



Desarrollo de cubertería biodegradable a base de cáscara de huevo y almidón de papa como alternativa a los utensilios de un solo uso elaborados con polímeros sintéticos.

Andrea Zapata Castro

Trabajo de grado para optar por el título de:

Bioingeniera

Asesor:

Giovanni Alberto Cuervo Osorio, MSc.

Universidad de Antioquia

Facultad de Ingeniería

Programa de Bioingeniería

Medellín, Colombia

2024

Cita	Zapata Castro [1]
Referencia	[1] A. Zapata Castro, “Desarrollo de cubertería biodegradable a base de cáscara de huevo y almidón de papa como alternativa a los utensilios de un solo uso elaborados con polímeros sintéticos.
Estilo IEEE (2020)	”, Proyecto de investigación, Programa de Bioingeniería, Universidad de Antioquia, Medellín, 2024.



Grupo de investigación en Biomateriales BioMat.

Coordinador de prácticas: Ana María Torres López.

Asesor: Giovanni Alberto Cuervo Osorio



Cendoi

Repositorio Institucional: <http://bibliotecadigital.udea.edu.co>

Universidad de Antioquia - www.udea.edu.co

Rector: John Jairo Arboleda Céspedes

Decano: Julio Cesar Saldarriaga Molina

Jefe departamento: John Fredy Ochoa Gómez.

El contenido de esta obra corresponde al derecho de expresión de los autores y no compromete el pensamiento institucional de la Universidad de Antioquia ni desata su responsabilidad frente a terceros. Los autores asumen la responsabilidad por los derechos de autor y conexos.

Agradecimientos

Quiero agradecerle principalmente a Dios, por darme perseverancia y nunca dejarme rendir, a mis padres por su amor, apoyo a lo largo de este camino, ustedes han sido el motor que me ha permitido llegar a la meta y cumplir este sueño.

A mi asesor Giovanni Alberto Cuervo por tanto apoyo, su disposición, paciencia y palabras de ánimo.

Gracias a Cinthya, Valentín, Aaron y Francisco del laboratorio de biomateriales, por sus consejos y su apoyo.

Finalmente quiero agradecer al grupo de investigación biomat, su colaboración fue fundamental para llevar a cabo este proyecto.

TABLA DE CONTENIDO

RESUMEN	2
ABSTRACT	4
INTRODUCCIÓN	5
1.1 Introducción y planteamiento del problema	5
1.2 Antecedentes	7
1.3 Objetivos	9
1.3.1 Objetivo general	9
1.3.2 Objetivos específicos	9
MARCO TEÓRICO	10
2.1 Contaminación ambiental	10
2.1.1 Utensilios de un solo uso	11
2.2 Material biodegradable	11
2.3 Polímeros sintéticos	12
2.4 Polímeros naturales	13
2.4.1 Almidones	14
2.4.1.1 Almidón de papa	15
2.4.2 Carboximetilcelulosa	16
2.5 Cerámicos	17
2.5.1 Cáscara de huevo	18
2.6 Biodegradabilidad	20
2.7 Mojabilidad	21
METODOLOGÍA	21

3.1 Búsqueda de información bibliográfica	21
3.2 Extracción y caracterización de materias primas	21
3.2.1 Obtención de la cáscara de huevo y de papa	22
3.2.2 Preparación de las cáscaras de papa	22
3.2.3 Obtención del almidón de papa	22
3.2.4 Caracterización por espectroscopía UV-vis	22
3.2.5 Preparación de la cáscara de huevo	23
3.2.6 Proceso de molienda	23
3.3 Formación del producto	23
3.3.1 Formulación de composiciones	23
3.3.2 Preparación de muestras preliminares	24
3.3.3 Secado de las muestras	24
3.3.4 Proceso de sinterización	24
3.3.5 Selección de las muestras	25
3.4 Métodos de fabricación	25
3.4.1 Impresión 3D	25
3.4.2 Molde de yeso	25
3.4.3 Molde de alginato	25
3.4.4 Molde de silicona	25
3.5 Evaluación del tiempo de degradación	26
3.6 Determinación de propiedades mecánicas y mojabilidad	26
ANÁLISIS Y RESULTADOS	27
4.1 Extracción y caracterización de materias primas	27
4.1.1 Obtención del almidón	27
4.1.2 Caracterización por Espectroscopia UV-vis de la Cáscara de Papa	28

4.1.3 Preparación de la cáscara de huevo	29
4.1.4 Proceso de molienda	30
4.2 Formación del producto	30
4.2.1 Formulación de composiciones	30
4.2.2 Preparación de muestras preliminares	31
4.2.3 Secado de las muestras	32
4.2.4 Proceso de sinterización	33
4.3 Evaluación de degradación	38
4.4 Determinación de las pruebas mecánicas	44
4.5 Métodos de fabricación	46
4.5.1 Impresión 3D	46
4.5.2 Molde de yeso	47
4.5.3 Molde de alginato	48
4.5.4 Molde de silicona	48
4.6 Evaluación de mojabilidad	52
5. Conclusiones	54
REFERENCIAS	55

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Proceso de licuado	27
Figura 2. Sedimento resultante.....	28
Figura 3. Espectro UV-vis del almidón.....	29
Figura 4. Cáscaras de huevo en hipoclorito	30
Figura 5. Cáscaras de huevo procesadas únicamente en licuadora (a) Cáscaras de huevo después del proceso de molienda en licuadora, molino de bolas y tamizado (b).	30
Figura 6. Multipozo utilizado para la realización de las muestras.	32
Figura 7. Muestras llevadas al horno para el proceso de secado.....	33
Figura 8. Resultado obtenido en el primer sinterizado.....	34
Figura 9. Resultado obtenido en el segundo sinterizado.....	35
Figura 10. Gráfica de esfuerzo vs deformación en el ensayo resistencia a la compresión de las muestras.....	45
Figura 11. Gráficas individuales de esfuerzo vs deformación en el ensayo resistencia a la compresión de las muestras.....	45
Figura 12. Molde obtenido de impresión 3D.	46
Figura 13. Cuchara obtenida con el molde de impresión 3D.....	47
Figura 14. Molde obtenido por el método de colado.	47
Figura 15. Molde obtenido de alginato.	48
Figura 16. Molde de silicona utilizado.....	49
Figura 17. Cucharas obtenidas con el molde de silicona.	50
.Figura 18 Sedimentación de partículas con mayor densidad y porosidad.	51
Figura 19. Resultado de reducir la cantad de agua de la composición 8 A.....	52

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Composición de las tablas.....	24
Tabla 2. Fotografías de las muestras obtenidas después de los tratamientos térmicos.	36
Tabla 3. Fotografías de las muestras utilizadas en la evaluación de degradación en agua.	40
Tabla 4. Fotografías de las muestras utilizadas en la evaluación de degradación en tierra.	42
Tabla 5. Información de las muestras utilizadas para la prueba de resistencia a la compresión....	44
Tabla 6. Fotografías tomadas con el ángulo de contacto y ángulos resultantes en la evaluación de mojabilidad.....	53

SIGLAS, ACRÓNIMOS Y ABREVIATURAS

CMC	Carboximetilcelulosa
UV-vis	Espectroscopia ultravioleta-visible

RESUMEN

En un contexto global de crecientes desafíos medioambientales, debido al gran impacto negativo que está sufriendo el planeta, como por ejemplo la contaminación a causa de polímeros sintéticos, especialmente de utensilios de un solo uso. Los polímeros sintéticos utilizados en estos utensilios generan residuos los cuales toman varios años para degradarse, además, liberan sustancias tóxicas tanto en el proceso de fabricación, como en el tiempo que toman en degradarse. Por otro lado, La producción mundial de plástico se ha duplicado en las últimas tres décadas, contribuyendo al 3.4 % de las emisiones globales de gases de efecto invernadero. Es por esto que este proyecto busca desarrollar una formulación a base de cáscaras de huevo y almidón de papa como alternativa a los polímeros sintéticos en la fabricación de cubertería biodegradable. Para ello, se extrajo y caracterizó el almidón de papa y el polvo de cáscara de huevo, ambos provenientes de desechos del sector terciario. Para obtener el almidón, las cáscaras de papa se trituraron, se dejaron reposar y se filtraron, mientras que, para el polvo de cáscara de huevo, las cáscaras se lavaron, secaron y se sometieron a molienda. Posteriormente, se formularon 10 composiciones diferentes utilizando estos materiales, junto con carboximetilcelulosa, y se prepararon muestras que fueron secadas y sometidas a un tratamiento térmico a diversas temperaturas, donde se obtuvieron varias muestras, según la composición y el tratamiento térmico al que fue sometida. Se seleccionaron 6 muestras para su posterior análisis, evaluando su tiempo de degradación en tierra y agua, así como sus propiedades mecánicas y de mojabilidad mediante el uso de una máquina universal de ensayos. Para los resultados obtenidos, en el proceso de caracterización espectroscópica se registró el espectro de absorción UV-vis en el rango de 200 a 400 nm, detectando picos característicos del almidón, comparados con estudios previos que muestran un pico característico entre 230 y 300 nm. Se obtuvo un pico en 250 nm, coincidiendo con estos estudios. Se prepararon composiciones con cáscara de huevo y almidón de papa en una proporción de 2:1, con cáscara tamizada y sin tamizar, y se añadió carboximetilcelulosa (CMC) en concentraciones del 1% y 10% del peso de la cáscara. Se agregó agua para ajustar la viscosidad, observándose que las mezclas con más CMC requerían más agua. Se seleccionaron las mejores composiciones para evaluar su degradación, resistencia a la compresión y otras propiedades. Las muestras cilíndricas se secaron a 70°C durante seis horas. El tratamiento térmico inicial no fue satisfactorio, por lo que se ajustaron los parámetros,

aumentando los tiempos de sostenimiento y temperaturas. Sin embargo, estos ajustes tampoco lograron los resultados deseados debido a la descomposición de los polímeros a altas temperaturas. Finalmente, se optó por tratamientos térmicos a 100°C y 300°C. Las pruebas de degradación en agua y tierra mostraron diferentes tasas de degradación según el tamaño de partícula y la cantidad de CMC. Las muestras con mayor cantidad de CMC y partículas más finas mostraron mejor resistencia mecánica y menor degradación. En tierra, las muestras 6 y 5B se degradaron completamente en siete días. Las pruebas de resistencia a la compresión indicaron que las muestras tenían un comportamiento similar al de un material cerámico, principalmente debido al carbonato de calcio en la cáscara de huevo. Se realizó un análisis de varianza para evaluar la influencia de diferentes variables en la resistencia a la compresión, sin encontrar diferencias significativas. Para fabricar los utensilios biodegradables, se evaluaron cuatro métodos de moldeo: impresión 3D, colado en moldes de yeso, alginato y silicona, siendo este último el más efectivo. Se solucionaron problemas de sedimentación y formación de burbujas reduciendo la cantidad de agua y utilizando jeringas para llenar los moldes. Finalmente, se realizaron pruebas de mojabilidad, observando un ángulo dinámico en algunas muestras, indicando absorción inmediata del agua debido a la superficie porosa del material, teniendo una buena respuesta la muestra 8^a, debido a que mostro un comportamiento hidrofóbico.

Palabras clave — Contaminación, Almidón de papa, cáscara de huevo, carboximetilcelulosa, polímeros, degradabilidad.

ABSTRACT

In a global context of growing environmental challenges due to the significant negative impact the planet is experiencing, such as pollution caused by synthetic polymers, especially single-use utensils. The synthetic polymers used in these utensils generate waste that takes several years to degrade, and they release toxic substances both during the manufacturing process and over the time it takes to degrade. Additionally, the worldwide production of plastic has doubled in the last three decades, contributing to 3.4% of global greenhouse gas emissions. This is why this project aims to develop a formulation based on eggshells and potato starch as an alternative to synthetic polymers in the manufacture of biodegradable cutlery. To achieve this, potato starch and eggshell powder, both sourced from tertiary sector waste, were extracted and characterized. To obtain the starch, potato peels were crushed, left to rest, and filtered, while for the eggshell powder, the shells were washed, dried, and ground. Subsequently, 10 different compositions were formulated using these materials, along with carboxymethylcellulose (CMC), and samples were prepared that were dried and subjected to thermal treatment at various temperatures, resulting in several samples based on composition and thermal treatment. Six samples were selected for further analysis, evaluating their degradation time in soil and water, as well as their mechanical properties and wettability using a universal testing machine.

For the obtained results, during the spectroscopic characterization process, the UV-vis absorption spectrum was recorded in the range of 200 to 400 nm, detecting characteristic peaks of starch, compared with previous studies showing a characteristic peak between 230 and 300 nm. A peak at 250 nm was obtained, coinciding with these studies. Compositions were prepared with eggshell and potato starch in a 2:1 ratio, with sieved and unsieved shell, and carboxymethylcellulose (CMC) was added in concentrations of 1% and 10% of the shell weight. Water was added to adjust the viscosity, and it was observed that mixtures with more CMC required more water. The best compositions were selected to evaluate their degradation, compression resistance, and other properties. The cylindrical samples were dried at 70°C for six hours. The initial thermal treatment was unsatisfactory, so the parameters were adjusted by increasing the holding times and temperatures. However, these adjustments also did not achieve the desired results due to the decomposition of the polymers at high temperatures. Finally, thermal treatments at 100°C and 300°C were chosen. The degradation tests in water and soil showed different degradation rates

depending on particle size and the amount of CMC. Samples with higher CMC content and finer particles showed better mechanical resistance and less degradation. In soil, samples 6 and 5B completely degraded in seven days. The compression resistance tests indicated that the samples behaved similarly to a ceramic material, mainly due to the calcium carbonate in the eggshell. A variance analysis was performed to evaluate the influence of different variables on compression resistance, finding no significant differences. To manufacture the biodegradable utensils, four molding methods were evaluated: 3D printing, casting in plaster, alginate, and silicone molds, with the latter being the most effective. Sedimentation and bubble formation issues were resolved by reducing the amount of water and using syringes to fill the molds. Finally, wettability tests were conducted, observing a dynamic angle in some samples, indicating immediate water absorption due to the porous surface of the material, with sample 8A showing a good response due to its hydrophobic behavior.

Keywords- Pollution, Potato Starch, Eggshell, Carboxymethylcellulose, Polymers, Degradability.

INTRODUCCIÓN

1.1 Introducción y planteamiento del problema

En un contexto global donde los desafíos medioambientales se elevan de manera progresiva, la búsqueda de alternativas sostenibles se ha convertido en una prioridad para la humanidad. uno de los problemas actuales, es la contaminación generada por los plásticos, en especial los utensilios de un solo uso. Estos generan una carga ambiental significativa debido a su lenta descomposición y residuos tóxicos asociados a su producción. Los utensilios de un solo uso elaborados de polímeros sintéticos tardan aproximadamente 450 años en descomponerse [1]. Adicionalmente, los utensilios desechables elaborados con materiales plásticos, como por ejemplo la cubertería desechable (cuchillos, cucharas y tenedores), esto desprenden sustancias químicas perjudiciales para el ambiente. este tipo de productos tienen una alta incidencia en la contaminación del suelo, agua y aire.

Los artículos desechables de plástico suponen aproximadamente el 10 % de los residuos generados a nivel mundial [2]. En las últimas tres décadas, la demanda de plástico ha aumentado considerablemente, experimentando un aumento cuatro veces mayor a causa del desarrollo de los mercados emergentes. Entre el año 2019 a 2020, la producción mundial de plástico se duplicó,

alcanzando 460 millones de toneladas. Esta producción de plásticos contribuye con el 3.4 % de las emisiones globales de gases de efecto invernadero. En el año 2019, aproximadamente 6.1 millones de toneladas de residuos plásticos se filtraron en ríos y mares, y 1.7 millones de toneladas fluían hacia los océanos. Se estima que hay aproximadamente 30 millones de toneladas de residuos plásticos en océanos, con otros 109 millones acumulándose en los ríos, lo que indica que las filtraciones hacia los océanos durarán décadas, incluso con esfuerzos significativos para reducir la mala gestión de residuos plásticos [3].

La consideración y aplicación de materiales biodegradables en la producción de utensilios de un solo uso es de gran importancia para mitigar el daño al medio ambiente. Puesto que pretende sustituir a los polímeros convencionales para beneficiar al planeta. Es crucial que iniciar investigaciones y apoyar las que vienen en curso en la producción de utensilios de un solo uso empleando materiales orgánicos. Esto conlleva a una transición hacia métodos de producción más sostenibles para la generación de plásticos de un solo uso, aportando de este modo a la conservación del medio ambiente [4]. La ventaja de utilizar materiales biodegradables para la fabricación de utensilios de un solo uso es que, en comparación con los polímeros sintéticos, es el tiempo de degradación, puesto que los materiales de origen orgánico tienen una degradación más rápida con respecto a los polímeros obtenidos de derivados de petróleo, lo que conlleva a minimizar la acumulación de residuos a largo plazo. Además, estos materiales biodegradables no generan residuos tóxicos como si pasa con la producción de plásticos convencionales, lo que constituye un beneficio adicional para el medio ambiente [5].

Existen diferentes materiales orgánicos que se han investigado para la fabricación de utensilios de un solo uso, o empaques, como por ejemplo el almidón de yuca [6], cáscara de plátano [7], corona de piña [8], caña de azúcar, salvado de trigo, maguey, cáñamo [9], entre otros materiales biodegradables.

según lo expuesto anteriormente y en busca de disminuir el impacto negativo que genera la cubertería de un solo uso, se planteó en este proyecto, el uso de cáscaras de huevo y cáscaras de papa para la extracción de almidón, con el objetivo de promover una práctica amigable con el ambiente, al igual que la reutilización de desechos agroindustriales en la elaboración de utensilios biodegradables. El objetivo, es reducir la contaminación ocasionada por los platos y utensilios elaborados con polímeros sintéticos. Para esto se extrajo y caracterizó el almidón de papa y se la cáscara de huevo se llevó a diferentes tamaños. Luego, se crearon diferentes composiciones con estos materiales y se realizaron diferentes tratamientos térmicos buscando optimizar las propiedades mecánicas del producto final, lo cual permitió la creación de utensilios biodegradables con propiedades específicas. De igual manera se realizó una evaluación del tiempo de degradación en tierra y agua, proporcionando información sobre la descomposición en distintos entornos. Finalmente, se determinaron las propiedades mecánicas y de mojabilidad mediante pruebas con una máquina universal de ensayos.

1.2 Antecedentes

El creciente interés en la reducción de residuos plásticos obtenidos de derivados del petróleo ha impulsado la investigación y desarrollo de materiales biodegradables, especialmente en la industria de empaques y utensilios desechables. Los plásticos convencionales, generan grandes problemas ambientales debido a su resistencia a la degradación, la acumulación en vertederos y sistemas acuáticos.

Se han realizado estudios sobre el uso de materiales biodegradables como sustitutos de los utensilios y vajillas de plástico de un solo uso, enfocándose en explorar diferentes tipos de materiales biodegradables y su relevancia para la sostenibilidad ambiental. Los principales hallazgos y materiales utilizados en estos estudios incluyen las hojas de palma de areca, que se usaron para fabricar platos y cubiertos mediante un proceso de limpieza, prensado con calor y corte sin el uso de químicos. Además, se desarrollaron cubiertos comestibles hechos con diferentes tipos de harinas nutritivas, como la harina de sorgo y mijo, que se preparan horneando a alta temperatura para eliminar la humedad y pueden ser consumidos o descomponerse rápidamente como fertilizante. Por otra parte, se utilizaron cáscaras de arroz para fabricar vajilla biodegradable duradera capaz de soportar temperaturas superiores a 100°C sin dañarse, resultando en un extracto natural puro y libre de toxinas. Asimismo, se fabricaron cubiertos, platos y tazones ligeros y reutilizables de bambú como una alternativa ecológica a los utensilios de metal y plástico. Además, en la industria del empaque, se innovó utilizando gránulos de almidón de papa y tapioca junto con otras biomásas para fabricar bolsas 100% biodegradables que se descomponen en 180 días o se disuelven en agua a temperatura ambiente o agua hirviendo [10].

A pesar de su potencial, los plásticos basados en almidón presentan ciertas limitaciones que afectan sus aplicaciones prácticas. Entre las principales desventajas se encuentran sus propiedades mecánicas inferiores y su alta permeabilidad al vapor de agua, lo que los hace menos adecuados para ciertos usos, especialmente en condiciones de alta humedad. Para superar estos problemas, se han investigado diversas estrategias, incluyendo la modificación del almidón mediante la incorporación de aditivos, el refuerzo con nanomateriales, y la creación de mezclas y estructuras multicapa. Estas técnicas buscan mejorar la resistencia, flexibilidad y durabilidad de los bioplásticos basados en almidón, expandiendo su utilidad en la industria alimentaria y otras aplicaciones [11].

Además de la mejora de las propiedades intrínsecas del almidón, la incorporación de otros materiales biodegradables ha mostrado buenos resultados. Un ejemplo innovador es el uso de cáscara de huevo, que generalmente es desechado, puede ser útil como material de refuerzo en la producción de bioplásticos. Las cáscaras de huevo, ricas en carbonato de calcio, aportan rigidez y mejoran las propiedades mecánicas de los biopolímeros de almidón. Este enfoque no solo agrega valor a los residuos agrícolas, sino que también contribuye a la economía circular al utilizar desechos para crear productos funcionales [11].

A medida que avanzan las investigaciones, se busca no solo optimizar las propiedades de los bioplásticos basados en almidón, sino también desarrollar procesos de producción más eficientes y sostenibles. Esto incluye el uso de residuos agroindustriales, como la cáscara de huevo, para reducir costos y minimizar el impacto ambiental. La integración de estos materiales en la fabricación de cubiertos y empaques biodegradables representa un avance significativo hacia la reducción de residuos plásticos. La implementación de una economía circular, que fomenta la reutilización y el reciclaje, es esencial para maximizar los beneficios ambientales y económicos de estas innovaciones. Se ha investigado el uso de la cáscara de huevo para la creación de productos biodegradables, evaluando su compatibilidad y propiedades físicas. Se llevaron a cabo pruebas de compatibilidad y se han diseñado varios implementos utilizando este nuevo material. Los resultados mostraron que la cáscara de huevo tiene una excelente capacidad de miscibilidad con otros materiales, aunque la mezcla con almidón de yuca no es resistente a la intemperie. Se utilizaron cáscaras de huevo pulverizadas y almidón de yuca, junto con herramientas y tecnologías modernas para la construcción de los objetos. Entre otras alternativas biodegradables que llaman la atención de los fabricantes y consumidores se encuentran materiales como el ácido poliláctico compostable, que puede derivarse de recursos renovables como el almidón de maíz y la caña de azúcar, lo que ofrece una opción más ecológica para los productos de un solo uso [11].

En otras investigaciones se exploran diversas investigaciones sobre el aprovechamiento de la cáscara de huevo para el desarrollo de productos biodegradables, con un enfoque en principios de química verde y economía circular. Se llevaron a cabo análisis de fuentes existentes para identificar estudios previos y comprender mejor las aplicaciones potenciales de la cáscara de huevo. Además, se realizaron pruebas de prototipos mediante el método de ensayo y error, utilizando cáscara de huevo y alginato de sodio grado alimenticio, para determinar el diseño más adecuado. Los resultados experimentales indicaron la posibilidad de producir platos biodegradables con una alta

composición de cáscara de huevo, aunque la viabilidad económica de su producción es limitada [12]. La cáscara de huevo se ha utilizado para reducir el impacto de este residuo orgánico, ya que en Colombia se consumen en promedio 293 huevos anuales por persona. Este residuo se ha empleado en la creación de compuestos para descontaminar aguas contaminadas con metales pesados como el cadmio. Además, estudiantes de la Universidad del Norte en Barranquilla han propuesto un proyecto de economía circular para reutilizar recursos desechados, reemplazando un 5% del calcio en la fabricación de cemento sin alterar sus propiedades. El carbonato de calcio de la cáscara de huevo también se usa en la industria alimenticia como neutralizante, texturizante, endurecedor, antihumectante, colorante y fortificante mineral. Investigaciones adicionales han logrado una producción limpia y diversificada de productos con alto valor agregado, como el calcio biológico. Se llevaron a cabo pruebas de compatibilidad y se diseñó una familia de objetos utilizando el nuevo material. Los resultados mostraron que la cáscara de huevo tiene una excelente capacidad de miscibilidad con otros materiales, aunque la mezcla con almidón de yuca no es resistente a la intemperie. Se utilizaron cáscaras de huevo pulverizadas y almidón de yuca, junto con herramientas y tecnologías modernas para la construcción de los objetos. [13].

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo general

Desarrollar cubertería biodegradable a base de cáscara de huevo y almidón de papa para su potencial uso como utensilios en la industria alimentaria.

1.3.2 Objetivos específicos

- Formular diferentes composiciones a base de cáscara de huevo y almidón de papa para obtener cubertería biodegradable.
- Comparar diferentes técnicas para la obtención de cubertería biodegradable.
- Evaluar la capacidad de degradación de los utensilios fabricados tanto en condiciones simuladas de laboratorio como en condiciones ambientales.
- Caracterizar las propiedades fisicoquímicas de los productos desarrollados.

MARCO TEÓRICO

2.1 Contaminación ambiental

La contaminación ambiental es un fenómeno que implica la introducción de sustancias, energía o materiales en el medio ambiente que causan efectos adversos en el equilibrio de los ecosistemas y en la salud humana [14]. Los polímeros sintéticos, son una de las principales fuentes de contaminación ambiental debido a su lenta degradación y su amplio uso en productos de un solo uso como por ejemplo, botellas, envases de alimentos, platos, vasos y cubiertos desechables. Estos productos desechables contribuyen significativamente a la contaminación ambiental debido a su proceso de producción y alta demanda. Estos productos, al ser desechados incorrectamente, terminan en vertederos, ríos y océanos, causando un grave impacto ambiental [15]. Según un informe reciente de la Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económico (OCDE), solo una pequeña proporción de los desechos plásticos generados a nivel global se recicla cada año. Aunque la producción de plástico ha aumentado significativamente en los últimos años, la tasa de reciclaje es muy baja, con tan solo un 9 %. Esto significa que la mayoría de los desechos plásticos terminan en vertederos, ríos y océanos, causando graves impactos ambientales y afectando la salud humana [16]. Cada año, se desechan miles de millones de tenedores, cuchillos y cucharas de plástico, los cuales pueden tardar siglos en degradarse de manera natural, siendo clasificados por la organización Ocean Conservancy como uno de los objetos más peligrosos para la vida marina, incluyendo tortugas, aves y mamíferos [17]. En la actualidad, se estima que hay entre 75 y 199 millones de toneladas de desechos plásticos en los océanos [18], y se calcula que un tercio de todos los residuos plásticos termina en suelos o agua dulce. Los microplásticos, partículas que son muy pequeñas derivadas de la descomposición de los plásticos, son ingeridos por los organismos marinos y entran en la cadena alimentaria, lo que puede tener consecuencias negativas para la salud de los seres vivos, incluidos los humanos [19].

2.1.1 Utensilios de un solo uso

Los utensilios de polímeros sintéticos de un solo uso son artículos fabricados a partir de diversos materiales poliméricos, principalmente termoplásticos como el polietileno, polipropileno, poliestireno y poliestireno expandido, están diseñados para ser utilizados una sola vez. Estos utensilios incluyen una amplia gama de productos como vasos, platos, cubiertos, pitillos, envases para alimentos, tapas, contenedores y otros elementos similares que se utilizan comúnmente en la industria de restaurantes, estos materiales proporcionan un bajo costo y facilidad de transporte, ligereza, resistencia a roturas y derrames, y la percepción de higiene al estar libres de contaminación los hacen ideales para situaciones donde no se dispone de instalaciones de lavado o cuando se requiere servir a grandes multitudes [20]. Sin embargo, el uso excesivo de estos utensilios ha generado preocupación por su impacto ambiental, ya que su fabricación requiere recursos no renovables como el petróleo y generan grandes cantidades de residuos no biodegradables que contribuyen a la contaminación de océanos, mares y ecosistemas terrestres [21]. Muchos países y ciudades han implementado prohibiciones o impuestos para reducir su consumo, y se han desarrollado alternativas más sostenibles como utensilios reutilizables de acero inoxidable, bambú o materiales biodegradables como el bagazo de caña de azúcar, con el objetivo de mitigar los efectos negativos de estos productos y promover un uso más responsable y consciente de los recursos [22].

2.2 Material biodegradable

Los materiales biodegradables tienen la capacidad de descomponerse de manera natural gracias a la acción de agentes biológicos como bacterias y hongos, este proceso de descomposición conduce a la transformación de estos materiales en componentes como dióxido de carbono, agua y minerales en un lapso relativamente corto, generalmente tarda un tiempo corto, de días o semanas[23]. La diferencia fundamental entre los materiales biodegradables y los no biodegradables radica en su habilidad para degradarse y en el tiempo que requiere este proceso. La importancia de los materiales biodegradables en el contexto ambiental es relevante, debido a que, su capacidad de descomposición permite que no haya acumulación de estos en suelos o fuentes hídricas,

manteniendo un equilibrio ecológico. Esta capacidad de reciclaje continuo de la materia orgánica contribuye a evitar la pérdida de materiales esenciales y a minimizar el impacto ambiental negativo. El proceso de biodegradación suele constar de tres etapas distintas: la debilitación mecánica inicial de la estructura del material, la biofragmentación implica la descomposición por microorganismos como bacterias y hongos, y la asimilación de los componentes generados en el proceso [23]. En cuanto a ejemplos y aplicaciones concretas, los materiales biodegradables encuentran uso en diversas industrias, desde la fabricación de envases hasta la industria automotriz, ejemplos comunes incluyen bolsas elaboradas a partir de almidón de maíz o trigo [24], platos fabricados con almidón de yuca [25], y bioplásticos en el sector automotriz para desarrollar alternativas biodegradables a los materiales convencionales [26].

Los materiales biodegradables presentan ventajas significativas en términos ecológicos al no dejar residuos después de su descomposición y al contribuir a la reducción del impacto ambiental. Existen desafíos en la transición de materiales no biodegradables a biodegradables en diversas industrias, la adopción generalizada de materiales biodegradables es esencial para promover la sostenibilidad ambiental y reducir la huella ecológica de las actividades humanas. Al comprender a fondo la importancia, el proceso y las implicaciones de la biodegradabilidad, podemos tomar decisiones informadas que impulsen un futuro más verde y sostenible [23].

2.3 Polímeros sintéticos

Los polímeros sintéticos son macromoléculas producidas a partir de elementos naturales, como el petróleo, carbón y gas natural. Estos materiales tienen un bajo costo de producción y alta resistencia, lo que los hace muy versátiles y útiles en una variedad de aplicaciones, desde embalajes y electrodomésticos hasta componentes automotrices y productos médicos. Además, ofrecen ventajas como baja densidad, resistencia, durabilidad y versatilidad, lo que los hace ideales para ser trabajados en diferentes espesores y formas para ofrecer diversas opciones de utilidad. Se utilizan ampliamente para fabricar elementos desechables, como recipientes, envases y otros productos que requieren una resistencia y durabilidad específicas. Sin embargo, su lenta degradación genera residuos y problemas ambientales si no se reciclan adecuadamente, lo que hace que sea importante considerar la sostenibilidad en su producción y uso [27]. El plástico sintético es una amenaza para la salud humana debido a sus impactos en el ciclo de vida. La exposición a

los plásticos puede causar problemas respiratorios, cardiovasculares por inhalación de partículas y gases tóxicos, y problemas gastrointestinales y de salud general por ingestión de microplásticos, estos también pueden afectar la salud reproductiva, aumentar el riesgo de enfermedades cardiovasculares y debilitar el sistema inmunológico. Es importante abordar los impactos del plástico en todo el ciclo de vida, considerando la interrelación entre las cadenas de suministro y las vías de exposición mundiales, para proteger la salud humana y el medio ambiente [28].

2.4 Polímeros naturales

Los polímeros naturales son macromoléculas que se encuentran en la naturaleza y se forman a partir de materiales de origen vegetal o animal. Estos polímeros son parte integral de los seres vivos y se han utilizado desde la antigüedad por el ser humano. Los polímeros naturales presentan varias propiedades que los hacen útiles en diversas aplicaciones. Estos polímeros tienen la capacidad de absorción y retención de humedad. También pueden descomponerse mediante procesos biológicos a lo largo del tiempo [29]. Sin embargo, se presentan algunas desventajas, como una resistencia mecánica inferior en comparación con los polímeros sintéticos y una sensibilidad a los cambios de temperatura que puede afectar sus propiedades biológicas [30]. Algunos ejemplos de polímeros naturales incluyen el colágeno, presente en la piel y tendones, que tiene una función estructural y biocompatibilidad. La celulosa, abundante en las plantas, forma la base de las paredes celulares, este polímero aporta integridad estructural, capacidad de absorción, resistencia, entre otras propiedades, por lo que se usa para la producción de papel y cartón, algodón, productos farmacéuticos, cosméticos y materiales de construcción por sus propiedades espesantes, aglutinantes y estabilizadoras. El caucho, obtenido del látex de los árboles de caucho, es apreciado en diversas industrias por sus propiedades de elasticidad y adhesividad. La quitina, hallada en los exoesqueletos de insectos y crustáceos, destaca por su resistencia y biodegradabilidad. El almidón, que se encuentra en las plantas, actúa como un depósito de energía y tiene aplicaciones amplias en la alimentación y la industria. Los polímeros naturales tienen propiedades únicas que los hacen ideales para la obtención de productos que requieren una interacción positiva con el medio ambiente, desde la medicina hasta la industria alimentaria [31].

2.4.1 Almidones

El almidón es un producto natural que se puede encontrar en diferentes productos orgánicos, como por ejemplo la papa, la yuca, el plátano, entre otro tipo de plantas. Este se utiliza en una gran variedad de aplicaciones, desde la la industria alimentaria hasta la industria cosmética. El almidón es un polisacárido compuesto por dos macromoléculas poliméricas: la amilosa y la amilopectina, los almidones contienen aproximadamente entre 25-28% de amilosa y 72-75% de amilopectina [32]. Estas cadenas de glucosa se encuentran en las células de las plantas y se utilizan como reserva de energía. El almidón es comúnmente conocido como fécula o maicena y se encuentra en muchos alimentos, como el maíz, diferentes tubérculos, tal como se mencionó anteriormente. Además de su función como reserva de energía, el almidón también tiene propiedades físicas y químicas que lo hacen útil en la industria alimenticia y en la fabricación de productos como papel, textiles y cosméticos [33].

El almidón presenta varias propiedades que lo hacen útil en diferentes aplicaciones. Entre estas propiedades se encuentran la absorción de agua, solubilidad, gelatinización, hinchamiento, viscosidad, resistencia al proceso digestivo y propiedades físicas y químicas. La absorción de agua es una de las propiedades más destacadas del almidón, ya que puede hincharse significativamente al absorber agua. Además, el almidón es soluble en agua, aunque su solubilidad puede variar según su origen botánico. La gelatinización del almidón es otro proceso importante, debido a que puede ser gelatinoso a temperaturas relativamente bajas. El almidón actúa como un aglutinante natural, uniendo partículas y mejorando la cohesión de los alimentos. Esta propiedad se aprovecha en la elaboración de productos de panadería, pastas y productos cárnicos. El almidón aumenta la viscosidad de los líquidos en los que se dispersa, lo que mejora la textura y la sensación en boca de los alimentos [34].

2.4.1.1 Almidón de papa

La papa es un tubérculo ampliamente consumido en todo el mundo y es una importante fuente de nutrientes de la dieta humana. El almidón de papa tiene la composición química [35]:

- Agua: 72-75%
- Almidón: 16-20%
- Proteínas: 2-2,5%
- Fibra: 1-1,8%
- Ácidos grasos

Su composición, abarca aproximadamente el 20 % de los compuestos presentes en la papa, se compone de un 14% de amilosa y un 86% de amilopectina, con un volumen de partícula elipsoidal que oscila entre 2 y 66 μ m [36].

La papa es una fuente natural de almidón, un polisacárido que se encuentra en las plantas y se utiliza en diversas aplicaciones industriales. El almidón de papa, también conocido como fécula de papa, de patata o chuño. Este almidón se obtiene a partir de del almidón presentes en las células del tubérculo de la papa. Para extraerlo, las papas se maceran, liberando los granos de almidón de las células destruidas [26]. El almidón de papa se caracteriza por tener gránulos ovales a esféricos de tamaño variable, generalmente entre 5 y 100 μ m. Este es un almidón refinado con una cantidad mínima de proteína y grasa, lo que le confiere un color claro y blancuzco [37]. Se utiliza en la fabricación de plásticos biodegradables, que generan un impacto ambiental positivo, al reducir la dependencia de los materiales fósiles, además, son biodegradables. Estos plásticos biodegradables se obtienen de fuentes renovables y naturales, como residuos agrícolas, celulosa o almidón de papa. Además de su aplicación en plásticos biodegradables, el almidón de papa también se utiliza en la industria alimentaria, farmacéutica y cosmética [38]. El almidón de papa muestra propiedades adecuadas para la creación de películas y recipientes biodegradables. Con su capacidad para disolverse en agua fría, alta claridad en la pasta y sus propiedades anteriormente mencionadas se ha convertido en un componente clave en diversas áreas, incluyendo materiales de relleno y espesantes. La estructura cristalina de las películas de almidón muestra una conexión directa con el contenido de amilopectina, lo que sugiere que la manipulación de la composición del almidón podría ser una estrategia efectiva para controlar y mejorar sus propiedades mecánicas [36].

En Colombia, su aplicación principal se centra en la industria alimentaria, destacándose por sus propiedades ideales para salsas, sopas, pastas, productos extruidos para fritos, carnes y postres lácteos. Por su versatilidad se ha expandido hacia nuevos sectores de mercado como el farmacéutico, la producción de madera laminada, textiles y materiales plásticos. Recientemente, se ha explorado su integración como materia prima en el desarrollo de materiales biodegradables [39]. El almidón de papa desempeña un papel crucial en diversas industrias, se utiliza en varias aplicaciones por viscosidad y su capacidad retener agua, propiedades intrínsecamente asociadas a su estructura. Su capacidad para gelatinizar a temperaturas reducidas, su resistencia a la retrogradación y su limitada propensión a la degradación enzimática, son características adicionales que lo destacan como un insumo versátil e ideal [40].

2.4.2 Carboximetilcelulosa

La carboximetilcelulosa (CMC) es un polímero biocompatible derivado de la celulosa mediante un proceso de modificación química que altera su macroestructura. Este compuesto orgánico está compuesto por grupos carboximetil enlazados a algunos grupos hidroxilo presentes en polímeros de glucopiranososa [41]. Debido a su naturaleza hidrosoluble y propiedades únicas, la CMC se utiliza comúnmente en diversas industrias, como la alimentaria y la farmacéutica. En el campo alimentación, se usa como espesante, estabilizante y emulsionante en productos alimentarios. Por otro lado, en la industria farmacéutica, la CMC se emplea en formulaciones de fármacos como aglutinante, desintegrante y modificador de la viscosidad en tabletas y suspensiones [42]. Además, de su amplio uso en la industria alimentaria y farmacéutica, la CMC también se encuentra en aplicaciones en el campo cosmético. Su versatilidad y propiedades la convierten en un componente valioso para una variedad de productos, desde cremas y lociones hasta geles y shampoo. La CMC contribuye a la estabilidad, textura y apariencia deseada en estos productos cosméticos. Una de sus características más destacadas es su biocompatibilidad, lo que la hace segura para su uso en aplicaciones alimentarias, farmacéuticas y cosméticas. Esta propiedad es fundamental para garantizar la seguridad de los consumidores y pacientes. Otra propiedad importante de la CMC es su hidrosolubilidad. Debido a su estructura química, la CMC se disuelve fácilmente en agua, lo que la convierte en un ingrediente ideal para formulaciones que requieren soluciones acuosas. Esta característica facilita su incorporación en una amplia variedad de productos. La CMC también tiene

la propiedad de modificador de viscosidad. Al añadirse a soluciones, la CMC puede alterar el comportamiento de flujo y la consistencia del producto, lo que permite ajustar la textura y el grosor deseados. Su estructura química, basada en fuerzas de van der Waals y enlaces de hidrógeno, le confiere propiedades reológicas únicas y una solubilidad en agua. Esta estructura particular influye en el comportamiento y sus aplicaciones. Este polímero también presenta un comportamiento selectivo en sus cadenas. Esto significa que las cadenas de CMC tienen preferencia por romper o crear interacciones específicas con otras cadenas vecinas, lo que afecta a sus propiedades y aplicaciones. Esta característica permite ajustar el rendimiento de la CMC según las necesidades de cada aplicación [41].

2.5 Cerámicos

Los cerámicos son materiales inorgánicos y no metálicos que se caracterizan por su tener resistencia a altas temperaturas, dureza, resistencia a la corrosión y aislamiento eléctrico. Se fabrican en procesos de conformado y cocción a altas temperaturas. Estos materiales se utilizan en una amplia gama de aplicaciones, desde revestimientos y pavimentos en la construcción hasta vajillas y utensilios de cocina, pasando por componentes eléctricos y electrónicos. Su versatilidad y durabilidad los convierten en una opción popular en diversas industrias [43].

En la búsqueda de alternativas sostenibles a los plásticos contaminantes, los cerámicos se presentan como una opción amigable con el medio ambiente. Al ser fabricados a partir de materias primas naturales renovables como la arcilla, los cerámicos no emiten compuestos orgánicos volátiles ni sustancias peligrosas, lo que los convierte en una elección respetuosa con el medio ambiente. Además, su capacidad de reciclaje en el momento que finaliza su vida útil los posiciona como una alternativa responsable y sostenible en la lucha contra la contaminación plástica. Ejemplos de productos cerámicos naturales incluyen baldosas de piedra natural, cerámicas que imitan la madera, ofrecen opciones estéticas y funcionales para diversas aplicaciones [44].

Las propiedades mecánicas de los materiales cerámicos, en comparación con metales y plásticos, se caracterizan por su alta dureza, resistencia a la compresión, al desgaste y a altas temperaturas, aunque presentan baja resistencia a la tracción, limitada plasticidad y tenacidad. Estas características hacen que los cerámicos sean ideales para aplicaciones que requieren gran rigidez y dureza, como también herramientas abrasivas y puntas cortantes. Además, su excelente resistencia

a altas temperaturas los hace adecuados para entornos con condiciones extremas. Los cerámicos también son importantes por su capacidad de aislamiento térmico y eléctrico, siendo cruciales en aplicaciones que necesitan protección contra el calor y la electricidad. Su resistencia a la corrosión y a agentes químicos los hace perfectos para entornos agresivos, asegurando una larga durabilidad y buen rendimiento. Las propiedades mecánicas de los materiales cerámicos, junto con su capacidad de aislamiento, los convierten en materiales versátiles y muy valorados en diversas aplicaciones industriales y tecnológicas [43].

2.5.1 Cáscara de huevo

El huevo es el gameto femenino en la reproducción sexual de los animales ovíparos, de forma esférica o elíptica, y luego la fecundación, aloja al embrión, proporcionándole nutrientes y protección. El término huevo también se refiere al cigoto, la cual es la célula resultante de la unión de gametos femenino y masculino. En aves, este es el huevo fecundado que tras la incubación da lugar al nacimiento de un polluelo. Los huevos permiten la perpetuación de especies ovíparas, donde el desarrollo embrionario ocurre fuera del cuerpo de la hembra. Este modo de reproducción es común en aves, arácnidos, anfibios, reptiles, peces, mamíferos monotremas e insectos. El huevo de gallina es un alimento importante y su consumo es casi universal hoy en día, creando un sector económico significativo en la producción ganadera y la industria alimentaria. También se comercializan huevos de pato, codorniz y avestruz, sin embargo, no tienen la misma relevancia económica que el huevo de gallina [45]. La cáscara de huevo es una estructura biomineral la cual rodea y protege el contenido interno del huevo, desempeñando un papel crucial como reserva de minerales para el desarrollo del polluelo. Esta estructura no solo proporciona una barrera física, sino que también por su porosidad permite el intercambio de agua y gases entre el ambiente y el embrión, gracias a la composición proteica de su cutícula, esta es una membrana semipermeable, que sella el paso de gases y bacterias protegiendo el interior del huevo y que, al endurecerse tras la puesta, permite estos intercambios vitales. Se creía que la ovocleidina era la única proteína presente en la cáscara [46]. Sin embargo, avances tecnológicos posteriores han podido observar la existencia de múltiples proteínas que influyen significativamente en la estructura cristalina de la cáscara. Estudios detallados han demostrado cómo estas proteínas se entrelazan con los cristales de calcita en una proporción específica, afectando directamente la dureza de la cáscara, la cual está formada

por cuatro capas distintas; capa empalizada, capa mamilar y membranas [47]. En términos de su composición, la cáscara de huevo contiene un 2 % de agua y un 98 % de materia seca. El componente principal de la cáscara es el carbonato de calcio, que representa entre el 94 % y el 98 % de su peso total. Este alto contenido de calcio es esencial para la adecuada formación de la cáscara y se mantiene constante en todas las razas de gallinas [48]. Además del carbonato de calcio, la cáscara contiene otros minerales como el carbonato de magnesio y el fosfato de calcio. También incluye materia orgánica, como glicoproteínas y proteoglicanos, así como trazas de elementos esenciales como el boro, estroncio, cobre, hierro, manganeso, molibdeno, azufre, silicio y zinc. Aunque la cáscara también contiene metales pesados como plomo, aluminio, cadmio y mercurio, estos están presentes en niveles mínimos, lo que permite su uso en suplementos dietéticos [46].

El aprovechamiento industrial de la cáscara de huevo como residuo agroindustrial ha ganado importancia, proporcionando una alternativa para el desarrollo de nuevos productos y la sustitución de ingredientes en formulaciones existentes, contribuyendo así a la economía circular. El carbonato de calcio obtenido de la cáscara se utiliza ampliamente en la industria farmacéutica como excipiente en formas sólidas de dosificación y como reemplazo del bicarbonato de sodio en tabletas efervescentes, mejorando las propiedades de flujo y compresibilidad del granulado. En la industria cosmética, se aprovecha principalmente la membrana interna de la cáscara, que es rica en colágeno. Este colágeno, una proteína fibrilar clasificada como escleroproteína debido a su insolubilidad, se utiliza por sus propiedades beneficiosas para la piel. Mediante procesos de hidrólisis, se separan componentes valiosos como el colágeno y el ácido hialurónico. El colágeno aporta resistencia y soporte a estructuras como la piel, los huesos, los tendones, los músculos, los cartílagos y los órganos internos. El ácido hialurónico, por su parte, es un polisacárido que retiene agua en la dermis, proporcionando elasticidad y participando en la fibrogénesis, lo que contribuye a la integridad de la estructura de la piel. Estos componentes se utilizan en una variedad de productos farmacéuticos y cosméticos, destacando la versatilidad y el valor de la cáscara de huevo [46].

La utilización de la cáscara de huevo como residuo agroindustrial resalta como una opción para la creación de productos innovadores y como reemplazo de componentes en formulaciones establecidas. Su uso no solo disminuye el impacto ambiental de dicho residuo, sino que también presenta beneficios notables, como su asequibilidad y fácil disponibilidad. Varios estudios respaldan su versatilidad en diversas industrias, como farmacéutica, alimentaria, agropecuaria, cosmética, química, textil y medicinal. Se ha demostrado su utilidad como suplemento cálcico,

alimentos fortificados, desarrollo de alimentos, entre otras aplicaciones. También se ha empleado para la creación de biopelículas para envases en las áreas farmacéutica y alimentaria, especialmente al combinarse con proteína de trigo. Otras investigaciones muestran su eficacia como material de relleno en la fabricación de plásticos biodegradables, ya que presenta una resistencia adecuada en tales aplicaciones. También presenta propiedades como fuente de baja toxicidad química y carencia de microorganismos patógenos [49].

2.6 Biodegradabilidad

La descomposición de un material puede llevarse a cabo de forma aeróbica o anaeróbica, debido a la actividad enzimática de microorganismos como bacterias, hongos y algas en condiciones típicas del entorno. Los productos considerados biodegradables en la nueva generación de materiales están predominantemente constituidos por derivados del papel o biopolímeros. Estos últimos se obtienen principalmente de cuatro fuentes fundamentales: animal, marina, agrícola y microbiana. Cada una de estas fuentes aporta propiedades distintivas a los biopolímeros empleados en la producción de productos biodegradables. El objetivo que tiene emplear biopolímeros en productos biodegradables es reducir el impacto ambiental al facilitar su descomposición más rápida. Los materiales convencionales pueden persistir durante períodos prolongados en el medio ambiente, mientras que los biopolímeros buscan reintegrarse a la naturaleza en un tiempo significativamente menor. Esta medida contribuye a mitigar la acumulación de residuos y respalda la sostenibilidad del medio ambiente [50].

Los materiales biodegradables se ven afectados por diversos factores que influyen en su capacidad de degradación. Los factores ambientales, como la temperatura, humedad, oxigenación y pH, tienen un papel crucial. Las temperaturas óptimas y la disponibilidad de agua son esenciales para la actividad microbiana que lleva a cabo la biodegradación, mientras que la presencia de oxígeno o condiciones anaeróbicas también afectan el proceso. Adicionalmente, las propiedades inherentes del material, como su composición química, cristalinidad, peso molecular y presencia de aditivos determinan qué tan fácilmente puede ser degradado. Materiales más amorfos, con moléculas más pequeñas y sin aditivos inhibidores, tienden a ser más biodegradables. Los factores biológicos, como el tipo y cantidad de microorganismos presentes, así como la disponibilidad de nutrientes, también influyen en la tasa y grado de degradación. En resumen, la biodegradabilidad de un

material depende de la interacción de estos múltiples factores ambientales, materiales y biológicos, lo que determina su potencial de descomposición [51].

2.7 Mojabilidad

Es la capacidad que posee un material para entrar en contacto con líquidos, que se mide por su habilidad para absorber o repeler líquidos y se evalúa mediante el ángulo de contacto que forma una gota de líquido sobre él. La disminución del ángulo de contacto indica un aumento en la mojabilidad. Se considera que un líquido presenta mojabilidad cuando el ángulo de contacto es inferior a 90° , mientras que un ángulo superior a 90° indica la falta de mojabilidad del líquido en la superficie [52].

METODOLOGÍA

3.1 Búsqueda de información bibliográfica

La búsqueda bibliográfica se llevó a cabo en diferentes bases de datos como: Scopus, Google Scholar, y SCieLo, buscando artículos, patentes, libros, entre otros. En donde se buscaron palabras claves como empaques y utensilios biodegradables, uso de residuos para la fabricación de empaques, entre otras; esto con el fin de observar los materiales usados en la actualidad y las técnicas para la obtención de utensilios o empaques a partir de materiales biodegradables. Esta búsqueda se extendió durante el tiempo total del trabajo.

3.2 Extracción y caracterización de materias primas

En esta etapa del trabajo se obtuvo el almidón de papa y el polvo de cáscara de huevo, ambos provenientes de productos de desecho del sector terciario, en este caso fueron donados por la cafetería de deportes de la Universidad de Antioquia. Se realizaron las siguientes etapas:

3.2.1 Obtención de la cáscara de huevo y de papa

Las cáscaras de papa y de huevo, fueron obtenidas de la cafetería de deportes de la Universidad de Antioquia.

3.2.2 Preparación de las cáscaras de papa

Las cáscaras de papa se sometieron a un proceso de limpieza hasta que quedaron completamente libres de suciedad y tierra. Para lograr esto, las cáscaras se sumergieron repetidamente en agua, donde se mezclaron manualmente. Este proceso involucró varios ciclos de lavado, asegurando que cada rastro de impureza fuera eliminado y las cáscaras quedaran en óptimas condiciones para su uso posterior.

3.2.3 Obtención del almidón de papa

Para la obtención del almidón de papa se siguió el protocolo realizado por Villalobos et al (2014) [53] . Las cáscaras de papa fueron inicialmente sometidas a un proceso de trituración en una licuadora, utilizando agua destilada en una cantidad que duplicaba el volumen de las cáscaras. La mezcla resultante se dejó reposar durante aproximadamente tres días, permitiendo que las partículas sólidas se asentaran. Después de este período, la mezcla se pasó por un colador para eliminar las partículas más grandes. Posteriormente, se realizó un segundo proceso de filtrado utilizando una tela fina, seguido de un reposo adicional por tres horas. Finalmente, se eliminó el líquido sobrante, conservando el precipitado en el que según lo reportado en la literatura se encontraba el almidón.

3.2.4 Caracterización por espectroscopía UV-vis

Se realizó un barrido entre los 250 y 400 nm, con el fin de corroborar si se presentaban los picos característicos de este polímero. Fiedorowicz et al (2010), donde se sugiere que el almidón presenta un pico alrededor de los 260 nm. Para realizar esta medición se empleó un espectrofotómetro marca MAPADA 3200 PC [54].

3.2.5 Preparación de la cáscara de huevo

Las cáscaras de huevo se recolectaron y se lavaron cuidadosamente utilizando una solución de hipoclorito de sodio al 2 % v/v, con el propósito de eliminar cualquier residuo y microorganismos presentes en ellas. Después de este lavado, las cáscaras se dejaron secar durante dos días para eliminar completamente el agua residual. Una vez secas, las cáscaras estaban listas para ser sometidas al proceso de molienda.

3.2.6 Proceso de molienda

Para obtener un polvo de cáscara de huevo, inicialmente se llevó a cabo la trituration inicial en una licuadora. Posteriormente, el material triturado se dividió en dos partes. Una parte se conservó en su estado inicial, triturada únicamente con la licuadora. La otra parte se sometió a un proceso de pulverización adicional utilizando un molino centrífugo de bolas. Esta pulverización se complementó pasando el material por un tamiz de malla número 100, con el fin de obtener partículas finas. Estos dos tipos de polvo de cáscara de huevo fueron utilizados posteriormente en la preparación de diversas composiciones.

3.3 Formación del producto

3.3.1 Formulación de composiciones

Para la formulación de las composiciones, se utilizó cáscara de huevo y almidón de papa en una proporción de 2:1, respectivamente. Además, se adicionó carboximetilcelulosa en concentraciones del 1, 10 y 20 % del peso de la cáscara de huevo utilizada en la mezcla.

Tabla 1. Composición de las tablas.

MARCACIÓN	COMPOSICIÓN			
1	Cáscara tamizada	_____	Agua	_____
2	Cáscara tamizada	_____	Agua	CMC 10%
3	Cáscara tamizada	_____	Agua	CMC 1%
4	Cáscara tamizada	Almidón	Agua	_____
5	Cáscara tamizada	Almidón	Agua	CMC 10%
6	Cáscara tamizada	Almidón	Agua	CMC 1%
7	Cáscara sin tamizar	_____	Agua	_____
8	Cáscara sin tamizar	Almidón	Agua	CMC 10%
9	Cáscara sin tamizar	Almidón	Agua	CMC 1%
10	Cáscara sin tamizar	Almidón	Agua	CMC 20%

3.3.2 Preparación de muestras preliminares

Se prepararon muestras preliminares utilizando placas multipozos para cultivo celular como los moldes, esto con el fin de ser sometidas a tratamientos térmicos para observar el comportamiento de las mezclas.

3.3.3 Secado de las muestras

Las muestras preparadas en los moldes de pozos se secaron en estufa a una temperatura de 70°C durante aproximadamente 8 horas, esto con el fin de eliminar la mayor cantidad de agua que tuviera la mezcla.

3.3.4 Proceso de sinterización

Luego del secado, las muestras se sometieron a un proceso de sinterización en donde se definieron 3 rampas iniciales, una a 200 °C que se mantuvieron durante una hora, luego una rampa de 600 °C durante otra hora, y la última rampa de sinterización fue a 800 °C durante 30 minutos. Adicionalmente algunas muestras se sometieron a tratamientos térmicos en 100° y 300°,

esto con el fin de observar si había diferencia entre el proceso de sinterización y tratamientos térmicos con menores temperaturas.

3.3.5 Selección de las muestras

Luego de los tratamientos térmicos, se eligieron 6 composiciones las cuales presentaron propiedades mecánicas aceptables, las cuales fueron las muestras 5, 5 A, 5 B, 6, 8 A y 9.

3.4 Métodos de fabricación

Para la fabricación de este producto, se evaluaron cuatro métodos diferentes:

3.4.1 Impresión 3D

En el primer método, se imprimió un modelo patrón de la cubertería en la impresora 3D Creality CR-5 Pro. Se buscó un molde en línea y se creó utilizando PLA para obtener el molde final.

3.4.2 Molde de yeso

Para el segundo método, se utilizó un molde de yeso. Con la ayuda de una cuchara de plástico, se creó un espacio negativo que luego se rellenó con el material deseado para obtener la cuchara.

3.4.3 Molde de alginato

Como tercer método, se empleó alginato. Se realizó un molde cuadrado con el material y se introdujo una cuchara para crear el espacio negativo, de manera similar al método del molde de yeso.

3.4.4 Molde de silicona

Por último, se utilizó un molde de silicona adquirido comercialmente.

3.5 Evaluación del tiempo de degradación

Con el objetivo de conocer el comportamiento del material en diferentes entornos, se realizaron ensayos para evaluar su degradación tanto en agua como en tierra. Esto permitiría determinar la velocidad y el grado de degradación del material en estos dos medios. Las muestras fueron sometidas a pruebas en ambos entornos, agua y tierra, con el fin de obtener resultados que permitieran verificar si el material cumplía con los requisitos de la norma ASTM D6400 [55]. Al someter las muestras a estas condiciones controladas, se buscaba simular el posible comportamiento del material en escenarios reales, donde podría entrar en contacto con el agua o ser dispuesto en suelos. De esta manera, se pudo evaluar de manera integral el desempeño del material en términos de su biodegradabilidad. Para la evaluación en tierra, se introdujeron las muestras en una zona verde de la Universidad de Antioquia, estas muestras se depositaron a una profundidad de 10 cm, y se recubrieron con tierra, inicialmente se planificó realizar mediciones específicas en intervalos de 8, 15, 30 y 45 días para registrar la descomposición de los utensilios biodegradables. En el caso de la evaluación en agua, se sumergieron las muestras en agua destilada y se sometieron a agitación constante en el shaker (marca), a 100 rpm, produciendo condiciones realistas de exposición a entornos hídricos.

3.6 Determinación de propiedades mecánicas y mojabilidad

Para determinar las características físicas de las muestras, se empleó una máquina universal de ensayos marca Shimadzu, la cual se encuentra en el laboratorio de ingeniería mecánica, para evaluar las características físicas de las muestras. Para cada muestra, se utilizaron probetas de dimensiones de 2 x 2 cm para cada formulación del material. A través de la máquina universal de ensayos, se aplicaron fuerzas controladas sobre las probetas para medir la resistencia a la tensión y compresión.

Adicionalmente, se utilizó una máquina de ángulo de contacto para medir la mojabilidad de cada muestra. Esta prueba evalúa la capacidad del material para absorber o repeler líquidos, lo cual es importante para determinar su funcionalidad para su aplicación.

ANÁLISIS Y RESULTADOS

4.1 Extracción y caracterización de materias primas

4.1.1 Obtención del almidón

La extracción de almidón de cáscaras de papa se logró mediante un proceso de trituración, reposo y filtrado tal como se muestra en las figuras 2 y 3. El método consistió en triturar las cáscaras de papa y mezclarlas con agua destilada en una proporción duplicada al volumen de las cáscaras. Después de un reposo de tres días para permitir la sedimentación de las partículas sólidas, la mezcla fue filtrada primero a través de un colador y luego mediante una tela fina. Posteriormente, se separó el líquido sobrante y se conservó el precipitado que contenía el almidón. El método de extracción demostró ser efectivo en la obtención de almidón, el cual fue evaluado posteriormente mediante técnicas de caracterización como la espectroscopia UV-vis. La eficacia del método se debió a la simplicidad y facilidad de implementación, así como a su bajo costo de los materiales y equipos requeridos.



Figura 1. Proceso de licuado



Figura 2. Filtrado y sedimento resultante

4.1.2 Caracterización por Espectroscopia UV-vis de la Cáscara de Papa

En la figura 3 se observa el espectro UV-vis del almidón obtenido, el cual tiene dos picos uno alrededor de los 200 nm, y otro en 250 nm, según lo reportado por Bahdanovich et al (2022) [56], el almidón de papa presenta un pico entre los 230 y 280 nm. El almidón es un polisacárido compuesto por amilosa y amilopectina. Estudios han demostrado que el almidón, especialmente el de papa, presenta un pico de absorbancia en el rango de 260-265 nm en el espectro UV-Vis. Este pico se atribuye a la estructura química del almidón, específicamente a los anillos de glucosa que conforman las cadenas de amilosa y amilopectina [57]. Los anillos de glucosa tienen estructuras aromáticas conjugadas que absorben luz UV en longitudes de onda cercanas a 260 nm. La intensidad y posición exacta del pico pueden variar ligeramente dependiendo de factores como el origen botánico del almidón, su grado de cristalinidad, entre otros.

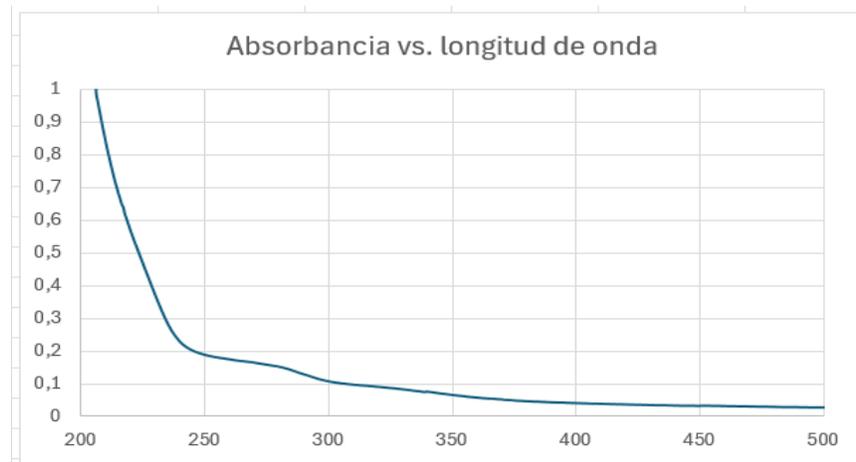


Figura 3. Espectro UV-vis del almidón.

4.1.3 Preparación de la cáscara de huevo

Como se muestra en la figura 4, las cáscaras de huevo se lavaron cuidadosamente utilizando una solución de hipoclorito de sodio al 2% v/v, para de eliminar cualquier residuo y microorganismos presentes. Adicionalmente se le quito la membrana a las cáscaras las cuales tienen diferentes proteínas que podrían interferir con el desarrollo del proyecto. Después de este lavado, las cáscaras se dejaron secar durante un día a 40° C para eliminar completamente de humedad.



Figura 4. Cáscaras de huevo en hipoclorito

4.1.4 Proceso de molienda

En la figura 5, se muestran las cáscaras de huevo antes y después del proceso de en el equipo de molino de bolas, se puede observar como este proceso permite obtener un polvo fino (figura 5.b), mientras que sin este proceso se obtienen partículas con un tamaño mucho mayor (figura 5.a). la disminución de tamaño conlleva a una mejor respuesta material en el proceso de sinterización, esto debido que se está aumentando la superficie de contacto. Por otra parte, al unir la cáscara en partículas finas con unas de mayor tamaño, podría ayudar a que estas últimas se puedan unir en procesos térmicos, esto debido a que las partículas finas se introducirían en los espacios que quedan en la unión de partículas de mayor tamaño [58].



Figura 5. Cáscaras de huevo procesadas únicamente en licuadora y cáscaras de huevo después del proceso de molienda en licuadora, molino de bolas y tamizado.

4.2 Formación del producto

4.2.1 Formulación de composiciones

Inicialmente, se prepararon muestras con diferentes composiciones (tabla 1) con el objetivo de evaluar varias mezclas antes de proceder a la elaboración de los utensilios reales. Para la formulación de las composiciones, se utilizó una mezcla de cáscara de huevo y almidón de papa

en una proporción de 2:1, respectivamente. La cáscara de huevo se preparó de dos maneras diferentes: en algunas mezclas se utilizó tamizada, mientras que en otras se empleó sin tamizar. Adicionalmente, se incorporó carboximetilcelulosa (CMC) en concentraciones del 1, 10 y 20 % con relación al peso de la cáscara de huevo utilizada. Este material se incluyó con el objetivo de estudiar su efecto en las características de las mezclas, la carboximetilcelulosa ayuda a mantener la homogeneidad de la muestra, puesto que sirve como dispersante de las partículas de cáscara de huevo [59]. Además, se adicionó agua a cada una de las muestras gradualmente hasta alcanzar una densidad idónea, la cual facilitara el proceso de moldeo. Se observó que las muestras con mayor cantidad de CMC requerían una mayor cantidad de agua para alcanzar la densidad adecuada. Esto se debe a la capacidad de la CMC para absorber y retener agua, lo que aumenta la viscosidad de la mezcla.

4.2.2 Preparación de muestras preliminares

En la figura 6, se muestra el molde usado para la elaboración de estructuras con las diferentes formulaciones. Este molde tiene geometría cilíndrica con altura y diámetro de 2 cm, este tipo geometría facilitó el desarrollo de los diferentes ensayos propuestos, los cuales permitieron determinar las formulaciones con mejores propiedades tanto a nivel de degradación, como de propiedades mecánicas, para ser sometidas al proceso de moldeo. Estos moldes se cubrieron con vinipel, con el fin de facilitar la extracción de las estructuras luego del secado en estufa.

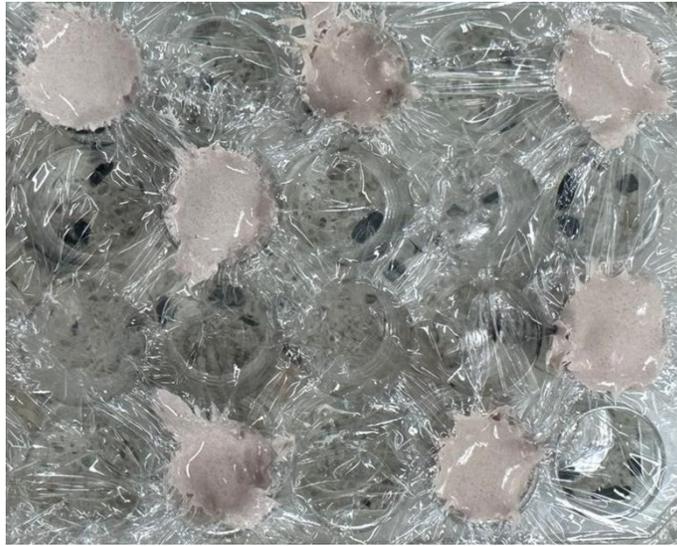


Figura 6. Multipozo utilizado para la realización de las muestras.

4.2.3 Secado de las muestras

Las muestras se llevaron a un secado en horno a 70 °C, se dispusieron tal como se muestra en la figura 7. En este proceso la muestra 7 fue descartada en esta etapa debido a que no cumplió con los requisitos de dureza y características deseadas, debido a que se fracturaban al tacto como se muestra en la tabla 2. Al analizar las muestras, se observó que las que contenían menos cantidad de CMC se secaban con mayor rapidez debido a su capacidad de absorción. Además, las muestras con un 10 % de CMC presentaron buenas propiedades mecánicas, lo que sugiere que esta cantidad es adecuada para obtener las propiedades deseadas. Por esta razón, no se evaluaron formulaciones con mayor cantidad de CMC, por lo cual se descartó la muestra 10 que contenía un 20% de CMC. En esta fase del proceso, se observó que las muestras presentaban una adecuada resistencia a la compresión, no se fracturaban ni se desintegraban con facilidad al manipularlas manualmente.



Figura 7. Muestras llevadas al horno para el proceso de secado.

4.2.4 Proceso de sinterización

Después del secado en estufa, las muestras se sometieron a un proceso de sinterización en donde se definieron 3 rampas, una a 200°C que se mantuvo durante una hora, luego una rampa de 600°C durante otra hora, y la última rampa de sinterización fue a 800°C durante 30 minutos. En este proceso no se obtuvo un resultado satisfactorio, puesto que ninguna de las muestras presentó propiedades mecánicas adecuadas, con resistencia mecánica muy baja, debido a que la mayoría de las muestras perdieron su forma original quedando en pequeños fragmentos o polvo como se puede observar en la figura 8. Por esta razón, se realizaron modificaciones en los parámetros del tratamiento térmico, aumentando los tiempos de sostenimiento, los tiempos de subida de temperatura y temperatura final, quedando de la siguiente manera: la nueva configuración incluyó una temperatura inicial de 200°C con un tiempo de subida de dos horas y un sostenimiento de 1 hora y media seguida de una segunda rampa a 600°C con un tiempo de subida de 2 horas y un sostenimiento de esta temperatura durante 2 horas. La tercera y última rampa alcanzó una temperatura de 825°C, correspondiente al punto de fusión del carbonato de calcio [60], con un tiempo de subida de 2 horas y un sostenimiento de 2 horas.



Figura 8. Resultado obtenido en el primer sinterizado.

Los resultados con las modificaciones hechas en el tiempo y temperatura de sinterización se muestran en la figura 9, se puede evidenciar que este proceso de sinterización no logró cumplir con los objetivos deseados, debido a que todas las muestras se convirtieron en polvo. Las dos técnicas de sinterización empleadas no fueron efectivas debido a las altas temperaturas utilizadas en el proceso, lo que afectó negativamente a los dos polímeros utilizados en la composición, el almidón y la CMC y adicionalmente debido a que se llevó a unas temperaturas altas, el cerámico utilizado pasa de ser carbonato de calcio a ser óxidos de calcio [61]. A altas temperaturas se evidenció un deterioro significativo en las propiedades mecánicas de las muestras, llegando incluso a quedar pulverizadas. Sin embargo, se evidencio que, durante el secado a 70°C, las muestras mantenían mejores propiedades, en vista de lo anteriormente mencionado, se llevaron a cabo dos tratamientos térmicos con temperaturas más bajas, específicamente a 100°C y 300°C por 2 horas.



Figura 9. Resultado obtenido en el segundo sinterizado.

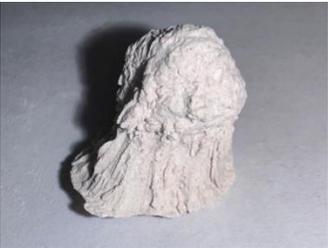
Se obtuvieron en total 24 muestras entre los tratamientos térmicos de 100°C y 300°C, cada muestra fue sometida a una presión manual para evaluar su respuesta y resistencia al tacto, en la tabla 2 se puede observar los resultados obtenidos.

Para diferenciar las muestras como se observa en la tabla 2, se utilizó un sistema de nomenclatura de la siguiente forma:

1. Las muestras que solo fueron secadas a 70°C durante 8 horas se identificaron únicamente con el número correspondiente de acuerdo con su composición.
2. Las muestras que fueron sometidas a un tratamiento térmico de 100°C se identificaron con el número de acuerdo con su composición seguido de la letra "A".
3. Las muestras que fueron sometidas a un tratamiento térmico de 300°C se identificaron con el número de acuerdo con su composición seguido de la letra "B".

Este sistema de marcado permitió diferenciar claramente las condiciones de procesamiento a las que fueron sometidas las distintas muestras, facilitando su seguimiento y análisis a lo largo del estudio.

Tabla 2. Fotografías de las muestras obtenidas después de los tratamientos térmicos.

NUMERO DE MUESTRAS A	MUESTRAS		
	MUESTRAS SOLO SECADO	MUESTRAS A (100°C)	MUESTRAS B (300 ° C)
1			
2			
3			
4			
5			

6			
7			
8			
9			

Al analizar las muestras obtenidas después de aplicarles los diferentes tratamientos térmicos como se observa en la tabla 2. Los resultados mostraron un comportamiento variable en función de la temperatura y la composición de cada formulación. Las muestras 5, 6, 8 y 9 que contienen CMC y almidón y fueron sometidas a un secado a 70°C presentaron buena resistencia mecánica, conservando su forma al aplicarles presión manual, mientras que las muestras sin CMC o sin almidón, las cuales eran las muestras 1, 2, 3 y 4, eran más débiles y se fracturaban al tacto.

Con un tratamiento a 100°C, las muestras 5 A y 8 A aún mostraban un buen comportamiento mecánico, pero las muestras 6 A y 9 A se tornaban más débiles, razón por lo que fueron descartadas, seleccionando únicamente las muestras 5 y 8. Con el tratamiento a 300°C, sólo la muestra 5 conservaba una buena resistencia mecánica, mientras que el resto se fracturaron con mayor facilidad. Según estos resultados, se seleccionaron las muestras 5, 6, 5A, 5B, 8A y 9 para la elaboración del ensayo de propiedades mecánicas y degradabilidad. Las muestras seleccionadas tenían diferentes composiciones por ejemplo la muestra 5, posee un 10% de CMC, esta demostró un buen comportamiento incluso tras el tratamiento a 300°C, lo cual se le podría atribuir al mayor contenido en CMC y al tamizado del polvo de cáscara de huevo. Las muestras 8A (10% CMC) y 9 (1% CMC) con cáscara sin tamizar también presentaban buenas propiedades, por lo que se seleccionaron junto a la muestra 6 que está compuesta por cáscara de huevo tamizada, 1 % de CMC y almidón, para continuar evaluando su potencial como material para la producción de utensilios biodegradables.

4.3 Evaluación de degradación

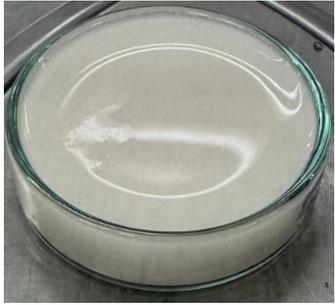
En la tabla 3 se muestran los resultados de la prueba de degradabilidad en agua, después de 5 días las muestras presentaban un alto grado de degradación, por lo que se sacaron del agitador y se secaron para determinar el peso final. Al comparar el peso inicial de la muestra con su peso posterior a la degradación y el secado, se pudo determinar cuánto material se ha descompuesto o eliminado durante el proceso.

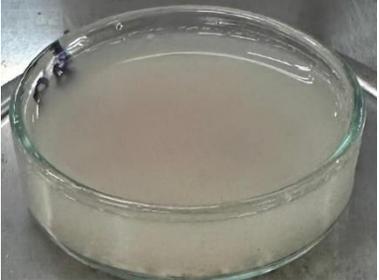
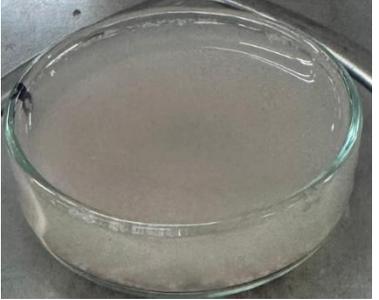
Al evaluar los porcentajes de pérdida de peso, se observó que la muestra 5B presentó la menor degradación de las muestras, con una pérdida de peso del 2%. Esto se pudo evidenciar durante el secado de las muestras, donde se notó que aún quedaba una parte significativa de la muestra entera. La muestra 5A presentó una pérdida de peso del 5,95%, seguida de la muestra 8A con una pérdida de peso del 7.29%. Las muestras que mejor presentaron degradación en el agua fueron las muestras 9, con una pérdida de peso del 24,11%, la muestra 5 con una pérdida de peso del 25,16%, y la muestra 6 con una pérdida de peso del 37,13%. Se puede concluir que las muestras 9, 5 y 6 fueron afectadas significativamente por el proceso de degradación en agua.

Debido al tratamiento térmico a las que se sometieron las muestras 5B y 5A en comparación con la muestra 5, se observa que estos dos tratamientos tuvieron una pérdida de peso menor, esto puede atribuirse a diferentes factores, como por ejemplo una posible carbonización de la muestra 5B, esto hace que presente propiedades impermeables y de baja porosidad [62]. Otra posible causa es el tamaño de partícula, lo cual en el proceso de sinterización hace que se presente una mejor unión de ellas.

En el caso de las muestras 8A y 9, donde la cáscara no fue pulverizada, es probable que quede más material sin degradar en comparación con las otras muestras donde la cáscara de huevo se llevó a un tamaño de partícula mucho menor. Las partículas más grandes tienen una superficie específica menor en comparación con las partículas más finas. Esto significa que hay menos área superficial expuesta a los agentes degradantes, lo que puede retardar el proceso de degradación. Comparando estas dos muestras, se pudo evidenciar una diferencia de degradación entre las dos muestras, degradándose aproximadamente un 16 % más la muestra 9. Esto pudo deberse a la misma situación que se observó en las muestras 5; debido a que la muestra 8 A se sometió a un tratamiento térmico de mayor temperatura, existe mejor unión entre las partículas de su composición. Las muestras 5 y 6, que no recibieron tratamientos térmicos a altas temperaturas y tienen un tamaño de partícula más pequeño, presentan una superficie más grande. Esto podría facilitar la degradación del material, lo que a su vez acelera la degradación del polvo de cáscara de huevo. El tamaño de las partículas permite una mayor interacción con los agentes degradantes y, en consecuencia, estas dos muestras presentan una degradación más rápida en el tiempo en comparación con las demás muestras.

Tabla 3. Fotografías de las muestras utilizadas en la evaluación de degradación en agua.

INFORMACION DE LAS MUESTRAS UTILIZADAS PARA PRUEBA DE DEGRADACIÓN EN AGUA					
Muestra #	Peso muestra antes	Peso muestra después	Porcentaje de pérdida de peso	Foto antes	Foto después
5	1.29g	0.97g	25.16%		
6	0.86g	0.54g	37.13%		
5 A	1.36g	1.29g	5.95%		
5 B	0.91g	0.89g	2.05%		
8 A	1.32g	1.22g	7.29%		

					
9	1.73g	1.31g	24.11%		

En la tabla 4 se exhiben los resultados obtenidos en la prueba de degradación en tierra, estos resultados se presentaron a los 7 días del inicio del ensayo. Cabe resaltar, que esta prueba se realizó durante una temporada de lluvia, lo que pudo haber acelerado el proceso de degradación. La humedad excesiva y la presencia de agua en el suelo pueden favorecer la actividad microbiana, lo que podría explicar la rápida degradación observada en algunas de las muestras.

Al evaluar las muestras, se encontró que la muestra 6 y la muestra 5B estaban completamente degradadas, ya que no se encontró presencia alguna de ellos en la tierra. Por otro lado, las muestras 5 y 5A mostraron una buena degradabilidad, ya que se desintegraron significativamente como se puede observar en las imágenes presentadas.

Esto se puede atribuir a la composición de los materiales, ya que tanto el almidón como la carboximetilcelulosa son polímeros que se pueden degradar fácilmente en condiciones ambientales [63], [64] y el tamaño de la partícula de la cáscara de huevo. Además, la interacción con la humedad y microorganismos en la tierra también pudo haber acelerado la descomposición de los polímeros, causando que estas muestras se desintegraran fácilmente. Igualmente se debe tener en cuenta que estas muestras tenían un tamaño de partícula pequeño, lo que facilita su degradación.

Las muestras 8A y 9 mostraron menos degradabilidad. Mientras que la muestra 8A presentó una degradación menor que las otras muestras, la muestra 9 fue la que menos se degradó. Se encontró que la muestra 9 estaba aún en su forma original antes de someterla a la prueba, lo que sugiere que fue menos afectada por la degradación. Sin embargo, al aplicar un poco de presión, la muestra 9 también se desintegró, lo que indica que tenía un proceso alto de degradación. Se puede atribuir la menor degradación de la muestra 9 a su tamaño de partícula, que era más grande que el de las otras muestras. Esto hizo que fuera más difícil para los microorganismos adentrarse en el material y causar la degradación. Además, el tamaño de partícula también puede haber afectado la disponibilidad de nutrientes para los microorganismos, lo que podría haber reducido la tasa de degradación.

Tabla 4. Fotografías de las muestras utilizadas en la evaluación de degradación en tierra.

INFORMACION DE LAS MUESTRAS UTILIZADAS PARA PRUEBA DE DEGRADACION EN TIERRA		
MUESTRA #	Foto antes	Fotos después
5		
6		_____

<p>5 A</p>		
<p>5 B</p>		<hr data-bbox="1122 915 1310 919"/>
<p>8 A</p>		
<p>9</p>		



4.4 Determinación de las pruebas mecánicas

Durante el ensayo, como se puede observar en la figura 10 y 11, todas las muestras mostraron un comportamiento similar al de un material polímero. Esto se puede atribuir a que el material de las muestras está compuesto por dos polímeros, carboximetilcelulosa y almidón de papa, esta composición puede ser el factor determinante en el comportamiento mecánico observado en las muestras. También se puede observar en la tabla 5 que el valor de esfuerzo máximo lo obtuvo la muestra 5 A, esto se le puede atribuir al tamaño de partícula y a la cantidad de CMC en su composición, esto puede incidir en las propiedades de cada material.

Tabla 5. Información de las muestras utilizadas para la prueba de resistencia a la compresión.

INFORMACION DE LAS MUESTRAS UTILIZADAS PARA PRUEBA DE COMPRESIÓN		
Muestra #	Nombre de las muestras en la prueba de resistencia a la compresión	Valor máximo de esfuerzo (MPa)
6	M1	2.105
5	M2	8.770
5 A	M3	4.345
5 B	M4	0.23
8 A	M5	2.327
9	M6	1.450

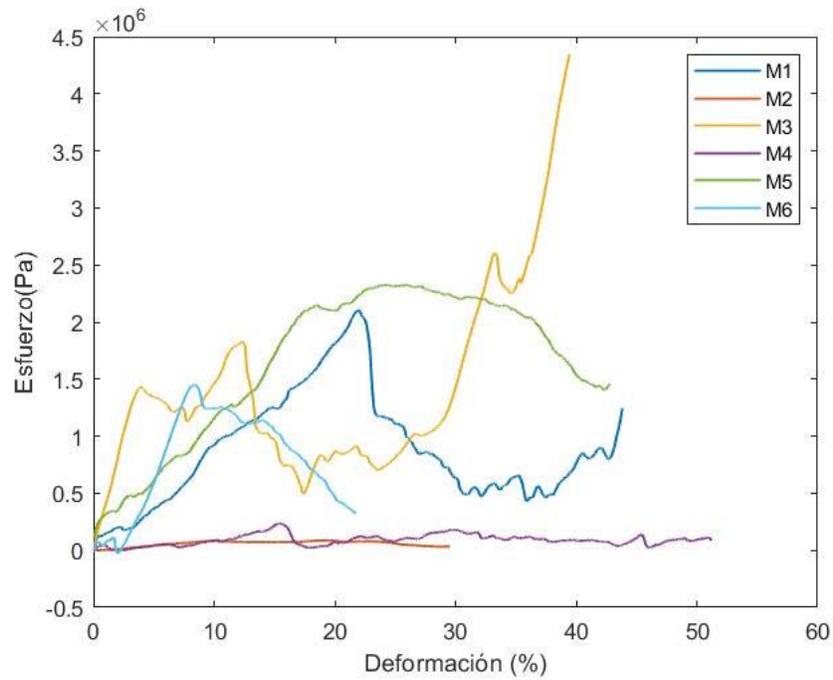


Figura 10. Gráfica de esfuerzo vs deformación en el ensayo resistencia a la compresión de las muestras.

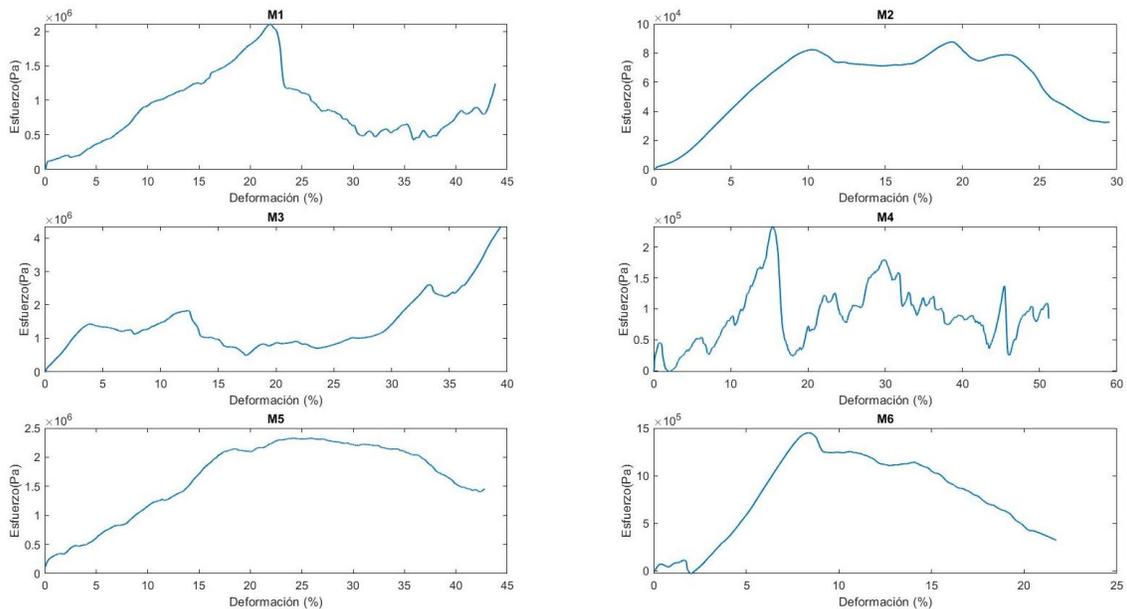


Figura 11. Gráficas individuales de esfuerzo vs deformación en el ensayo resistencia a la compresión de las muestras.

4.5 Métodos de fabricación

4.5.1 Impresión 3D

En la figura 12 se puede ver el molde que se obtuvo por medio de la impresora 3D. En este molde de PLA, se vertió la solución acuosa de la mezcla de cáscara de huevo pulverizada y almidón de papa. Posteriormente, el molde se llevó a secado en estufa para evaporar el agua presente en la mezcla. En la figura 13 se puede observar una de las cucharas obtenidas con este molde. Sin embargo, este método no arrojó los resultados adecuados, esto debido a la geometría y el material del molde, lo cual no permitía un secado homogéneo en todas las partes del utensilio. Incluso después de un secado adicional de 3 horas en estufa a 70°C, las muestras seguían húmedas en la zona de contacto con el material del molde. Otra desventaja observada fue la dificultad para llenar completamente la parte convexa del molde, lo que provocaba que estas áreas quedaran con poco material y fueran propensas a romperse.



Figura 12. Molde obtenido de impresión 3D.



Figura 13. Cuchara obtenida con el molde de impresión 3D.

4.5.2 Molde de yeso

El segundo método evaluado fue el de colado. Si bien este método permitió un buen secado del material como se ve en la imagen 14, la geometría delgada del utensilio provocaba que este se quebrara fácilmente durante el desmoldeo.



Figura 14. Molde obtenido por el método de colado.

4.5.3 Molde de alginato

En la figura 15 se observa el moldeado utilizando alginato. El molde de alginato es un método comúnmente utilizado en odontología para crear moldes dentales. Sin embargo, al llevar a secado este material, se observó que se contraía y contrayendo también el material que se encontraba dentro del molde. Esto se debe a que el alginato es un material que se expande cuando se humedece y se contrae cuando se seca. Esto se debe a que el agua se encuentra en el interior del material y cuando se evapora, el material se contrae y pierde estabilidad horas después.



Figura 15. Molde obtenido de alginato.

4.5.4 Molde de silicona

Finalmente, como se muestra en la figura 16, se evaluó el uso de un molde de silicona, este método permitió obtener utensilios bien definidos. En este molde, las muestras se secaban fácilmente, y gracias a las propiedades del material, el calor se distribuía uniformemente, secando no solo la

parte superior, sino también las zonas en contacto con el molde. Esta distribución homogénea del calor, junto con la facilidad de desmoldeo proporcionada por el material de silicona, hicieron de este el método más efectivo para la fabricación de los utensilios biodegradables tal como se muestra en la figura 17, donde se evidencia que las cucharas mantenían su forma y estructura de una manera adecuada.



Figura 16. Molde de silicona utilizado.



Figura 17. Cucharas obtenidas con el molde de silicona.

Durante el proceso de moldeo, se presentaron algunos problemas relacionados con la sedimentación de los componentes de la mezcla. Al verter el material en los moldes, se observó que las partículas más pesadas, en este caso las de cáscara de huevo, tendían a sedimentarse, como se muestra en la figura 18. Este fenómeno ocurrió en todas las muestras evaluadas.

Otro inconveniente que se observó fue la presencia de espacios vacíos sin material a la hora del llenado de los moldes.

Además, de que los utensilios fabricados experimentaron una contracción significativa al secarse, lo que fue más notable en la muestra 5. Esto se debió a que estas muestras requerían una mayor cantidad de agua debido a la cantidad de carboximetilcelulosa CMC aplicada, ya que esta sustancia absorbe una gran cantidad de agua. Sin embargo, al secarse la muestra, el volumen del material disminuyó debido a la evaporación del agua, lo que resultó en una geometría indeseada. Al secarse la muestra, el volumen del material disminuyó debido a la evaporación del agua, lo que resultó en una geometría indeseada.



Figura 18. Sedimentación de partículas con mayor densidad y porosidad.

Para solucionar estos problemas, se redujo la cantidad de agua en las mezclas, con el objetivo de que las partículas más densas, que en este caso eran las de cáscara de huevo, se depositaran en el fondo del molde de manera más controlada. Esta estrategia funcionó satisfactoriamente en el caso de la muestra 8 A que se puede observar en la figura 19, debido a que al reducir la cantidad de agua en las mezclas 6 y 5 para evitar la sedimentación, se observó un aumento en la formación de burbujas de aire. Y, por último, para resolver el problema de las burbujas; Las mezclas se vertieron en los moldes con la ayuda de una jeringa, asegurando un llenado homogéneo y evitando la formación de espacios vacíos que pudieran generar burbujas.

Después de realizar el proceso de moldeo con cada una de las composiciones evaluadas y teniendo en cuenta los resultados de las propiedades evaluadas anteriormente, se determinó que estas composiciones tuvieron resultados prometedores, por lo cual estas se les realizó la prueba de mojabilidad.

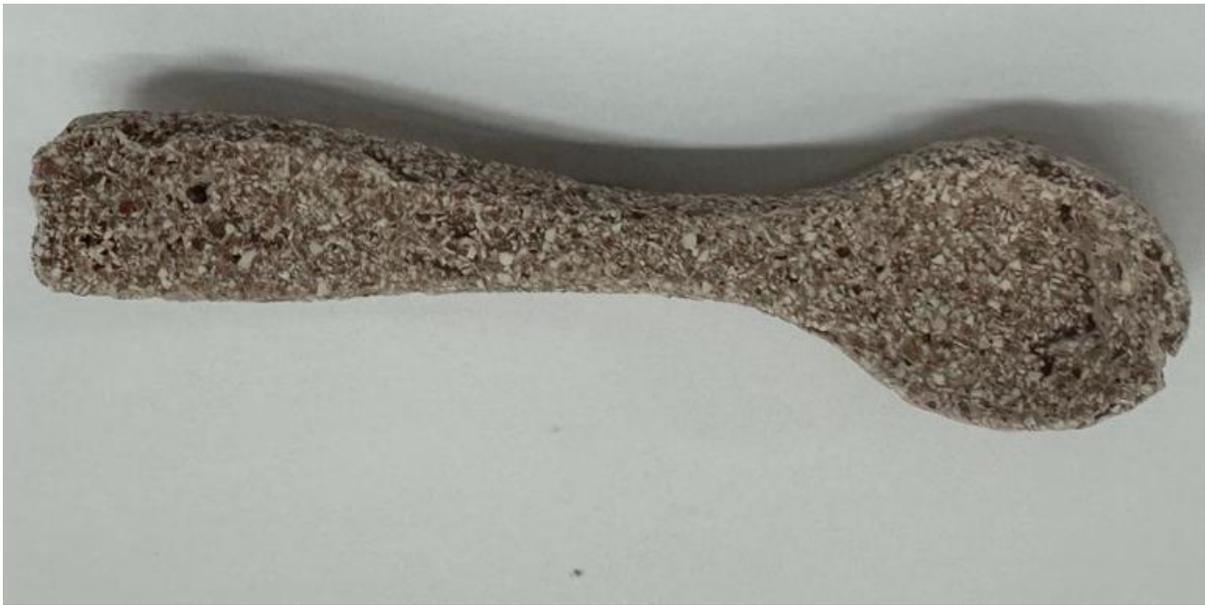
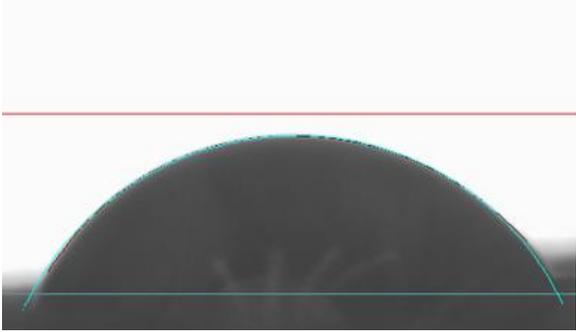
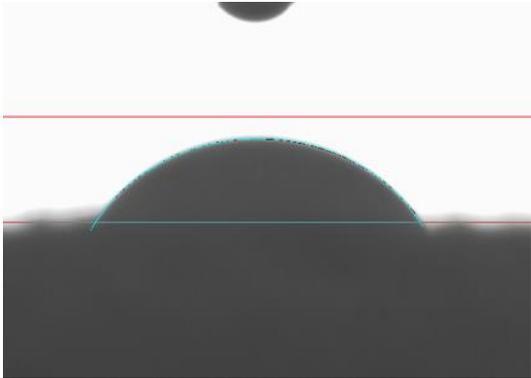
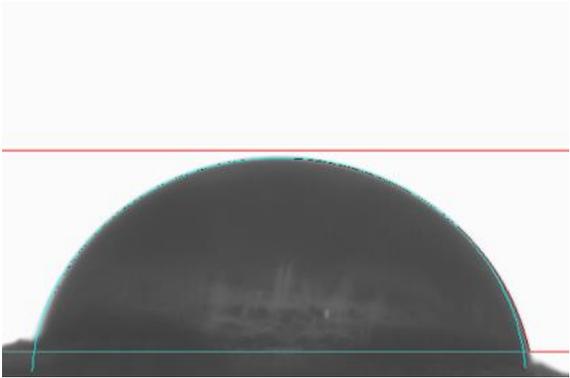


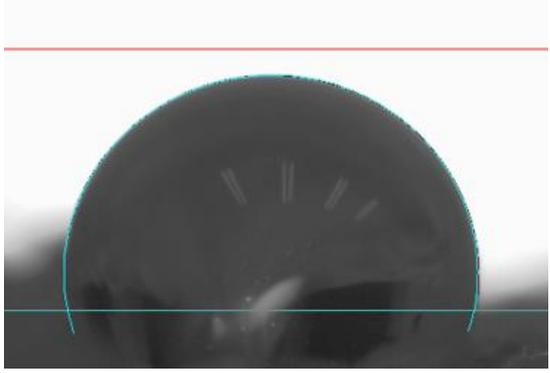
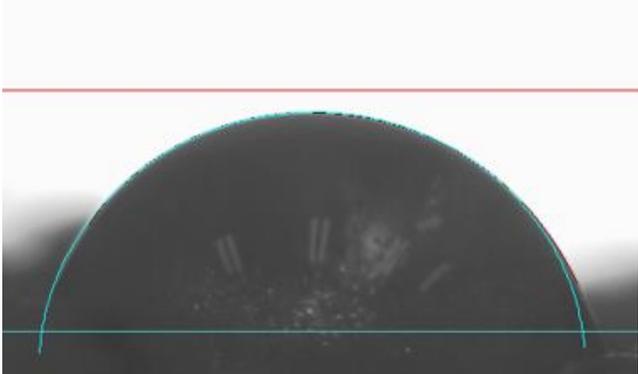
Figura 19. Resultado de reducir la cantidad de agua de la composición 8 A.

4.6 Evaluación de mojabilidad

Se realizó un análisis de ángulo de contacto para evaluar el comportamiento hidrofóbico o hidrofílico de las muestras como se puede ver en las figuras de la tabla 6. En esta evaluación únicamente se observó el comportamiento de las muestras 5, 5 A, 6 y 8 A debido a que fueron las que presentaron un mejor comportamiento a la hora del moldeo. Como se puede ver en las figuras de la tabla 6, se observó que las muestras 5, 5 A y 6 presentaron un ángulo dinámico, lo que indica que el agua se absorbe inmediatamente al tocar la superficie, este fenómeno es característico de materiales con alta afinidad por el agua. Esto se debe a la superficie porosa del material, lo que permite la absorción rápida del agua. Por otro lado, la muestra 8 A presentó un ángulo mayor a 90° grados, lo que indica una característica propia a un material con poca afinidad al agua, lo cual es una característica deseada debido a la aplicación que tendrá este material. Este comportamiento puede deberse a la composición de la muestra, la cual contiene la cáscara de huevo sin tamizar. Esto pudo deberse a que las partículas más grandes pueden ser menos uniformes y aglomerarse más fácilmente, generando zonas con menor porosidad en la superficie. Esto reduce la capacidad de absorción de agua y favorece un comportamiento hidrofóbico, ya que el agua no puede penetrar fácilmente en los poros.

Tabla 6. Fotografías tomadas con el ángulo de contacto y ángulos resultantes en la evaluación de mojabilidad.

Muestra	Angulo	Imágenes
5	61.8°	 A photograph showing a dark, semi-circular droplet on a light surface. A red horizontal line is drawn above the droplet, and a cyan horizontal line is drawn at the base of the droplet. The contact angle is indicated by a cyan arc between the two lines.
6	56.1°	 A photograph showing a dark, semi-circular droplet on a light surface. A red horizontal line is drawn above the droplet, and a cyan horizontal line is drawn at the base of the droplet. The contact angle is indicated by a cyan arc between the two lines.
5 A	80.9°	 A photograph showing a dark, semi-circular droplet on a light surface. A red horizontal line is drawn above the droplet, and a cyan horizontal line is drawn at the base of the droplet. The contact angle is indicated by a cyan arc between the two lines.
8 A	101.5	

		
8 A 1 min despues	81.0	

5. Conclusiones

- los tratamientos térmicos realizados generan variaciones en la resistencia mecánica final de las muestras, lo que conlleva a la afectación en las propiedades de la cubertería obtenida.
- Se pudo determinar que el tamaño de partícula tiene una alta influencia tanto en los resultados de compresión como de degradación, teniendo resultados más adecuados con tamaños de partículas más pequeños.
- Las muestras presentaron una tendencia en el ensayo de compresión un material compuesto, esto se debe a que combinan las propiedades de la cáscara de huevo el cual es un cerámico, con las propiedades del almidón y la CMC, los cuales son materiales poliméricos.
- La combinación de materiales biodegradables como el almidón y la CMC, junto con un tamaño de partícula optimizado de la cáscara de huevo, permitió obtener las mejores características de degradación en las muestras evaluadas.

- Se logro evidenciar un alto porcentaje de degradación tanto en medio acuoso como en tierra, lo cual hace que la cubertería obtenida tenga un alto potencial para ser usado como alternativa a la cubertería tradicional de un solo uso.
- Los resultados obtenidos muestran que tanto la cáscara de huevo, como el almidón de papa permiten obtener cubertería biodegradable, dándole así un uso a estos materiales que son un desecho de la industria alimentaria.

REFERENCIAS

- [1] Noticias de la ciencia y la tecnología, “Vasos de usar y tirar que se descomponen en 60 días,”. [Online]. Available: <https://noticiasdelaciencia.com//art/40773/vasos-de-usar-y-tirar-que-se-descomponen-en-60-dias>
- [2] Natalia Rodríguez Eugenio, Michael McLaughlin, and Daniel Pennock, “La contaminación del suelo: una realidad oculta,” 2019.
- [3] “Noticias - OCDE en español.” [Online]. Available: <https://www.oecd.org/espanol/noticias/perspectivas-globales-del-plastico.htm>
- [4] E. P. Barreto, “Los bioplásticos como sustitutos de los plásticos de un solo uso en Colombia,” 2022.
- [5] J. C. Posada and E. Montes-Florez, “Revisión: materiales poliméricos biodegradables y su aplicación en diferentes sectores industriales,” *Informador Técnico*, vol. 86, no. 1, Nov. 2021, doi: 10.23850/22565035.3417.
- [6] R. Adhemir and P. Vega, “Escuela Académico Profesional de Ingeniería Industrial”.
- [7] M. Margot Villamar Mendoza, C. Alexandra Contreras Coello, M. Amabel Cruz Correa, and E. Johanna Mendoza Sagñay, “Elaboración de utensilios de bioplástico a base de la cáscara de plátano,” 2020, [Online]. Available: <http://hdl.handle.net/20.500.11763/cccss2005elaboracion-utensilios-bioplastico>
- [8] “Diseño de una Bandeja Biodegradable a partir de la Corona de Piña Sustituyendo el Poliestireno Expandido para Mitigar la Contaminación Ambiental en la Ciudad de Tunja,” *DanielaLesmes*, 2023.

-
- [9] “Materiales biodegradables pueden sustituir al plástico - THE FOOD TECH - Medio de noticias líder en la Industria de Alimentos y Bebidas.” [Online]. Available: <https://thefoodtech.com/insumos-para-empaque/materiales-biodegradables-pueden-sustituir-al-plastico/>
- [10] M. Boro, R. J. Devi, and L. S. Sharma, “Biodegradable Cutleries and Tableware as Substitute for Plastic: An Exploratory Study on Green Solutions,” 2020. [Online]. Available: www.rsisinternational.org
- [11] K. Dybka-Stępień, H. Antolak, M. Kmiotek, D. Piechota, and A. Koziróg, “Disposable food packaging and serving materials—trends and biodegradability,” *Polymers (Basel)*, vol. 13, no. 20, Oct. 2021, doi: 10.3390/polym13203606.
- [12] Nathalia Beltrán Ramírez, Lady Johann Hernández Gómez, and Yenny González Fino, “Estudio para el desarrollo de un biomaterial de cáscara de huevo,” 2021.
- [13] A. Ricardo and P. Vergara, “Método de reutilización de la cáscara de huevo.”
- [14] D. Guadalupe and T. A. Pulido, “Contaminación ambiental y sus efectos sobre la salud.”, [Online]. Available: <http://www.jornada.unam.mx/2007/08/16/index.php?section=sociedad&article=039n1soc>
- [15] “Todo lo que necesitas saber sobre la contaminación por plásticos.” [Online]. Available: <https://www.unep.org/es/noticias-y-reportajes/reportajes/todo-lo-que-necesitas-saber-sobre-la-contaminacion-por-plasticos>
- [16] “El reciclaje del plástico, una asignatura pendiente a nivel global.” [Online]. Available: https://www.nationalgeographic.com.es/naturaleza/reciclaje-plastico-asignatura-pendiente-a-nivel-global_17901
- [17] D. Marinos, “Guía del Educador sobre”, Accessed: [Online]. Available: www.namepa.net/educaci
- [18] “Cómo reducir el impacto de los plásticos de un solo uso.” [Online]. Available: <https://www.unep.org/es/noticias-y-reportajes/reportajes/como-reducir-el-impacto-de-los-plasticos-de-un-solo-uso>
- [19] D. Lin *et al.*, “Microplastics negatively affect soil fauna but stimulate microbial activity: insights from a field-based microplastic addition experiment,” *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences*, vol. 287, no. 1934, Sep. 2020, doi: 10.1098/RSPB.2020.1268.

-
- [20] “ABC del Plástico: una guía completa de tipos, usos e impacto ambiental.” [Online]. Available: <https://www.plastico.com/es/noticias/abc-del-plastico-una-guia-completa-de-tipos-usos-e-impacto-ambiental>
- [21] “Contaminación por plásticos. Uno de los mayores desafíos ambientales del siglo XXI.” [Online]. Available: <https://ecodes.org/hacemos/cultura-para-la-sostenibilidad/salud-y-medioambiente/observatorio-de-salud-y-medio-ambiente/contaminacion-por-plasticos-uno-de-los-mayores-desafios-ambientales-del-siglo-xxi>
- [22] Lady Esperanza Rojas Gutiérrez and Denis Mary Puentes Fuentes, “Propuesta de portafolio de proyectos en Acoplásticos.” [Online]. Available: <https://repository.universidadean.edu.co/bitstream/handle/10882/13495/RojasLady2023.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- [23] Envaselia, “¿Qué es un material biodegradable? .” [Online]. Available: <https://www.ensavelia.com/blog/que-es-biodegradable-id17.htm>
- [24] [object Object], “Elaboración de plástico biodegradable a partir de almidón de maíz; evaluando su degradabilidad con ácido sulfúrico y su expansión polimérica al variar la formulación”.
- [25] G. Ruiz Avilés, “Polímeros biodegradables a partir del almidón de yuca,” 2005.
- [26] J. M. Madrid Rodríguez, E. Chacón, and J. Martínez Urreaga, “Bioplásticos en la industria el automóvil,” 2020.
- [27] “Generalidades de los Polímeros y el uso de estos - Esenttia S.A.”. [Online]. Available: <https://www.esenttia.co/blog/generalidades-de-los-polimeros-y-el-uso-de-estos/>
- [28] “El plástico y la salud los costos ocultos De un planeta plástico producción mundial de plástico y tendencias futuras,” 2013.
- [29] A. E. Sileoni, L. María, R. Almandoz, and I. R. Díaz, “Guía didáctica sobre polímeros.”
- [30] “Ventajas Y Desventajas de Usar Polimeros | Descargar gratis PDF | El plastico | Polímeros.” [Online]. Available: <https://es.scribd.com/document/413317365/Documento>
- [31] “Polímeros naturales hidrogeles,” 2017.
- [32] “El tipo de almidón y su efecto en la granulación - All About Feed ES - Puerta a la Industria Global de Alimentación.” [Online]. Available: <https://es.allaboutfeed.net/el-tipo-de-almidon-y-su-efecto-en-la-granulacion/>

-
- [33] J. G. Sánchez Ken, “Que es el almidón.” [Online]. Available: <https://inecol.mx/inecol/index.php/es/ct-menu-item-25/ct-menu-item-27/17-ciencia-hoy/1376-que-es-el-almidon>
- [34] M. Hernández-medina, J. Gabriel, L. Chel-guerrero, and D. Betancur-ancona, “Caracterización fisicoquímica de almidones de tubérculos cultivados en Yucatán, México,” *Ciênc. Tecnol. Aliment., Campinas*, vol. 28, no. 3, p. 718, 2008.
- [35] Organización de las naciones unidas para la alimentacipon y la and agricultura, “La papa”.
- [36] M. Enríquez, R. Velasco, and V. Ortiz, “Composición y procesamiento de películas biodegradables basadas en almidón,” 2012.
- [37] Alimentos y Cárnicos S.A, “Almidón de papa,” 2017. [Online]. Available: <https://www.aldecar.com/product-page/almidon-de-papa>
- [38] H. Pizá, S. Rolando, C. Ramirez, S. Villanueva, and A. Zapata, “Análisis experimental de la elaboración de bioplástico a partir de la cáscara de plátano para el diseño de una línea de producción alterna para las chifleras de piura, Peru,” 2017.
- [39] J. Sebastian and H. Cardona, “Obtención de un bioplástico a partir de almidón de papa,” 2019.
- [40] J. G. Solarte-Montúfar *et al.*, “Propiedades Reológicas y Funcionales del Almidón. Procedente de Tres Variedades de Papa Criolla,” *Información tecnológica*, vol. 30, no. 6, pp. 35–44, 2019, doi: 10.4067/S0718-07642019000600035.
- [41] J. G. Puente-Córdova *et al.*, “Estudio reológico de soluciones poliméricas de carboximetil celulosa,” *Ingeniería, investigación y tecnología*, vol. 23, no. 2, pp. 1–10, Apr. 2022, doi: 10.22201/FI.25940732E.2022.23.2.012.
- [42] - Sercalia, “Carboximetil Celulosa.” [Online]. Available: <https://sercalia.com/cmc-carboxi-metil-celulosa/>
- [43] M. D. I. Emma Del Carmen Vázquez, M. Colección, and C. Investigación, “Materiales Cerámicos. Propiedades, Aplicaciones y Elaboración”.
- [44] M. Laz Pavón and M. Hernández Molina, “Sustitución del plástico por materiales vegetales,” 2020.
- [45] M. 1977- Sandoval, F. 1958- Soriano, and Instituto de Estudios del Huevo, *El gran libro del huevo*. Everest, 2009.

-
- [46] A. Bedoya Salazar Esp., M. P. Valencia González M.Sc., A. Bedoya Salazar Esp., and M. P. Valencia González M.Sc., “Usos potenciales de la cáscara de huevo de gallina (*Gallus gallus domesticus*): una revisión sistemática,” *Revista colombiana de ciencia animal recia*, vol. 12, no. 2, pp. 106–116, Sep. 2020, doi: 10.24188/RECIA.V12.N2.2020.776.
- [47] “La cáscara de huevo: estructura, formación y calidad.” [Online]. Available: <https://avinews.com/la-cascara-de-huevo-estructura-formacion-que-factores-afectan-a-su-calidad/>
- [48] G. Pérez J. Guzman, K. Duran, J. Ramos, “Aprovechamiento de las cascaras de huevo en la fortificación de alimentos,” *Revista Ciencia, Tecnología e Innovación*, vol. 16, no. 18, pp. 29–38, 2018, Accessed: Jul. 02, 2024. [Online]. Available: http://www.scielo.org.bo/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2225-87872018000200003&lng=es&nrm=iso&tlng=es
- [49] Pedro Noé Ricardo and Jacob Burja, “Aprovechamiento de residuos agroindustriales de cáscara de huevo como insumo para la elaboración de pintura látex de color.”
- [50] M. Ruiz, K. Pastor, and A. Acevedo, “Biodegradabilidad de Artículos Desechables en un Sistema de Composta con Lombriz,” vol. 24, no. 2, pp. 47–56, 2013.
- [51] D. Sarahí and F. Valdez, “Elaboración de materiales biodegradables,” 2009.
- [52] Cesar Gonzalez Barrera, “Mojabilidad: medición del ángulo de contacto por el método de la gota cautiva.,” 2014.
- [53] M. Villalobos *et al.*, “Obtención de almidón a partir de los residuos de papa del mercado Abastos”.
- [54] Karen Khachtryan, Maciej Fiedorowic, and Gohar Khachatryan and Lidia Krzeminska, “Implication of nanometals formation in potato starch gel on structure of polysaccharide chains.”
- [55] “Normativas y regulaciones para polímeros biodegradables y compostables | Adapt.” [Online]. Available: <https://adapt.mx/es/normativas-y-regulaciones-para-polimeros-biodegradables-y-compostables/>
- [56] P. Bahdanovich, K. Axelrod, A. Y. Khlystov, and V. Samburova, “Optimized Spectrophotometry Method for Starch Quantification,” *Analytica*, vol. 3, no. 4, pp. 394–405, Dec. 2022, doi: 10.3390/ANALYTICA3040027/S1.

-
- [57] “Características del almidón y relación con las enzimas de su biosíntesis.” Accessed: [Online]. Available: https://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1405-31952013000100001
- [58] T. De Fabricación, “Sinterizado módulo I: fundición y sinterizado.”
- [59] “Carboximetilcelulosa‘CMC.’”. Available: <https://www.esmaltycolor.com/materias-primas/1108-carboximetil-celulosa.html>
- [60] Dasit group, “Ficha de datos de seguridad,” 2014.
- [61] Caleras San Juan, “Proceso de Calcinación de la Cal.” [Online]. Available: <https://www.calerassanjuan.com/calcinacion.html>
- [62] M. A. Álvarez Merino, F. C. M. Carrasco, and F. J. Maldonado Hódar, *Desarrollo y aplicaciones de materiales avanzados de carbón*. Universidad Internacional de Andalucía, 2014.
- [63] A. David and P. Otero, “Biopolímeros a base de almidón de papa, para uso de la industria alimentaria en Colombia.”
- [64] química industrial, “Carboximetilcelulosa,” 2023. [Online]. Available: <https://quimicaindustrial.com.py/carboximetilcelulosa/>

