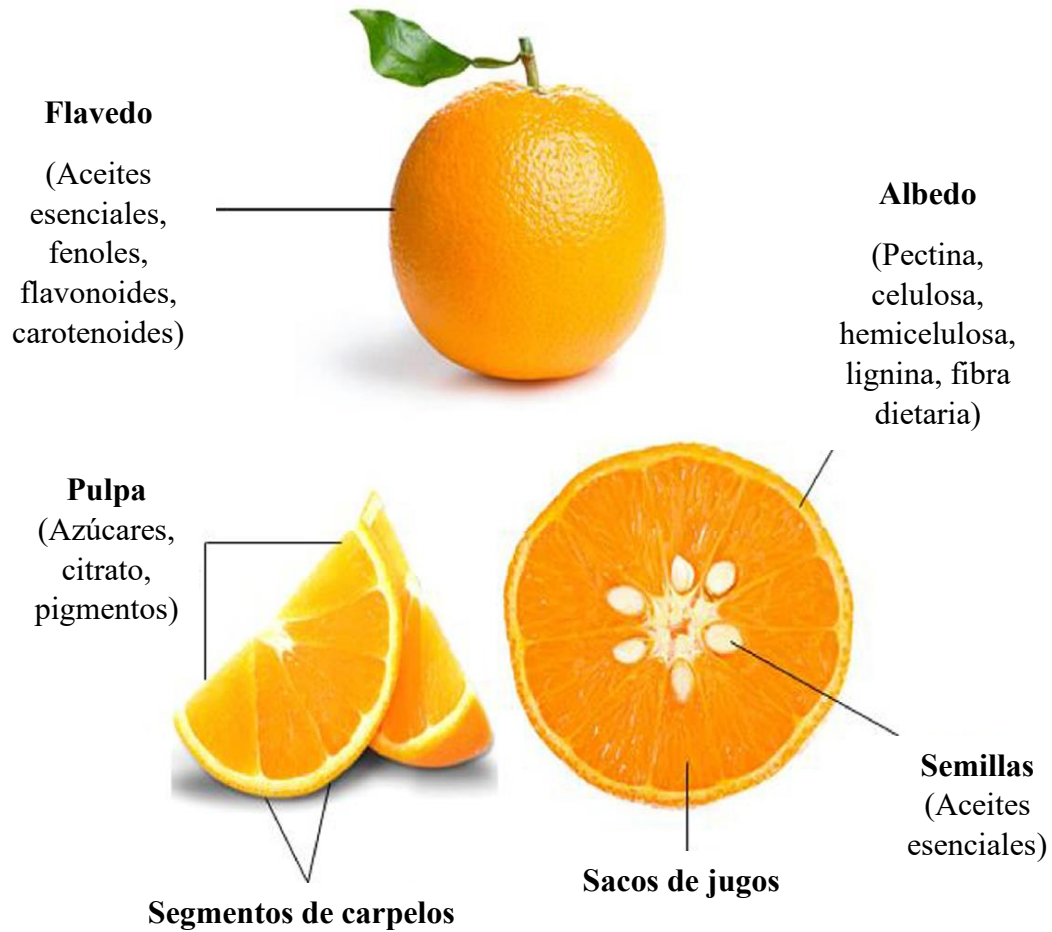


Figura 4. Estructura y composición química de la naranja (compuestos de interés en la industria alimentaria). (Shweta Suri, 2022)

Vitamina C. El ácido ascórbico es una vitamina esencial e hidrosoluble, necesaria para la síntesis de las fibras de colágeno la que se realiza por medio del proceso de hidroxilación de la prolina y lisina, además actúa como un agente reductor (Andrade et al., 2016).

Carotenoides. Son un conjunto de pigmentos liposolubles responsables de la coloración de frutas, flores, raíces, etc. Entre los principales carotenoides que se pueden encontrar en los alimentos tenemos a los betacarotenos, licopeno y zeaxantina (Urango et al., 2009).

Fibra. Componente es esencial en la dieta diaria por sus beneficios que genera en el ser humano, su consumo previene enfermedades como desórdenes gastrointestinales, problemas cardiovasculares y un control en el peso corporal de las personas (Almeida et al., 2014).

Compuestos fenólicos. Constan de un grupo hidroxilo unido a un anillo aromático, estos son los principales en formar parte de los metabolitos secundarios. En la naranja las flavanonas son las responsables del sabor amargo (Martín, 2018)

2.2.2. Residuos de naranja

La producción de jugo de naranja genera residuos que representan el 50% de la masa de fruta fresca. Estos residuos incluyen cáscaras (50-55%), semillas (20-40%), orujo y aguas residuales. Las aguas residuales de los cítricos cubren partes de fruta en mal estado, semillas, pulpa y cáscaras. Debido al valioso componente funcional presente en los desechos cítricos y con la creciente preocupación por la valorización de los desechos, los investigadores están utilizando los desechos cítricos, minimizando el daño ambiental. Los desechos cítricos que constituyen cáscaras, pulpa, orujo y semillas contienen varios fitoquímicos bioactivos como pectina, aceite esencial, flavonoides, polifenoles, carotenoides, fibra dietética, ácidos orgánicos y vitaminas (Di Donna et al., 2020). Estos componentes bioactivos no solo sirven como un ingrediente funcional, sino que también protegen la salud contra microbios, alergias y enfermedades (Babbar et al., 2011). Las cáscaras contienen una gran cantidad de fitoquímicos y componentes bioactivos, por ejemplo, polifenoles, aceites esenciales, pigmentos, carbohidratos (pectina, celulosa, hemicelulosa y fibras dietéticas), compuestos saborizantes y pigmentos (Wang et al., 2014). Se utiliza en alimentos, bebidas, perfumería, medicamentos y la industria cosmética como se presenta en la Tabla 1.

Tabla 1. Aplicaciones de los residuos de cáscaras de naranja en el sector alimentario y no alimentario.

No.	Aplicaciones	Papel	Características presentes	Referencia
Aplicaciones alimentarias de la cáscara de cítricos				
1	Aditivo en productos alimenticios	Desarrollo de muffins ricos en fibra dietética	Los muffins preparados incorporando un 15% de fibra dietética de bagazo de <i>Citrus sinensis</i> (naranja) dieron como resultado una disminución del índice glucémico previsto	(Romero-López et al., 2011)
		Sustituto de grasa en productos de panadería	La incorporación del 50% de fibra de <i>Citrus sinensis</i> desamargada exhibió buenas propiedades de reemplazo de grasa en la preparación de brioches, un producto de panadería	(Caggia et al., 2020)
2	Almacén de compuestos bioactivos	Carotenoides	Extraídos de la cáscara de cítricos mediante descarga eléctrica de alto voltaje mostraron una bioaccesibilidad mejorada (82.5%) con un aumento en el aporte energético	(Buniowska et al., 2015)
		Pectina	Extraída de cáscaras de <i>Citrus sinensis</i> mediante extracción asistida por microondas basada en	(Su et al., 2019)

surfactante mostró un alto rendimiento (28%) a 400 W de potencia, 7 min y 1.2 pH.

3	Prebiótico	Oligosacáridos pécticos	Mostró mayores efectos prebióticos debido a las propiedades antimicrobianas y moduladoras del microbiota	(Foti et al., 2021)
4	Agente encapsulante	Nanopartícula de pectina/zeína cítrica cargada con resveratrol	Las nanopartículas enriquecidas con resveratrol obtenidas de la pectina y la zeína de la cáscara de cítricos mostraron buena estabilidad al calor (80 °C durante una hora) y al pH (2-7).	(Huang et al., 2019)
Aplicaciones no alimentarias de la cáscara de cítricos				
1	Bioadsorbente	Adsorbente de carbón activado -FeCl ₃	Eliminación de metales pesados como iones fluoruro de aguas residuales	(Siddique et al., 2020)
2	Fuente de biocombustibles	Producción de bioetanol	Rendimiento de bioetanol de 0.495 g/g y una productividad de 4.85 g/L.h a partir de cáscaras de <i>Citrus sinensis</i>	(Santi et al., 2014)
3	Material de embalaje	Película comestible biodegradable	Mezcla de 50% de pectina a base de cáscara de naranja y 50% de gelatina de pescado dio como	(Jridi et al., 2020)

			resultado el desarrollo de una película comestible con alta resistencia a la tracción y acción antioxidante y antimicrobiana	
4	Productos cosméticos	Crema blanqueadora de piel	La cáscara de naranja exhibió una alta actividad anti-tirosinasa que condujo a una reducción del pigmento melanina	(Wuttisin et al., 2017)
5	Medicamento farmacéutico	Efectos antiulcerosos	La incorporación de extracto de cáscara <i>de Citrus sinensis</i> en la dieta de ratas condujo al mantenimiento de su salud gastrointestinal	(Aboul Naser et al., 2020)

2.3. Producción de café en México

El café (*Coffea arabica* L.) es uno de los principales productos de consumo comercializados a nivel mundial debido a su alto valor energético asociado a la cafeína. Este último componente se clasifica como un estimulante del sistema nervioso central que produce un efecto temporal de activación sensorial en pequeñas dosis, lo que lo hace preferido por la población, hasta el punto de que actualmente existe un consumo promedio mundial de 1.8 kg de café per cápita (OIC, 2022). Es el segundo producto básico más comercializado después del petróleo, cotizando en las principales bolsas de valores (CDERSSA, 2022), y siendo de gran importancia económica, sociocultural y ambiental para la mayoría de los países productores (Rosas et al., 2008).

Hace apenas un par de décadas, y particularmente desde 2008, la producción de café a nivel mundial mantenía una tendencia ascendente, a la par del consumo internacional que también se encontraba en sus niveles máximos, incrementándose a una tasa promedio anual de 2.80% (Rivera, 2022). Para 2018, la producción alcanzó su máximo histórico en los últimos 20 años con una producción de 10.5 millones de toneladas de café, siendo Brasil el principal productor con más del 37% de la producción mundial, para este momento, México ocupaba el octavo lugar en la producción mundial con 2.4% según datos de la Organización Internacional del Café (OIC, 2022).

La producción de café es una de las principales actividades agrícolas en México (CDERSSA, 2022), considerada de gran importancia económica, sociocultural y ambiental (Barrera et al., 2021; Escamilla & Díaz, 2002), integrándose a diferentes cadenas productivas para la creación de empleos y contribución a la economía con la generación de divisas (Barrita-Ríos et al., 2018) que permiten la subsistencia de muchos pequeños productores.

El fruto, baya o cereza del café es un grano de aproximadamente 10 mm (Narita & Inouye, 2014; Pérez- Sariñana & Saldaña-Trinidad, 2017) que comprende el exocarpio (pulpa), el mesocarpio (mucílago), la piel plateada y la cáscara o pergamino, que es una capa que rodea las dos semillas (endospermo) (Figura 5). El proceso de transformación primaria del café genera cantidades sustanciales de residuos orgánicos sólidos y líquidos que se estiman en diez millones de toneladas al año (Martínez et al., 2017).

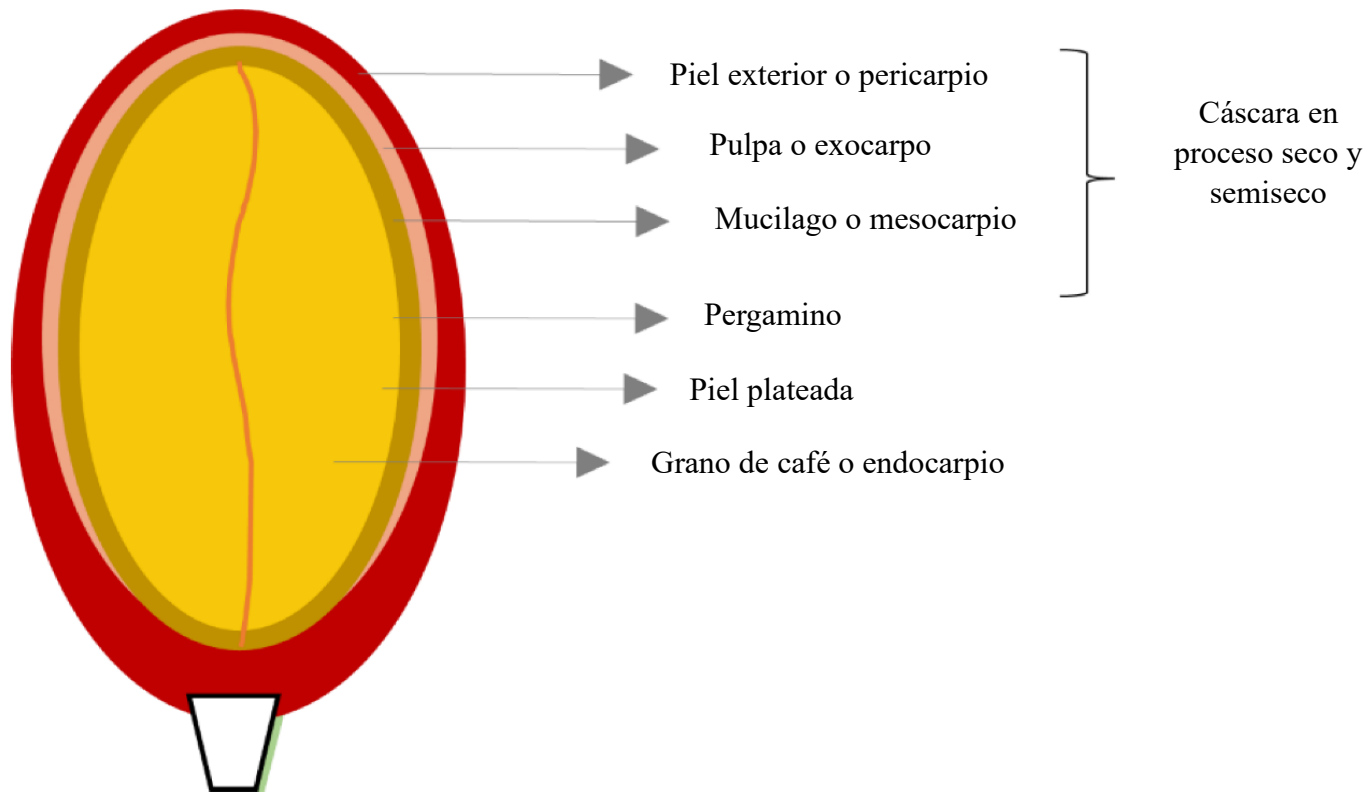


Figura 5. Anatomía de la fruta y semilla del café.

2.3.1. Café gastado

La pulpa de café, las cáscaras de café, la película plateada del café y los posos de café usados (CG) son los subproductos más importantes del procesamiento del café (Murthy & Naidu, 2012; Esquivel & Jimenez 2012). Los CG se producen a partir del tratamiento del polvo de café con agua caliente para preparar café instantáneo (Figura 6). Se estima que 1 tonelada de café verde genera 650 kg de CG (Garcia & Kim, 2021). Además, los residuos de café contienen materiales orgánicos que, según se informa, son altamente contaminantes y ocasionan graves problemas ambientales y contaminación si se descargan directamente al medio ambiente (Gomes et al., 2013).

Los carbohidratos, ligninas, lípidos, minerales y proteínas son los principales componentes que se encuentran en la composición química de CG (McNutt, 2019). También es posible encontrar compuestos fenólicos (12.0 mg/g), cafeína (14.5 µg/g) y ácido clorogénico (31.8 µg/g) (Santos et al., 2017). Los carbohidratos (polisacáridos), como la celulosa y las hemicelulosas, están altamente presentes en los CG. La celulosa, en general, es un homopolímero lineal de unidades de glucosa repetidas que conducen a posibles aplicaciones de producción de pulpa y papel. Las hemicelulosas, como heteropolímeros, pueden liberar diferentes tipos de azúcares a través de pretratamientos químicos o biológicos.

Los CG tienen un alto contenido proteico (13–17 % en peso de masa seca) (Battista et al., 2020; Coelho et al., 2021). Por lo tanto, se pueden utilizar como un suministro fiable de nutrientes en la industria alimentaria y potencialmente desempeña un papel importante como sustratos en procesos biotecnológicos y fermentativos (Kovalcik et al., 2018). Recientemente, las proteínas CG se extrajeron mediante un método basado en urea seguido de hidrólisis con dos enzimas diferentes para producir péptidos bioactivos. Los resultados mostraron rendimientos de péptidos de 0.23 mg/mL (alcalasa) y 0.39 mg/mL (termolisina) después de la extracción de polifenoles, así como actividades antioxidantes (ensayo de radicales hidroxilo) de 84.3 % y 95.4 %, respectivamente (Valdés et al., 2020).

Numerosos estudios también exploraron la extracción de productos de valor agregado de fracciones lipídicas, como el aceite de café (7–21% de la masa seca total de CG) (Kovalcik et al., 2018; Toda et al., 2021; Araujo et al., 2019). Se han extraído compuestos fenólicos del

aceite de café y se han estudiado debido a su potencial antioxidante. Se utilizan en alimentos funcionales y suplementos. Un estudio identificó 230.2 mg GAE/g (GAE = equivalentes de ácido gálico) de compuestos fenólicos en CG pretratado con álcali y 234.2 mg GAE/g en hidrolizados de CG, mientras que otro estudio identificó 5.7 mg GAE/g de compuestos fenólicos en extractos de CG (Sant'Anna et al., 2017; Ballesteros et al., 2018). Además, se propuso un método respetuoso con el medio ambiente para extraer compuestos fenólicos de CG mediante extracción con etanol-solvente y los autores informaron una recuperación de más del 90 % de los compuestos fenólicos de los CG (Zuorro & Lavecchia, 2012).

Los minerales también se encuentran en la composición química de los CG. Por esta razón, los sustratos de compost a base de CG pueden ayudar a limitar la extracción de minerales del suelo (Campos-Vega et al., 2015). Según la Tabla 2, el potasio, el fósforo, el magnesio y el calcio son los minerales más abundantes extraídos de los CG. Esta amplia variedad de compuestos ricos en nutrientes extraídos del CG puede dar lugar a diversas aplicaciones según su composición. Por lo tanto, la caracterización de estos residuos desempeña un papel esencial para determinar las aplicaciones más adecuadas.



Figura 6. Posos de café gastado en la industria alimentaria. (Online, 2025)

2.4. Espumas biodegradables

Las espumas biodegradables son un material poroso con estructura de célula nucleada, formado por la agregación de burbujas, que se obtienen generalmente al saturar un polímero con gas a alta presión, (inyectado o generado in situ) y sometido a inestabilidad termodinámica inducida por una liberación repentina de presión o aumento de la temperatura, provocando que numerosas células crezcan hasta estabilizarse (Zafar et al., 2016; Zhao, et al., 2015).

El almidón tiene la capacidad de expandirse, lo que le permite formar espumas. En la producción de estas espumas se utilizan almidones de diferentes fuentes, como almidón de yuca, almidón de papa, almidón de maíz y otros menos tradicionales. Estos almidones pueden utilizarse in natura o modificarse para mejorar sus propiedades (Machado et al., 2017; Cruz-Tirado et al., 2019; Bergel et al., 2017).

Algunos métodos de mezcla y expansión se emplean comúnmente en la producción de espumas, y uno de estos métodos es la extrusión. En la extrusión, la mezcla y la expansión pueden o no llevarse a cabo en un solo proceso, además, hay algunos parámetros que deben determinarse, como las temperaturas, el diámetro y la velocidad del tornillo. Hay algunos estudios que utilizan la extrusión para obtener espumas de almidón, sin embargo, en cada trabajo hay una variación en estos parámetros, ya que utilizan almidones de diferentes fuentes, y esto influye en la temperatura de gelatinización del almidón, además de utilizar aditivos diferentes en las composiciones (Georges et al., 2018; Jebalia et al., 2019). En el estudio de Kaisangsri et al. (2019) se produjeron espumas de almidón de yuca con la adición de fibras de celulosa. El almidón y las fibras premezcladas se alimentaron a una extrusora de doble tornillo con una temperatura de 50 °C a 140 °C y una velocidad de rotación del tornillo de 150 a 250 rpm. Se probaron estas espumas y se investigó la influencia de la fibra.

Otro método para obtener espumas o bandejas de almidón es a través del prensado térmico. Este método puede realizarse en un equipo de moldeo por compresión o utilizando un molde y una prensa hidráulica con calentamiento. El método de prensado térmico se lleva a cabo en dos etapas, ya que primero es necesario mezclar todos los componentes de la espuma, y esto puede hacerse en una mezcladora o en una extrusora (Cruz-Tirado et al., 2019; Stoffel, 2015; da Silva Figueiró et al., 2022).

En el estudio de Kaewtatip et al., (2018) se produjeron espumas de almidón de yuca y otros componentes. El almidón y los aditivos se procesaron en una mezcladora, dando como resultado una pasta, y esta pasta se alimentó a un molde para expandirse mediante prensado térmico. La espuma se formó en una máquina de moldeo, utilizando una temperatura de 180 °C, una presión de 1500 psi durante 5 min. También existen procesos de producción de espuma que utilizan más de dos pasos. En el estudio de Reis et al., (2018) se mezclaron almidón, glicerol y ácido poliláctico en una extrusora de un solo tornillo, formando pellets. Después de extruir estos pellets en una extrusora de doble tornillo para formar láminas, estas láminas de almidón se termoformaron en un molde. Durante el proceso de expansión, se utilizó una prensa hidráulica para calentar el molde y las láminas se moldearon a 100 °C y a una presión de 100 bar durante 2 minutos para obtener las bandejas expandidas.

Es importante analizar preferentemente algunas propiedades. Entre ellas se encuentran la densidad de la espuma, la absorción de humedad, la absorción de agua, el ángulo de contacto, el impacto, la flexión, la resistencia a la tracción y el análisis morfológico (da Silva Figueiró et al., 2022; Bergel et al., 2018; Engel et al., 2018).

Algunos estudios verifican la influencia del tipo de fuente de almidón y el contenido de amilosa en las propiedades de la espuma. En el trabajo de Cruz-Tirado et al., (2019) se utilizaron diferentes fuentes de almidón en la producción de bandejas, incluyendo yuca, oca (*Oxalis tuberosa*) y batata. El almidón, junto con otros aditivos como agua, glicerol y estearato de magnesio se mezclaron, y esta pasta se expandió. Los resultados mostraron que las bandejas presentaron diferentes espesores y densidades. La bandeja con el menor espesor y densidad se produjo a partir de la yuca, la densidad fue de 0.14 g.cm⁻³, y el mayor espesor y densidad fue para la bandeja de batata, presentando una densidad 22% mayor que la de la yuca. En otro ejemplo, en el estudio de Bergel et al., (2018) se produjeron espumas a partir de almidón de papa, maíz y yuca. Cada almidón se gelatinizó en presencia de agua y glicerol, y la pasta se expandió. Los resultados mostraron que la espuma de almidón de maíz tuvo la mayor densidad y la espuma de almidón de yuca la menor, siendo de 0.20 y 0.10 g/cm³, respectivamente. Estos resultados pueden estar relacionados con los diferentes niveles de amilosa presentes en el almidón, ya que el mayor contenido de amilosa dificulta la expansión de las espumas de almidón (Sjöqvist & Gatenholm et al., 2005; Shogren et al., 1998).

Algunas características dificultan su aplicación comercial, como por ejemplo la hidrofobicidad del almidón. Para mejorar algunas características de las espumas y aumentar su aplicabilidad, existen estudios que incorporan un aditivo, modifican el almidón o aplican una película protectora (Bergel et al., 2018; Kaewtatip et al., 2013).

Tabla 2. Compuestos químicos y minerales encontrados en los posos de café gastado.

Compuestos químicos	Contenido (% en peso) ¹	Referencias	Compuestos minerales	Contenido (mg/g) ¹	Referencias
Hemicelulosa	30–40	(Battista et al., 2020; Kovalcik et al., 2018; Ballesteros et al., 2018)	Potasio	3.70	(Mussatto et al., 2011; Afriliana et al., 2020; Morikawa & Saigusa, 2011)
Celulosa	8–15		Fósforo	1.47	
Lignina	20–30		Magnesio	1.29	
Proteínas	13–17		Calcio	1.38	
Lípidos	7–21		Sodio	0.07	
Cenizas	1–2		Aluminio	0.28	
			Hierro	0.12	
			Manganeso	0.05	
			Cobre	0.03	
			Zinc	0.01	

¹Peso seco.

3. JUSTIFICACIÓN

Actualmente en el mundo se generan 300 millones de toneladas de plásticas, dentro de los que se encuentran los materiales desechables; generando un gran problema ambiental, para minimizar esta problemática se plantea el uso de residuos de la industria alimentaria. Sin embargo, a medida que la demanda de materiales biodegradables y compostables sigue creciendo, se espera que la industria alimentaria continúe adoptando prácticas más sostenibles como es el uso de residuos alimentarios para la elaboración de materiales totalmente biodegradables: un ejemplo es el uso de bagazo de naranja y café gastado. Formular y reforzar con materiales biodegradables, sobre todo residuos de la industria alimentaria, han demostrado ser un enfoque eficiente. En virtud de ello y tras una búsqueda se ha encontrado que las espumas biodegradables elaboradas a partir de almidón han surgido como una excelente alternativa, debido a su capacidad de descomposición natural, que contribuye a la reducción de la contaminación ambiental.

Se ha encontrado que el almidón es un biopolímero natural, ampliamente distribuido en la naturaleza, económico e ideal para la fabricación de espumas biodegradables, pues su utilización dentro de materiales en la industria alimentaria no solo tiene beneficios ambientales, sino también dentro de la seguridad alimentaria, pues logra preservar la vida de anaquel de estos. No obstante el almidón por sí solo tiene algunas limitaciones, como la baja resistencia mecánica y alta permeabilidad al vapor de agua, sin embargo, diferentes estudios han demostrado que la adición de subproductos de alimentos mejoran estas propiedades, como la cáscara de yuca, cáscara de semillas, tallos de uva, cáscara de maní, bagazo de malta, entre otras; dichos subproductos no solo mejoran las propiedades del material, sino también contribuyen a la disminución de desechos agroalimentarios, reduciendo así el desperdicio de recursos.

Los subproductos alimentarios son ricos en compuestos bioactivos, como los antioxidantes, fibra u otros compuestos que ofrecen diferentes propiedades adicionales a las espumas, como aumentar la resistencia mecánica, aumentar el espesor, disminuir la permeabilidad al vapor de agua y la solubilidad, conferir propiedades antimicrobianas o antioxidantes que ayuden a extender la vida útil de los alimentos.

Por lo tanto, la mezcla de almidón con subproductos alimentarios son una idea innovadora para el desarrollo de espumas biodegradables, es por ello, que la presente investigación tiene como objetivo evaluar las propiedades físicas-mecánicas de espumas biodegradables elaboradas mediante termoprensado, a partir de almidón de maíz, polvo de café gastado y polvo de bagazo de naranja, como una alternativa su utilización como empaque bioactivo, como alternativa respetuosa con el medio ambiente para los materiales de embalaje.

4. OBJETIVOS

4.1. Objetivo General

Evaluar las propiedades físico-mecánicas de espumas biodegradables tipo foam elaboradas mediante termoprensado, a partir de almidón de maíz, polvo de café gastado y polvo de bagazo de naranja, como una alternativa para su utilización como empaque bioactivo.

4.2. Objetivos específicos

- Establecer el proceso de elaboración de espumas bioactivas a partir de almidón de maíz y subproductos de la industria alimentaria.
- Elaborar espumas bioactivas por el método del termoprensado con diferentes formulaciones.
- Evaluar el efecto de la adición del café gastado y el bagazo de naranja en las propiedades físicas en las espumas bioactivas.
- Evaluar el efecto de la adición del café gastado y el bagazo de naranja en las propiedades mecánicas de las espumas.
- Determinar la liberación de fenoles totales en las espumas bioactivas utilizando etanol y agua como solventes de extracción.

5. MATERIALES Y MÉTODOS

5.1. Materiales

Almidón nativo de maíz (ALMEX-México), polvo de bagazo de naranja previamente caracterizado (proteína 5.1%, grasa 7.2%, ceniza 3.9%, fibra 11.5% y carbohidratos 66.7%), polvo de café gastado, estearato de magnesio para evitar la sedimentación de sólidos y como agente liberador, fibra de madera como antiapelmazante, y agua como agente espumante.

La caracterización de las películas se realizó de acuerdo al diagrama de la Figura 7. Para ello, se realizaron pruebas físicas (densidad, colorimetría y absorción de agua), mecánicas (módulo de Young, porcentaje de rotura y resistencia a la tracción) y antioxidantes (cinética de liberación de compuestos fenólicos) en los tratamientos de las espumas bioactivas formadas.

5.2. Obtención de la materia prima

El café utilizado se recolectó de la cafetería “Bubble Licious waffle & coffee” (Figura 8), el bagazo de naranja se recolectó de una juguería en el mercado municipal, ambas del municipio de Tulancingo de Bravo, Hidalgo.

5.3. Secado y tamizado

Al concluir la limpieza, se procedió a secar el residuo de café a una temperatura constante de 45 °C por 3 días en una estufa de secado por convección (Drying Oven). Finalmente, se pasó por una malla 80 mesh, para homogeneizar el tamaño de las partículas (Figura 9).

5.4. Preparación de masa

Se mezcló la fibra de madera con 80 mL de agua destilada por 5 minutos con una batidora Oster PERFORM INOX 600 W, hasta obtener una pasta deseada. Posteriormente, se agregó almidón y la pasta junto con el polvo del bagazo de naranja y el polvo de café gastado (Figura 10), se mezcló por aproximadamente 10 minutos, hasta obtener una mezcla homogénea; agregando poco a poco más agua, hasta obtener un total de 120 mL (Figura 11). Para elaborar las espumas de almidón mediante termoprensado se utilizaron 6 formulaciones (Tabla 3).

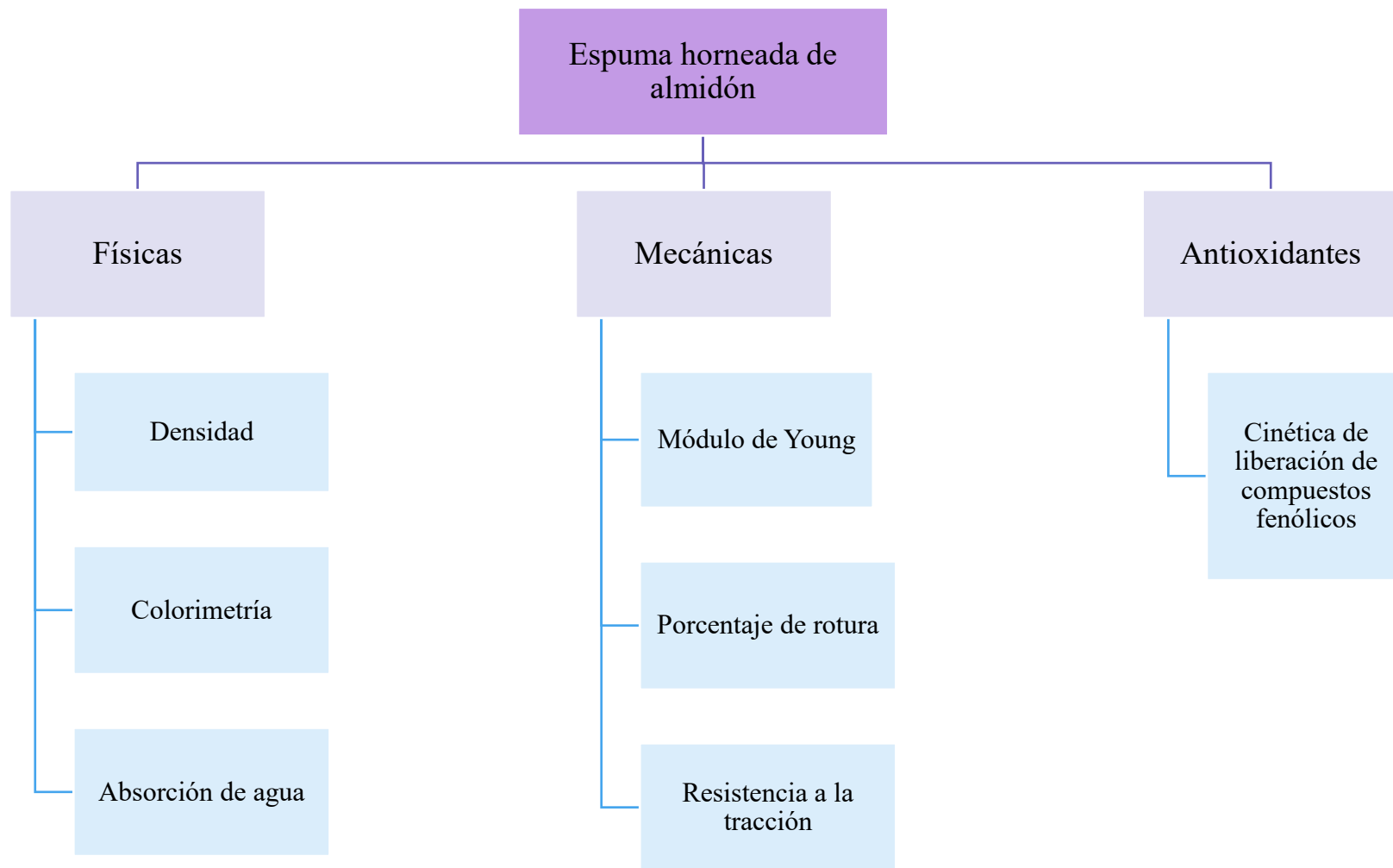


Figura 7. Diagrama de flujo de la caracterización de espumas de almidón.

Tabla 3. Formulaciones de las espumas elaboradas a partir de almidón de maíz y harina de bagazo de naranja y de café gastado.

Muestras	Almidón de maíz (g)	Agua (mL)	Harina de bagazo de naranja (g)	Harina de café gastado (g)	Fibra de madera (g)	Estearato de magnesio (g)
Control	80	80	-	-	5	1.5
BN100	80	120	18	0	5	1.5
BN75CG25	80	120	13.5	4.5	5	1.5
BN50CG50	80	120	9	9	5	1.5
BN25CG75	80	120	4.5	13.5	5	1.5
CG100	80	120	0	18	5	1.5



Figura 8. Cafetería, Crepas y Waffles “Bubble Licious waffle & coffee”.



Figura 9. Secado del café gastado.

5.5. Proceso de termoprensado

Se llevó a cabo siguiendo el método descrito por Vargas-Torres, et al., (2017), con ligeras modificaciones. Se utilizó una máquina de termoprensado de laboratorio (Hebenstreit Moldelden Germany) para hornear muestras rectangulares (0.25 cm de espesor, 16.5 cm de largo y 11.1 cm de ancho). Se precalentó el molde para hornear y se mantuvo a una temperatura de 180-185 °C. Las espumas se elaboraron colocando una muestra de masa (42 g) en el centro del molde, cerrándolo rápidamente, y horneándolo durante 2 min (Figura 12). Posteriormente, se retiraron las espumas de la máquina de horneado y se almacenaron en bolsas ziploc selladas en condiciones ambientales (25 ± 2 °C) para su uso posterior.

5.6. Caracterización de espumas de almidón

5.6.1. Propiedades físicas

5.6.1.1. Densidad

La densidad (g/cm^3) se calculó a partir de la masa (g) y el volumen (cm^3) de tiras rectangulares de espuma de 200×300 mm. Cada muestra se pesó y el volumen se calculó a partir de las mediciones de longitud, anchura y espesor.

5.6.1.2. Capacidad de absorción de agua

Se determinó utilizando muestras de espuma de 2.5 cm x 5.0 cm. Estas se pesaron y se sumergieron en 50 mL de agua destilada, agitándose a 100 rpm en un baño de agua. La cantidad de agua absorbida se determinó calculando la diferencia de peso y expresándola como masa de agua absorbida por unidad de masa de la muestra inicial.

5.6.1.3. Determinación del color

Se utilizó un colorímetro (CM-600D, Minolta, EE. UU.) para evaluar el color de las muestras. Se obtuvieron los parámetros L^* , a^* y b^* en la espuma horneada, y se realizaron 10 mediciones por muestra. La diferencia de color (ΔE) entre las muestras de espuma y el control se calculó mediante la siguiente ecuación:

$$\Delta E = [(L^* T - L^* C)^2 + (a^* T - a^* C)^2 + (b^* T - b^* C)^2]^{1/2}$$

5.6.2. Propiedades mecánicas

Se determinó utilizando una máquina de ensayos universal (Instron, Modelo 4500, Canton, MA), equipada con una celda de carga de 50 kg. Los compuestos se cortaron con una sierra de cinta en barras de tracción estándar tipo I, siguiendo el método ASTM 638M-93. La resistencia a la tracción (T_s), el módulo de Young (Y_m) y el alargamiento de rotura (E_b) se obtuvieron mediante ensayos de tracción con una velocidad de deformación de 1 mm/min. Se registró la medición promedio de diez muestras para cada tratamiento.

5.6.3. Liberación de compuestos fenólicos totales

Se determinó según la metodología de Slinkard & Singleton, (1997), con modificaciones menores. Un gramo de la muestra se disolvió en 30 mL de agua destilada. La solución se mantuvo bajo agitación constante durante 1, 4, 8, 10 y 28 h. El contenido fenólico total se determinó según el método de Folin- Ciocalteu. En resumen, se mezclaron 0,2 mL de solución de extracto compuesto de espuma de almidón con 0,5 mL de reactivo de Folin-Ciocalteu al 10% durante 3 min. Luego, se agregaron 1,5 mL de solución de carbonato de sodio al 2% (Na_2CO_3). Posteriormente, la mezcla se dejó reposar durante 40 min a temperatura ambiente y en la oscuridad. Después de transcurrido el tiempo designado, se utilizó un espectrofotómetro UV-vis (Genesys 10S Vis) para medir la absorbancia a 765 nm. Los resultados obtenidos fueron el promedio de tres repeticiones, expresados en equivalentes de ácido gálico ($\mu\text{g GAE/g}$).

5.7. Análisis estadístico

Se realizó un análisis de varianza para evaluar la significancia de las concentraciones de bagazo de naranja y café gastado en relación con las propiedades estudiadas. Todos los análisis estadísticos se realizaron con el programa informático Sigma-Stat versión 12.0. Las comparaciones de medias se realizaron mediante la prueba de Tukey ($\alpha \leq 0,05$).



Figura 10. Incorporación de celulosa.



Figura 11. Pasta formada previo al proceso de termopresado.



Figura 12. Termopresado de las espumas bioactivas.

6. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

6.1. Densidad

El parámetro de densidad presentó un intervalo de valores entre 0.284 y 0.438 g/ML presentados en la Tabla 4. Los valores de densidad registrados en el presente estudio fueron más altos que los del poliestireno expandido, cerca de 0.06 g/cm³ (Shey et al., 2006), del cartón 0.18 g/cm³ (Glenn et al., 2001). Pero similares a los reportados por otros autores para espumas hechas de almidón de trigo, maíz, tapioca, papa y yuca (0.07 – 0.41 g/cm³) (Carr et al., 2006, Cinelli et al., 2006). Schmidt (2006) reportó valores de densidad mayores que los encontrados en el presente estudio, 0.63-1.3 g/cm³, para bandejas elaboradas con el mismo almidón y las mismas fibras, pero adicionadas con CaCO₃.

La espuma control presentó menor densidad, con diferencias estadísticamente significativas ($p < 0.05$). La baja densidad de las espumas sin relleno ocurre cuando la suspensión de almidón se calienta y forma una estructura que atrapa el aire, con abundantes huecos celulares, aumentando así la porosidad interna del material y disminuyendo la densidad de la espuma (Tapia-Blácido et al., 2022; Koester et al., 2024).

La incorporación de cáscara de naranja (BN) resultó en un aumento de los valores de densidad, un fenómeno que fue más perceptible en presencia de residuos de café (CG) en la espuma biodegradable (EB). Este marcado aumento en los valores de densidad con la incorporación de CG podría atribuirse a la disolución incompleta de CG en la mezcla durante la fase de preparación de la masa (amasado), lo que puede haber influido en la expansión de la EB y, en consecuencia, afectado los valores de densidad. Un comportamiento similar fue reportado por Wanchinee et al. (2017) en EB a base de almidón de yuca, reforzado con fibra de algodón. Los investigadores informaron que un aumento en la fibra de algodón en la matriz del material aumentó los valores de densidad. Román-Moreno et al. (2020) informaron el impacto de la longitud y la cantidad de fibras de caña de azúcar en espumas horneadas a base de harina de plátano. Los hallazgos mostraron que los valores de densidad aumentaron más significativamente debido a la cantidad de fibra añadida que debido a la variable de longitud de la fibra. En este sentido, los valores de densidad más altos se asocian con una menor expansión de la espuma o un menor número de celdas en los materiales que componen a la EB.

6.2. Absorción de agua

La humedad afecta fácilmente a las espumas a base de almidón porque las moléculas de agua interfieren con los enlaces de hidrógeno, debilitando su estructura interna y funcionalidad. Por lo tanto, mejorar la resistencia al agua es esencial para mejorar su rendimiento y ampliar sus aplicaciones. El comportamiento de absorción de agua (AA) resultante de la adición de BN y CG se presenta en la Tabla 4. La EB de control mostró valores de AA de 49.52%. La incorporación de cáscara de naranja (BN) en EB resultó en un aumento en los valores de AA en comparación con la muestra control. Las muestras BN-100, BN-75/CG-25 y BN-50/CG-50 exhibieron valores de 58.03%, 60.58% y 63.29%, respectivamente. Sin embargo, estos valores no demostraron diferencias estadísticamente significativas ($\alpha \leq 0.05$). De igual forma, a medida que la adición CG aumentó en las muestras de EB (BN-25/CG-75 y CG 100), el valor de AA disminuyó hasta alcanzar 39.52%. La reducción en los valores de AA de las espumas con CG probablemente estuvo relacionada con la posible formación de enlaces covalentes entre los grupos funcionales del almidón y otros compuestos, lo que redujo la disponibilidad de grupos hidroxilo y amino y limitó las interacciones moleculares polisacárido-agua a través de enlaces de hidrógeno (Amaraweera et al., 2022).

Por otro lado, el aumento de AA en las espumas BN podría explicarse por lo reportado por Swabiiha & Pratima, (2020). Estos autores mencionan que la cáscara de naranja contiene más hemicelulosa que celulosa. Dorez et al. (2020) realizaron un estudio sobre la estabilidad de la pirólisis de la celulosa, la hemicelulosa y la lignina en fibras naturales. Estos autores informaron que la hemicelulosa comienza a degradarse antes que la celulosa, hipotetizando que esto se debe al menor grado de polimerización en comparación con la celulosa y la lignina. Según los estudios mencionados anteriormente, EB se sometió a una temperatura de 185 °C durante la producción. Esta temperatura podría inducir la despolimerización de la hemicelulosa presente en EB, exponiendo así un mayor número de grupos hidroxilo (-OH) al ambiente externo y aumentando la absorción de agua. Esta despolimerización podría conducir a un aumento en la tasa de transferencia de vapor de agua.

6.3. Cambio de color

El color de la espuma podría tener un efecto de aceptación o rechazo por parte del consumidor debido a que la preferencia del consumidor para elegir el empaque está asociada con el color blanco o transparente del empaque (Klangmuang et al., 2016). Delta E (ΔE) es una medida para comprender cómo el ojo humano percibe la diferencia de color. El término delta proviene de las matemáticas y significa cambio en una variable o función. De acuerdo con este principio, ΔE se puede clasificar en función de los valores obtenidos durante la lectura. Determinar si ΔE es menor o igual a 1 indicará que el aumento en el color de la muestra no es perceptible para el ojo humano. Cuando los valores de ΔE están entre 1 y 2, el color es perceptible mediante una observación minuciosa. Sin embargo, si los valores de ΔE determinados son mayores que 2, dentro de un intervalo de 2 a 10, la diferencia de color se puede percibir a simple vista (Brainard, 2003).

La Tabla 4 presenta los parámetros de diferencia total de color (ΔE) para las espumas. En general, la adición de residuo de café afectó significativamente los parámetros de color de la espuma ($p < 0.05$) en comparación con la espuma de control. CG100 presentó una diferencia total de color mayor, fue más de dos veces que los demás tratamientos, comportamiento similar a lo reportado por Cruz-Tirado et al., (2019).

Los valores de ΔE obtenidos de la EB se presentan en la Tabla 4. Los valores determinados a partir del intervalo de muestras de 2.59 a 14.32. Los valores obtenidos Este análisis indicó que el color mostrado en las muestras de EB era visible a simple vista. El aumento en los valores de ΔE fue más notorio a medida que aumentaba la concentración de residuos de café (CG) en los materiales de EB. Las Figuras 13 y 14 muestran un aumento significativo en ΔE ; vea las imágenes del día 0 de almacenamiento. Varias investigaciones han relacionado el oscurecimiento de las bandejas con reacciones de Maillard (pardeamiento no enzimático), como producto de la reacción entre carbohidratos y proteínas (Kaisangsri et al., 2014; Cinelli et al., 2006).

Tabla 4. Determinación de propiedades fisicoquímicas en espumas horneadas a partir de residuos alimentarios.

Tratamiento*	Densidad (g/mL)	% Absorción de agua	Color ΔE
Control	0.284±0.013 ^d	45.529±3.891 ^b	2.509±0.321 ^d
BN100	0.313±0.006 ^c	58.032±6.572 ^a	6.101±0.749 ^c
BN75CG25	0.289±0.010 ^d	60.584±5.854 ^a	6.058±0.554 ^c
BN50CG50	0.365±0.010 ^b	63.299±2.828 ^a	7.731±0.499 ^b
BN25CG75	0.415±0.009 ^a	40.698±5.034 ^{bc}	7.961±0.183 ^b
CG100	0.438±0.019 ^a	39.524±1.419 ^c	14.324±1.377 ^a

^aLos valores a son el promedio de diez determinaciones ± desviación estándar. ^bLos valores son el promedio de tres determinaciones ± desviación estándar. Las medias en la misma columna seguidas de diferentes superíndices son significativamente diferentes ($\alpha \leq 0,05$).

*Para la identificación de la muestra, consulte la Tabla 3.



Figura 13. Cambios de color en cada una de las formulaciones en masa (1) y en las espumas horneadas (2): A (control), B(BN100) y C(BN75CG25).

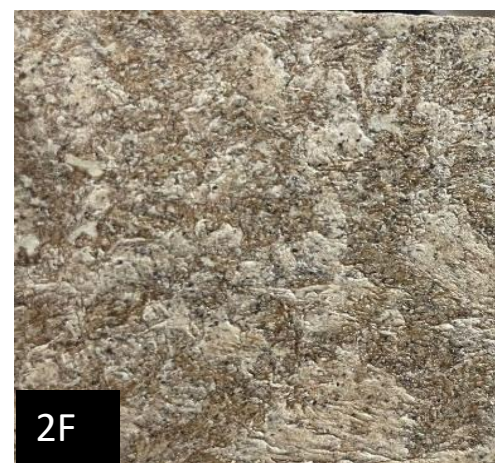
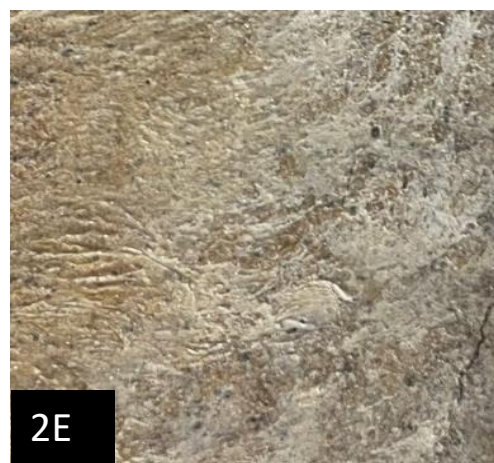


Figura 14. Cambios de color en cada una de las formulaciones en masa (1) y en las espumas horneadas (2): D(BN50CG50), E(BN25CG75), F(CG100).

6.4. Propiedades mecánicas

Las propiedades mecánicas de las espumas son una de las más importantes para su aplicación práctica. La Tabla 5 representa los valores de resistencia a la tracción (T_s), la elongación a la rotura (E_b) y el módulo de Young (Y_m) obtenidos para las espumas a base de almidón incorporadas con bagazo de naranja (BN) y café gastado (CG).

En el análisis de T_s , la muestra de control presentó valores bajos (0,101 MPa). La adición de BN y CG a diferentes concentraciones incrementó los valores de T_s en un intervalo de 0.124 MPa a 0.213 MPa. Estos valores fueron superiores a los obtenidos con el control EB (0.101 MPa), mostrando una diferencia estadísticamente significativa ($\alpha \leq 0.05$). Además, se observó que un aumento de CG en los materiales EB mejoraba las propiedades de T_s . Los valores de T_s en el estudio de Cruz-Tirado et al., (2019) fueron superior a los del presente estudio (0.67 MPa en almidón de camote y 0.65 MPa en almidón de papa *Oxalis tuberosa*). Según Wang et al. (2017), el contenido de amilosa es proporcional al tamaño de gránulo de almidón y tiene un efecto directo en la resistencia a la tracción, lo que explica los resultados para los almidones de camote y oca, con mayores contenidos de amilosa y mayor tamaño de gránulo de almidón. Lawton et al. (2016) reportaron que el uso de almidones con alto contenido de amilopectina (como el almidón de arracacha) da como resultado bandejas más ligeras y con menor resistencia. Por otro lado, según Machado et al. (2017), las propiedades de las proteínas se ven afectadas al ser sometidas a calor y fuerzas de corte, debilitando los enlaces de hidrógeno y su reordenamiento en la matriz polimérica. Este reordenamiento de los enlaces proteicos puede ser la causa de la baja densidad y fragilidad de las bandejas, en comparación con las bandejas obtenidas en otros estudios. Gaspar et al. (2005) también observaron una mejora en la resistencia a la tracción de las bandejas de almidón de maíz cuando se añadieron zeínas de maíz al 10% a la formulación. Atribuyeron este efecto y la menor absorción de agua a la compatibilidad entre ambos polímeros, lo que permitió una estructura más compacta.

Por otro lado, se observó un comportamiento similar para las propiedades E_b . Un aumento de CG resultó en un ligero aumento en los valores de E_b . El valor más alto se encontró en CG-100 con 1,147%, mientras que el valor más bajo se encontró en BN-100 con 0.658%. Se observó que este ligero aumento en los valores de T_s y E_b fue estadísticamente significativo

($\alpha \leq 0,05$) cuando la concentración de CG fue mayor a BN en las EB. Este comportamiento podría estar relacionado con lo reportado por Aila-Suarez et. Al. (2013), Marimuthu et al. (2025); Roman-Brito et al. (2020); Xiao, Liu, Kang, & Cui, Xu (2021), quienes mencionan que las propiedades mecánicas son influenciadas por la adición interfacial, grupos de enlaces de hidrógeno intermoleculares dentro de la matriz EB, lo que lleva a la formación de materiales horneados con mayor resistencia mecánica. Esto podría atribuirse a la celulosa presente en el bagazo de café, que es un polímero de mayor peso molecular en comparación con la hemicelulosa encontrada en el bagazo de naranja. El mayor peso molecular de la celulosa puede resultar en una mayor interacción química, particularmente a través de enlaces de hidrógeno, lo que podría influir en las propiedades mecánicas del material.

La adición de BN o CG a EB no mostró una diferencia estadísticamente significativa ($\alpha \leq 0,05$) en Y_m . Esto podría indicar que la adición de BN y CG a diferentes concentraciones podría no estar afectando la expansión de la EB. Estudios de Roman-Brito et al. (2020) informaron que las bajas concentraciones de fibra en este tipo de biomaterial causan una mayor expansión, lo que podría debilitar la estructura interna de los materiales, afectando su rigidez (Ver Tabla 3). Los resultados de la caracterización de las propiedades mecánicas sugieren que estos materiales (EB) son más fuertes debido a la adición de CG, sin alterar su fragilidad. Esto se evidencia por la falta de cambios en Y_m , lo que indicaría una mayor resistencia al impacto.

Tabla 5. Pruebas mecánicas en espumas horneadas a partir de residuos alimentarios.

Tratamiento*	Esfuerzo de ruptura (Mpa)	Elongación al rompimiento (%)	M. Young (MPa)
Control	0.101 ± 0.011^a	1.886 ± 0.249^d	26.749 ± 7.078^a
BN100	0.137 ± 0.002^b	0.658 ± 0.038^b	26.037 ± 2.193^a
BN75CG25	0.124 ± 0.009^b	0.510 ± 0.072^a	25.547 ± 3.706^a
BN50CG50	0.190 ± 0.008^c	1.008 ± 0.082^c	23.298 ± 1.434^a
BN25CG75	0.199 ± 0.033^c	1.152 ± 0.281^c	25.015 ± 3.082^a
Control	0.213 ± 0.010^c	1.147 ± 0.019^c	24.102 ± 0.526^a

^aLos valores a son el promedio de diez determinaciones $\pm$ desviación estándar. ^bLos valores son el promedio de tres determinaciones $\pm$ desviación estándar. Las medias en la misma columna seguidas de diferentes superíndices son significativamente diferentes ($\alpha \leq 0,05$).

*Para la identificación de la muestra, consulte la Tabla 3.

6.5. Liberación de compuestos fenólicos

La liberación de compuestos bioactivos en biopelículas para su uso como envases o contenedores de alimentos es un tema de creciente interés, ya que estos compuestos tienen el potencial de prolongar la vida útil de la fruta u otros productos (Ebrahimi Tirtashi et al., 2019; Eze, Jayeoye, & Singh, 2022; Martínez-Ortiz et al., 2019; Xiao et al., 2021). En este estudio, la tasa de liberación de compuestos fenólicos totales (véase la Tabla 6) presente en las espumas se determinó mediante la adición de BN y CG durante un intervalo de tiempo de 1 a 28 horas. La muestra de control mostró trazas de contenido fenólico en la primera hora (33 μg EAG/g), que se perdieron después de 4 horas de estudio. La liberación de compuestos fenólicos de los biomateriales orgánicos (véase la Tabla 6) mostró un aumento con el aumento del tiempo de estudio hasta las 10 horas, donde se determinó la mayor cantidad de compuestos fenólicos. Esto mostró una diferencia estadísticamente significativa ($\alpha \leq 0,05$) en comparación con las primeras 4 horas de estudio.

Sin embargo, al determinar los fenoles 18 horas después (28 h), se observó una disminución de más del 50 % en la mayoría de las muestras. Por lo tanto, el presente estudio sugiere que este fenómeno puede atribuirse a la considerable concentración de compuestos fenólicos que ya se habían lixiviado en las primeras 10 horas, y que, a las 28 horas, la cantidad de estos compuestos en la matriz del biomaterial había disminuido. Xiao et al. (2021) observaron un comportamiento similar en películas de aislado de proteína de soja con nanocristales de celulosa y nanocápsulas de curcumina.

La liberación de curcumina de la película se produce en dos etapas. En primer lugar, se produce la liberación de la curcumina presente cerca o sobre la superficie de la película (Liu et al., 2018). Xiao et al. (2021) mencionan que, en la primera etapa, las películas aún no habían alcanzado su grado máximo de hinchamiento. En consecuencia, la difusión de la curcumina se vio limitada. En la etapa posterior, cuando las películas se habían hinchado completamente, las estructuras de la red se debilitaron, lo que permitió la libre difusión de la curcumina hasta alcanzar el equilibrio. Un fenómeno similar podría ocurrir en este estudio.

Petchwattana & Naknaen, (2015) y Requena et al., (2017) estudiaron muchos enfoques para explicar el fenómeno ocurrido en la liberación de los compuestos bioactivos en la matriz polimérica. Donde mencionan que la difusión del compuesto bioactivo consistió en tres

pasos, es decir, (i) la difusión del solvente en la matriz polimérica; (ii) la relajación de la red polimérica por solvatación y plastificación; y (iii) la difusión del compuesto activo a través de la red polimérica relajada hasta la fase de equilibrio termodinámico.

Tabla 6. Liberación de compuestos fenólicos totales en las espumas bioactivas.

Muestra*	Tiempo (h)				
	1	4	8	10	28
Control	250.8 ± 22.1 ^d	332.1 ± 30.3 ^{bc}	400.8 ± 36.1 ^{ab}	430.2 ± 15.1 ^a	195.4 ± 15.3 ^c
BN100	309.6 ± 29.5 ^c	365.6 ± 32.1 ^b	419.3 ± 32.1 ^{ab}	448.7 ± 19.0 ^a	202.9 ± 14.4 ^d
BN75CG25	337.3 ± 27.5 ^d	441.8 ± 36.6 ^{bc}	487.9 ± 38.1 ^{ab}	524.3 ± 28.3 ^a	239.3 ± 20.0 ^c
BN50CG50	237.0 ± 18.5 ^d	320.6 ± 26.3 ^c	393.9 ± 32.9 ^{ab}	441.8 ± 35.1 ^a	201.8 ± 17.1 ^d
BN25CG75	225.4 ± 19.5 ^d	358.1 ± 30.5 ^c	447.5 ± 41.5 ^{ab}	472.9 ± 39.4 ^a	383.5 ± 30.9 ^{bc}
Bagazo de Naranja	1064.3 ± 78.3 ^b	1079.3 ± 80.5 ^b	1157.1 ± 81.4 ^{ab}	1229.3 ± 65.2 ^a	621.8 ± 51.9 ^c
Café Gastado	1289.3 ± 72.5 ^b	1323.3 ± 85.5 ^{ab}	1375.8 ± 94.8 ^{ab}	1456.6 ± 74.5 ^a	734.3 ± 42.5 ^c

^aLos valores a son el promedio de diez determinaciones ± desviación estándar. ^bLos valores son el promedio de tres determinaciones ± desviación estándar. Las medias en la misma columna seguidas de diferentes superíndices son significativamente diferentes ($\alpha \leq 0,05$).

*Para la identificación de la muestra, consulte la Tabla 3.

7. CONCLUSIONES

Este estudio demostró que la incorporación de residuos agroindustriales, como el bagazo de naranja y el café gastado, en espumas horneadas a base de almidón tuvo un efecto significativo en sus propiedades fisicoquímicas, mecánicas y de liberación de compuestos antioxidantes. La adición de estos subproductos modificó la densidad y la expansión del material, con mayor efecto en el café gastado debido a su baja disolución en la matriz, lo cual influyó directamente en la estructura de la espuma. Además, las propiedades de barrera, como la absorción de agua, aumentaron con el contenido de bagazo de naranja, un efecto atribuido a la despolimerización térmica de las hemicelulosas durante el horneado. Desde una perspectiva mecánica, la resistencia a la tracción y el alargamiento a la rotura mejoraron con mayores concentraciones de café gastado, sin afectar la rigidez del material. Esto se relaciona con el mayor contenido de celulosa en el café gastado, que favorece las interacciones intermoleculares dentro de la matriz del biopolímero. Finalmente, se observó que estas espumas liberan rápidamente compuestos fenólicos en las primeras 10 horas, lo cual podría aprovecharse en aplicaciones activas para el envasado de alimentos. En conjunto, estos resultados resaltan el potencial de estos materiales como alternativas sostenibles y funcionales para el desarrollo de envases biodegradables enriquecidos con residuos agroindustriales.

8. REFERENCIAS

- About Naser, A., Younis, E., El-Feky, A., Elbatanony, M., & Hamed, M. (2020). Management of Citrus sinensis peels for protection and treatment against gastric ulcer induced by ethanol in rats. *Biomarkers*, 25(4), 349-359.
- Afriliana, A., Hidayat, E., Yoshiharu, M., Taizo, M., & Harada, H. (2020). Evaluation of potency spent coffee grounds for make black compost. In *E3S Web of Conferences* (Vol. 142, p. 04002). EDP Sciences.
- Agarwal, S., Singhal, S., Godiya, C. B., & Kumar, S. (2023). Prospects and applications of starch based biopolymers. *International Journal of Environmental Analytical Chemistry*, 103(18), 6907-6926.
- Aila-Suárez, S., Palma-Rodríguez, H. M., Rodríguez-Hernández, A. I., Hernández-Uribe, J. P., Bello-Pérez, L. A., & Vargas-Torres, A. (2013). Characterization of films made with chayote tuber and potato starches blending with cellulose nanoparticles. *Carbohydrate Polymers*, 98(1), 102-107. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2013.05.022>
- Aila-Suárez, S., Palma-Rodríguez, H. M., Rodríguez-Hernández, A. I., Hernández-Uribe, J. P., Bello-Pérez, L. A., & Vargas-Torres, A. (2013). Characterization of films made with chayote tuber and potato starches blending with cellulose nanoparticles. *Carbohydrate Polymers*, 98(1), 102-107.
- Amaraweera, S. M., Gunathilake, C., Gunawardene, O. H., Dassanayake, R. S., Fernando, N. M., Wanninayaka, D. B., ... & Manipura, A. (2022). Preparation and characterization of dual-modified cassava starch-based biodegradable foams for sustainable packaging applications. *ACS omega*, 7(23), 19579-19590.
- Araujo, M. N., Azevedo, A. Q. P. L., Hamerski, F., Voll, F. A. P., & Corazza, M. L. (2019). Enhanced extraction of spent coffee grounds oil using high-pressure CO₂ plus ethanol solvents. *Industrial Crops and Products*, 141, 111723.
- ASTM D 638–10. Book of Standards, 08.01. West Conshohocken, PA, USA, p.16, 2010.
- ASTM E96/E96M – 16. (2016) Standard method for water vapor transmission of materials. In: ASTM International. West Conshohocken, PA.
- Babbar, N., Oberoi, H. S., Uppal, D. S., & Patil, R. T. (2011). Total phenolic content and antioxidant capacity of extracts obtained from six important fruit residues. *Food research international*, 44(1), 391-396.
- Balakrishnan, P., Gopi, S., MS, S., & Thomas, S. (2018). UV resistant transparent bionanocomposite films based on potato starch/cellulose for sustainable packaging. *Starch-Stärke*, 70(1-2), 1700139.

- Ballesteros, L. F., Cerqueira, M. A., Teixeira, J. A., & Mussatto, S. I. (2018). Production and physicochemical properties of carboxymethyl cellulose films enriched with spent coffee grounds polysaccharides. *International journal of biological macromolecules*, 106, 647-655.
- Ballesteros, L. F., Teixeira, J. A., & Mussatto, S. I. (2017). Extraction of polysaccharides by autohydrolysis of spent coffee grounds and evaluation of their antioxidant activity. *Carbohydrate polymers*, 157, 258-266.
- Barrera, R.A.; Ramírez, G.A.G.; Cuevas, R.V.; y Espejel García, A. Modelos de innovación en la producción de café en la Sierra Norte de Puebla-México. *Rev. Cienc. Soc.* 2021, 26, 443–458.
- Barrita-Ríos, E.E.; Espinosa-Trujillo, M.A.; Pérez-Vera, F.C.; Rentabilidad de Dos Sistemas de Producción de Café Cereza (*Coffea Arábica* L.) en Pluma Hidalgo, Oaxaca, México. Guía para Autores AGRO. 2018. Available online: <https://core.ac.uk/download/pdf/249320086.pdf> (accessed on 10 December 2022).
- Battista, F., Barampouti, E. M., Mai, S., Bolzonella, D., Malamis, D., Moustakas, K., & Loizidou, M. (2020). Added-value molecules recovery and biofuels production from spent coffee grounds. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 131, 110007.
- Bénézet, J. C., Stanojlovic-Davidovic, A., Bergeret, A., Ferry, L., & Crespy, A. (2012). Mechanical and physical properties of expanded starch, reinforced by natural fibres. *Industrial Crops and Products*, 37(1), 435-440.
- Bergel, B. F., da Luz, L. M., & Santana, R. M. C. (2017). Comparative study of the influence of chitosan as coating of thermoplastic starch foam from potato, cassava and corn starch. *Progress in Organic Coatings*, 106, 27-32.
- Bergel, B. F., Osorio, S. D., da Luz, L. M., & Santana, R. M. C. (2018). Effects of hydrophobized starches on thermoplastic starch foams made from potato starch. *Carbohydrate Polymers*, 200, 106-114.
- Bernaerts, T. M., Gheysen, L., Foubert, I., Hendrickx, M. E., & Van Loey, A. M. (2019). The potential of microalgae and their biopolymers as structuring ingredients in food: A review. *Biotechnology advances*, 37(8), 107419.
- Brainard, D. H. (2003). Color Appearance and Color Difference Specification. In S. K. Shevell (Ed.), *The science of color* (2nd ed., pp. 191–216). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-044451251-2/50006-4>
- Buniowska, M., Carbonell-Capella, J., Zulueta, A., Frigola, A., & Esteve, M. J. (2015). Bioaccessibility of bioactive compounds and antioxidant capacity from orange peel after pulsed electric fields and high voltage electrical discharges. *MOJ Food Process. Technol*, 1, 17.

- Burrell, M. M. (2003). Starch: the need for improved quality or quantity—an overview. *Journal of experimental Botany*, 54(382), 451-456.
- Kaur, B., Ariffin, F., Bhat, R., & Karim, A. A. (2012). Progress in starch modification in the last decade. *Food hydrocolloids*, 26(2), 398-404.
- Buxoo, S., & Jeetah, P. (2020). Feasibility of producing biodegradable disposable paper cup from pineapple peels, orange peels and Mauritian hemp leaves with beeswax coating. *SN Applied Sciences*, 2(8), 1359. <https://doi.org/10.1007/s42452-020-3164-7>
- Caggia, C., Palmeri, R., Russo, N., Timpone, R., Randazzo, C. L., Todaro, A., & Barbagallo, S. (2020). Employ of citrus by-product as fat replacer ingredient for bakery confectionery products. *Frontiers in nutrition*, 7, 46.
- Calabrò, P. S., Paon, E., & Komili, D. (2018). Strategies for the sustainable management of orange peel waste through anaerobic digestion. *Journal of Environmental Management*, 212, 462-468. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2018.02.039>
- Camila da Silva Figueiró, Carmen Iara Walter Calcagno, and Ruth Marlene Campomanes Santana 2023. Starch Foams and Their Additives: A Brief Review. <https://doi.org/10.1002/star.202300012>
- Campos-Vega, R., Loarca-Pina, G., Vergara-Castañeda, H. A., & Oomah, B. D. (2015). Spent coffee grounds: A review on current research and future prospects. *Trends in Food Science & Technology*, 45(1), 24-36.
- Carr, L. G., Parra, D. F., Ponce, P., Lugão, A. B., & Buchler, P. M. (2006). Influence of fibers on the mechanical properties of cassava starch foams. *Journal of Polymers and the Environment*, 14(2), 179-183.
- CDERSSA. Centro de Estudios para el Desarrollo Rural Sustentable y la Soberanía Alimentaria. Reporte el Café en México Diagnóstico y Perspectiva. 2018. Available online: <http://www.cedrssa.gob.mx/> (accessed on 20 November 2022).
- Chan, S. Y., Choo, W. S., Young, D. J., & Loh, X. J. (2017). Pectin as a rheology modifier: Origin, structure, commercial production and rheology. *Carbohydrate polymers*, 161, 118-139.
- Cinelli, P., Chiellini, E., Lawton, J. W., & Imam, S. H. (2006). Foamed articles based on potato starch, corn fibers and poly (vinyl alcohol). *Polymer Degradation and Stability*, 91(5), 1147-1155.
- Coelho, G. O., Batista, M. J., Ávila, A. F., Franca, A. S., & Oliveira, L. S. (2021). Development and characterization of biopolymeric films of galactomannans recovered from spent coffee grounds. *Journal of Food Engineering*, 289, 110083.

- Crawshaw, R. (2003). Co-product feeds: Animal feeds from the food and drinks industries R
Crawshaw Nottingham University Press, Nottingham, 2001 pp 285, price£ 30.00
(paperback) ISBN 1-897676-35-2. *Journal of the Science of Food and
Agriculture*, 83(4), 362-362.<https://doi.org/10.1002/jsfa.1326>
- Cruz-Tirado, J. P., Siche, R., Cabanillas, A., Díaz-Sánchez, L., Vejarano, R., & Tapia-Blácido,
D. R. (2017). Properties of baked foams from oca (*Oxalis tuberosa*) starch reinforced
with sugarcane bagasse and asparagus peel fiber. *Procedia engineering*, 200, 178-185.
- Cruz-Tirado, J. P., Vejarano, R., Tapia-Blácido, D. R., Barraza-Jáuregui, G., & Siche, R.
(2019). Biodegradable foam tray based on starches isolated from different Peruvian
species. *International journal of biological macromolecules*, 125, 800-807.
- Cypriano, D. Z., Lopes da Silva, L., & Tasic, L. (2018). High value-added products from the
orange juice industry waste. *Waste Management*, 79, 71-78.
<https://doi.org/10.1016/j.wasman.2018.07.028>
- da Silva Figueiró, C., Trojaner, M. R., Calcagno, C. I. W., & Santana, R. M. C. (2022).
Rheological and structural characterization of cassava starches foam with low and high
amylose contents. *Journal of Polymer Research*, 29(1), 30.
- Debiagi, F., Marim, B. M., & Mali, S. (2015). Properties of cassava bagasse and polyvinyl
alcohol biodegradable foams. *Journal of Polymers and the Environment*, 23(2), 269-
276.
- Delia Rita Tapia-Blacido, Guilherme Jose Aguilar, Mateus Teixeira de Andrade, Marcio F.
Rodrigues-Júnior, Fernanda C. Guareschi-Martins. 2022. Trends and challenges of
starch-based foams for use as food packaging and food container.
<https://doi.org/10.1016/j.tifs.2021.12.005>
- Di Donna, L., Bartella, L., De Vero, L., Gullo, M., Giuffrè, A. M., Zappia, C., ... & Caridi,
A. (2020). Vinegar production from Citrus bergamia by-products and preservation of
bioactive compounds. *European Food Research and Technology*, 246(10), 1981-1990.
- Din, M. I., Ghaffar, T., Najeeb, J., Hussain, Z., Khalid, R., & Zahid, H. (2020). Potential
perspectives of biodegradable plastics for food packaging application-review of
properties and recent developments. *Food Additives & Contaminants: Part A*, 37(4),
665-680. . <https://doi.org/10.1080/19440049.2020.1718219>
- Donald, AM; Jenkins, P.; Waigh, T. A. Scientific Highlights from Annual Report. ISIS 97
(1997). ISIS Facility Annual Report 1996–97. RAL-TR-97-050. Council for the Central
Laboratory of the Research Councils, The Rutherford Appleton Laboratory:
Oxfordshire, U.K.; p 54.
- Dorez, G., Ferry, L., Sonnier, R., Taguet, A., & Lopez-Cuesta, J. M. (2014). Effect of
cellulose, hemicellulose and lignin contents on pyrolysis and combustion of natural

- fibers. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 107, 323-331. <https://doi.org/10.1016/j.jaap.2014.03.017>
- Ebrahimi Tirtashi, F., Moradi, M., Tajik, H., Forough, M., Ezati, P., & Kuswandi, B. (2019). Cellulose/chitosan pH-responsive indicator incorporated with carrot anthocyanins for intelligent food packaging. *International Journal of Biological Macromolecules*, 136, 920-926. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2019.06.148>
- Engel, J. B. (2018). Propriedades de espumas à base de amido de mandioca com incorporação de engão de uva.
- Engel, J. B., Ambrosi, A., & Tessaro, I. C. (2019). Development of biodegradable starch-based foams incorporated with grape stalks for food packaging. *Carbohydrate Polymers*, 225, 115234. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2019.115234>
- Escamilla, P.; y Díaz, C.S. (2002). *Sistemas de Cultivo de Café en México*; Universidad Autónoma de Chapingo & Fundación Produce: Huatusco, México.
- Esquivel, P., & Jimenez, V. M. (2012). Functional properties of coffee and coffee by-products. *Food research international*, 46(2), 488-495.
- Eze, F. N., Jayeoye, T. J., & Singh, S. (2022). Fabrication of intelligent pH-sensing films with antioxidant potential for monitoring shrimp freshness via the fortification of chitosan matrix with broken Riceberry phenolic extract. *Food Chemistry*, 366, 130574. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2021.130574>
- Fahimeh Ebrahimi Tirtashi, Mehran Moradi, Hossein Tajik, Mehrdad Forough, Parya Ezati, Bambang Kuswandi. 2019. *International Journal of Biological Macromolecules* 136 (2019) 920–926. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2019.06.148>
- FAO (Food and Agriculture Organization of the United Nations). (2021). *Citrus Fruit Statical Compendium*. Italy, Rome: FAO. Consultado el 20 de enero, 2022, desde: Consultado el 20 de enero, 2022, desde: <https://www.fao.org/3/cb6492en/cb6492en.pdf>.
- Fazzino, F., Mauriello, F., Paone, E., Sidari, R., & Calabrò, P. S. (2021). Integral valorization of orange peel waste through optimized ensiling: Lactic acid and bioethanol production. *Chemosphere*, 271, 129602. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2021.129602>
- Fernandes, A. S., Mello, F. V. C., Thode Filho, S., Carpes, R. M., Honório, J. G., Marques, M. R. C., . . . Ferraz, E. R. A. (2017). Impacts of discarded coffee waste on human and environmental health. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 141, 30-36. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2017.03.011>
- Figueiró, C. d. S., Calcagno, C. I. W., & Santana, R. M. C. (2024). Starch Foams and Their Additives: A Brief Review. 76(3-4), 2300012. <https://doi.org/10.1002/star.202300012>

- Foti, P., Ballistreri, G., Timpanaro, N., Rapisarda, P., & Romeo, F. V. (2022). Prebiotic effects of citrus pectic oligosaccharides. *Natural product research*, 36(12), 3173-3176.
- Fredrick Nwude Eze, Titilope John Jayeoye, Sudarshan Singh. 2022. Fabrication of intelligent pH-sensing films with antioxidant potential for monitoring shrimp freshness via the fortification of chitosan matrix with broken Riceberry phenolic extract. *Food Chemistry* 366 (2022) 130574. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2021.130574>
- Garcia, C. V., & Kim, Y. T. (2021). Spent coffee grounds and coffee silverskin as potential materials for packaging: A review. *Journal of Polymers and the Environment*, 29(8), 2372-2384.
- Garcia, M. A., Ferrero, C., Bertola, N., Martino, M., & Zaritzky, N. (2002). Edible coatings from cellulose derivatives to reduce oil uptake in fried products. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 3(4), 391-397.
- García-García, D., Carbonell, A., Samper, M. D., García-Sanoguera, D., & Balart, R. (2015). Green composites based on polypropylene matrix and hydrophobized spend coffee ground (SCG) powder. *Composites part B: engineering*, 78, 256-265.
- García-Salazar, J. A., Bautista-Mayorga, F., Borja-Bravo, M., & Gúzman-Soria, E. (2021). Variación de los precios de la naranja (*Citrus sinensis* L.) en México. *Agronomía Mesoamericana*, 32(1), 209-223. <https://doi.org/10.15517/am.v32i1.40679>
- Georges, A., Lacoste, C., & Damien, E. (2018). Effect of formulation and process on the extrudability of starch-based foam cushions. *Industrial Crops and Products*, 115, 306-314.
- Ghanbarzadeh, B., Almasi, H., & Entezami, A. A. (2010). Physical properties of edible modified starch/carboxymethyl cellulose films. *Innovative food science & emerging technologies*, 11(4), 697-702.
- Ghasemlou, M., Daver, F., Murdoch, B. J., Ball, A. S., Ivanova, E. P., & Adhikari, B. (2022). Biodegradation of novel bioplastics made of starch, polyhydroxyurethanes and cellulose nanocrystals in soil environment. *Science of the Total Environment*, 815, 152684.
- Glenn, G. M., Orts, W. J., & Nobes, G. A. R. (2001). Starch, fiber and CaCO₃ effects on the physical properties of foams made by a baking process. *Industrial Crops and products*, 14(3), 201-212.
- Gomes, T., Pereira, J. A., Ramalhosa, E., Casal, S., & Baptista, P. (2013). Effect of Fresh and Composted Spent Coffee Grounds on Lettuce Growth. In *Photosynthetic Pigments and Mineral Composition, Agroingeniería VII and Iberian Congress of Horticultural Science*, Madrid, Spain.

- Gómez-Luría, D., Vernon-Carter, E. J., & Alvarez-Ramirez, J. (2017). Films from corn, wheat, and rice starch ghost phase fractions display overall superior performance than whole starch films. 69(11-12), 1700059. <https://doi.org/10.1002/star.201700059>
- Gorinstein, S., Martin-Belloso, O., Park, Y. S., Haruenkit, R., Lojek, A., Ciz, M., ... Trakhtenberg, S. (2001). Comparison of some biochemical characteristics of different citrus fruits. *Food Chemistry*, 74, 309–315.
- Gutiérrez y Alvarez, 2017. Gutiérrez, T. J., & Alvarez, V. A. (2017). Cellulosic materials as natural fillers in starch-containing matrix-based films: A review. *Polymer Bulletin*, 74(6), 2401-2430.
- Hoseney, 2010 Hoseney, R. C. (1986). Principles of cereal science and technology. A general reference on cereal foods (p. 327pp).
- Huang, X., Liu, Y., Zou, Y., Liang, X., Peng, Y., McClements, D. J., & Hu, K. (2019). Encapsulation of resveratrol in zein/pectin core-shell nanoparticles: Stability, bioaccessibility, and antioxidant capacity after simulated gastrointestinal digestion. *Food Hydrocolloids*, 93, 261-269.
- Ishika Gupta, L. C. (2022). Biopolymers: Implications and application in the food industry. *ELSEVIER*, 2. doi:<https://doi.org/10.1016/j.bcab.2022.102534>
- Jandas, P. J., Mohanty, S., & Nayak, S. K. (2012). Renewable resource-based biocomposites of various surface treated banana fiber and poly lactic acid: characterization and biodegradability. *Journal of Polymers and the Environment*, 20(2), 583-595.
- Jebalia, I., Maigret, J. E., Réguerre, A. L., Novales, B., Guessasma, S., Lourdin, D., ... & Kristiawan, M. (2019). Morphology and mechanical behaviour of pea-based starch-protein composites obtained by extrusion. *Carbohydrate Polymers*, 223, 115086.
- Jeon, J. S., Ryoo, N., Hahn, T. R., Walia, H., & Nakamura, Y. (2010). Starch biosynthesis in cereal endosperm. *Plant physiology and Biochemistry*, 48(6), 383-392.
- Jiang, T., Duan, Q., Zhu, J., Liu, H., & Yu, L. (2020). Starch-based biodegradable materials: Challenges and opportunities. *Advanced Industrial and Engineering Polymer Research*, 3(1), 8-18. <https://doi.org/10.1016/j.aiepr.2019.11.003>
- Jiménez, A., Fabra, M. J., Talens, P., & Chiralt, A. (2010). Effect of lipid self-association on the microstructure and physical properties of hydroxypropyl-methylcellulose edible films containing fatty acids. *Carbohydrate Polymers*, 82(3), 585-593.
- Jridi, M., Abdelhedi, O., Salem, A., Kechaou, H., Nasri, M., & Menchari, Y. (2020). Physicochemical, antioxidant and antibacterial properties of fish gelatin-based edible films enriched with orange peel pectin: Wrapping application. *Food Hydrocolloids*, 103, 105688.

- K. Slinkard, VL Singleton, (1997). Análisis de fenol total: automatización y comparación con métodos manuales, *Am. J. Enol. Vític.* 28(1) 49.
<https://doi.org/10.5344/ajev.1977.28.1.49>.
- Kabir, M. E., Saha, M. C., & Jeelani, S. (2006). Tensile and fracture behavior of polymer foams. *Materials Science and Engineering: A*, 429(1), 225-235.
<https://doi.org/10.1016/j.msea.2006.05.133>
- Kaewtatip, K., Chiarathanakrit, C., & Riyajan, S. A. (2018). The effects of egg shell and shrimp shell on the properties of baked starch foam. *Powder Technology*, 335, 354-359.
- Kaisangsri, N., Kerdchoechuen, O., & Laohakunjit, N. (2014). Characterization of cassava starch based foam blended with plant proteins, kraft fiber, and palm oil. *Carbohydrate polymers*, 110, 70-77.
- Kaisangsri, N., Kowalski, R. J., Kerdchoechuen, O., Laohakunjit, N., & Ganjyal, G. M. (2019). Cellulose fiber enhances the physical characteristics of extruded biodegradable cassava starch foams. *Industrial crops and products*, 142, 111810.
- Kasemsiri, P., Dulsang, N., Pongsa, U., Hiziroglu, S., & Chindaprasirt, P. (2017). Optimization of biodegradable foam composites from cassava starch, oil palm fiber, chitosan and palm oil using Taguchi method and grey relational analysis. *Journal of Polymers and the Environment*, 25(2), 378-390.
- Khalil, A. P. S. A., Yap, S. W., Tye, Y. Y., Tahir, P. M., Rizal, S., & Fazita, M. N. (2018). Effects of corn starch and *Kappaphycus alvarezii* seaweed blend concentration on the optical, mechanical, and water vapor barrier properties of composite films. *BioResources*, 13(1), 1157-1173.
- Klangmuang P , Sothornvit R. Propiedades de barrera, propiedades mecánicas y actividad antimicrobiana de películas nanocompuestas a base de hidroxipropilmetilcelulosa con aceites esenciales tailandeses . *Food Hydrocoll* . 2016 ; 61 (Suplemento C) : 609-616 .
- Kocaman, S., Karaman, M., Gursoy, M., & Ahmetli, G. (2017). Chemical and plasma surface modification of lignocellulose coconut waste for the preparation of advanced biobased composite materials. *Carbohydrate polymers*, 159, 48-57.
- Koester, D. L., Gomes, L. M., Dresch, A. P., Matsuo, T. T., Dos Santos, D. F., Bender, J. P., ... & Pinto, V. Z. (2024). Biodegradable starch foams reinforced by food-chain side streams. *International Journal of Biological Macromolecules*, 275, 133386.
- Kotharangannagari, V. K., & Krishnan, K. (2016). Biodegradable hybrid nanocomposites of starch/lysine and ZnO nanoparticles with shape memory properties. *Materials & design*, 109, 590-595.

- Kovalcik, A., Obruca, S., & Marova, I. (2018). Valorization of spent coffee grounds: A review. *Food and Bioproducts Processing*, 110, 104-119.
- Labeaga Viteri, A. (2018). Polímeros biodegradables. Importancia y potenciales aplicaciones.
- Larrea, M. A., Chang, Y. K., & Martínez-Bustos, F. (2005). Effect of some operational extrusion parameters on the constituents of orange pulp. *Food Chem*, 89, 301–308.
- Laufenberg, G., Kunz, B., & Nystroem, M. (2003). Transformation of vegetable waste into value added products: (A) the upgrading concept; (B) practical implementations. *Bioresource Technology*, 87, 167–198.
- Le Corre, Bras y Dufresne, 2010. Le Corre, D., Bras, J., & Dufresne, A. (2010). Starch nanoparticles: a review. *Biomacromolecules*, 11(5), 1139-1153.
- Lemos, P. V. F., Barbosa, L. S., Ramos, I. G., Coelho, R. E., & Druzian, J. I. (2019). Characterization of amylose and amylopectin fractions separated from potato, banana, corn, and cassava starches. *International Journal of Biological Macromolecules*, 132, 32-42.
- Liu, J., Wang, H., Wang, P., Guo, M., Jiang, S., Li, X., & Jiang, S. (2018). Films based on κ -carrageenan incorporated with curcumin for freshness monitoring. *Food Hydrocolloids*, 83, 134-142. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2018.05.012>
- Liu, J., Wang, X., Bai, R., Zhang, N., Kan, J., & Jin, C. (2018). Synthesis, characterization, and antioxidant activity of caffeic-acid-grafted corn starch. *Starch-Stärke*, 70(1-2), 1700141.
- Machado, C. M., Benelli, P., & Tessaro, I. C. (2017). Sesame cake incorporation on cassava starch foams for packaging use. *Industrial Crops and Products*, 102, 115-121.
- Marimuthu, S., Saikumar, A., & Badwaik, L. S. (2025). Development and characterization of biodegradable foam plates from corn starch and banana bunch stalks coated with beeswax. *Biomass Conversion and Biorefinery*, 15(5), 7763-7777. . <https://doi.org/10.1007/s13399-024-05782-0>
- Martinez, C. L. M., Rocha, E. P. A., Carneiro, A. D. C. O., Gomes, F. J. B., Batalha, L. A. R., Vakkilainen, E., & Cardoso, M. (2019). Characterization of residual biomasses from the coffee production chain and assessment the potential for energy purposes. *Biomass and Bioenergy*, 120, 68-76.
- Martínez-Ortiz, M. A., Palma-Rodríguez, H. M., Montalvo-González, E., Sáyago-Ayerdi, S. G., Utrilla-Coello, R., & Vargas-Torres, A. (2019). Effect of using microencapsulated ascorbic acid in coatings based on resistant starch chayotextle on the quality of guava fruit. *Scientia Horticulturae*, 256, 108604. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2019.108604>

- McNutt, J. (2019). Spent coffee grounds: A review on current utilization. *Journal of industrial and engineering chemistry*, 71, 78-88.
- Mello, L. R., & Mali, S. (2014). Use of malt bagasse to produce biodegradable baked foams made from cassava starch. *Industrial Crops and Products*, 55, 187-193.
- Mendes, J. F., Paschoalin, R. T., Carmona, V. B., Neto, A. R. S., Marques, A. C. P., Marconcini, J. M., ... & Oliveira, J. E. (2016). Biodegradable polymer blends based on corn starch and thermoplastic chitosan processed by extrusion. *Carbohydrate polymers*, 137, 452-458.
- Montgomery, E. M., & Senti, F. R. (1958). Separation of amylose from amylopectin of starch by an extraction-sedimentation procedure. *Journal of Polymer Science*, 28(116), 1-9.
- Moreno, O., Atarés, L., & Chiralt, A. (2015). Effect of the incorporation of antimicrobial/antioxidant proteins on the properties of potato starch films. *Carbohydrate polymers*, 133, 353-364.
- Morikawa, C. K., & Saigusa, M. (2011). Recycling coffee grounds and tea leaf wastes to improve the yield and mineral content of grains of paddy rice. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 91(11), 2108-2111.
- Murthy, P. S., & Madhava Naidu, M. (2012). Sustainable management of coffee industry by-products and value addition—A review. *Resources, Conservation and Recycling*, 66, 45-58. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2012.06.005>
- Mussatto, S. I., Carneiro, L. M., Silva, J. P., Roberto, I. C., & Teixeira, J. A. (2011). A study on chemical constituents and sugars extraction from spent coffee grounds. *Carbohydrate polymers*, 83(2), 368-374.
- Narita, Y., & Inouye, K. (2014). Review on utilization and composition of coffee silverskin. *Food Research International*, 61, 16-22.
- Negro, V., Ruggeri, B., Fino, D., & Tonini, D. (2017). Life cycle assessment of orange peel waste management. *Resources, Conservation and Recycling*, 127, 148-158. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2017.08.014>
- North, E. J., & Halden, R. U. (2013). Plastics and environmental health: The road ahead. *Reviews on Environmental Health*, 28(1), 1–8. <https://doi.org/10.1515/reveh-2012-0030>.
- OIC. Organización Internacional del Café (OIC). Available online: <https://www.cancilleria.gov.co/international/multilateral/inter-governmental/ico> (accessed on 20 November 2022).
- Oliveira, C. F. P. (2015). Obtenção e caracterização de amido termoplástico e de suas misturas com polipropileno. 197p.

- Online, V. (2025). *¿Cómo aprovechar el bagazo de mi café?* Café La Flor De Córdoba. <https://www.cafelaflordecordoba.com/blogs/blog/como-aprovechar-el-bagazo-de-mi-cafe>
- Paiva, D., Pereira, A. M., Pires, A. L., Martins, J., Carvalho, L. H., & Magalhães, F. D. (2018). Reinforcement of thermoplastic corn starch with crosslinked starch/chitosan microparticles. *Polymers*, 10(9), 985.
- Parker y Ring, 2001; Parker, R., & Ring, S. G. (2001). Aspects of the physical chemistry of starch. *Journal of Cereal Science*, 34(1), 1-17.
- Pérez-Sariñana, B. Y., & Saldaña-Trinidad, S. (2017). Chemistry and biotransformation of coffee by-products to biofuels. In *The Question of Caffeine*. IntechOpen.
- Petchwattana, N., & Naknaen, P. (2015). Utilization of thymol as an antimicrobial agent for biodegradable poly (butylene succinate). *Materials Chemistry and Physics*, 163, 369 - 375.
- Phillips, G. O., & Williams, P. A. (Eds.). (2009). *Handbook of hydrocolloids*. Elsevier.
- Plastics Europe (2020). *Plásticos-Situación (2020)*. Un análisis de los datos sobre producción, demanda y residuos de plásticos en Europa. Recuperado de: https://plasticseurope.org/es/wp-content/uploads/sites/4/2021/11/ES_Plastics_the_facts-WEB-2020_May21_final_updatedJuly2021.pdf. Consultado el 14 de mayo del 2025.
- Polat, S., Uslu, M. K., Aygün, A., & Certel, M. (2013). The effects of the addition of corn husk fibre, kaolin and beeswax on cross-linked corn starch foam. *Journal of Food Engineering*, 116(2), 267-276.
- Pollak, L. M., Scott, M. P., & Scott, M. P. (2005). Breeding for grain quality traits.
- Prachayawarakorn, J., & Hanchana, A. (2017). Effect of neem wood sawdust content on properties of biodegradable thermoplastic acetylated cassava starch/neem wood sawdust composites. *Starch-Stärke*, 69(3-4), 1600113.
- Rafiq, S., Kaul, R., Sofi, S. A., Bashir, N., Nazir, F., & Nayik, G. A. (2018). Citrus peel as a source of functional ingredient: A review. *Journal of the Saudi Society of Agricultural Sciences*, 17(4), 351-358.
- Requena, R., Vargas, M., & Chiralt, A. (2017). Release kinetics of carvacrol and eugenol from poly (hydroxybutyrate-co-hydroxyvalerate)(PHBV) films for food packaging applications. *European Polymer Journal*, 92, 185-193.
- Reis, M. O., Olivato, J. B., Bilck, A. P., Zanela, J., Grossmann, M. V. E., & Yamashita, F. (2018). Biodegradable trays of thermoplastic starch/poly (lactic acid) coated with beeswax. *Industrial Crops and Products*, 112, 481-487.

- Rivera, R.C.R. Competitiveness of the Mexican coffee in international trade: A comparative analysis with Brazil, Colombia, and Peru (2000–2019). *Análisis Econ.* 2022, 37, 181–199.
- Roman-Brito, J. A., Juárez-López, A. L., Rosas-Acevedo, J. L., de J. Berrios, J., Glenn, G., Klamczynski, A., . . . Vargas-Torres, A. (2020). Physicomechanical Properties and Biodegradation Rate of Composites Made from Plantain and Chayotextle Starch/Fiber. *Journal of Polymers and the Environment*, 28(10), 2710-2719. . <https://doi.org/10.1007/s10924-020-01805-9>
- Román-Moreno, J. L., Radilla-Serrano, G. P., Flores-Castro, A., Berrios, J. D. J., Glenn, G., Salgado-Delgado, A., . . . Vargas-Torres, A. (2020). Effect of size and amount of sugarcane fibers on the properties of baked foams based on plantain flour. *Heliyon*, 6(9), e04927. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2020.e04927>
- Romero-Lopez, M. R., Osorio-Diaz, P., Bello-Perez, L. A., Tovar, J., & Bernardino-Nicanor, A. (2011). Fiber concentrate from orange (*Citrus sinensis* L.) bagasse: Characterization and application as bakery product ingredient. *International Journal of Molecular Sciences*, 12(4), 2174-2186.
- Rosas, A.J.; Escamilla, P.E.; Ruiz, R.O. Relación de los nutrimentos del suelo con las características físicas y sensoriales del café orgánico. *Terra Latinoam.* 2008, 26, 375–384. Available online: http://www.scielo.org.mx/scielo.php?pid=S0187-57792008000400010&script=sci_arttext (accessed on 10 December 2022).
- Ruijuan Zhang, Yanqun Su, Tao Zhao, Jingang Liu, Hongjie Zhang, Leilei Hou, Xianling Fu, Qi Chen. Degradable Foam Tray Based on High-concentration Dispersed Cellulose Fibers Obtained by a Hot-press Baking Process. DOI: 10.26599/PBM.2023.9260022
- Saleh, A. A., Saleh, M. A., Al Haron, M. H., & Farag, M. (2017). Insights into the effect of moisture absorption and fiber content on the mechanical behavior of starch–date-palm fiber composites. *Starch-Stärke*, 69(7-8), 1600254.
- Sanhawong, W., Banhalee, P., Boonsang, S., & Kaewpirom, S. (2017). Effect of concentrated natural rubber latex on the properties and degradation behavior of cotton-fiber-reinforced cassava starch biofoam. *Industrial Crops and Products*, 108, 756-766. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2017.07.046>
- Sant’Anna, V., Biondo, E., Kolchinski, E. M., da Silva, L. F. S., Corrêa, A. P. F., Bach, E., & Brandelli, A. (2017). Total polyphenols, antioxidant, antimicrobial and allelopathic activities of spend coffee ground aqueous extract. *Waste and Biomass Valorization*, 8(2), 439-442.

- Santi, G., Crognale, S., D'annibale, A., Petruccioli, M., Ruzzi, M., Valentini, R., & Moresi, M. (2014). Orange peel pretreatment in a novel lab-scale direct steam-injection apparatus for ethanol production. *biomass and bioenergy*, 61, 146-156.
- Santos, C., Fonseca, J., Aires, A., Coutinho, J., & Trindade, H. (2017). Effect of different rates of spent coffee grounds (SCG) on composting process, gaseous emissions and quality of end-product. *Waste management*, 59, 37-47.
- Schmidt, V. C. (2006). Desenvolvimento de embalagens biodegradáveis a partir da fécula de cassava, calcário e fibra de celulose. Dissertação, ao de Mestrado em Engenharia de Alimentos. Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC), Florianópolis, Brazil.
- Shang, Y. F., Xu, J. L., Lee, W. J., & Um, B. H. (2017). Antioxidative polyphenolics obtained from spent coffee grounds by pressurized liquid extraction. *South African Journal of Botany*, 109, 75-80.
- Sharma, G., Wu, W., & Dalal, E. N. (2005). The CIEDE2000 color-difference formula: Implementation notes, supplementary test data, and mathematical observations. 30(1), 21-30. <https://doi.org/10.1002/col.20070>
- Shekar, H. S., & Ramachandra, M. J. M. T. P. (2018). Green composites: a review. *Materials Today: Proceedings*, 5(1), 2518-2526.
- Shey, J., Imam, S. H., Glenn, G. M., & Orts, W. J. (2006). Properties of baked starch foam with natural rubber latex. *Industrial crops and products*, 24(1), 34-40.
- Shibanuma, K., Takeda, Y., Hizukuri, S., & Shibata, S. (1994). Molecular structures of some wheat starches. *Carbohydrate polymers*, 25(2), 111-116.
- Shit, S. C., & Shah, P. M. (2014). Edible polymers: challenges and opportunities. *Journal of Polymers*, 2014(1), 427259.
- Shogren, R. L., Lawton, J. W., Doane, W. M., & Tiefenbacher, K. F. (1998). Structure and morphology of baked starch foams. *Polymer*, 39(25), 6649-6655.
- Shweta Suri, A. S. (2022). Current applications of citrus fruit processing waste: A scientific outlook. *ELSEVIER*, 2. doi:<https://doi.org/10.1016/j.afres.2022.100050>
- SIAP (Sistema de Información Agroalimentaria y Pesquera). (2021). Anuario estadístico de la producción agrícola. Consultado el 1 de julio, 2022, desde <https://www.gob.mx/siap/acciones-y-programas/produccion-agricola-33119>
- Siddique, A., Nayak, A. K., & Singh, J. (2020). Synthesis of FeCl₃-activated carbon derived from waste Citrus limetta peels for removal of fluoride: An eco-friendly approach for the treatment of groundwater and bio-waste collectively. *Groundwater for sustainable development*, 10, 100339.

- Sjöqvist, M., & Gatenholm, P. (2005). The effect of starch composition on structure of foams prepared by microwave treatment. *Journal of Polymers and the Environment*, 13(1), 29-37.
- Slinkard, K., & Singleton, V. L. (1977). Total Phenol Analysis: Automation and Comparison with Manual Methods. *American Journal of Enology and Viticulture*, 28(1), 49. .
<https://doi.org/10.5344/ajev.1977.28.1.49>
- Soykeabkaew, N., Thanomsilp, C., & Suwantong, O. (2015). A review: Starch-based composite foams. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 78, 246-263.
- Stoffel, F. (2015). Desenvolvimento de espumas à base de amido de mandioca. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Processos e Tecnologias). Universidade de Caxias do Sul.
- Su, D. L., Li, P. J., Quek, S. Y., Huang, Z. Q., Yuan, Y. J., Li, G. Y., & Shan, Y. (2019). Efficient extraction and characterization of pectin from orange peel by a combined surfactant and microwave assisted process. *Food chemistry*, 286, 1-7.
- Swabiiha Buxoo and Pratima Jeetah. (2020). Feasibility of producing biodegradable disposable paper cup from pineapple peels, orange peels and Mauritian hemp leaves with beeswax coating. *SN Applied Sciences* (2020) 2:1359 |
<https://doi.org/10.1007/s42452-020-3164-7>
- Tapia-Blácido, D. R., Aguilar, G. J., de Andrade, M. T., Rodrigues-Júnior, M. F., & Guareschi-Martins, F. C. (2022). Trends and challenges of starch-based foams for use as food packaging and food container. *Trends in Food Science & Technology*, 119, 257-271. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2021.12.005>
- Tayade, R., Kulkarni, K. P., Jo, H., Song, J. T., & Lee, J. D. (2019). Insight into the prospects for the improvement of seed starch in legume—a review. *Frontiers in plant science*, 10, 1213.
- Tetlow, I. J. (2011). Starch biosynthesis in developing seeds. *Seed Science Research*, 21(1), 5-32.
- Tianyu Jiang, Qingfei Duan, Jian Zhu, Hongsheng Liu, Long Yu. (2020). Starch-based biodegradable materials: Challenges and opportunities.
<https://doi.org/10.1016/j.aiepr.2019.11.003>
- Toda, T. A., Visioli, P. D. C. F., de Oliveira, A. L., & da Costa Rodrigues, C. E. (2021). Conventional and pressurized ethanolic extraction of oil from spent coffee grounds: Kinetics study and evaluation of lipid and defatted solid fractions. *The Journal of Supercritical Fluids*, 177, 105332.

- Valdés, A., Castro-Puyana, M., & Marina, M. L. (2020). Isolation of proteins from spent coffee grounds. Polyphenol removal and peptide identification in the protein hydrolysates by RP-HPLC-ESI-Q-TOF. *Food Research International*, 137, 109368.
- Vieira, M. G. A., Da Silva, M. A., Dos Santos, L. O., & Beppu, M. M. (2011). Natural-based plasticizers and biopolymer films: A review. *European polymer journal*, 47(3), 254-263.
- Wanchinee Sanhawong, Pakamas Banhalee, Siridech Boonsang, Supranee Kaewpirom. (2017). Effect of concentrated natural rubber latex on the properties and degradation behavior of cotton-fiber-reinforced cassava starch biofoam. *Industrial Crops & Products* 108 (2017) 756–766. <http://dx.doi.org/10.1016/j.indcrop.2017.07.046>
- Wang, K., Wang, W., Ye, R., Liu, A., Xiao, J., Liu, Y., & Zhao, Y. (2017). Mechanical properties and solubility in water of corn starch-collagen composite films: Effect of starch type and concentrations. *Food chemistry*, 216, 209-216.
- Wang, X., Chen, Q., & Lü, X. (2014). Pectin extracted from apple pomace and citrus peel by subcritical water. *Food Hydrocolloids*, 38, 129-137.
- Wilkins, M. R., Suryawati, L., Maness, N. O., & Chrz, D. (2007). Ethanol production by *Saccharomyces cerevisiae* and *Kluyveromyces marxianus* in the presence of orange-peel oil. *World Journal of Microbiology and Biotechnology*, 23(8), 1161-1168. . <https://doi.org/10.1007/s11274-007-9346-2>
- Williams y Phillips, 2021. Williams, P. A., & Phillips, G. O. (2021). Introduction to food hydrocolloids. In *Handbook of hydrocolloids* (pp. 3-26). Woodhead publishing.
- Wuttisin, N., Boonmak, J., & Thaipitak, V. (2017). Anti-tyrosinase activity of orange peel extract and cosmetic formulation. *International Food Research Journal*, 24(5), 2128-2132.
- Xiao, Y., Liu, Y., Kang, S., Cui, M., & Xu, H. (2021). Development of pH-responsive antioxidant soy protein isolate films incorporated with cellulose nanocrystals and curcumin nanocapsules to monitor shrimp freshness. *Food Hydrocolloids*, 120, 106893. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2021.106893>
- Xu, Y. X., Dzenis, Y., & Hanna, M. A. (2005). Water solubility, thermal characteristics and biodegradability of extruded starch acetate foams. *Industrial Crops and Products*, 21(3), 361-368. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2004.05.004>
- Xu, Y., Wu, Y. J., Sun, P. L., Zhang, F. M., Linhardt, R. J., & Zhang, A. Q. (2019). Chemically modified polysaccharides: Synthesis, characterization, structure activity relationships of action. *International journal of biological macromolecules*, 132, 970-977.

- Yaqing Xiao, Yingnan Liu, Shufang Kang, Mengdi Cui, Huaide Xu. 2021. Development of pH-responsive antioxidant soy protein isolate films incorporated with cellulose nanocrystals and curcumin nanocapsules to monitor shrimp freshness. *Food Hydrocolloids* 120 (2021) 106893. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2021.106893>
- Yen, W. J., Wang, B. S., Chang, L. W., & Duh, P. D. (2005). Antioxidant properties of roasted coffee residues. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 53(7), 2658-2663.
- Yu, J. K., & Moon, Y. S. (2021). Corn starch: quality and quantity improvement for industrial uses. *Plants*, 11(1), 92.
- Zafar, M. T., Zarrinbakhsh, N., Mohanty, A. K., Misra, M., Maiti, S. N., & Ghosh, A. K. (2016). Biocomposites based on poly (lactic acid)/willow-fiber and their injection moulded microcellular foams. *Express Polymer Letters*, 10(2).
- Zhang, H., Zhang, J., Gao, Y., Wang, W., Dong, H., Hou, H., & Liu, X. (2017). Effect of modification extent of montmorillonite on the performance of starch nanocomposite films. *Starch-Stärke*, 69(11-12), 1700088.
- Zhang, R., Ma, S., Li, L., Zhang, M., Tian, S., Wang, D., ... & Wang, X. (2021). Comprehensive utilization of corn starch processing by-products: A review. *Grain & Oil Science and Technology*, 4(3), 89-107.
- Zhang, R., Su, Y., Zhao, T., Liu, J., Zhang, H., Hou, L., . . . Chen, Q. (2023). Degradable Foam Tray Based on High-concentration Dispersed Cellulose Fibers Obtained by a Hot-press Baking Process. *Paper and Biomaterials*, 8(4), 20-26. . <https://doi.org/10.26599/PBM.2023.9260022>
- Zhao, H., Zhao, G., Turng, L. S., & Peng, X. (2015). Enhancing nanofiller dispersion through prefoaming and its effect on the microstructure of microcellular injection molded polylactic acid/clay nanocomposites. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 54(28), 7122-7130.
- Zuorro, A., & Lavecchia, R. (2012). Spent coffee grounds as a valuable source of phenolic compounds and bioenergy. *Journal of Cleaner Production*, 34, 49-56.