



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO**  
PROGRAMA DE MAESTRÍA EN DISEÑO INDUSTRIAL  
POSGRADO DE DISEÑO INDUSTRIAL  
FACULTAD DE ARQUITECTURA

DESARROLLO DE POLÍMERO BASADO EN GOMA  
XANTANA PARA SU IMPLEMENTACIÓN EN  
SISTEMAS DE MANUFACTURA ADITIVA

**TESINA**

QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE:  
MAESTRO EN DISEÑO INDUSTRIAL

PRESENTA:

**ALONSO GORDILLO DÍAZ**

**TUTOR PRINCIPAL:**

MDI ERICK IROEL HEREDIA CARRILLO  
Posgrado en Diseño Industrial UNAM

**COMITÉ TUTOR:**

MDI EMMA VÁZQUEZ MALAGÓN  
Posgrado en Diseño Industrial UNAM  
MDI ENRIQUE RICALDE GAMBOA  
Posgrado en Diseño Industrial UNAM  
MDI VANESSA SATTELE GUNTHER  
Posgrado en Diseño Industrial UNAM  
MTRO. ERNESTO OCAMPO RUÍZ  
Posgrado en Diseño Industrial UNAM

Ciudad Universitaria, CD. MX. Marzo 2024



Universidad Nacional  
Autónoma de México



**UNAM – Dirección General de Bibliotecas**  
**Tesis Digitales**  
**Restricciones de uso**

**DERECHOS RESERVADOS ©**  
**PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.



# Índice

Resumen	4
Introducción	5
Antecedentes	6
La cultura del plástico	8
¿Qué son los polímeros?	14
Los polímeros naturales	16
Gestión de los residuos solidos urbanos	19
Laboratorios independientes de materiales	22
Problematica de la fabricación aditiva	26
Metodología	29
Definición de variables	32
Justificación del enfoque	32
Descripción metodológica	33
Obtención de los ingredientes	36
Probeta y registro de la experimentación	37
Utensilios empleados	38
Desarrollo de la investigación	39
Pruebas con agregados organicos	39
Pruebas con agregados estandarizados	44
Pruebas de fluidez	49
Optimización del material	52
Experimentación de biodegradabilidad	58
Aplicabilidad en el diseño	62
Conclusión	66
Bibliografía	68

## Resumen

Mediante el progreso de la siguiente investigación se desarrolló y evaluó la posibilidad de producir e implementar un polímero biodegradable basado en goma xantana en sistemas de fabricación aditiva. Para ello, se ha realizado un proceso exploratorio de tres etapas. Durante la primera fase, se llevó a cabo un acercamiento al desarrollo de materiales biobasados a través de una investigación del tipo cuasi experimental, en la cual se elaboraron distintas muestras de materiales producidos a partir de una revisión de los trabajos elaborados en los centros abiertos de desarrollo de biomateriales (FabLab, FabTextiles, Materiom, etc.); de éstas muestras se seleccionaron aquellas que mostraron poseer mayores posibilidades de ser implementadas en sistemas de fabricación aditiva a partir de un extrusor de pastas, considerando cualidades de viscosidad, fluidez y velocidad de solidificación.

La formulación de un polímero natural que pueda ser utilizado en sistemas de fabricación aditiva tiene el propósito de sustituir los materiales plásticos actuales que se usan en este proceso. Estos últimos suelen ser termoplásticos no biodegradables o requerir una infraestructura industrial para poder llevar a cabo la degradación de sus componentes.

El proyecto de investigación podrá ser aprovechado como una base tanto teórica como práctica para el desarrollo de nuevos materiales que se adecuen a las necesidades del diseñador. Así, se aportará un punto sólido de inicio para la elaboración de nuevos polímeros biobasados.

## Introducción

La fabricación aditiva, también llamada impresión 3D, es una tecnología revolucionaria que permite principalmente la producción de prototipos rápidos, posibilitando un proceso de diseño iterativo a través de la creación de diversas propuestas físicas para valorar las cualidades de un objeto antes de su producción final. Para realizar dicho procedimiento se utilizan mayormente materiales plásticos como el ABS o el PLA, siendo este último el de mayor uso tanto por su facilidad de empleo como por su bajo costo.

El plástico PLA se elabora principalmente a partir de la glucosa del almidón de maíz, el cual pasa por un proceso de fermentación industrial para llevar a cabo la polimerización de sus moléculas. Aunque este material se plantea como de bajo impacto ambiental (tanto por provenir de materias primas renovables como por su posibilidad de degradabilidad), no se considera necesario el tener un ambiente controlado ni el equipamiento industrial adecuado para llevar a cabo dicho proceso, ni tampoco la problemática que tiene su producción, recolección y correcta gestión de residuos (Funabashi et. al., 2009). Teniendo en cuenta las desventajas de éstos plásticos degradables, se planteó implementar otro tipo de materiales biobasados (compuestos a partir de polímeros naturales) como una alternativa a los actuales insumos para los sistemas de fabricación aditiva.

El proyecto de investigación se planteó con los siguientes objetivos:

Objetivo general:

Desarrollar la formulación de un material biobasado y compostable capaz de ser implementado en sistemas de fabricación aditiva por extrusión de pastas, para el desarrollo de prototipado rápido de objetos con ángulos de inclinación no mayores a 30° respecto a su vertical.

Objetivos específicos:

Recopilar información sobre el uso de biopolímeros por grupos o comunidades que realizan materiales DIY.

Cuantificar cuáles biopolímeros son los más implementados por dichos grupos y valorar cuál es el motivo de su preferencia.



Figura 1. Fotografía de materiales biobasados desarrollados durante la investigación.

A partir de la información conseguida anteriormente, medir las propiedades de viscosidad y fluidez de los biopolímeros más implementados mediante la experimentación de desplazamiento en pendiente.

Conocer que biopolímeros de los evaluados pueden ser extruidos fácilmente mediante un extrusor de pastas.

Comprobar la biodegradación del material resultante en una composta no industrial, conforme la normativa AS 5810 del Australian Standard.

Documentar el proceso de experimentación y optimización de los materiales evaluados.

A través de la siguiente investigación cuasi experimental, se formularon treinta y siete distintos materiales compuestos de diferentes agregados y polímeros naturales, como grenetina, agar-agar, almidón, goma xantana, entre otros. Evaluando la deformación sufrida por cada uno de los materiales al solidificarse, se decidió continuar experimentando con el compuesto que presentó menor alteración, siendo éste elaborado a partir de goma xantana y carbonato de calcio. Posteriormente, se buscó su optimización con el propósito de adaptar su formulación para su adecuada extrusión en sistemas de fabricación aditiva, a partir de un extrusor mecánico de pastas. En este proceso se consideró medir sus propiedades reológicas, así como su velocidad de solidificación.

Como resultado de la investigación se desarrolló un material para la elaboración de prototipos a partir de la impresión 3D, mismo que puede ser biodegradado en composteras no industriales. La documentación de éste proceso podrá fungir como punto de partida para nuevas investigaciones en el ámbito, ya sea en el desarrollo de nuevos materiales biobasados o en el estudio de las tecnologías de fabricación aditiva aplicada en el diseño industrial.

# Antecedentes

## La cultura del plástico

Los avances durante el siglo XX en la síntesis química de nuevas sustancias inexistentes hasta el momento y la caracterización de sus propiedades significaron el inicio de un nuevo escenario para los materiales sintéticos o de laboratorio. Materiales como el vinilo y el polietileno expandieron radicalmente los límites de las posibilidades productivas del momento. La baquelita, reconocida por ser el primer plástico sintético, fue un producto pionero en un mundo de nuevos materiales. Patentada en 1909, se comercializó inicialmente como un barniz aislante, aunque posteriormente se le dieron más usos como: plástico para moldeado, revestimiento para equipos mecánicos y sellador de focos, lo que le hizo ganar el eslogan “el material de los mil usos”. Posterior a la baquelita, se desarrolló un mayor número de plásticos sintéticos conformados principalmente por químicos derivados de la explotación petrolera. Éste fenómeno hizo que los medios de producción se transformaran con el propósito de aprovechar las cualidades físicas de los nuevos materiales plásticos (Meikle, 1997).

La palabra “plástico” hace referencia a aquellos materiales provenientes de la polimerización de cadenas de monómeros para conformar polímeros artificiales o sintéticos. Se les nombró así por sus cualidades de maleabilidad, variedad de formas, texturas, durezas, densidades, colores y olores. Estas propiedades permitieron la fabricación de productos a partir de moldear, extruir, espumar y termoformar termoplásticos, lo cual propició un incremento en la producción de bienes de consumo después de la Segunda Guerra mundial. Así que, para 1960 en Estados Unidos la producción anual de artículos plásticos alcanzó los 3 millones de toneladas y para 1976 la producción mundial anual se acercó a 50 millones de toneladas (PlasticsEurope, 2012; Science History Institute, 2019).

La implementación del plástico en diversos productos fue sustituyendo otros materiales como la madera o el vidrio; asimismo, su bajo costo impulsó el auge del capitalismo y la consolidación económica al concluir la Segunda Guerra Mundial. Posteriormente, fue parte fundamental para acortar los gastos de la guerra de Vietnam, en la cual se utilizó para distintos accesorios como cantimploras, brújulas, relojes y calzado. En su



Figura 2. Radio FADA 1000 “Bullet”, producido en 1945 a partir de baquelita. Decophobia, 2021, (<https://www.decophobia.com/fada-insert-grill-bullet-catalin-radio-1000-butterscotch-red>).



Figura 3. Cantimplora de plástico y taza, utilizada en 1965 durante la Guerra de Vietnam, Ejército de los EE. UU. OmegaMilitaria 2021, (<https://omegamilitaria.com/products/1965-vietnam-war-us-army-plastic-canteen-cup-m1956-cover-set>).



origen, el plástico era visto socialmente como un material de bajo estatus, pero su rápida adopción e implementación en diversos productos provocó que esta idea fuera transformándose (Meikle, 1997).

En el siguiente gráfico (Figura 4) se puede apreciar cómo ha sido el crecimiento de producción de plásticos en el mundo de 1950 al 2020, donde se aprecia cómo la producción ha incrementado en un promedio de 10 millones de toneladas anuales del 2008 al 2019, siendo el 2020 un año atípico debido a que, por cuestión de la pandemia, hubo problemas en la cadena de producción a nivel mundial. Los datos presentados nos permiten estimar que para el 2025 se estarán produciendo aproximadamente 500 millones de toneladas de plástico anualmente (PlasticEurope, 2021).

Conforme la producción del plástico crecía, la noción social de la problemática que traería la acumulación de residuos plásticos también aumentaba. Fue en los años 80 que la propia industria de los plásticos propuso, por presión social y política, que los residuos plásticos fueran recolectados y procesados para su reciclabilidad como parte de una campaña para la adecuada gestión de los residuos. Sin embargo, actualmente sabemos que el reciclaje está lejos de ser una solución y que, aun con legislaciones o planes de acción, siguen llegando miles de productos plásticos a vertederos y mares, dañando no sólo al entorno natural, sino también la salud de distintos seres vivos (Freinkel, 2011).

Los riesgos que representan los plásticos para el ecosistema natural del planeta están dados principalmente por cuatro factores: su producción típica a partir de recursos no renovables provenientes del petróleo, su gran perdurabilidad o lenta degradación, la ineficiente reutilización en cadenas de reciclaje y su fragmentación en micropartículas por desgaste. Como se ha mencionado anteriormente, el plástico es un material muy utilizado por su bajo costo de producción, ligereza, resistencia, permeabilidad y aislamiento, pero estas mismas cualidades hacen de éste un material complicado de degradar, como es el caso de algunos plásticos de un solo uso provenientes del polipropileno, que tardan en biodegradarse entre cien y cuatrocientos años. Esto, aunado a la deficiencia en los procesos de recolección y gestión de residuos, conlleva a que únicamente se recicle el 9% de los materiales plásticos, siendo un 70 % restante depositado en vertederos, mar abierto o incinerados. La problemática que los residuos plásticos generan no se limita al impacto ambiental que implicarían las 12

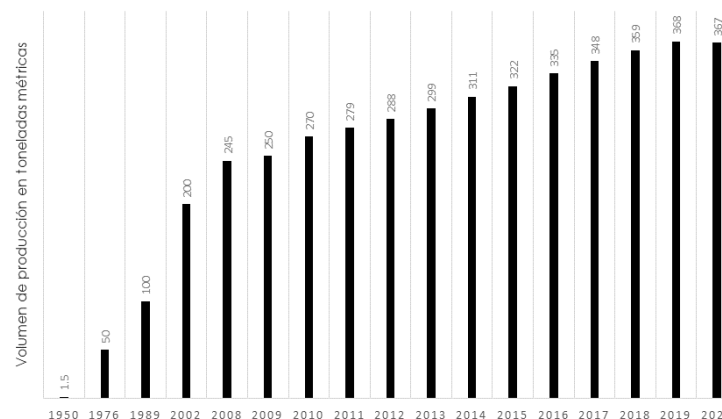


Figura 4. Producción de plástico a nivel mundial de 1950 a 2018, Elaborado con datos obtenidos de PlasticsEurope (PEMRG) Consultic, 2021.

mil millones de toneladas de residuos que se acumulen en vertederos y ecosistemas naturales en el 2050, ya que a su vez existen riesgos de salud por el uso excesivo de materiales plásticos. Dichos riesgos aún no se han estudiado en su totalidad, pero representan una problemática latente para todos los seres vivos (Heinrichs, 2018).

La mayor problemática a la salud ocasionada por los plásticos proviene de la fragmentación a través del desgaste por su uso o por efecto de elementos del entorno natural. Estos fragmentos, llamados microplásticos, terminan en el aire, agua y tierra de nuestro entorno y, por su tamaño menor a 5 milímetros, se trasladan con facilidad a otros ecosistemas naturales, en los cuales puede impregnarse tanto a materiales orgánicos como no orgánicos. Dicho fenómeno permite que partículas de plástico sean encontradas en sal de mesa comercial, agua embotellada, alimentos marítimos comerciales y en los sistemas de agua potable. Aunque aún no se cuentan con estudios completos sobre el impacto de estos fragmentos plásticos en la salud humana, sabemos que otros seres vivos de menor tamaño tienden a morir por intoxicación al confundirlos con alimentos orgánicos e ingerirlos. Tal es el caso del plancton que llega a ingerir microplásticos confundiéndolos con alga marina, ocasionando una falsa satisfacción alimenticia y posiblemente su muerte; consiguiente a esto, otros animales podrían comer el plancton intoxicado y, como el plástico no se degrada en su interior, llegaría al sistema digestivo de otros seres vivos, entre ellos el ser humano, repitiéndose el proceso de transferencia natural (Heinrichs, 2018).

Los microplásticos son comúnmente clasificados según su origen; aquellos que se crean con un propósito comercial como ingrediente para productos de belleza o higiene se les llama microplásticos primarios o de diseño (Fendall & Sewell, 2009), mientras que a los que surgen de elementos plásticos más grandes a causa de una degradación por factores ambientales o accidentales (como los rayos ultravioletas del sol o la abrasión física) se les nombra microplásticos secundarios (Barnes et. al., 2009). Por otro lado, se sabe que las telas sintéticas, que contienen nylon o poliéster, pueden liberar aproximadamente 1,900 fibras de microplásticos por cada ciclo de lavado, lo cual es una problemática difícil de controlar (Browne et. al., 2011). Otra fuente importante de microplásticos es la de los plásticos oxobiodegradables, los cuales son elaborados a partir de aditivos químicos que permiten la fragmentación



Figura 5. Pez arcoiris del pacifico norte, el cual había ingerido 18 piezas de plástico. Dr. Marcus Eriksen, Instituto Gyres, 2018 (<https://www.scientificamerican.com/article/from-fish-to-humans-a-microplastic-invasion-may-be-taking-a-toll/>).

del material en partículas no visibles para el ojo humano. Este proceso no asegura la total degradación del plástico por lo que la Unión Europea ha prohibido su producción (Euronews, 2021).

Aunque se tiene conocimiento de la presencia de microplásticos en los océanos desde 1970, no se han tomado acciones claras para mitigar la problemática. Por eso, actualmente podemos encontrar fragmentos de plásticos de distintos tamaños en la mayoría de las playas del mundo y, de igual manera, se han encontrado más de dos mil fragmentos por metro cuadrado en mar adentro a cinco mil metros de la costa (Fischer et. al., 2015).

Mediante la recopilación de distintos estudios al respecto de microplásticos en ambientes marinos, se ha podido promediar que en los océanos se pueden encontrar cuarenta mil partículas de plástico por metro cúbico de mar, con un tamaño variable de cinco micrómetros a un milímetro. La información presentada afirma que los microplásticos pueden llegar a tener un mayor impacto en el bioma de los océanos que fragmentos de mayor tamaño, esto en parte por su dificultad de localizar y extraer, pero también por la facilidad que tienen de desplazarse en las corrientes marinas (Van Cauwenberghe et. al., 2013). En el siguiente gráfico (Figura 6) se puede observar la densidad de microplásticos existentes en el océano a nivel mundial, denotando que las zonas donde se cuenta más densidad de microplásticos son el Mediterráneo y el océano Pacífico, zonas de gran importancia para la industria pesquera. En el mismo estudio se menciona que, al diseccionar 141 peces nativos del océano Pacífico Norte, se encontraron partículas de plástico en el 9.2% de los especímenes (Van Sebille et. al., 2015).

Los océanos han sido el centro de atención en el estudio de los efectos del plástico en el medio ambiente, pero eso no descarta que también los suelos de cultivo sean afectados por el uso excesivo y la mala gestión de los residuos plásticos. Considerando que una de las fuentes más importantes de microplásticos son los textiles sintéticos, no es raro encontrar fibras plásticas en las tuberías del drenaje, las cuales no siempre llegan a una planta de tratamiento adecuado para filtrar micropartículas.

Como un ejemplo del daño que producen los desechos generados por los microplásticos a nivel internacional, podemos mencionar el estudio

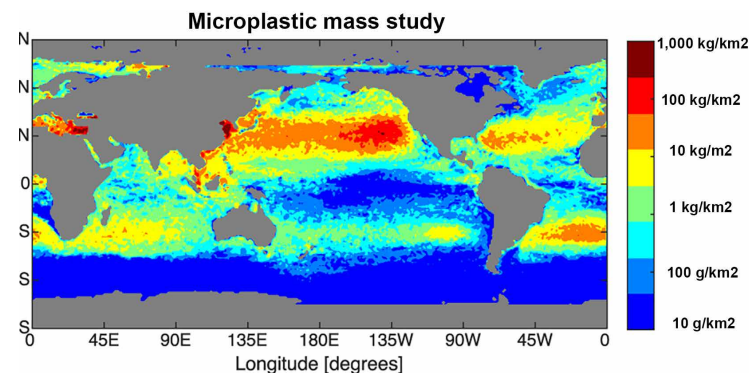


Figura 6. Abundancia de microplásticos flotando en los océanos. A global inventory of small floating plastic debris, Van Sebille, 2015.

realizado por el Instituto de Investigaciones Agropecuarias con sede en Santiago de Chile, donde se observó que el suelo de sembradío de la zona de Maipo contiene 2.57 gramos de microplásticos por cada kilogramo de tierra regada con aguas residuales, mientras que analizando directamente el agua de riego se contabilizaron 45.5 micropartículas por cada kilogramo analizado. De las muestras tomadas se encontró que las fibras sintéticas eran las partículas más frecuentes, con un tamaño promedio de 0.97 milímetros de largo y 20 micrómetros de ancho. Aunque en el estudio no se incluyeron los productos alimenticios cosechados, es muy posible que las micropartículas se impregnen en ellos al momento de crecer y ser cosechados, por lo cual pueden llegar al cuerpo humano a partir de su consumo (Corradini et. al., 2019).

Los microplásticos son un grave problema con consecuencias aún no completamente estudiadas. Sin embargo, considerando que su degradación puede tomar más de cien años, debemos deducir que su consumo tendrá notorias consecuencias en la calidad de vida de distintas especies.

A partir de la información anteriormente presentada, se busca visibilizar la existencia de esta problemática. La razón principal es que frecuentemente no se considera al hablar de temas sobre los residuos plásticos, cuando en realidad es de gran relevancia para plantear nuevas acciones ante el uso de este material.

El planteamiento de una gestión adecuada de los residuos sólidos quizás no sea suficiente para mitigar la problemática de los microplásticos, ya que estos seguirán generándose a partir del desgaste natural de los productos comercializados. Es por ello que se debe contemplar el remplazo del uso de los polímeros sintéticos por la implementación de alternativas orgánicas como los biopolímeros biodegradables, los cuales probablemente podrían tener un menor impacto ambiental comparado con los actuales polímeros sintéticos utilizados indiscriminadamente.

Con el propósito de tener un panorama más comprensible sobre el origen del plástico y sus posibilidades de sustitución, se mostrará en las próximas páginas una breve síntesis sobre la conformación del plástico como un polímero sintético. Asimismo, se presentará una recopilación de desarrollos en la materia de polímeros naturales biodegradables, los

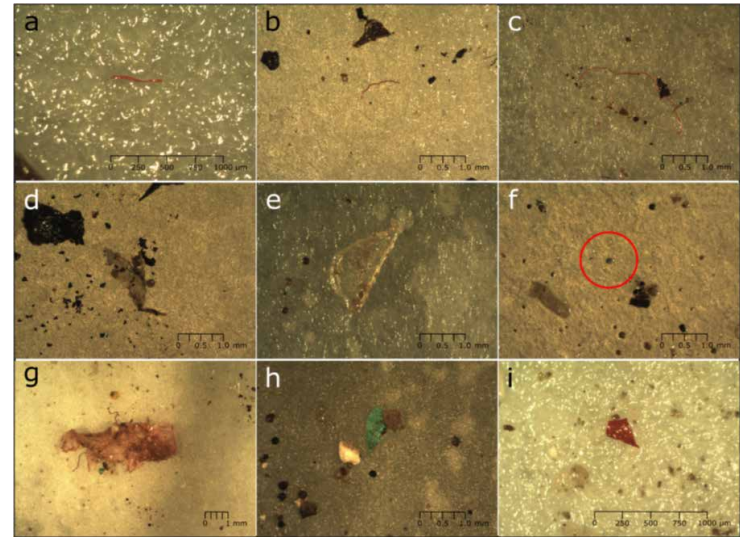


Figura 7. Muestras de suelo analizadas con presencia de microplásticos. Fibras (a, b, c) Film (d, e) Fragmentos (g, h, i). Evidence of microplastic accumulation in agricultural soils from sewage sludge disposal, Corradini, 2019.

cuales han sido propuestos como una posible alternativa a los actuales materiales plásticos.

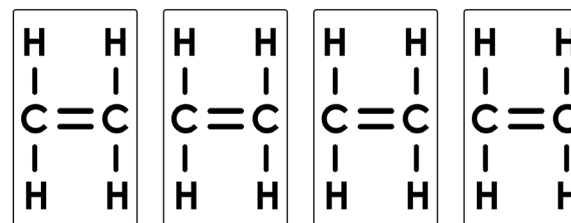
## ¿Qué son los polímeros?

La palabra polímero proviene de los vocablos griegos polys - meros que en conjunto se interpretan como “de muchos segmentos”. Se les nombró de esta manera porque son macromoléculas conformadas por la unión de varias moléculas en largas cadenas, es decir, es una gran molécula conformada por el enlace de otras moléculas de un menor tamaño, esto a través de una reacción química de polimerización (Figuras 8 y 9). Los polímeros se pueden encontrar en nuestro entorno de forma natural; tal es el caso de la celulosa, que es una macromolécula conformada por múltiples moléculas de glucosa y que podemos encontrar en la conformación de paredes celulares de seres del reino vegetal, siendo así uno de los polímeros más abundantes del planeta (Beltrán & Marcilla, 2012).

Los polímeros pueden clasificarse de distintas maneras: según su composición química, sus propiedades físicas, su estructura, su mecanismo de polimerización o su origen. La clasificación de los polímeros por su origen se conforma por dos grandes grupos: 1) los de origen natural o biopolímeros, los cuales tienen una estructura más compleja, pero se pueden obtener de forma natural; y 2) los polímeros sintéticos, que son obtenidos a partir de sintetizar materia prima comúnmente derivada del petróleo y actualmente son los más utilizados de manera industrial (Beltrán & Marcilla, 2012).

La posibilidad de biodegradabilidad es otra forma de categorizar a los materiales plásticos, siendo esta una cualidad que ha tomado relevancia ante el impacto ambiental que se puede generar al producir materiales que no logren reintegrarse al medio ambiente. La degradabilidad se especifica como la ruptura de la estructura básica del material, separando sus partes en elementos pequeños. Este proceso se puede llevar a cabo por tres distintos factores: químicos, físicos y biológicos. En los años 80 fue comercializado el primer plástico considerado degradable por factores biológicos o biodegradable. Este material estaba conformado por un polímero sintético, comúnmente polietileno, mezclado con un polímero natural como el almidón. Su composición permitía que el almidón fuera consumido por microorganismos dejando pequeñas partículas de polietileno, las cuales en su momento no se consideraban dañinas, pero ahora conocemos el gran problema que generan los microplásticos. Por ello, la definición de biodegradabilidad de los materiales en las normativas actuales se especifica como “la rotura de un compuesto orgánico por la

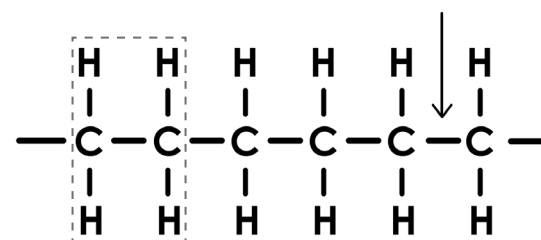
### MOLÉCULAS



### ETILENO

Figura 8. Esquema de moléculas individuales de etileno, compuesta por 4 átomos de hidrógeno y dos de carbono. Elaboración propia con información de Essential Chemical Industry, 2021, (<https://www.essentialchemicalindustry.org/polymers>)

### POLIMERIZACIÓN



### POLIETILENO

Figura 9. Esquema de una macromolécula de polietileno, compuesta por la conexión de monómeros de etileno C<sub>2</sub>H<sub>4</sub>. Elaboración propia con información de Essential Chemical Industry, 2021, (<https://www.essentialchemicalindustry.org/polymers>)

acción de microorganismos en dióxido de carbono, agua y sales minerales de otros elementos presentes y en biomasa nueva” (Ebnesajjad, 2012).

Como se muestra en el esquema (Figura 10), los polímeros sintéticos pueden ser biodegradables o no biodegradables. En el caso de los no biodegradables se encuentran los principales plásticos que se usan en la industria como el PET (politereftalato de etileno) y PVC (cloruro de polivinilo), mientras que en los biodegradables se encuentran polímeros como el PLA (poliácido láctico) y el PHA (polihidroxialcanoato). Tanto el PHA como el PLA son polímeros derivados de bioactividad de microorganismos como la fermentación. En el caso del poliácido láctico o ácido poliláctico, el polímero se produce a partir de glucosa obtenida de maíz, la cual es convertida en dextrosa mediante enzimas; posteriormente la dextrosa es fermentada en ácido láctico el cual se polimeriza a partir de policondensación usando catalizadores de estaño. Aunque en el proceso de producción del PLA se emplean materias primas renovables, éste es muy resistente a la degradación, por lo que se debe biodegradar mediante una composta controlada a una temperatura de 58° y una humedad del 55% como marca la norma ISO14855, tardando como máximo 6 meses para completar el proceso (Funabashi et. al., 2009).

Si tomamos en cuenta las aplicaciones que se le han dado en años recientes a los polímeros sintéticos considerados biodegradables, encontraremos, por ejemplo, al anteriormente mencionado PLA material, con el cual se lleva a cabo la producción de filamento de mayor comercialización en la industria de la fabricación aditiva, ya que cuenta con cualidades físicas que facilitan su utilización en estos sistemas y se comercializa como un material ecológico y biodegradable. No obstante, esto resulta ser malinterpretado, ya que, como se ha señalado anteriormente, su biodegradabilidad requiere de un ambiente controlado (pues en un entorno natural sería complicado de lograr) y que lamentablemente no se cuentan con una gestión adecuada para que estos polímeros lleguen a composteros industriales para su degradación.

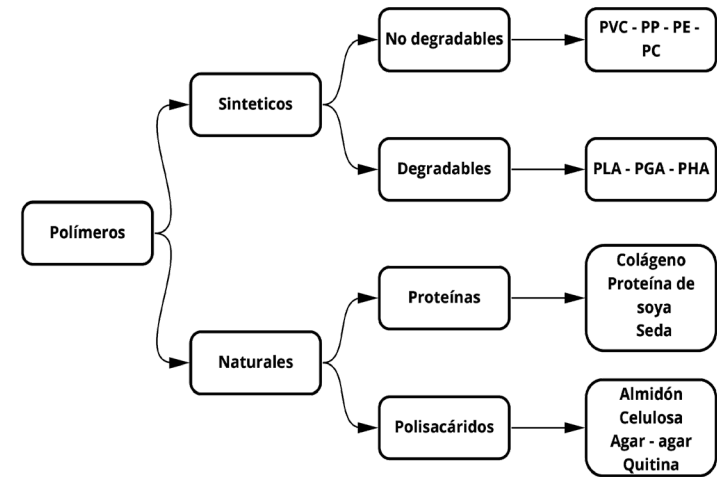


Figura 10. Clasificación de los polímeros por su forma de obtención. Elaboración propia con datos recuperados de Natural and Synthetic Polymers as Drug Carriers for Delivery of Therapeutic Proteins. Polymer Reviews, 2015.

## Los polímeros naturales

Teniendo en cuenta que los polímeros sintéticos biodegradables requieren de una infraestructura especializada y organizada, se han buscado alternativas en los polímeros naturales, los cuales han sido utilizados desde la antigüedad. La goma vegetal, que en sí es un tipo de resina de los árboles, se empleaba como recubrimiento impermeable en embarcaciones marítimas. De igual manera, el látex de caucho, que es un polímero de origen natural proveniente de la savia de los árboles de género *Hevea*, se documentó como un material utilitario desde 1495, aunque durante mucho tiempo no se le dio tanta importancia, ni se le realizaron modificaciones o sinterizaciones. Fue hasta el año 1844 que Charles Goodyear inventó el proceso de vulcanización, en el cual se emplea azufre, caucho y una fuente de calor; este proceso químico hace que el caucho natural gane resistencia al entrar en contacto con el azufre a una alta temperatura, pero al ser un proceso de sinterización, no se puede revertir, lo que hace al producto un polímero sintético no biodegradable. (Ebnesajjad, 2012).

Los polímeros naturales se encuentran en nuestro entorno de diversas formas, todos ellos derivados de fuentes renovables y con una amplia gama de posibilidades funcionales. Y aunque varios de ellos han sido utilizados desde hace ya muchos años (como la celulosa o el almidón), aún hay muchos otros que han sido infrautilizados. Los también llamados biopolímeros son derivados de distintos grupos de polisacáridos, lípidos o proteínas, producidos a partir de los ciclos de vida natural de plantas, animales, insectos, hongos o bacterias (Kaplan, 1998). Su implementación ha abordado distintas disciplinas, siendo la medicina una de las más importantes por las posibilidades de biocompatibilidad que llegan a tener algunos biopolímeros, la cual permite su utilización en intervenciones quirúrgicas o como vehículo para fármacos. No obstante, también han sido implementados para resolver problemáticas en otras áreas, como la agropecuaria, el diseño textil, las artes plásticas, el diseño de empaques y el diseño industrial (Lu et. al., 2009).

En el siguiente esquema (Figura 10) se señala el origen de algunos de los polímeros naturales con mayor implementación en la experimentación artística y del diseño. Entre los materiales que se muestran y suelen ser poco conocidos se encuentra la celulosa de origen bacteriana, la cual se ha utilizado en los últimos años como fuente de “cuero vegetal”, mismo que se produce a partir de la fermentación de la kombucha, también llamada

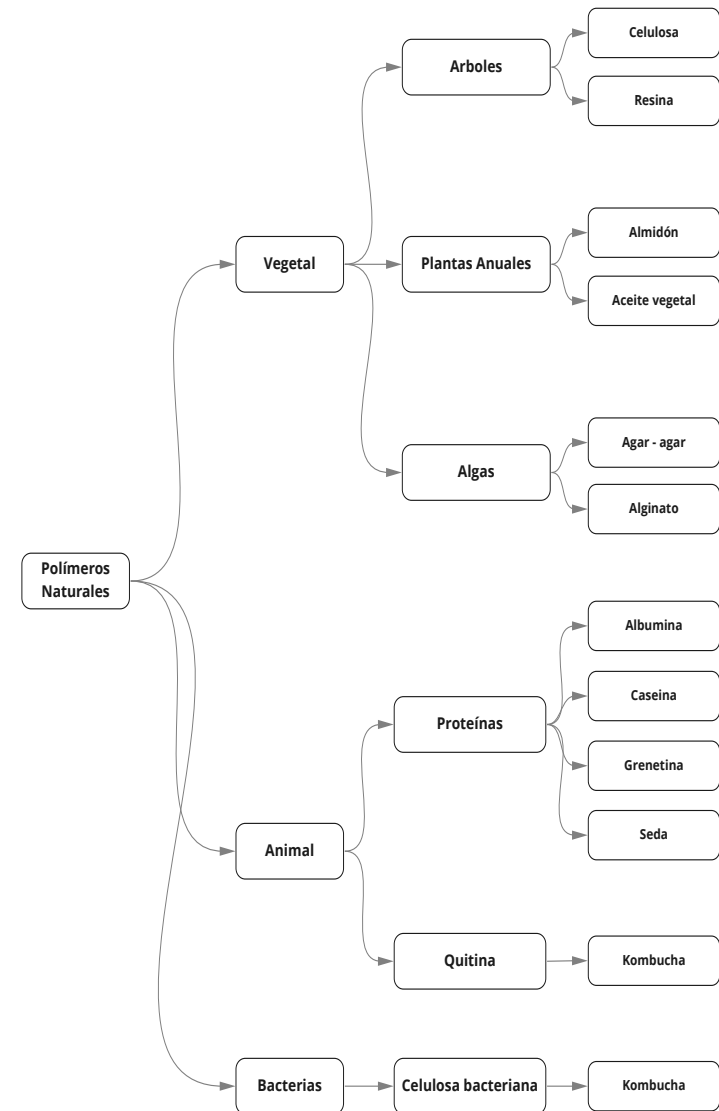


Figura 10. Clasificación de los polímeros naturales por su origen. Elaboración propia con datos recuperados de Natural and Synthetic Polymers as Drug Carriers for Delivery of Therapeutic Proteins. Polymer Reviews, 2015.



hongo del té, y aunque se ha utilizado desde hace más de doscientos años como un producto medicinal, sus cualidades como material textil no habían sido exploradas a profundidad hasta hace unos años (Lee, 2011).

Cuando hablamos de biopolímeros obtenidos a partir de biomasa de origen vegetal, es relevante considerar que ésta es la más abundante en el planeta, ascendiendo a 1,013 toneladas, la cual se renueva aproximadamente un 3% anual por procesos naturales y con apoyo de la energía solar. Por lo tanto, para que su uso explotación no tenga un impacto ambiental considerable, se debe de trabajar sobre este rango de renovación para mantener un principio de sostenibilidad (Ebnesajjad, 2012).

Siguiendo con el esquema anterior, se considera a las plantas anuales como aquellas que tienen un ciclo único de vida, comúnmente de un año, aunque hay especies que tienen periodos de vida más cortos. La mayoría de éstas han sido modificadas por el hombre desde las técnicas de cultivo y cosecha, ya sea por producción alimentaria, farmacéutica, estética u ornamental. Como resultante de estas prácticas, se generan residuos que han sido aprovechados de distintas maneras. Entre los polímeros más comunes extraídos de la agroindustria se encuentran los almidones y los aceites vegetales, mismos que han sido utilizados en distintas actividades humanas como alimentos, componentes de artículos de belleza, materiales para artes plásticas, recubrimientos, medicamentos, etc. El almidón, que es un polisacárido extraído principalmente de tubérculos y cereales, ha ganado atención por sus posibilidades para crear novedosos materiales como es el TPS (almidón termo plástico), con el cual se pueden realizar materiales compuestos de agregados fibrosos o biomateriales para su uso médico por su biocompatibilidad (Ebnesajjad, 2012).

De igual manera, en las algas podemos encontrar biopolímeros, en especial los polisacáridos como el alginato o el agar-agar, los cuales se han explotado como recursos útiles en distintas áreas, aprovechando sus propiedades como polielectrolito que posibilitan la conducción eléctrica por su carga salina (Ebnesajjad, 2012). Su extracción es otro tema importante, ya que en los últimos años se ha aprovechado su sobrepoblación, como el caso del sargazo en los mares mexicanos o el aprovechamiento de microalgas provenientes de plantas tratadoras de aguas residuales (PTR) de donde se extraen y con las cuales se pueden



Figura 11. Film plástico realizado a partir de almidones de yuca. Gerhard Waller, SciDevNet, 2019, (<https://www.scidev.net/america-latina/news/fabrican-plastico-biodegradable-con-almidon-de-yuca>)

producir, entre otras cosas, fotobiorreactores, fertilizantes, aislantes y productos de desarrollo bioquímico (Richmond, 2004).

La biomasa animal es otro subproducto que se ha utilizado como fuente de biopolímeros desde épocas antiguas. La lana, que es un polímero a base de proteínas, es altamente usada en la industria textil, mientras que tanto la albúmina (proveniente de claras de huevo) como la caseína (proveniente de la leche) han sido empleadas como medios para artes pictóricas y como pegamentos naturales. De igual forma, los residuos animales han sido aprovechados como biopolímeros; la grenetina extraída de masa ósea y cuero animal ha sido empleada en alimentos, medicamentos y últimamente como recubrimiento o vehículo para fármacos, aprovechando tanto su solubilidad en líquidos como su biocompatibilidad. Los insectos y moluscos son otra fuente de biopolímeros como la seda o la quitina, y en estudios recientes también se han encontrado algunos moluscos capaces de producir celulosa en forma de nano-fibras (Ebnesajjad, 2012).

Incluso las bacterias son fuentes de biopolímeros, como se ha hablado anteriormente, el PLA, aunque es un material sintético, depende de un proceso controlado de fermentación con ácido láctico, en la cual la actividad de microorganismo o bacterias transforman dextrosa de almidones para posteriormente ser polimerizada sintéticamente. Como ya se ha dicho, la kombucha es un material proveniente de la actividad de microorganismos; en este caso se aprovecha el crecimiento de bacterias sobre un medio orgánico líquido para crear una estructura de celulosas similar a la de origen vegetal, las cuales se han implementado como productos para cubrir heridas, implantes dentales, alimentos, productos textiles, o implantes vasculares (Carreño et. al., 2012).

De la recopilación de información sobre el origen de los polímeros naturales resalta tanto las distintas posibilidades como lo accesible que pueden llegar a ser, a menudo los podemos encontrar en tiendas de autoservicio o en comercios de materias prima. Aunque a su vez podemos encontrar polímeros naturales en los residuos sólidos que solemos desaprovechar. En el siguiente capítulo se presentará información recopilada sobre la forma en la que se gestionan los residuos sólidos urbanos en la Ciudad de México, esto con el propósito de visibilizar las deficiencias de éste y cuáles residuos pudiesen ser aprovechados como fuentes de polímeros naturales.



Figura 12. Piel vegetal hecha a partir de kombucha. Gonzalez Paula, Material revolution, 2019, (<https://www.behance.net/gallery/82760205/Kombucha-leather>)

## Gestión de los residuos sólidos urbanos

El impacto ambiental ocasionado por la generación de residuos es una problemática compleja de nivel global, la cual ha tratado de ser controlada a partir de distintas iniciativas políticas y legislativas. Tal es el caso de la Ley General para la Prevención y Gestión Integral de los Residuos (LGPGIR) con la que se rige el gobierno de México. Esta ley en conjunto con sus programas anexos tiene como propósito el minimizar los impactos antiestéticos, a la salud y al medio ambiente provocados por los residuos que genera la actividad humana (SEMARNAT, 2020). La correcta implementación de los programas para la gestión integral de los residuos sólidos constituye una meta a conseguir en términos de política ambiental a nivel mundial, siguiendo el “Integrated Solid Waste Management Plan” creado por la ONU desde el Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (UNEP) en febrero del 2009, donde marca que a partir de un sistema de segregación y reciclaje adecuado se pueden recuperar una cantidad significativa de residuos, que comúnmente terminan en los vertederos, y convertirlos en recursos útiles para la producción de bienes y servicios (UNEP, 2009).

Como parte de la LGPGIR se encuentra el Programa Nacional para la Prevención y Gestión Integral de los Residuos (PNPGIR), que ejecutado por parte de la Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT) tiene la finalidad de evaluar y administrar los sistemas de gestión de residuos en sus distintos niveles, siguiendo los principios de reducción, reutilización y reciclado de los residuos. Como parte de las actividades se publica cada dos años un documento sobre el progreso nacional conforme al PNPGIR, siendo así que el último diagnóstico publicado está basado en los datos obtenidos durante los años 2017 y 2018. En éste se expone que el manejo predominante de residuos sólidos es la recolección y disposición en rellenos sanitarios, correspondiente al 79% de los residuos generados nacionalmente, desaprovechando aquellos que podrían ser reutilizados en sistemas de reciclaje y que posiblemente podrían haber ayudado a la disminución de la demanda y explotación de nuevos recursos naturales (PNPGIR, 2018).

De igual manera, la SEMARNAT tiene la responsabilidad de generar el Diagnóstico Básico para la Gestión Integral de los Residuos (DBGIR), en el cual se muestran los resultados del estudio de la situación del país en la generación y manejo de residuos, abordando temas como la cantidad de residuos, su composición, la infraestructura disponible y la efectividad de



Figura 13. Camión recolector de residuos, con separación de residuos orgánicos y no orgánicos. Residuos profesionales, 2017, (<https://www.residuosprofesional.com/ciudad-de-mexico-cuatro-fracciones>)

gestión. Es así como se han desarrollado hasta la fecha tres diagnósticos, siendo el primero publicado en el 2006; consecuentemente, en el 2012, se actualizó la información para ser usada en el planteamiento del PNGIR del 2013 al 2018; posteriormente, a inicios del 2019, la SEMARNAT dio a conocer su Visión Nacional hacia una Gestión Sustentable de cero residuos con el objetivo de “[...]transformar el esquema tradicional del manejo de los residuos en un modelo de economía circular, para el aprovechamiento racional de los recursos naturales y favorecer el desarrollo sustentable en el país”. Esta visión hizo necesario actualizar el último informe con el que se contaba y fue así como en el 2020 se presentó la nueva versión del Diagnóstico Básico para la Gestión Integral de los Residuos (SMARNAT, 2020).

En la información que muestra el DBGIR del 2020 encontramos que en el país se generan 120 mil toneladas de residuos al día (18 mil toneladas más de lo señalado en el diagnóstico del 2012), de los cuales el 31.56 % corresponde a residuos susceptibles de aprovechamiento, el 46.42 % a residuos orgánicos y el 22.03% a “otros residuos”; la composición de estas categorías se desarrolla en el siguiente gráfico (G1), donde destaca que el mayor porcentajes de residuos son alimentarios, lo que correspondería a aproximadamente 39 mil toneladas generadas diariamente, este porcentaje es seguido por los residuos plásticos (fibras sintéticas, hule, PET, plásticos rígidos y de película, poliestireno expandido y poliuretano) que corresponde a un 13.27% de residuos generados al día en el país, lo que equivale a cerca de 16 mil toneladas. Es importante resaltar que bajo los mismos datos del DBGIR 2020, en promedio 19 mil toneladas de residuos diarios no son recolectados y terminan en zonas no habilitadas para su gestión (SMARNAT, 2020).

Los residuos recolectados apropiadamente tienen como destino una de las 127 estaciones para la transferencia de los residuos, donde podrán ser compactados, seleccionados para su reaprovechamiento o transferidos a vehículos de mayor capacidad para transportarlos a un sitio de deposición fina (SDF). Sobre este último, el diagnóstico declara que por el rezago de información al respecto de las características de infraestructura y de los procesos que se realizan en los sitios de disposición final de residuos, no se pueden clasificar como “Rellenos Sanitarios”, “Sitios Controlados” o “Sitios no Controlados”, es decir que no se tiene conocimiento preciso sobre las cualidades individuales de los SFD nacionales (SMARNAT, 2020).

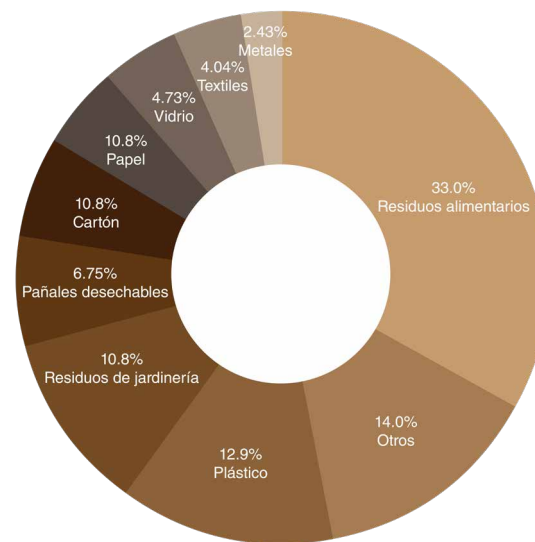


Figura 14. Composición porcentual promedio de los residuos mexicanos, Diagnóstico Básico para la Gestión Integral de los Residuos, SEMARNAT, 2020.

En el caso de los desechos que son transferidos para su aprovechamiento, se contabiliza que en el país existen 173 centros de acopio formalmente constituidos, los cuales reciben diariamente un promedio de 38 mil toneladas de residuos, de los cuales el 32.42% corresponde a materiales plásticos (PET en su mayoría) y 28.30% a papel y cartón. En cuestión de los plásticos aprovechables, se acopian 12 mil toneladas diarias en promedio, lo cual dejaría 4 mil toneladas sin reciclar de las 16 mil toneladas que se recolectan diariamente (SEMARNAT, 2020).

Ir en contra de la gran industria mundial de los plásticos quizás sea una cuestión imposible, pero el buscar soluciones desde nuestro entorno es una buena estrategia para mitigar los daños que ocasiona la comercialización de plásticos de un solo uso. Por lo mismo, es importante generar propuestas que se puedan implementar localmente con los recursos disponibles y con el apoyo de la propia comunidad. Si consideramos los datos que SEMARNAT presenta en su Diagnóstico Básico para la Gestión Integral de los Residuos, podríamos tomar en cuenta que en el país se desperdician 55 mil toneladas de residuos orgánicos que probablemente podrían ser aprovechados para generar productos a partir de polímeros naturales que puedan ser biodegradables, lo cual contrarrestaría a las 16 mil toneladas de plástico que se generan al día.

El tema del aprovechamiento de residuos orgánicos ha sido abordado por distintas instituciones y estudios que se han establecido como laboratorios independientes de materiales o fábricas de materiales activistas, en las que se enseña a aprovechar biopolímeros como materiales para expresión artística, fabricación textil o producción de objetos de diseño. Con el propósito de recuperar algunos aspectos de las actividades realizadas en estos espacios, se documentó el origen de estos espacios, su propósito y ejemplos de los trabajos desarrollados. La recopilación de esta información tiene el objetivo de fungir como base teórica y práctica para el desarrollo de la presente investigación.



Figura 15. Basurero del Bordo de Xochiaca. Postales del basurero de Neza, Betanzos Marcos, 2012, (<https://www.vice.com/es/article/8gjykv/postales-del-basurero-de-neza>)

## Laboratorios independientes de materiales

Al hablar de laboratorios independientes de materiales es importante mencionar los FabLabs, los cuales son espacios donde las ideas se vuelven productos a través del acceso a herramientas de fabricación local y la posibilidad de aprender nuevo conocimiento de otros miembros de la comunidad. Su incidencia social actual radica en permitir a la sociedad llevar a cabo sus proyectos en un espacio seguro con las herramientas adecuadas para ello. El concepto de FabLab surge del MIT siguiendo los ideales del “hazlo tú mismo” (DIY, Do It Yourself) y del “hazlo con otros” (DIWO, Do It With Others), caracterizado por el compartir e inspirar a otras personas con inquietudes y proyectos similares, ideales que también comparten los laboratorios independientes de materiales (Julia & Büching, 2014). Otra relevante organización que ha inspirado a distintos proyectos independientes de investigación es el MediaLab del MIT, que explora el desarrollo de investigaciones interdisciplinarias conjuntando ingenieros, artistas, químicos, científicos y diseñadores, permitiendo el crecimiento del proyecto hasta llevarlo a una posible evolución fuera del laboratorio (MIT-MediaLab, 2020).

A diferencia de los FabLabs, en los laboratorios independientes de materiales, las actividades se enfocan en realizar proyectos a través de la experimentación con materiales creados por los propios diseñadores, llamados por algunos como “DIY Materials” (materiales hechos por uno mismo). Éstos son a su vez implementados en diseño de objetos decorativos o funcionales.

En el artículo “DIY Materials”, redactado por académicos del departamento de diseño del Politécnico de Milán, se menciona que “[...]los materiales DIY se producen a través de experiencias de autoproducción individuales o colectivas, a menudo mediante técnicas y procesos de la propia invención del diseñador, como resultado de un proceso de experimentación con los materiales. Pueden ser nuevos materiales fabricados mediante el uso creativo de otras sustancias como ingredientes, o pueden ser versiones modificadas o desarrolladas de materiales ya existentes.” En el mismo artículo se plantea que parte de la razón por la cual han surgido laboratorios o estudios con interés de desarrollar materiales de manera autónoma son la gran cantidad de información disponible en redes digitales sobre materiales y procesos de manufactura. Encontrar recetas sobre cómo preparar y producir polímeros naturales se ha vuelto algo sencillo gracias a los repositorios de material autoproducidos. Este



Figura 16. Vaciado de biocompuesto en moldes para muestras. FabLab Barcelona, 2021, (<https://fablabbcn.org/blog/emergent-ideas/biomaterials-101>)

tipo de iniciativas ha permitido una nueva forma de desarrollo científico ciudadano o de ciencia open source, que se involucra tanto en procesos de producción como en la búsqueda de oportunidades de colaboración social en el desarrollo de materiales alternativos con un menor impacto ambiental (Rognoli et. al., 2015).

A continuación, se presentarán algunos de los centros que se enfocan en la enseñanza, difusión o el desarrollo de biomateriales. Éstos siguen un mismo enfoque de desarrollo autónomo y sustentable.

FabTextil (Barcelona, España) es un laboratorio multidisciplinario enfocado sobre todo en el diseño de modas, en el cual se ha creado una gran red de conocimiento sobre cómo crear, producir y distribuir elementos de moda de bajo impacto ambiental. Cuenta con distintas plataformas de investigación y educación interdisciplinaria, tanto de manera digital como en su laboratorio abierto, en donde se llevan a cabo proyectos con biopolímeros desarrollados in situ y distintos materiales naturales para producir prendas que posteriormente llegan a participar en pasarelas de moda y en exposiciones a nivel global. Una de sus mayores aportaciones ha sido la publicación de dos booklets de acceso libre con recetas detalladas para producir bioplásticos de forma no industrial, “The secrets of bioplastic” publicado en 2017 y “Bioplastic cook book” publicado en el 2018. Ambas publicaciones han sido inspiración para que más personas se involucren en el tema y tengan la oportunidad de adquirir el conocimiento de manera gratuita (FabTextiles, 2020).

LABVA (Valdivia, Chile) es otro laboratorio que se ha involucrado en la difusión del desarrollo de biopolímeros, presentando sus propuestas en diversos eventos desde el 2018 y más recientemente con participación en el Abierto Mexicano de Diseño 2020 con una propuesta de bioplástico a partir de almidón de aguacate. El autonostrado laboratorio de biomateriales define su práctica como “[...]el desafío de crear una paleta biomaterial-heterogénea, diversa y con denominación de origen asociada a las materias primas —naturales y/o de desechos antrópicos— que se encuentran en abundancia en nuestro entorno. Utilizando una metodología de Diseño Basado en Biodiversidad, generamos biomateriales que surgen tanto del cultivo de organismos (GIY - Grow It Yourself) como de recetas de cocina (CIY - Cook It Yourself) para el desarrollo de nuevas materialidades” (LABVA, 2018).



Figura 17. Bolso de piel-vegetal a base de café FabTextiles, 2019, (<http://fabtextiles.org/coffee-leather-bag>)



Figura 18. Biomateriales DIY / Biopolímero Artesanal de Aguacate Abierto de diseño, 2020, ([https://abiertodediseno.mx/en/expo\\_central/labva-biomaterials-laboratory-valdivia](https://abiertodediseno.mx/en/expo_central/labva-biomaterials-laboratory-valdivia))

DIY Materials Research Group (Milán, Italia), funciona como un equipo interdisciplinario independiente, aunque cuenta con el apoyo de universidades como el Politécnico de Milán y la Universidad de los Andes. Su principal objetivo es democratizar los procesos de elaboración de materiales no estandarizados. Para ello cuentan con una base de datos pública “The DIY-Materials Database” en donde categorizan los materiales, según su origen, en cinco “Kingdom”, Vegetabile (vegetal), Animale (animal), Lapideum (minerales), Recuperavit (residuos) y Mutantis (hibridación). Además de esta base de datos, el grupo crea talleres itinerantes llamados “Materials Clubs” definidos como espacios abiertos para crear o experimentar con biomateriales y generar proyectos a partir de los mismos (DIY Materials, 2020).

Materiom (Internacional), es un repositorio de recetas de código abierto para elaborar biomateriales a partir de distintos recursos naturales, como desechos orgánicos que se generan en la ciudad. Con el ideal de hacer que este conocimiento sea abierto, se acelera el desarrollo de materiales de manera autónoma y se reducen las barreras de entrada en los mercados de nuevos materiales renovables. Materiom también funciona como una plataforma virtual para vincular empresas, ciudades y comunidades, para fomentar el desarrollo de laboratorios independientes que deseen desarrollar biomateriales para cambiar la relación del humano con el ecosistema y apoyar la economía social en el transcurso (Materiom, 2019).

Biology Studio (CDMX, México), se define como “el primer estudio en México creado por Edith Medina, que bajo la filosofía I.T.T. (Innovación + Tecnología + Tradición) vincula biología, diseño y conocimiento ancestral, para desarrollar proyectos, objetos y diseños que involucran diversas disciplinas. Desde naturalismo, arte, diseño y ciencia”. Cuenta con diversos talleres en los cuales se exploran las cualidades y posibilidades de distintos materiales naturales, indagando a partir de la experimentación sus límites para generar nuevos objetos de diseño (Biology Studio, 2020).

Material Designers (Milán, Italia) es una competencia, una serie de eventos y una plataforma dedicada a darse cuenta del impacto positivo que los diseñadores de materiales pueden tener en todos los sectores creativos. Cofinanciado por el Programa Europa Creativa de la Unión Europea, tiene como objetivo impulsar los talentos hacia economías circulares en toda Europa. Considerando a los diseñadores de materiales como agentes



Figura 19. Materials Clubs\_POLIMI  
DIY Materials, 2020, (<http://www.diymaterials.it/the-diy-materials-club>)

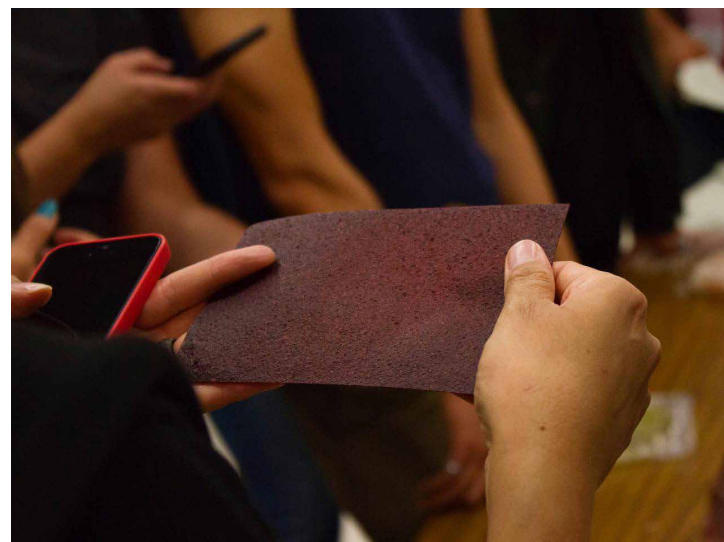


Figura 20. Taller Materiales Especulativos.  
Biology Studio, 2020, (<https://biologystudio.com.mx/portafolio>)



de cambio, con la posibilidad de diseñar, rediseñar, reformar, reutilizar y redefinir materiales, les da un propósito nuevo e implementando cambios sociales, económicos, políticos y ambientales positivos en todos los sectores hacia un futuro diseñado de manera responsable (MaDe, 2019).

Aunque anteriormente se presentaron únicamente grupos independientes, podemos encontrar cursos sobre desarrollo de biomateriales en distintas universidades de diseño como parte de su plan de estudios. Esto habla de un interés general sobre abordar estos temas y de la importancia de compartir el conocimiento con los futuros profesionistas del diseño.

Como parte de la investigación se han recopilado los ingredientes más utilizados para crear biomateriales en los laboratorios anteriormente presentados. Estos se presentarán en el siguiente diagrama “Figura 22”, catalogándolos por la función que cumplen en el proceso de fabricación de materiales y su origen.

El almidón, agar-agar y la grenetina son los polímeros naturales que más constantemente se mencionan en recetas para biomateriales, aunque en el caso específico de biotextiles, la kombucha es el biopolímero más constante. Esto es principalmente por la disponibilidad de los materiales (por ser a la vez ingredientes de cocina) y el bajo costo de obtención comparado a otros polímeros naturales. Por otro lado, la glicerina es quizás el único polimerizante que se emplea en laboratorios independientes, lo más probable es que sea por su origen natural y bajo costo. Conforme a los agregados, estos resultan ser muy variables y dependen en su mayoría de las características deseadas para el biomaterial, pudiendo modificar la textura, color, olor o cualidades físicas.

Como se mencionó anteriormente, los principales materiales ocupados en la fabricación de biomateriales son ingredientes que se utilizan en la gastronomía, por lo cual son económicos y relativamente fáciles de conseguir. Al proponer los biopolímeros a evaluar durante el desarrollo de esta investigación, se deberá considerar este tema, ya que se espera que los resultados del proyecto sean aprovechables para la comunidad que actualmente se encuentra produciendo sus propios productos mediante estos materiales.



Figura 21. MaDe Proyecto ganador - Aqua faba, Paula Nerlich. MADE, 2020, (<http://materialdesigners.org/paula-nerlich>)

Ingrediente	Origen	Función	Frecuente aplicación
Almidón	Vegetal	Polímero Natural	Repostería
Agar			Postres veganos
Alginato			Cocina molecular
Carrageno			Postres, gelatina
Grenetina	Animal		Estabilizante en lácteos
Quitosano	Bacteria		Se encuentra en mariscos
Xantana			Emulsionante y espesante
Kombucha-SCOBY			Realización de bebidas
Micelios	Fungí		Raíz de hongos como setas
Vinagre	Vegetal		Acido-Disolvente
Aceite vegetal	Vegetal/Animal	Aditivo	Distintos usos en alimentos
Glicerina		Polimerizante	Humectante
Sal	Mineral	Agregados	Distintos usos en alimentos
Arcilla			Alfarería
Arena			Agregados
Carbón activado			Medicamentos, suplemento
Cascaras de frutos			Abono
Cenizas de madera			Remedios para la salud
Residuos de papel	Vegetal		Reciclaje
Café	Animal		Abono
Cascara de huevo			Vegetal/Animal
Fibras			

Figura 22. Principales ingredientes usados en la elaboración de materiales DIY.

De igual manera, se pudo constatar mediante la información disponible que el proceso de producción de objetos utilitarios u ornamentales mediante los biomateriales desarrollados es mayormente mediante moldes, yeso o bastidores de madera. En algunos casos se hace el vaciado de la mezcla en el bastidor para crear un lienzo y posteriormente cortarlo con el patrón deseado, realizando así una producción sustractiva, lo cual no resulta tan negativo, ya que los restos de lienzo se pueden reaprovechar para realizar otro biomaterial. Además, abre oportunidades a experimentar otros tipos de procesos mediante sistemas de fabricación aditiva con los que no sería necesario hacer los cortes del patrón o la fabricación de un molde, ahorrando recursos y reduciendo el impacto ambiental del proceso de fabricación.

Es esencial comprender como se efectúan las prácticas de producción de biomateriales, cuáles valores se persiguen en las distintas plataformas de enseñanza, las oportunidades de innovación que representan y las redes digitales que se han formado en su entorno. Todo lo anterior da pauta a que el proyecto de investigación realizado sea un recurso importante para esta comunidad que se encuentra en un rápido crecimiento.

## Problemática de la fabricación aditiva

La fabricación aditiva es un grupo de herramientas de producción definidas por el proceso de unir materiales capa sobre capa para crear objetos a partir de datos de modelos tridimensionales. Estas tecnologías se encuentran en un rápido desarrollo, el creciente interés de fabricantes y diseñadores por la adopción de estas herramientas en sus procesos está dado por las oportunidades de producir, reparar o reemplazar productos o prototipos de manera local a bajo costo.

En las guías publicadas por la asociación de FabLabs se sugiere contar con este tipo de equipos para la elaboración de partes mecánicas, juguetes, material educativo, o prototipos. Su versatilidad permite que el diseñador pueda llevar un flujo de trabajo desde lo digital para posteriormente solidificar las ideas a partir de la impresión 3D de objetos físicos. La fabricación aditiva da la posibilidad de que el diseñador pueda realizar cambios en el diseño a través del estudio de prototipos realizados a través de esta tecnología, a un bajo costo y un menor tiempo del que requeriría otro tipo de proceso de fabricación.



Figura 23. Biocompuesto a partir de cenizas de madera Materiom, 2021, (<https://materiom.org/recipe/59>)



Figura 24. Laboratorio de fabricación digital, University of Southern California, 2020, (<https://www.uscannenbergmedia.com/2020/04/08/the-iovine-and-young-academy-produces-3d-printed-personal-protective-equipment-for-caregivers/>)

El proceso descrito anteriormente hace que el 10% de los objetos creados a partir de fabricación aditiva sean desechados de forma inadecuada y terminen en los océanos. Dicho porcentaje es cada vez mayor al aumentar la oferta de equipos de impresión 3D no profesionales y también al aumentar el interés por adquirir este tipo de equipos por parte de sectores poblacionales no familiarizados con el tema, para la producción de bienes de consumo desechables (National Geographic, 2018).

Dentro del amplio espectro de tecnologías para fabricación aditiva se encuentra el modelado por deposición fundida (fused deposition modeling - FDM) el cual es la tecnología de impresión 3D con mayor adopción a nivel mundial, esto gracias a su reducido precio de adquisición e implementación. Este tipo de impresoras constan de una base caliente o cama de impresión, un extrusor de filamento, también llamado cabezal de extrusión y la materia prima, la cual comúnmente se encuentra como un filamento plástico embobinado (Mwema & Akinlabi, 2020).

Parte fundamental del proceso de fabricación aditiva son los materiales empleados, particularmente en el modelado por deposición fundida, los dos materiales más frecuencia son el acrilonitrilo butadieno estireno (ABS) y el ácido poliláctico (PLA), cada uno cuenta con sus propias cualidades y origen. Mientras que el ABS es un plástico no renovable que se crea a partir de sustancias que se obtienen de derivados del petróleo, el PLA es un bioplástico originado a partir de la fermentación de carbohidratos de origen natural; por ello se ha manejado su comercialización como un plástico renovable y biodegradable, justificando así su implementación y generación de desechos. Aun cuando la biodegradabilidad del PLA es algo posible, es importante aclarar que este proceso debe ser realizado en composteros industriales controlados, ya que es necesario mantener ciertas encimas en una temperatura y humedad constante para lograr romper las cadenas del polímero y lograr una descomposición adecuada (Cepeda et. al., 2018).

La creciente elaboración de objetos a partir de fabricación aditiva suele ser realizada a partir de plásticos de un solo uso, lo cual genera un impacto ambiental que no se ha estudiado en su totalidad. No obstante, es un problema latente que debe ser considerado por los diseñadores al momento de ejercer su profesión. Si bien podemos tomar distintas acciones para mitigar el impacto, como la reducción de desperdicios o

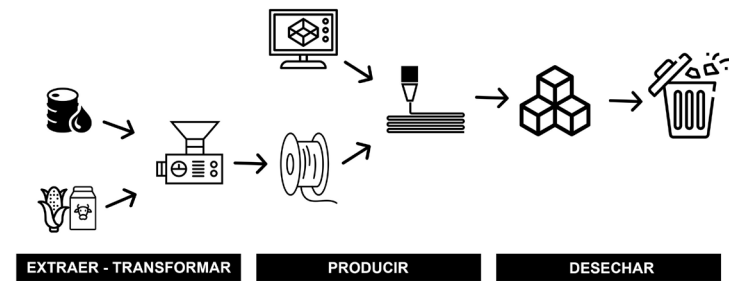


Figura 25. Diagrama sobre el ciclo de la fabricación aditiva.

el reutilizar los residuos plásticos, esto no evitará que continúen llegando desechos al medio ambiente, por lo cual resulta imprescindible el repensar los materiales utilizados en los sistemas de fabricación aditiva.

Dentro de los materiales realizados en laboratorios independientes de materiales, se encuentran diversas propuestas con base en productos de origen natural, como pueden ser los residuos de la industria agrícola. La producción de este tipo de materiales tiene la ventaja de ser elaborados a partir de fuentes renovables y la posibilidad de ser reintegrados al medio ambiente a partir de su biodegradación en entornos no controlados. Su implementación en sistemas de fabricación aditiva permitiría la elaboración de objetos a partir de materiales renovables que tengan un impacto ambiental menor al ocasionado por los actuales plásticos que suelen ser utilizados. A su vez, la elaboración de materiales DIY para su uso en sistemas de fabricación aditiva, permitirá que el diseñador tenga la libertad de dotar al material de las cualidades deseadas para el proyecto específico; cualidades como color, textura o flexibilidad pueden ser controladas al cambiar las dosificaciones del material.



Figura 26. Composite de café Co02, 2022, (<https://materiom.org/recipe/171>)

# Metodología

El proyecto de investigación se plantea desde la intención de crear nuevos materiales capaces de sustituir a los filamentos plásticos que son empleados comúnmente en sistemas de fabricación aditiva, los cuales provienen de fuentes no renovables o son complicados de biodegradar o reciclar. Para lograr este objetivo se realizó una recopilación de información tanto de la gestión de los residuos plásticos como de las alternativas han surgido en torno a los materiales plásticos en los últimos años, encontrando en este proceso, organizaciones o laboratorios independientes que promueven la fabricación de materiales provenientes de fuentes renovables y biodegradables, estos nombrados materiales DIY (Do It Yourself) (Rognoli et. al., 2015). Como se ha mencionado anteriormente, los materiales DIY están basados en polímeros de fuentes naturales (como el almidón), los cuales al ser mezclados con un plastificante natural (glicerina), obtienen nuevas cualidades útiles para el diseño de productos de diseño. Por lo cual, resulta pertinente comprobar la posibilidad de ser un sustituto de los actuales filamentos plásticos, esto a partir de la evaluación de sus cualidades.

El desarrollo de la investigación se llevó a cabo en tres fases, las cuales se señalan en el siguiente diagrama (Figura 27). La primera etapa se enfocó en el desarrollo de materiales biobasados por medio de la experimentación. Durante este proceso se elaboraron diversas muestras de materiales realizadas desde la revisión de publicación realizadas por centros como FabLab, FabTextiles y Materiom. En los cuales se detallan los procesos y compuestos requeridos para realizar materiales biobasados en entornos no controlados y a partir de ingredientes de uso doméstico y residuos orgánicos. De las muestras obtenidas se seleccionaron aquellas que mostraron un menor porcentaje de deformación durante el proceso de secado y con mayor facilidad de ser extruidos a través de un extrusor mecánico de pastas, para lo que se consideraron cualidades como viscosidad y fluidez. Posteriormente, se procedió a optimizar el compuesto con el propósito de obtener un material capaz de soportar el peso del apilamiento de capas durante el proceso de impresión. Para ello se realizaron pruebas de impresión con mezclas de diversas dosificaciones, variando los porcentajes entre agua, polimerizante y agregados, el proceso experimental fue documentado y su resultado llevo a la selección de un compuesto óptimo para la impresión de objetos tridimensionales de baja escala (10x10x10 cm).

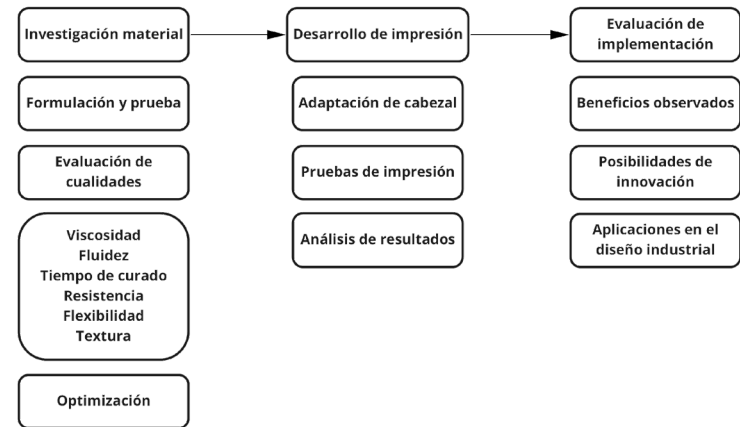


Figura 27. Diagrama de actividades conforme a las fases de la investigación.

La segunda fase se enfocó en la realización de pruebas de impresión, para lo cual se realizó la adaptación de un cabezal para poder realizar la extracción controlada del material a partir de su compresión mecánica. El cabezal se montó en una impresora 3D del tipo Delta con la cual se efectuaron diversas impresiones, durante este proceso se continuó la optimización del material con el objetivo de obtener capas más detalladas del objeto.

Durante la última fase se llevó a cabo la evaluación de la implementación del material biobasado en sistemas de fabricación aditiva, para ello se evaluó el tiempo de biodegradación del material en una compostera no industrial, la cual se monitoreó a partir de un controlador Arduino que elabora mediciones de humedad y temperatura de la composta cada 15 días. Mediante la información obtenida se documentaron los beneficios observados y sus posibilidades de aplicación en el diseño industrial.

A continuación, se desglosan las bases metodológicas que estructuran el proyecto de investigación.

Pregunta de investigación: ¿Cuáles biopolímeros utilizados en el desarrollo de materiales biobasados en laboratorios independientes de materiales podrán ser implementados en sistemas de fabricación aditiva como alternativa a los materiales plásticos usados actualmente?

¿Podrán los residuos sólidos orgánicos ser aprovechados como agregados en el desarrollo de materiales biobasados para su uso como insumo en sistemas de fabricación aditiva?

Objeto de estudio: La investigación se centra en el desarrollo de materiales biobasados, su estudio, producción y optimización, con la finalidad específica de cumplir los aspectos adecuados para su implementación en sistemas de fabricación aditiva. Para ello se evaluó las características de distintos polímeros naturales que se han usado anteriormente para el desarrollo de este tipo de materiales, encontrando entre ellos el almidón, agar-agar, grenetina, alginato de sodio y goma xantana. A su vez, se trabajó con agregados orgánicos y minerales, principalmente carbonato de calcio, que puede ser obtenido de los cascarones de huevo. Con el propósito de evaluar la capacidad de los materiales se utilizó una impresora 3D de tipo Delta, a la cual se le instaló un cabezal de extrusión de pastas accionado



Figura 28. Prueba de extrusión manual, material biobasado a partir de almidón y carbón activado.

con un motor NEMA17, el cual podría ser replicado con facilidad por otros usuarios o centros de investigación que se interesen en el tema.

Hipótesis: A partir de la adecuada dosificación de compuestos formulados con base de polímeros naturales, se puede producir un material óptimo para su implementación en sistemas de fabricación aditiva, que a su vez consiga ser biodegradado en un entorno no controlado.

Objetivo general: Evaluar la formulación de un material biobasado y compostable capaz de ser implementado en sistemas de fabricación aditiva por extrusión de pastas, para el desarrollo de prototipado rápido de objetos de geometría no compleja.

Objetivos específicos:

Recopilar información sobre el uso de biopolímeros por grupos o comunidades que realizan materiales DIY.

Cuantificar que biopolímeros son los más implementados por estos grupos y valorar cuál es el motivo de su preferencia.

A partir de la información conseguida anteriormente, medir las propiedades de viscosidad y fluidez de los biopolímeros más implementados mediante la experimentación de desplazamiento en pendiente.

Conocer que biopolímeros de los evaluados pueden ser extruidos con facilidad mediante un extrusor de pastas.

Comprobar la biodegradación del material resultante en una composta no industrial, conforme la normativa AS 5810 del Australian Standard.

Documentar el proceso de experimentación y optimización de los materiales evaluados.

## Definición de variables

- Materiales biobasados o materiales DIY, son materiales compuestos principalmente por cuatro elementos: biopolímero, disolvente, plastificante o polimerizante y agregado. La variación sobre la proporción relacionada entre la cantidad de disolvente y biopolímero (expresada como el % de disolvente por cantidad de biopolímero), cambiarán las cualidades del material, dándole una mayor o menor fluidez y resistencia, mientras que la relación del polimerizante cambiará las cualidades de flexibilidad del material. Por lo tanto, estas relaciones son una variable dependiente a las cualidades deseadas.
- Biopolímeros o polímeros naturales se define como aquellos polímeros que se pueden encontrar en la naturaleza sin pasar por un proceso sintético. Entre los principales se encuentran polisacáridos, almidones, glucógenos y proteínas. En el caso específico de esta investigación se emplearon seis polímeros naturales distintos, almidón de maíz, agar-agar, alginato de sodio, grenetina, quitosano y goma xantana.
- Biodegradabilidad, se establece como capacidad de un material para descomponerse en sus componentes originales por medio de la actividad enzimática de microorganismos que se encuentran en el entorno natural.

## Justificación del enfoque

La estrategia metodológica se plantea como una investigación experimental de análisis cuantitativa, ya que el proceso explorativo se concentra en datos cuantificables y estadísticos; considerando que el objetivo principal es evaluar la implementación de biopolímeros en sistemas de fabricación aditiva, así como la medición del tiempo requerido para que dichos materiales tengan una total biodegradación en una compostera no industrial.



Figura 29. Diagrama sobre los componentes usados durante la investigación para realizar materiales biobasados.



## Descripción metodológica

A continuación, se presentan las actividades que se llevaron a cabo durante el desarrollo del proyecto de investigación.

Actividad 1: Búsqueda y actualización de referencias respecto al tema de los polímeros naturales y su aplicación en la práctica del diseño. Investigación sobre las comunidades que desarrollan biomateriales de forma autónoma o independiente, también llamados material designers, los cuales realizan sus proyectos en FabLabs, laboratorios independientes o estudios de biomateriales. Asimismo, se consultaron los recursos disponibles en las más importantes plataformas digitales que apoyan a este tipo de actividades.

Actividad 2: Elección de materiales según la información encontrada. A partir de la investigación efectuada, se eligieron aquellos polímeros naturales que son utilizados con mayor frecuencia por los distintos laboratorios independientes para la elaboración de biomateriales que posteriormente son utilizados como materiales para desarrollo de artefactos u objetos de diseño.

Actividad 3: Se elaboró una primera experimentación mediante el uso de recetas originadas en los mencionados laboratorios; los biopolímeros resultantes fueron evaluados para conocer su viscosidad y fluidez, la cual se llevó a cabo mediante una experimentación cuasi experimental, variando la cantidad de los componentes en la mezcla para cuantificar los cambios en sus propiedades de fluidez y viscosidad del material.

Actividad 4: A partir de las pruebas de la actividad 3, se continuó con la optimización de la mezcla del biopolímero para obtener un material con propiedades adecuadas para su empleo en sistemas de extrusión de fabricación aditiva. Con esta mezcla optimizada se comprobaron sus cualidades en un extrusor de pastas, verificando que el biopolímero en fresco fluyera sin calentar o forzar el motor del extrusor.

Actividad 5: Obteniendo una mezcla adecuada para su extrusión, se llevó a cabo el diseño de muestras mediante software de modelado 3D, teniendo en cuenta la posibilidad de visibilizar problemáticas de resistencia en la conformación de capas durante el proceso de impresión. Con este modelo tridimensional se fabricaron las muestras mediante una impresora 3D adaptada para utilizar el extrusor de pastas.



Figura 30. Prueba de material biobasado a partir de grenetina.

Actividad 6: Con el propósito de medir el tiempo que tardará el material en completar su biodegradabilidad, se colaron dos muestras en un medio orgánico no controlado conforme a la normativa AS 5810 del Australian Standard que publicó en 2010 la primera norma del mundo sobre compostabilidad doméstica (PA, 2010). Estas muestras se monitorearon cada quince días llevando un control del desgaste visible en el material y las medidas de humedad y temperatura del medio en el que han sido depositadas.

Actividad 7: Al completar el proceso de experimentación se estudiaron los datos obtenidos para llegar a una correcta conclusión sobre el uso de los materiales biobasados en sistemas de fabricación aditiva.

Con el propósito de obtener información al respecto de las características y cualidades de los materiales biopoliméricos, se efectuó una exploración experimental a partir de la variación de sus componentes. Durante este proceso se documentaron los cambios de comportamiento de los materiales según se altera su dosificación y origen de sus componentes. La documentación del proceso de experimentación, así como los resultados obtenidos, será base para el proyecto de investigación. Es por lo que se conformó un catálogo de las distintas pruebas realizadas, incluyendo el proceso seguido e ingredientes utilizados.

Este primer proceso es nombrado Material Tinkering por el proyecto MaDe del Creative Europe Programme of The European Union, quienes lo han descrito como “el arte de manipular el material de forma creativa con fines de descubrimiento y aprendizaje”. De esta manera, el proceso exploratorio de los materiales requiere tanto de una visión de libre experimentación como de un enfoque científico de prueba y error (MaDe, 2020).

Si bien el proceso planteado es exploratorio, se consideraron ciertas directrices para comenzar la experimentación. La selección de componentes se basó en la tabla mostrada anteriormente sobre los principales ingredientes usados en la elaboración de materiales DIY. (Figura 22), en la cual se pueden encontrar clasificados los componentes más comunes de encontrar en repositorios de materiales biopoliméricos, estos se han recolectado de cuatro diversas fuentes (FabTextiles, Materiom, DIY Materials y NatureLab). De los ingredientes recopilados



Figura 31. Prueba de material biobasado a partir de grenetina y residuos de mandarina.

se seleccionaron seis polímeros naturales (almidón, agar-agar, alginato, grenetina, quitosano y xantana), seis agregados (arcilla, cáscara de frutos, café y cascarones de huevo), vinagre como un ácido disolvente y glicerina como elemento polimerizante o plastificante. Esta selección está basada en la facilidad de obtención y su frecuencia de uso en recetas para creación de bioplásticos de forma no industrial.

La relación del plastificante con el resto de los ingredientes es de igual manera importante en el proceso de experimentación, ya que esta variabilidad influye directamente en las cualidades de plasticidad que desarrolle el material. La plastificación es un proceso fundamental para crear materiales biopolímeros, puesto que mediante este se obtienen las cualidades plásticas del material, así como su flexibilidad y maleabilidad. Esta reacción se puede lograr a partir de un plastificante, como es el caso de la glicerina, la cual mejora la flexibilidad del material mediante la reducción de las fuerzas intermoleculares. Mientras más se agregue un plastificante a la mezcla de un biopolímero, mayor será la deformación que pueda soportar sin una ruptura, es decir, se gana una mayor flexibilidad (Enríquez et. al., 2012).

En este sentido, se definen cuatro componentes mínimos para llevar a cabo el proceso de plastificación de los materiales biopoliméricos: **Polímero + Plastificante + Disolvente + Aditivo**. Considerando los ingredientes seleccionados anteriormente, se apreciará que en el proceso de experimentación se repiten dos ingredientes esenciales, el agua como disolvente y la glicerina como plastificante; ambos resultan de gran importancia, ya que son componentes que cambiarán las cualidades del material según su dosificación o relación con el resto de los ingredientes (Kwong, 2011).

El proceso de experimentación exploratorio con biopolímeros tiene una sensación de alquimia y podría ser entendida como una reinterpretación de las prácticas tradicionales. Pero en realidad tiene un trasfondo contemporáneo en el cual nos encontramos con una creciente comunidad de diseñadores que se enfocan en la creación de materiales a través de la experiencia sensorial y el conocimiento científico. Este conocimiento permite “diseñar” el procedimiento o secuencia de pasos para obtener un material final que puede modificarse, personalizarse y mejorarse, variando su procedimiento y componentes (MaDe, 2020).



Figura 32. Prueba de material biobasado a partir de goma xantana y barro zacatecas.

## Obtención de los ingredientes

Como se ha mencionado, se trabajó con seis polímeros naturales: almidón, agar-agar, alginato, grenetina, quitosano y goma xantana. Estos son comúnmente utilizados en la industria alimentaria, por lo cual se pueden conseguir de forma sencilla en comercios de materias primas y mayoristas de insumos alimenticios. Mientras que los agregados mencionados provienen o de productos comercializados en condiciones estandarizadas como son los agregados minerales (arcillas o arena) o de residuos del consumo humano, como es el caso de cáscaras de frutos. Para estos últimos, se requirió un proceso de secado y molido para poderlos emplear de manera óptima en el desarrollo de materiales biopoliméricos.

Entre los residuos orgánicos obtenidos en el hogar se han recolectado cáscaras de plátano, mandarina y limón, residuos de zanahoria obtenidos en su extracción de jugo y cascarás de huevo. En todos los casos se siguieron los mismos pasos para su secado y trituración. Se comenzó con secar los residuos en un espacio a sol directo, cubiertos por una fina tela transpirable. Este proceso requiere entre dos y tres días para ser completado. Al momento que los residuos se encuentran deshidratados se puede notar un cambio en su rigidez, en este punto se trituraron mediante un molino eléctrico para producción de harinas, el material fino resultante se pasó por una malla cernidora #18 (abertura de 1mm) y finalmente se dejó secar un día más al interior. Este proceso puede no ser muy preciso y llevar a que los agregados no tengan una estandarización al obtenerlos y procesarlos en distintas condiciones, tanto de madurez como de situación ambiental, ya que no se controlan aspectos como humedad, la edad de los residuos o proveniencia de los mismos.



Figura 33. Triturado de ingredientes provenientes de residuos orgánicos de mandarina.

## Probeta y registro de la experimentación

Teniendo el propósito de llevar un control y registro adecuado de las pruebas a realizar, se diseñó un molde con medidas de 10x10 cm y un espesor de 2 mm, este fue producido mediante una impresora 3D utilizando PLA (ácido poliláctico) como filamento de impresión. Se decidió emplear este diseño de molde para poder analizar cambios de encogimiento y deformación en el proceso de secado, así como recopilar las muestras en un formato similar y poderlas comparar entre sí.

Con la misma intención se elaboró una ficha de registro para documentar la composición del material, el proceso de producción y una descripción cualitativa de los resultados obtenidos de cada experimentación. De esta manera, el registro podrá ser usado para la replicabilidad o implementación del material biobasado. Si bien esta primera ficha de registro se centra en características cualitativas de los materiales obtenidos, podrá ser modificada posteriormente para facilitar la documentación de pruebas cuantitativas que se procedan según el avance de la investigación.

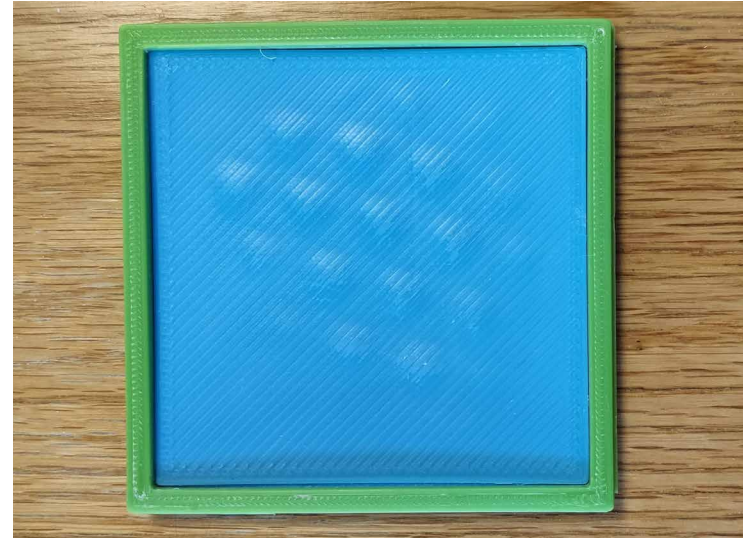


Figura 34. Molde usado para el desarrollo de muestras de los materiales biobasados.

## Utensilios empleados

Como parte de la documentación del proceso de elaboración de materiales biobasados se enlistan los utensilios y herramientas utilizados.

- Molino eléctrico
- Malla cernidora #18 (abertura 1mm)
- Báscula digital tolerancia de 0.1g
- Vaso medidor 20ml
- Jeringa de 5ml
- Taza medidora 240ml
- Parrilla eléctrica de cinco temperaturas
- Vaso de precipitados de 600ml
- Termómetro digital para alimentos
- Pala de madera



Figura 35. Utensilios y herramientas empleadas durante el proceso de experimentación.

# Desarrollo de la investigación

## Pruebas con agregados organicos

Durante la primera fase de experimentación se ha podido probar cuatro distintos polímeros de origen natural: goma xantana, almidón de maíz, grenetina y agar-agar; y cuatro distintos agregados provenientes de residuos orgánicos generados en casa: cascarones de huevo, residuos de zanahoria, residuos de café y cáscaras de mandarina. En la Figura 36 se puede observar cómo ha sido la composición de dichos materiales que han dado un total de cinco pruebas realizadas.

Como parte de la investigación es importante mencionar el origen y cualidades principales de los ingredientes utilizados.

Biopolímeros, información obtenida del texto “Introduction to Biopolymers from Renewable Resources” de David Kaplan (Kaplan, 1998).

**Agar-agar:** se describe como un polisacárido proveniente de algas de color rojizo, es aprovechado como gelificante en la industria alimentaria, dental y microbiología.

**Almidón de maíz:** los almidones en general son caracterizados por los polisacáridos amilosa y la amilopectina, el porcentaje de estas depende de la especie vegetal de la cual se extraigan. Su bajo costo y alta disponibilidad hacen que los almidones sean un biopolímero de interés en distintas industrias.

**Grenetina:** es un subproducto derivado del colágeno existente en cartílagos, huesos o pieles de diversos animales de la industria ganadera. Se utiliza como gelificante o nutriente en las industrias alimentaria y farmacéutica.

**Goma Xantana:** es un heteropolisacárido microbiano extracelular formado por la actividad fermentativa de los microorganismos *Xanthomonas Campestris*, sus propiedades estabilizantes y espesantes se han aprovechado en industrias alimentarias, petroquímicas y farmacéuticas.

**Agregados orgánicos:** podemos decir que los agregados

Prueba N°	Polímero	Agregado
01	Agar	Cascarones de huevo
02	Almidón de maíz	Residuos de café
03	Grenetina	Cascaras de mandarina
04	Goma Xantana	Residuos de zanahoria
05	Goma Xantana	Cascarones de huevo

Figura 36. Matriz de polímeros y agregados usados durante la fase de experimentación con agregados orgánicos.

implementados durante esta fase son de un origen vegetal o animal. Siendo los cascarones de huevo parte de estos últimos, su composición resalta por su alta presencia de carbonato de calcio (96%), el cual es un mineral que se utiliza como carga en otros materiales como el plástico, la cerámica o el vidrio. Por otro lado, los agregados de origen vegetal se consideran que están compuestos mayormente por celulosa, la cual es un biopolímero compuesto por polisacáridos. La celulosa es el polímero natural con mayor presencia en el mundo, su uso se extiende con distintos propósitos en todas las actividades humanas (Kaplan, 1998).

Es pertinente mencionar que dos ingredientes de la composición de materiales biopoliméricos se repiten en todas las pruebas, estos son el agua que tiene la función de ser el medio disolvente y la glicerina que funge como plastificante natural. La glicerina se obtiene principalmente del procesamiento de lípidos vegetales, su empleo en la industria de los plásticos tanto biodegradables como no biodegradables es extensa. Se presenta comercialmente como un líquido translúcido y viscoso, su costo es muy reducido comparado con otros plastificantes comerciales y es totalmente biodegradable en entornos naturales, lo cual lo hace atractivo como plastificante natural.

En las siguientes imágenes (Figuras 38 a 42) se pueden observar los resultados obtenidos durante esta primera fase de experimentación. En las fotografías se aprecia la deformación y encogimiento que han sufrido especialmente la prueba 02 y 03.

Mediante la variación de la dosificación de glicerina, se ha demostrado que ésta es importante al otorgar las cualidades de flexibilidad que obtenga el material resultante, teniendo una relación de a mayor cantidad de glicerina mayor flexibilidad.



Figura 37. Agregados orgánicos, residuos de zanahoria, mandarina y cascarás de huevo.



Muestra 01, compuesto de agar-agar y cascarones de huevo. Composición:

Agua: 40ml Glicerina: 2.5ml

Carbonato de calcio: 7g Agar-agar: 1.5g

Proceso: Se mezclan los ingredientes secos y los líquidos por separado. Después, se mezclan en una olla a temperatura promedio de 60° continuamente durante 5 minutos. Posteriormente, se realiza el vaciado en moldes, la mezcla solidifica rápidamente.



Figura 38. Muestra 01, compuesto de agar-agar y cascarones de huevo.

Muestra 02, compuesto de almidón y residuos de café. Composición:

Agua: 60ml Glicerina: 5ml Café molido: 2g Almidón: 20g Vinagre: 5ml

Proceso: Se mezclan los ingredientes secos y los líquidos por separado. Posteriormente, se mezclan en una olla a temperatura promedio de 60°, mientras se calienta, la mezcla se tornará viscosa hasta tener una consistencia pastosa, momento en el cual hay que verter en moldes.



Figura 39. Muestra 02, compuesto de almidón y residuos de café.

Muestra 03, compuesto de grenetina y residuos de mandarina.  
Composición:

Agua: 50ml Glicerina: 3ml

Cáscaras de mandarina: 15g Grenetina: 3g

Proceso: Se mezclan los ingredientes secos y los líquidos por separado. Posteriormente, se mezclan en una olla a temperatura promedio de 60°, se mezcla continuamente, la mezcla se volverá pastosa rápidamente y se podrá verter en el molde.



Figura 40. Muestra 03, compuesto de grenetina y residuos de mandarina.

Muestra 04, compuesto de goma xantana y residuos de zanahoria.  
Composición:

Agua: 35ml Glicerina: 5ml

Residuos de zanahoria: 5g Goma Xantana: 1g

Proceso: Se mezclan los ingredientes secos y los líquidos por separado. Posteriormente, se mezclan en una olla a temperatura promedio de 60°, cuando la mezcla se torna pastosa se vacía en los moldes, dejándolos secar dos días a temperatura ambiente.



Figura 41. Muestra 04, compuesto de goma xantana y residuos de zanahoria.

Muestra 05, compuesto de goma xantana y cascarones de huevo.  
Composición:

Agua: 50ml Glicerina: 3ml

Cascaron de huevo: 35g Goma Xantana: 4g

Proceso: Se mezclan los ingredientes secos y los líquidos por separado. Posteriormente, se mezclan en una olla a temperatura promedio de 60°, cuando la mezcla se torna pastosa se vacía en los moldes, dejándolos secar un día a temperatura ambiente.

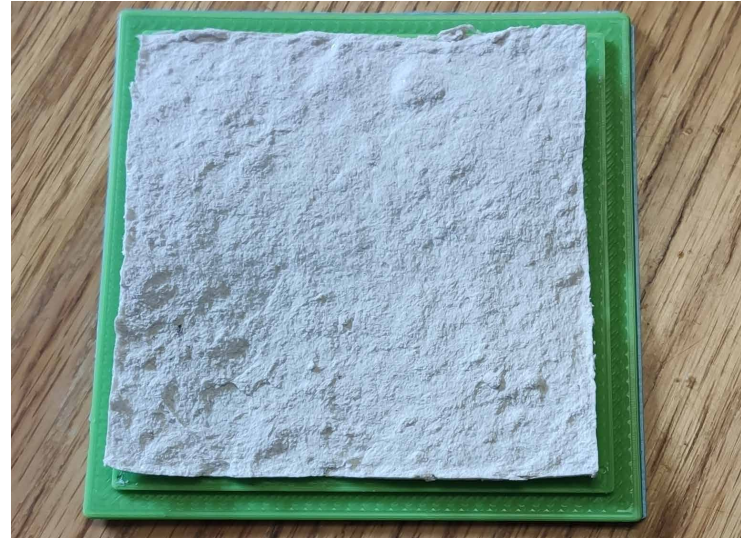


Figura 42. Muestra 05, compuesto de goma xantana y cascarones de huevo.

Al concluir la experimentación con agregados orgánicos se ha encontrado que tanto la goma xantana, como el agar-agar cuentan con un menor grado de deformación y, al igual que la grenetina, tienen la posibilidad de ser reutilizados aun secos al hidratarlos con agua caliente. Por otro lado, se encontró que los agregados obtenidos a partir de residuos orgánicos, obtenidos en el hogar, tienen una deficiencia en su uso al ser difíciles de estandarizar, por lo cual las pruebas realizadas con estos pueden no ser replicables en su totalidad.

## Pruebas con agregados estandarizados

A partir de los resultados obtenidos de la primera fase de pruebas, se decidió implementar agregados comercializados bajo estándares que permitan la replicabilidad de las pruebas. De esta manera se optó por utilizar cuatro agregados minerales:

- Carbonato de calcio, mineral natural de bajo costo, carga utilizada en plásticos y cerámicas con distintos propósitos como añadir blancura o resistencia al material.
- Silicato de magnesio (talco), mineral natural blando, carga reforzante e hidrofóbico, permite ser moldeado por presión en estado húmedo.
- Caolín, arcilla primaria, se aproxima mucho a la fórmula ideal caolinita; en los plásticos se usa como carga para generar un acabado superficial liso, reduce el agrietamiento y la contracción durante el secado.
- Barro Zacatecas: Arcilla refractaria, mezcla con óxidos metálicos y sílice puro, puede usarse como texturizante, reduce la contracción al secado.

Información obtenida de la tesis “La cerámica en el diseño industrial, algunas propuestas metodológicas para el desarrollo de pastas y vidriados.” de la MDI Emma Vázquez (Vázquez Malagón, 2001).

En el caso de los polímeros, se descartó el uso de almidón por su alta deformación presentada en la prueba 02; el resto de los polímeros se mantuvieron y se agregaron los siguientes:

- Alginato de sodio, polisacárido obtenido de las paredes celulares de algas de coloración café. El alginato se gelifica en contacto con iones calcio, los geles formados en estas condiciones son buenas barreras al oxígeno e hidrofóbicos.
- Quitosano, polisacárido presente en las estructuras exoesqueléticas de crustáceos y algunos insectos. Se considera el segundo polímero más abundante presente en la biomasa después de la celulosa.

Biopolímero base	Agregados estandarizados			
	Carbonato de calcio	Caolín	Talco	Barro Zacatecas
Agar- Agar	06 AG-CA	07 AG-KA	08 AG-TA	09 AG-ZA
Alginato de Sodio	10 AL-CA	11 AL-KA	12 AL-TA	13 AL-ZA
Grenelina	14 GR-CA	15 GR-KA	16 GR-TA	17 GR-ZA
Quitosano	18 QU-CA	19 QU-KA	20 QU-TA	21 QU-ZA
Goma Xantana	22 XA-CA	23 XA-KA	24 XA-TA	25 XA-ZA

Figura 43. Matriz de polímeros y agregados usados durante la fase de experimentación con agregados estandarizados.

Información obtenida del texto “Introduction to Biopolymers from Renewable Resources” de David Kaplan (Kaplan, 1998).

El desarrollo de las muestras elaboradas mediante agregados estandarizados es similar al de las anteriores pruebas, se emplearon los mismos utensilios y moldes para evitar el sesgo al momento de realizar medidas y comparar los resultados obtenidos.

Como parte de la experiencia adquirida durante la primera fase de experimentación, se determinó evaluar las pruebas a partir del porcentaje de deformación o encogimiento observado en las mismas posteriormente a su secado. De esta manera se pudo cuantificar el cambio físico que sufre el material a lo largo de su proceso de producción, y con ello tomar decisiones sobre la viabilidad de su aplicación en sistemas de fabricación aditiva.

En las siguientes imágenes se pueden observar las pruebas en seco, con su porcentaje de encogimiento horizontal señalado como “xy” y el encogimiento de su grosor como “z”.



Figura 44. Polímeros naturales (agar-agar, grenetina, quitosano y goma xantana) usados durante las pruebas con agregados estandarizados.

Porcentajes de encogimiento encontrado en las muestras elaboradas a partir de agar-agar.

06 AG-CA: xy: 22.7%, z: 35%

07 AG-KA: xy: 30%, z: 35%

08 AG-TA: xy: 21%, z: 30%

09 AG-ZA: xy: 21.1%, z: 25%

Dentro de las pruebas realizadas se observa que la muestra que contiene barro zacatecas presenta menor variación en sus dimensiones, pero una mayor deformación en su geometría.

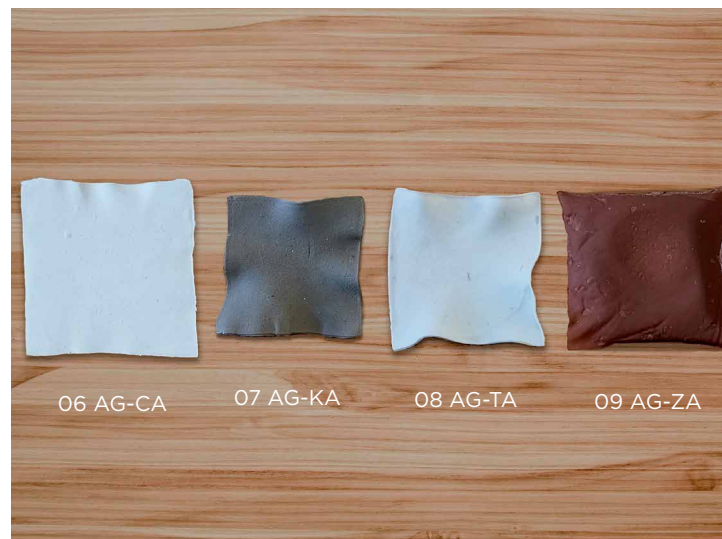


Figura 45. Muestras 06-09, elaboradas con agar-agar.

Porcentajes de encogimiento encontrado en las muestras elaboradas a partir de alginato de sodio.

10 AL-CA: xy: 14%, z: 5%

11 AL-KA: xy: 17%, z: 30%

12 AL-TA: xy: 7.4%, z: 25%

13 AL-ZA: xy: 33.8%, z: 6%

Las pruebas realizadas con alginato de sodio tienden a un bajo porcentaje de reducción de tamaño a lo ancho y largo, pero a su vez resultan piezas con poca flexibilidad, lo cual las hace quebradizas.



Figura 46. Muestras 10-13, elaboradas con alginato de sodio.

Porcentajes de encogimiento encontrado en las muestras elaboradas a partir de grenetina.

14 GR-CA: xy: 6.5%, z: 5%

15 GR-KA: xy: 17%, z: 6%

16 GR-TA: xy: 19.5%, z: 5%

17 GR-ZA: xy: 23.3%, z: 5%

Las muestras realizadas con grenetina tienen un menor porcentaje de encogimiento que las elaboradas con agar-agar, pero presentan deformaciones en su forma, mostrando a su vez problemas de fisuras en el caso de la elaborada con carbonato de calcio.



Figura 47. Muestras 14-17, elaboradas con grenetina.

Porcentajes de encogimiento encontrado en las muestras elaboradas a partir de quitosano de sodio.

18 QU-CA: xy: 26.9%, z: 6%

19 QU-KA: xy: 17%, z: 7%

20 QU-TA: xy: 23%, z: 6%

21 QU-ZA: xy: 32.7%, z: 7%

Los compuestos elaborados a partir de quitosano resultan en piezas rígidas pero con una gran deformación, asimismo al elaborar las pruebas destaca un aroma desagradable a causa de la quitina.



Figura 48. Muestras 18-21, elaboradas con quitosano.

Porcentajes de encogimiento encontrado en las muestras elaboradas a partir de goma xantana.

22 XA-CA: xy: 3.2%, z: 5%

23 XA-KA: xy: 4.3%, z: 10%

24 XA-TA: xy: 4.5%, z: 5%

25 XA-ZA: xy: 3.1%, z: 5%

A partir de las pruebas realizadas se encontró que los compuestos realizados a partir de goma xantana tienden a tener un menor porcentaje de encogimiento y menor deformación en su forma geométrica. Por lo cual se decidió continuar la investigación enfocando la experimentación en el desarrollo de un compuesto basado en este biopolímero.



Figura 49. Muestras 22-25, elaboradas con goma xantana.



## Pruebas de fluidez

Como se ha mencionado anteriormente, se continuó la investigación enfocada en el desarrollo de un compuesto a partir de goma xantana, que ha demostrado tener mejores resultados como biopolímero en el proceso de secado, teniendo una baja deformación y en promedio un encogimiento del 3.77%. Durante esta fase se experimentó con la variabilidad en la relación de agua conforme al resto de los ingredientes, las distintas muestras fueron evaluados midiendo nuevamente su porcentaje de encogimiento y midiendo su viscosidad, basándose en la prueba de índice de fluidez o viscosidad (MFI), comúnmente aplicada a termoplásticos. En la cual se define la viscosidad como el tiempo que tarda en fluir un termoplástico a través de un capilar, al aplicar una fuerza continua.

Los resultados de la prueba MFI estandarizada se señalan normalmente como el volumen de material expulsado en 10 minutos a través de un capilar de 2mm, definido en  $\text{cm}^3/10\text{min}$  o  $\text{g}/10\text{min}$ . Pero con fines de facilitar la realización de la prueba de forma no estandarizada, se medirá el tiempo (T) que tarda en ser expulsado  $5\text{cm}^3$  del compuesto, a base de goma xantana, por una fuerza específica (F) a través de un capilar de 2mm correspondiente a una jeringa clínica. De esta manera, el resultado obtenido estaría dado por  $I=F/T$ , donde F sería la fuerza señalada en gramos y T el tiempo transcurrido señalado en segundos.

Al no contar con el equipo de laboratorio adecuado para realizar la medición del índice de fluidez, se elaboró un artefacto que simula la prueba de manera no estandarizada. Este consta de una jeringa farmacéutica con capacidad de cinco mililitros, a la cual se le ejerce una presión constante a partir de colocar peso en un contenedor en la parte superior. La jeringa está soportada por una estructura impresa en 3D para separarla de la superficie, donde el material expulsado es recolectado en un recipiente.

En las siguientes imágenes (Figura 50 y 51) se puede observar tanto el artefacto de medición como el proceso a seguir para realizar la medición, donde se ejemplifica el índice de fluidez del agua obtenido al vaciar 5 mililitros de agua en 39 segundos al aplicar una fuerza de 226 gramos.

Con el propósito de tener una medición más certera y consolidar los datos resultantes, se decidió realizar la experimentación con una masa constante, teniendo está un peso de 912 gramos. La experimentación

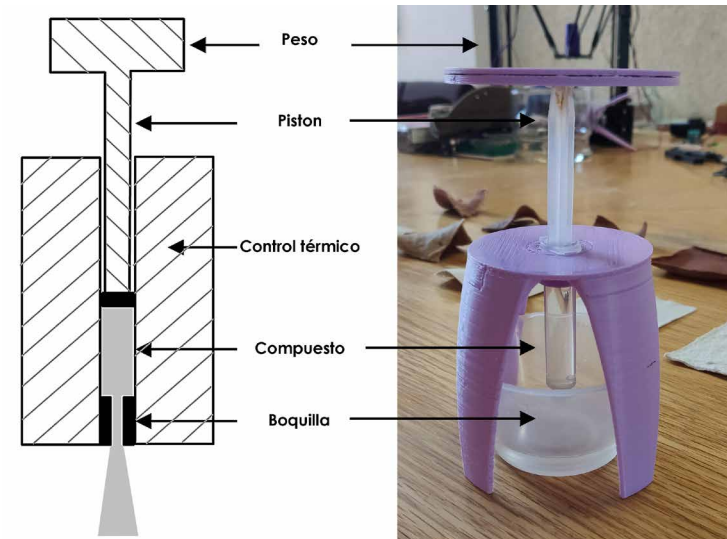


Figura 50. Partes del reómetro capilar no estandarizado para medición del índice de fluidez.

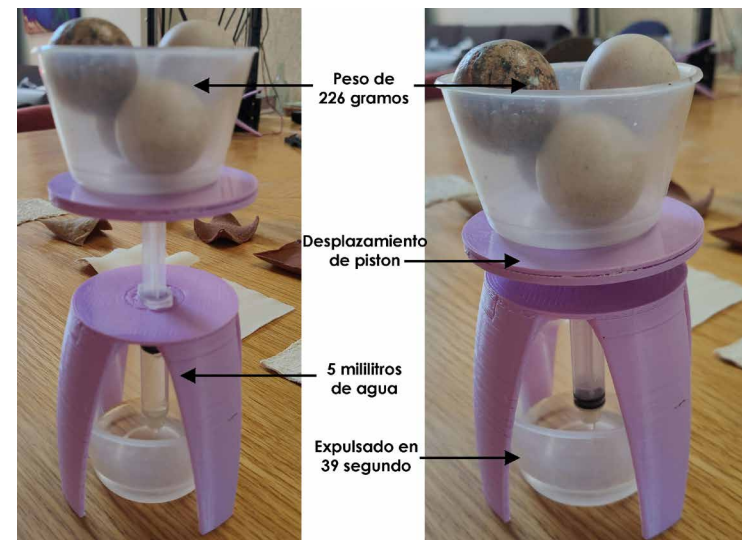


Figura 51. Ejemplificación de la medición del índice de fluidez del agua, Siendo esta de  $I=226\text{g}/39\text{s}=5.79\text{g/s}$ .

se planteó bajo una formulación base del compuesto, conformado por 50 mililitros de agua, 3 mililitros de glicerina, 25 gramos de carbonato de calcio y 2 gramos de goma xantana. A partir de esta formulación se desarrollaron variaciones de reducción del 10% y 20% en la cantidad de agua, teniendo así tres mezclas medibles a partir de la prueba MFI descrita anteriormente. Tanto la matriz de dosificación como los resultados obtenidos del índice de fluidez se muestran en la tabla y gráfica señalada como Figura 52.

De los datos obtenidos se pudo observar una reducción notable al reducir 5ml de agua a la formulación, por lo cual se decidió realizar una nueva serie de experimentación cambiando en este caso la dosificación de goma xantana, la cual en la formulación base corresponde al 4% del peso del agua. Siguiendo un proceso a la serie de pruebas anteriores, se efectuaron cuatro pruebas distintas, con una variación del 2% entre ellas. Los resultados de las pruebas se muestran a continuación:

Prueba de variación en dosificación de goma xantana

N. Prueba	29	30	31	32
% Xantana	4%	6%	8%	10%
G Xantana	2g	3g	4g	5g
I. Fluidez	28.50	10.48	8.47	7.02

Los datos obtenidos de esta serie de pruebas mostraron una gran variación en el índice de fluidez al aumentar 2% la dosificación. A su vez se observa un aumento más estable al continuar saturando la mezcla, esto puede ser una condición de sobresaturación, es decir, la cantidad de goma xantana llega a ser demasiada para poder ser hidratada correctamente por la solución.

De esta manera, se concluyó en que las futuras dosificaciones no deberán superar al 4% de goma xantana con relación a la cantidad de agua en el compuesto a realizar. De elaborarse una dosificación con una relación

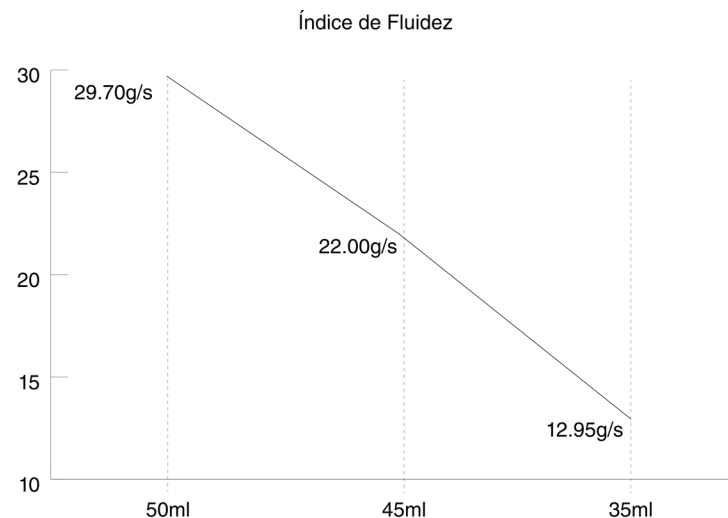


Figura 52. Reducción del índice de fluidez al modificar la cantidad de agua en el compuesto probado.

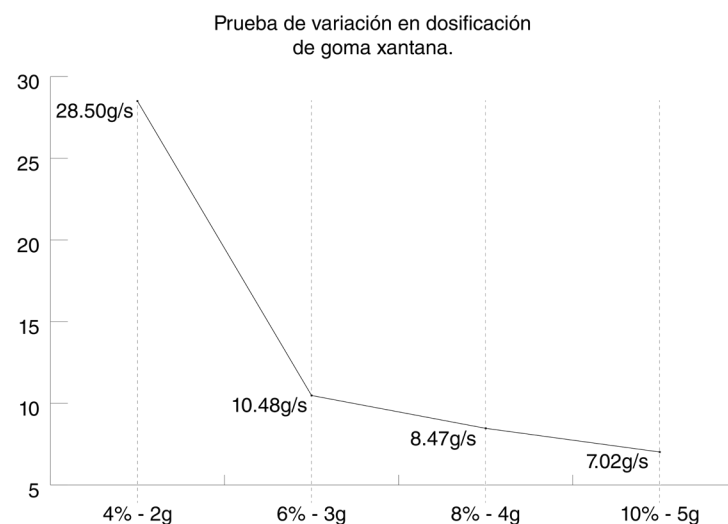


Figura 53. Reducción del índice de fluidez al modificar el porcentaje de goma xantana en el compuesto probado.

mayor, la viscosidad será demasiado alta y podría generar un problema de calentamiento en el motor del extrusor mecánico al tratar de expulsar el material.

Para dar una adecuada conclusión a esta fase de experimentación se decidió efectuar una impresión 3D utilizando la dosificación base usando el extrusor de pastas con una boquilla de 1.5 mm. Con la realización de esta prueba de impresión se comprobó que la mezcla es compatible con el cabezal de impresión y probablemente pueda ser optimizada para obtener mejores resultados. En las siguientes imágenes (Figura 50) se puede observar la primera capa de impresión y posteriormente la deposición de cinco capas del compuesto, con una altura de 1mm cada una (Figura 51), alcanzando así una altura de 5mm.

Las pruebas de impresión mostradas no fueron totalmente satisfactorias, si bien el compuesto es capaz de ser extruido con facilidad por el extrusor de pastas, la deposición del material sobre cada capa genera deformaciones en las paredes de la impresión. La razón de que esto suceda es que el compuesto resulta no ser autoportante, es decir, no soporta su propio peso al ir construyendo nuevas capas. Con el propósito de solucionar esta problemática se realizaron una nueva serie de pruebas modificando los porcentajes de los componentes del material.

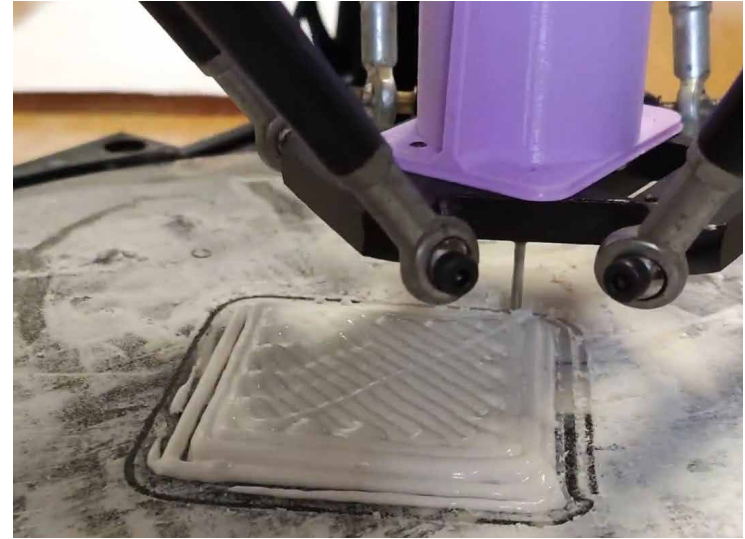


Figura 54. Impresión de primera capa de compuesto de goma xantana y carbonato de calcio.

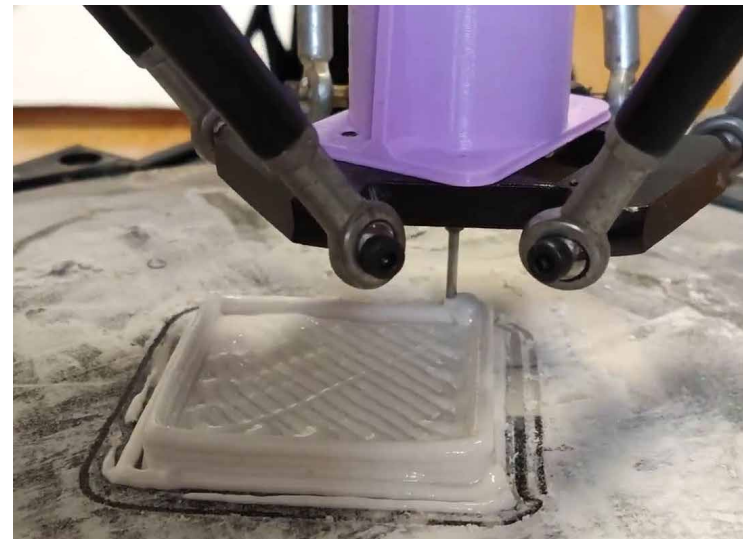


Figura 55. Impresión de quinta capa de compuesto de goma xantana y carbonato de calcio.

## Optimización del material

Partiendo de las pruebas anteriores, se decidió continuar con la experimentación de dosificación, buscando optimizar las cualidades para su correcta extrusión en el sistema de impresión y considerando los problemas de hidratación de la goma xantana presentadas en las anteriores pruebas. De esta manera se propone evaluar la fiabilidad de impresión del compuesto al modificar la proporción porcentual de sus componentes (carbonato de calcio, glicerina, goma xantana y agua), según lo establecido en el siguiente diagrama triaxial (Figura 52), donde se señalan con una marca amarilla las pruebas de dosificación que se realizaron durante esta etapa.

Las pruebas de impresión se desarrollaron empleando un extrusor de pastas de diseño propio; el cual extruye el compuesto a través de una boquilla de 1.5mm al ser empujado mediante un pistón accionado por un motor Nema17 con un torque de 12.7 N\*cm. Las partes del extrusor serán presentadas en la siguiente imagen (Figura 53). El cabezal se instaló en una impresora 3D tipo delta marca Anycubic, la cual cuenta con la ventaja de tener una superficie de impresión estática a diferencia de otras impresoras en las cuales la superficie o cama de impresión es móvil, lo que haría complejo imprimir con un material biobasado; ya que el peso del material depositado afectaría al movimiento de la cama de impresión.

Las pruebas realizadas según las dosificaciones señaladas en el primer diagrama triaxial fueron analizadas en el sistema de impresión anteriormente mostrado. Los resultados de dicho ensayo señalan que los compuestos tienen una consistencia líquida muy alta. Lo cual provoca que al momento de imprimir se generen problemas de inestabilidad en la deposición del material, resultando en una calidad muy baja de impresión o piezas con errores.

En el mismo proceso de experimentación se encontró que el orden en el que se mezclan los ingredientes del compuesto afecta el compuesto final. El mayor problema encontrado en el proceso de la preparación del compuesto ha sido el disolver la goma xantana en agua. Algunos autores proponen que la correcta disolución de la goma xantana debe ser realizada mezclando la goma en agua destilada en un agitador eléctrica a temperatura ambiente durante 30 minutos, (Jahit et. al., 2016). Aunque al no contar con la herramienta adecuada para llevar a cabo este proceso, se optó por pre-dispersar la goma en glicerina, para posteriormente

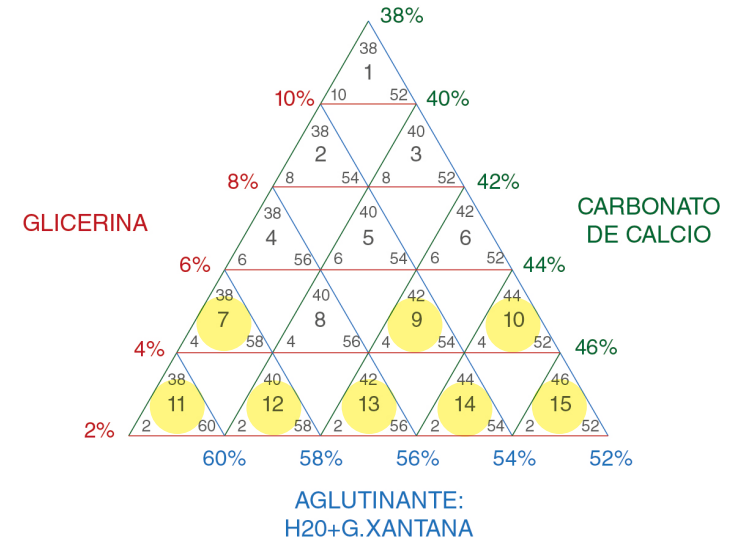


Figura 56. Diagrama triaxial, donde se señalan las variaciones porcentuales de los componentes.



Figura 57. Partes del extrusor de pastas ocupado en la realización de pruebas de impresión.

ser incorporada con el resto de los componentes; esta técnica ha sido propuesta mayormente en la industria de elaboración de alimentos y cosméticos, en la cual se suele usarse un medio graso como aceite o glicerina para hidratar la goma antes de que entre en contacto con agua. La hidratación previa de la goma xantana en un medio graso hace que ésta se recubra por una capa que evita la acumulación en grumos al momento de integrarse con el resto de los ingredientes del compuesto; permitiendo su óptima disolución y una mezcla homogénea, equivalente al proceso de disolución mecánica mediante agitador eléctrico (Food Systems, 2021).

En las siguientes fotografías (Figura 45 y 55) se puede observar cuál ha sido el proceso definido para obtener un compuesto homogéneo y sin grumos. El primer paso ha sido dispersar la goma xantana en glicerina como se ha mencionado anteriormente, al mismo tiempo se hidrata el carbonato de calcio con agua. Para una adecuada hidratación se dejan reposar ambas mezclas por separado a temperatura ambiente durante cinco minutos. Pasado este tiempo se mezclan ambas partes para crear un único compuesto. Este tendrá una consistencia apelmazada en el primer momento, pero al ir mezclando constantemente el material se tornará más maleable. Esto es debido a que el compuesto demuestra cualidades de pseudo plástico, definido como un compuesto en el cual su viscosidad aparente disminuye con el aumento de la velocidad de cortante o agitación, fenómeno también nombrado tixotropía (Dicciomed, 2021).

Habiendo redefinido un proceso adecuado para la elaboración del compuesto, se decidió redefinir la matriz triaxial. En la nueva matriz se aumentaron los porcentajes del agregado de carbonato de calcio, buscando de esta manera que el compuesto resultante tuviese una consistencia menos líquida y con ello corregir los problemas encontrados durante la realización de las primeras pruebas.

A partir de la reformulación de la matriz triaxial, se elaboraron nueve pruebas de dosificación distintas, teniendo resultados positivos únicamente en tres de ellas, en el siguiente diagrama se señalan en verde las pruebas fallidas y en morado las que han dado resultados positivos. Las dosificaciones marcadas como 9, 10 y 15, demostraron un mejor desempeño al momento de ser extruidas y depositadas durante el desarrollo de la impresión, siendo la número 15 la que presentó mejores cualidades de impresión.



Figura 58. Proceso de elaboración del compuesto, mezcla individual de polímero natural con glicerina y carbonato de calcio con agua.



Figura 59. Proceso de elaboración del compuesto, integración de ambas partes del compuesto en una sola mezcla homogénea.

Con la finalidad de comprobar la compatibilidad del compuesto con el sistema de impresión se realizaron cuatro pruebas de impresión con distintas características geométricas, en estas se buscó comprobar la posibilidad de realizar impresiones estables con capas definidas y una deposición constante sin grumos. Las pruebas se han nombrado como p1 donde se evalúa la capacidad de crear rellenos en la pieza, p2 que se enfoca en la impresión del contorno del objeto, p3 en la cual se imprime una pieza en forma de puente y p4 que consta de una pieza con mayor complejidad en forma de panel 3D. En cada una de las pruebas se puede observar el desempeño del compuesto en distintas situaciones de impresión, como la posibilidad de crear rellenos y muros que se soporten por sí mismos o la capacidad de que el cabezal tenga cambios de dirección durante la deposición del material. Estas pruebas pueden ser observadas en las siguientes fotos (Figura 61 a 63), con algunas anotaciones sobre los fallos de impresión encontrados.

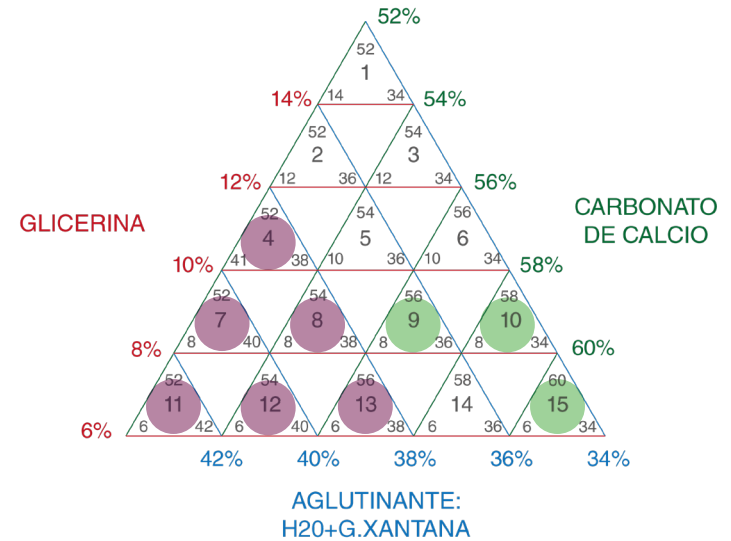


Figura 60. Diagrama triaxial modificado para nuevas pruebas de dosificación. Señalado en verde aquellas que presentaron buenos resultados.

Los objetos creados mediante impresión 3D se caracterizan por constar de dos zonas diferenciadas, contorno y relleno. La relación y adecuada construcción de estas dos zonas definen la correcta impresión del objeto, así como sus características de resistencia a esfuerzos mecánicos. Durante la prueba p1 se evaluó la correcta deposición de capas al generar el relleno de la pieza. Para ello, se definió el patrón en forma de rejilla con una densidad del 25%, esta configuración mostró ser adecuada para el tipo de material impreso, en la fotografía señalada como Figura 61 se puede observar la definición del trazo y que no hubo fallas al depositar nuevas capas. En el caso de la prueba p2, se realiza la impresión exclusiva de los muros o contorno de la pieza, al no contar con relleno la pieza tiende a ser más frágil, sufriendo deformaciones en la deposición de capas mientras gana altura la impresión. Si bien esta problemática se puede resolver con el ensanchamiento del contorno, es importante considerar que esto requeriría más material y tiempo de impresión.

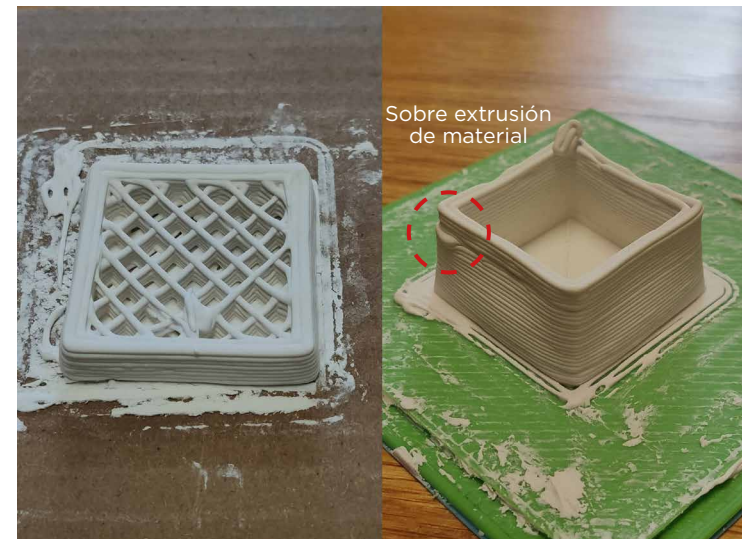


Figura 61. Prueba de impresión p1 y p2.

La prueba p3 se define como una armadura en W, en el caso de esta pieza se buscó evaluar de manera similar la posibilidad de imprimir contornos bien definidos. A diferencia de la prueba p2, esta pieza cuenta con un doble muro o contorno, lo cual le permite tener una mayor altura y resistencia. Por otro lado, la forma del trazo de la pieza complica el movimiento del cabezal de impresión, lo cual exige que el material utilizado cuente con mejores cualidades de adhesión y estabilidad. En la fotografía señalada como Figura 62 se observa como la fiabilidad del material no es suficiente para que la deposición de nuevas capas sea adecuada, por lo que surgen desplazamiento en la capa.



Figura 62. Prueba de impresión p3.

La prueba de impresión p4 se trata de un alto relieve, se puede considerar que es el modelo más complejo de imprimir de las cuatro pruebas. Su dificultad recae en la necesidad de extruir material sobre las capas de relleno previamente impresas, esto hace necesario que el relleno no solo soporte su propio peso, sino que debe soportar a su vez el peso de capas de contorno. De igual manera, estas capas de contorno deben de ser capaces de crear un puente entre las partes vacías del relleno, lo cual en algunas partes no se ha logrado, como se puede observar en la fotografía señalada como Figura 63.



Figura 63. Prueba de impresión p4.

Posterior al análisis visual de las muestras realizadas, se definió que la mayor problemática del compuesto es la capacidad de crecimiento de altura de la impresión, esto sucede, ya que al aumentar la altura el peso comienza a ser demasiado para ser soportado por las capas inferiores de la impresión. Para resolver esta problemática se ha optado por aumentar la viscosidad del compuesto a través del incremento del porcentaje de goma xantana que funciona como aglutinante principal.

A la par del cambio de proporción de la goma xantana, se ha decidido utilizar jarabe de maíz como aglutinante secundario. Un compuesto similar a la combinación de jarabe de maíz con goma xantana para su uso en impresión 3D ha sido documentada previamente en el Food Technology Department de la Universidad Politécnica de Valencia. En el caso particular de este estudio, el compuesto, definido como tinta comestible, se desarrolló a partir de jarabe a base de azúcar (2%), goma xantana, suplemento alimenticio KGM (raíz konjac - fibra dietética) y lactato de calcio (gluconato de calcio). El compuesto resultante se describe como un gel de consistencia viscosa y transparente. A través de las pruebas de dosificación se encontró que la relación de dureza y resistencia del material estaba relacionada con la dosificación de goma xantana; pero durante la experimentación no se varió el porcentaje de concentración de azúcar en el jarabe, por lo cual se desconoce si su concentración pudiese

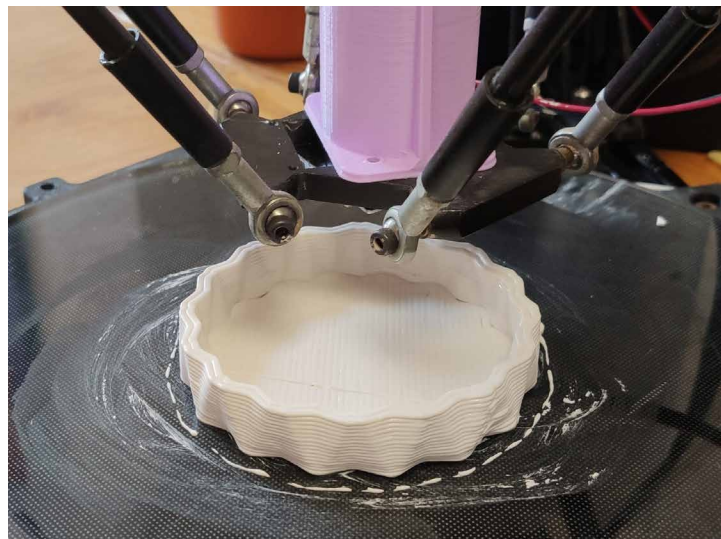


Figura 64. Impresión de pieza mediante el uso del material biobasado con agregado de jarabe de maíz.

#### Dosificación de compuest C16, con agregado de jarabe de maíz

	Agua	J. de maíz	C. Calcio	Glicerina	G. Xantana
Porcentaje	19%	7.5%	67%	5.5%	1%
Cantidad	12.5ml	5ml	44g	3.6g	0.65g

afectar las cualidades anteriormente mencionadas (García et. al., 2020).

Basado en este estudio se formuló un nuevo compuesto, nombrado como C16, a evaluar teniendo las proporciones señaladas a continuación.

Esta formulación fue puesta a prueba al imprimir un nuevo modelo para evaluar la posibilidad de altura de capa, en la cual se superó la altura alcanzada en las pruebas anteriores. La consistencia del material tiene



una mayor elasticidad y adherencia, sin reducir su capacidad de soportar el peso de su propio peso, lo cual permite que la impresión tenga mayor calidad en la construcción de los contornos. Los resultados de la prueba pueden observarse en la siguiente imagen (Figura 64).

## Experimentación de biodegradabilidad

Considerando la importancia de que el material biobasado propuesto tenga cualidades de biodegradabilidad, se decidió evaluar el compuesto descrito anteriormente. Con el propósito de que el proceso de biodegradación pueda ser realizado de forma no industrial, se decidió utilizar la normativa australiana AS 5810-2010, en la cual se especifica: “los requisitos y procedimiento para determinar si un material plástico es biodegradable en condiciones de compostaje doméstico”. En la misma norma se define biodegradabilidad como “la capacidad de las sustancias orgánicas de ser degradadas por microorganismos en presencia de oxígeno y convertirse en dióxido de carbono, agua, biomasa y sales minerales” (Australian Standard, 2010).

Los criterios por cumplir en la prueba AS 5810-2010 señalan que el material debe perder al menos el 90% de su masa en menos de 180 días de exposición a una composta doméstica aeróbica, con este propósito se deben realizar mediciones de la probeta previo a la experimentación, dicha probeta está señalada como una parte del material con medidas de 5x5 cm y un grosor no mayor a 2mm, la cual será sujeta entre un par de porta diapositiva de 35mm. La probeta preparada debe ser expuesta a una composta a temperatura ambiente y en una zona con poca incidencia solar, se harán inspecciones visuales durante el periodo de biodegradación para documentar su descomposición (Australian Standard, 2010). En la Figura 65, se puede observar un ejemplo de probetas en distintos puntos de su biodegradación.

Siguiendo la normativa descrita se prepararon dos probetas distintas (Figura 66), la primera (semisólida) se realizó al imprimir una pieza de 5x5cm y grosor de 2mm, utilizando el compuesto señalado como C16, la segunda (sólida) es una probeta elaborada mediante el vaciado del mismo compuesto dentro del porta diapositiva de 35mm. La muestra elaborada mediante impresión 3D, contiene espacios vacíos en su interior como resultado del proceso de impresión, por lo cual se espera que tenga una menor resistencia al proceso de biodegradación. Ambas muestras fueron colocadas en un recipiente con una premezcla de tierra proveniente de un compostero doméstico, el cual tiene una antigüedad mayor a cuatro meses y se inspeccionaron cada quince días, llevando un registro visual de los cambios sufridos.

Con la intención de monitorear las condiciones de temperatura y

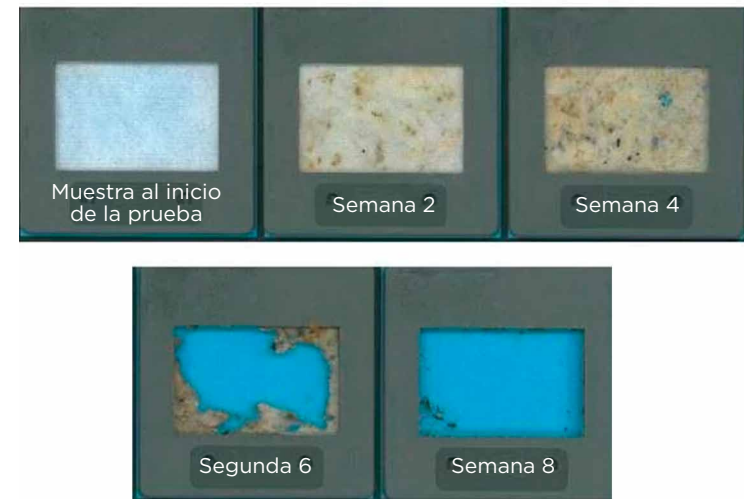


Figura 65. Ejemplo de probetas de material textil biodegradable, la biodegradación se hace visible desde la cuarta semana mostrando el fondo azul detrás del textil evaluado.

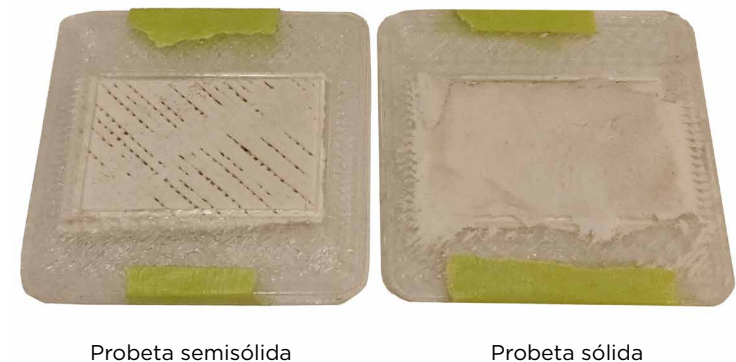


Figura 66. Probetas preparadas para evaluar su la biodegradabilidad del compuesto.

humedad de la compostera en la que se realizaron las pruebas de biodegradabilidad, se elaboró un artefacto de medición y registro de los valores mencionados. Para ello se utilizó un microcontrolador Arduino UNO el cual toma lecturas de temperatura a partir de un sensor DS18B20 y de humedad de suelo mediante un sensor FC-28, estos datos serán grabados en un archivo de texto dentro de una tarjeta micro SD. En la Figura 67 se señalan los componentes anteriormente mencionados.

Tanto los sensores como las probetas fueron colocadas en la compostera; quince minutos después se procedió a la medición de sus condiciones, teniendo como primeros datos una temperatura de 14° y una humedad del 3%. Esta medición se repitió cada dos semanas durante la prueba, de esta manera se pudo obtener registro de las condiciones ambientales en las cuales se llevó a cabo la biodegradación. El proceso de biodegradación surge por efecto de microorganismos enzimáticos, por lo cual es importante mantener un ambiente que propicie la presencia de dichos organismos para permitir la correcta biodegradación del material.

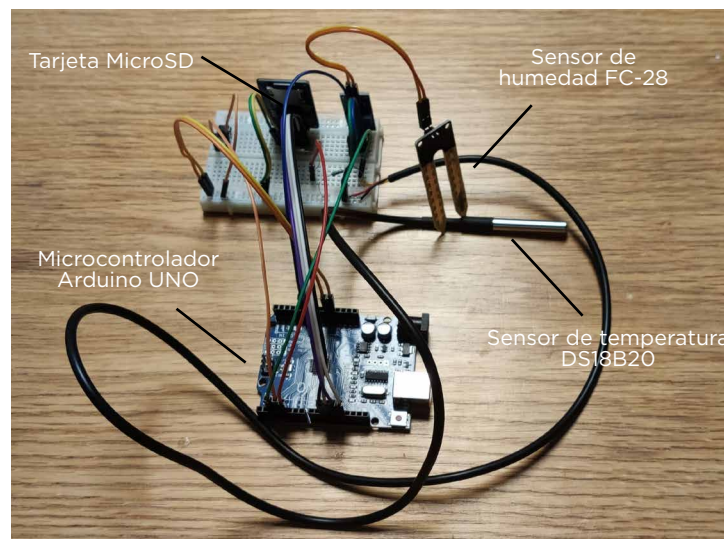


Figura 67. Monitor de temperatura y humedad para registrar el estado de humedad y temperatura de la compostera donde se realizara la prueba de biodegradación.

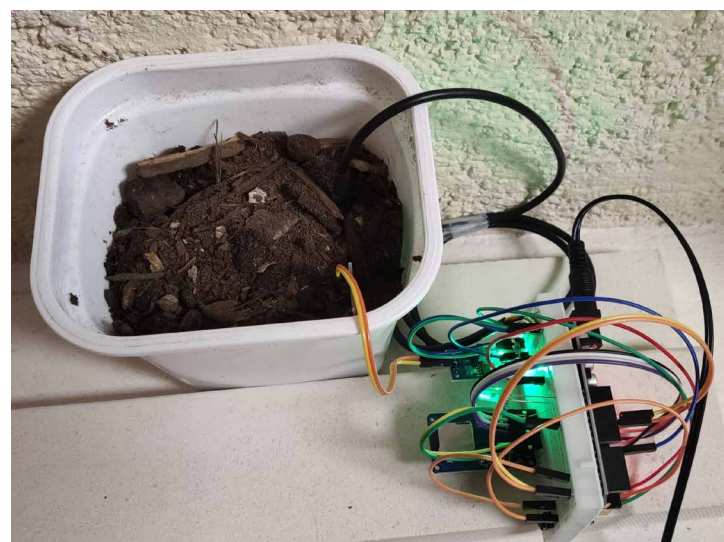


Figura 68. Compostera doméstica preparada para la realización de las pruebas de biodegradabilidad.

Semana 2 y 4 del proceso de biodegradación, se comienzan a observar daños en la muestra que fue elaborada a partir de impresión 3D, mientras que en la muestra sólida no se observan grandes cambios hasta la semana 4. Ambas muestras se sienten flexibles, a su vez se aprecia al tacto que el material absorbe la humedad del ambiente, efecto propiciado por el carbonato de calcio.

Las probetas no muestran cambio de aroma o coloración, por lo cual se puede decir que no existe un proceso de putrefacción como sucedería con la materia orgánica proveniente de productos naturales.

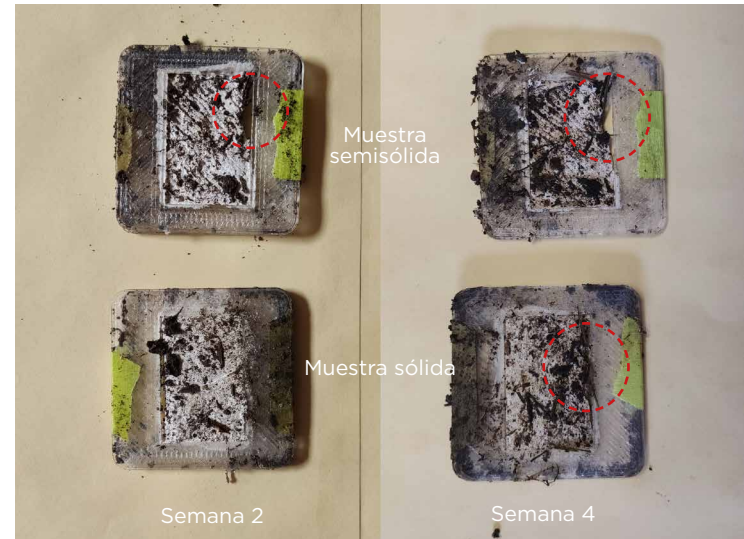


Figura 69. Semana 2 y 4 de la prueba de biodegradabilidad.

Durante la sexta semana de biodegradación se puede observar una mayor afectación a ambas probetas, siendo nuevamente la semisólida aquella que muestra una degradación más rápida.

Se observa en las probetas cambios de dimensiones o encogimiento, lo que puede favorecer al proceso de degradación; a su vez ambas muestras continúan sin tener cambios de coloración u otro tipo.



Figura 70. Registro de probetas durante la semana 6.

En la semana ocho ambas muestras se tornaron frágiles, lo que provocó que al extraerlas de la composta se quebraran en fragmentos de diversos tamaños. Algunos de los fragmentos mencionados se perdieron durante la substracción de las probetas, la pérdida de cohesión del material genera que este se haga polvo al moverlo.

En este punto la biodegradación ha generado que el material pierda sus cualidades de flexibilidad que otorgaba la goma xantana como polímero natural del compuesto.



Figura 71. Semana 8 de biodegradación.

Posterior a la semana ocho, las muestras fragmentadas han sido recolocadas en la composta en conjunto para continuar el proceso de biodegradación. Pasadas dos semanas se volcó la tierra de la composta en una superficie para encontrar resto de ambas muestras, se encontraron fragmentos pequeños, pero reconocibles, estos fueron pesados, encontrando que las de mayor tamaño cuentan con un peso promedio de 0.3g. Distintos fragmentos se perdieron al tratar de substraerlos de la composta, esto al ser muy quebradizos.

Al concluir la semana diez, se estableció que el material se había biodegradado adecuadamente, los fragmentos restantes no contaron con una dimensión considerable para continuar monitoreando su degradación, por lo cual la prueba se dio por concluida. Cumpliendo de esta manera con el lapso máximo de 180 días que establece la normativa australiana AS 5810-2010.



Figura 72. Registro de probetas durante la semana 10.

## Aplicabilidad en el diseño

A partir del desarrollo del proyecto de investigación se pueden definir tres distintos productos distintos obtenidos: el material biobasado a partir de goma xantana, el cabezal de impresión de pastas que puede ser replicado a partir de piezas accesibles y la metodología llevada a cabo para el desarrollo de materiales biobasados. A partir de identificar estos tres productos obtenidos y consecuente a la experimentación efectuada se ha planteado distintos casos de aplicación en el ámbito del diseño y de la educación.

### Prototipado de objetos durante el proceso de diseño

El principal caso de aplicación responde a la posibilidad de crear prototipos físicos a partir de la impresión 3D de objetos previamente modelados a través de medios digitales. El prototipado rápido es el uso más frecuente que se le suele dar a los sistemas de fabricación aditiva, pero dichos prototipos suelen ser desechados al tener poco uso, por lo cual es conveniente contar con un material que pueda ser degradado al cumplir su función. Si bien el material desarrollado en esta investigación carece de las propiedades físicas adecuadas para elaborar piezas mecánicas funcionales; tiene la suficiente rigidez para producir prototipos visuales con los cuales estudiar las cualidades de tamaño y forma del producto diseñado. Aunque al igual que otros materiales usados en sistemas de fabricación aditiva, se deberán considerar las variables tanto del sistema de impresión como del objeto a ser impreso, las cuales serán resumidas a continuación.

Durante el proceso de experimentación con el material biobasado, se llevaron a cabo pruebas de impresión mediante el uso de tres distintos grosores de boquilla, siendo de 1.37mm la más pequeña y de 3.00mm la de mayor tamaño. La relación del tamaño de la boquilla es directamente proporcional a la altura máxima posible de impresión, pudiendo observar que al usar la boquilla de menor tamaño (1.37mm) la altura de impresión máxima alcanzada de un muro perimetral fue de 30mm. De igual manera, el diámetro de boquilla tiene influencia en la resistencia de la pieza impresa, siendo así que mientras que más pequeña es el ancho de muro perimetral, este resulta ser más frágil, por lo cual tiende a fracturarse. La correcta selección de la boquilla de impresión resulta de gran importancia, ya que, si bien al seleccionar un diámetro menor se encuentran problemas de resistencia, como contra parte se logrará una mejor definición de capa



Figura 73. Muestras de prototipos realizados a partir de impresión 3D de material biobasado de goma xantana.

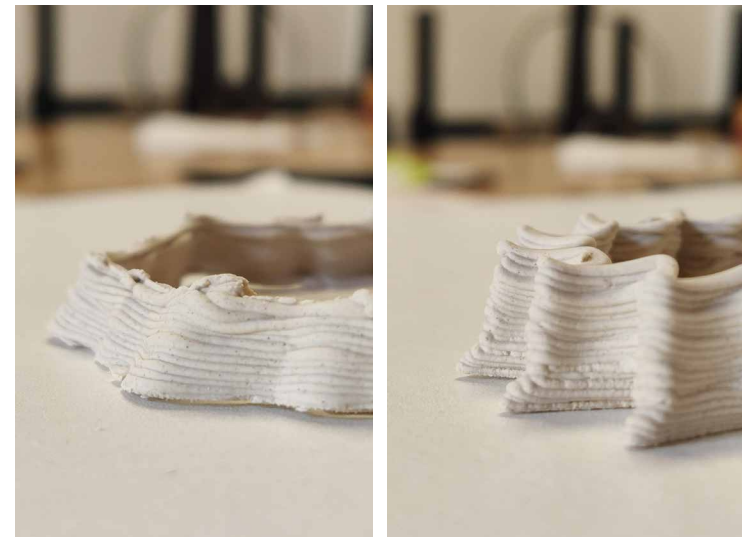


Figura 74. Fotos de pruebas de impresión realizadas con distintos tamaños de boquilla, A la izquierda boquilla de 1.3 7mm a la derecha boquilla de 1.65mm.

y un mayor detalle en la impresión, similar a lo ocurrido en la impresión 3D con filamento.

La geometría del perímetro de la pieza a imprimir tiene igualmente influencia en el proceso de impresión, similar a lo sucedido al construir muros mediante el uso de mampostería. En los diagramas mostrados en la Figura 75 se puede observar la similitud existente al buscar crear un muro inclinado mediante mamposteo o a partir de la deposición de material por impresión 3D. En ambos casos existe una distancia de material volando o en cantiléver, la cual aumenta mientras más inclinado es el muro; mediante la realización de pruebas de impresión se ha logrado imprimir con el material biobasado muros inclinados hasta  $16^\circ$  desde su vertical.

Las limitantes encontradas en el proceso de impresión se asemejan a las que normalmente se consideran al momento de realizar impresiones con materiales de consistencia pastosa, como es el caso del barro, la tierra o el concreto, así como se puede observar en los trabajos mostrados durante la conferencia “Clay Printing in Architecture” de DigitalFUTURES world, durante la cual se puede observar cómo los procesos de diseño se han tenido que ir adaptando a los requerimientos que este tipo de materiales llegan a tener (DigitalFUTURES, 2022).

### Sistema de impresión 3D para la educación de pequeños en sistemas STEAM

En el caso de aplicación alternativo se establece el potencial de usar el material biobasado y el cabezal de impresión de pastas para la enseñanza sobre el funcionamiento de las tecnologías de fabricación aditiva a comunidades de niñas y niños; como parte de los modelos educativos STEAM (acrónimo en inglés de ciencia, tecnología, ingeniería, arte y matemáticas). La incidencia social que puede tener la investigación realizada en la enseñanza de menores de edad radica tanto en el propio desarrollo del material, como en la posibilidad de que los niños puedan hacer uso de equipos de impresión 3D sin correr el riesgo de sufrir quemaduras, como podría suceder con un equipo convencional que usa temperaturas desde  $190^\circ$  para fundir el filamento plástico.

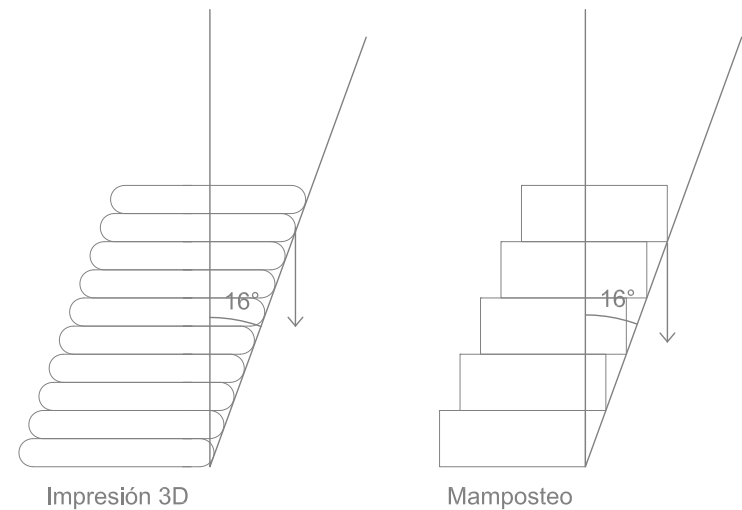


Figura 75. Diagramas sobre el cantiléver generado a partir de imprimir muros inclinados y su similitud a los muros de mamposteo en situaciones similares.



Figura 76. Talleres para niños en FABLAB Maya, 2020, (<https://www.facebook.com/fablabmaya/photos/1901272526698471>)

FabLab Kids y Makers Kids, son propuestas en las cuales se imparten talleres a niños desde 5 hasta 16 años, en estos se les permite cierto acercamiento a equipos de fabricación digital como cortadoras CNC e impresoras 3D. El poder contar con un equipo de fabricación aditiva que implique un menor riesgo para el usuario de corta edad, puede llevar a mejorar la experiencia de los participantes de este tipo de talleres.

### Guía para la elaboración de materiales biobasados

La metodología seguida durante el proceso de experimentación por el cual se llevó a cabo el material biobasado a partir de goma xantana, se establece de igual manera como una herramienta de diseño; la cual puede ser aplicada en el desarrollo de otros materiales biobasados que requieran de distintas cualidades físicas para cumplir la función deseada para el producto realizado por el diseñador. La metodología puede resumirse en tres fases; en cada fase se sigue un camino no lineal de experimentación, donde se efectúan distintas formulaciones, pruebas de las cualidades físicas del material resultante y su optimización según los datos obtenidos. Por otro lado, la experimentación realizada utilizando otros polímeros naturales como agar-agar, grenetina, almidón de maíz, alginato de sodio y quitosano, es un recurso que puede ser aprovechado por otros diseñadores que tengan la intención de desarrollar un material biobasado.

Si bien se han descrito tres distintos casos de aplicación de la investigación, es importante mencionar que durante el desarrollo de esta han surgido a la par proyectos similares en otras partes del mundo. Tal es el caso de la iniciativa “Nodo Biofabricación Digital” del Fa de la Universidad de Chile, el cual se describe como “un set de herramientas y tecnologías de bajo costo y formato escritorio, para abordar diferentes procesos de biofabricación, tales como impresión 3D, rotomoldeado, y termoformado de biomateriales”. La documentación del proyecto es de dominio público, lo cual permite que cualquier interesado pueda desarrollar sus propios equipos de biofabricación para el aprovechamiento de los residuos orgánicos generados en su localidad, apoyando así a la “integración del tejido social”. (FabLab U. de Chile, 2022).

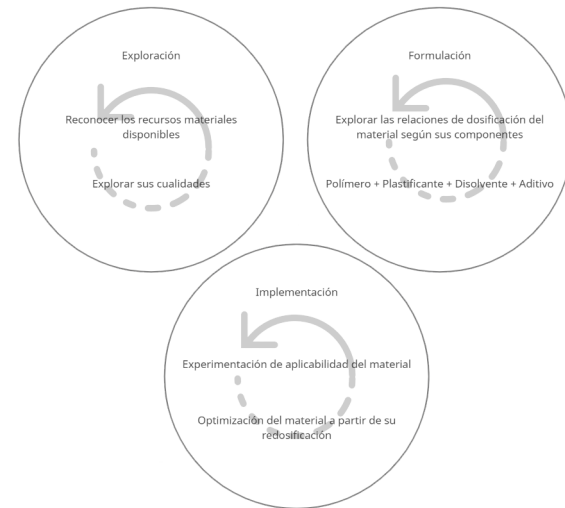


Figura 77. Diagrama sobre fases de la metodología seguida para el desarrollo de materiales biobasados.



Figura 78. Bio rotomoldeadora, máquina rotomoldeadora para fabricar geometrías cerradas y huecas de biomaterial. FABLAB UCH, 2021, (<https://gitlab.com/fablab-u-de-chile/rotomoldeadora>)



Este tipo de proyectos demuestra el interés por los materiales biobasados por parte de comunidades de creadores, siendo de gran importancia la investigación de los posibles procesos por los cuales se puede transformar los residuos orgánicos en productos utilitarios. Dando pauta a la vez en la necesidad de que los diseñadores cuenten con el conocimiento adecuado para llevar a cabo proyectos relacionados con este tipo de materiales.

## Conclusión

Los resultados obtenidos a partir de la investigación realizada muestran la posibilidad de implementar un material biobasado a partir de goma xantana en sistemas de fabricación aditiva, el cual tiene la capacidad de desintegrarse en un entorno natural no controlado. Sin embargo, este material no se puede definir como un sustituto a los comúnmente usados filamentos plásticos como el PLA, esto ya que sus propiedades físicas pueden ser limitantes al momento de realizar impresiones de objetos “complejos”. Durante las pruebas de impresión se pudo observar que objetos con paredes inclinadas a más de 30° conforme a su vertical, tienden a caer por la baja capacidad del material para soportar el peso, difiriendo con los filamentos plásticos que tienen una mayor capacidad de soportar la inclinación de su forma.

Por otra parte, la cualidad de biodegradación debe considerarse al momento de establecer el uso del material, ya que su perdurabilidad puede no ser la necesaria para el uso que se le desee dar. En este sentido, se pudieron observar pequeñas motas en piezas que, posterior a su impresión, fueron almacenadas en un espacio húmedo y oscuro, lo cual pudo originar la formación de hongos en el objeto.

Si bien las limitantes del material desarrollado son importantes al momento de definir su aplicación, es notable a su vez las oportunidades que puede tener el empleo de materiales biobasados en sistemas de fabricación aditiva. Como se ha mencionado anteriormente, la elaboración de este tipo de materiales tiene la ventaja de poderse llevar a cabo localmente, aprovechando los recursos del lugar y permitiendo la reintegración de este posterior a su uso. De igual manera, la posibilidad de modificar las propiedades del material a partir de su dosificación nos da la oportunidad de repensar la forma en la que diseñamos, estableciendo nuevas variables y libertades al proceso de diseño.

Por último, es relevante considerar que, durante el proceso de la experimentación, no se consideró la variabilidad de cambio de escala, ya que las pruebas de impresión realizadas fueron hechas mediante un cabezal de impresión con una capacidad de 60ml y a partir de una boquilla de 1.5mm. El cambio del grosor de esta podría permitir una mayor resistencia al objeto impreso y a su vez la optimización del cabezal de impresión permitiría trabajar con materiales más densos.



Figura 79 Objeto impreso en 3D mediante material biobasado de goma xantana.

El cambio de escala en los sistemas de fabricación aditiva se ha llevado a cabo principalmente con el propósito de aplicar la tecnología en la realización de objetos arquitectónicos, ya sean monolíticos o por secciones. El principal material que actualmente se está usando para este tipo de objetos, es el concreto mejorado mediante aditivos como fibra de vidrio o reductores de agua. Siendo este un material considerado de alto impacto ambiental sería pertinente estudiar la posibilidad de ocupar materiales biobasado en la producción de objetos arquitectónicos mediante sistemas de fabricación aditiva, considerando las actuales ventajas encontradas en esta investigación.



Figura 80. Icon imprime casas en 3D usando su impresora Vulcan. Fotografía de Regan Morton, 2021, (<https://metropolismag.com/viewpoints/3d-printing-is-speeding-up-the-automation-of-construction/>)

## Bibliografía

- Akash, M. S. H., Rehman, K., & shuqing, chen. (2015). Natural and Synthetic Polymers as Drug Carriers for Delivery of Therapeutic Proteins. *Polymer Reviews*, 55. <https://doi.org/10.1080/15583724.2014.995806>
- Australian Standard (2010). AS 5810 - Biodegradable plastics — Biodegradable plastics suitable for home composting. Australian Standard, 1-19.
- Barnes, D. K. A., Galgani, F., Thompson, R. C., & Barlaz, M. (2009). Accumulation and fragmentation of plastic debris in global environments. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, 364(1526), 1985-1998. <https://doi.org/10.1098/rstb.2008.0205>
- Beltrán, M., & Marcilla, A. (2012). *Tecnología de polímeros, procesado y propiedades* (1st ed.). Universidad de Alicante.
- BiologyStudio. (2020). *Nosotros*. <https://biologystudio.com.mx/nosotros/>
- Browne, M., Crump, P., Niven, S., Teuten, E., Tonkin, A., & Galloway, T. (2011). Accumulation of microplastic on shorelines worldwide: sources and sinks. *Environmental Science & Technology*, 45.
- Carreño, L. D., Caicedo, L. A., & Martínez, C. A. (2012). Técnicas de fermentación y aplicaciones de la celulosa bacteriana: una revisión. *Ingeniería y Ciencia*, 8(16), 307-335. [http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S1794-91652012000200012](http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1794-91652012000200012)
- Cepeda, A., Rubio, A., Farías, L., & Sáenz, A. (2018). Análisis de las propiedades fisicoquímicas de materiales poliméricos para re-uso en impresiones 3D. *Cienciabierta*, 55.
- Corradini, F., Meza, P., Eguiluz, R., Casado, F., Huerta-Lwanga, E., & Geissen, V. (2019). Evidence of microplastic accumulation in agricultural soils from sewage sludge disposal. *Science of the Total Environment*, 671, 411-420. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.03.368>
- Dicciomed. (2021). *Dicciomed: Diccionario médico-biológico, histórico y etimológico*. Dicciomed: Diccionario médico-biológico, histórico y etimológico. <https://dicciomed.usal.es/palabra/tixotropia>
- DigitalFUTURES Talk: Clay Printing in Architecture. (2022, March 26). YouTube. <https://www.youtube.com/watch?v=SOGuh9ZVqak&t=6011s>
- DIY Materials. (2020). What are the Do-It-Yourself-Materials? <http://www.diymaterials.it/>
- Ebnesajjad, S. (2012). Handbook of Biopolymers and Biodegradable Plastics: Properties, Processing and Applications. In *Handbook of Biopolymers and Biodegradable Plastics: Properties, Processing and Applications*. <https://doi.org/10.1016/C2011-0-07342-8>
- Enríquez, M., Velasco, R., & Ortiz, V. (2012). Películas Biodegradables Basadas En Almidón. *Biotecnología En El Sector Agropecuario y Agroindustrial*, 10(1), 182-192.
- FabLab U. de Chile. (2022, February). *Nodo Biofabricación Digital*. GitLab. <https://gitlab.com/fablab-u-de-chile/NBD>
- FabTextiles. (2020). WHAT Fab Textiles project. Open sourcing fashion production for a global innovation ecosystem. <http://fabtextiles.org/what/>
- Fendall, L., & Sewell, M. (2009). Contributing to marine pollution by washing your

face: microplastics in facial cleansers. *Marine Pollution Bulletin*, 58(8), 1225–1228.

Fischer, V., Elsner, N. O., Brenke, N., Schwabe, E., & Brandt, A. (2015). Plastic pollution of the Kuril–Kamchatka Trench area (NW Pacific). *Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography*, 111, 399–405. <https://doi.org/10.1016/j.dsr2.2014.08.012>

Food systems. (2021). How to disperse gums in water. *Ingredion*. <https://www.ingredion.com/na/en-us/solving-a-challenge/resource-library/how-to-disperse-gums.html>

Freinkel, S. (2011). *Plastic: A Toxic Love Story* (1st ed.). HMH.

Funabashi, M., Ninomiya, F., & Kunioka, M. (2009). Biodegradability evaluation of polymers by ISO 14855-2. *International Journal of Molecular Sciences*, 10(8), 3635–3654. <https://doi.org/10.3390/ijms10083635>

García-Segovia, P., García-Alcaraz, V., Balasch-Parisi, S., & Martínez-Monzó, J. (2020). 3D printing of gels based on xanthan/konjac gums. *Innovative Food Science and Emerging Technologies*, 64(January), 102343. <https://doi.org/10.1016/j.ifset.2020.102343>

Heinrichs, S. (2018). O nos divorciamos del plástico, o nos olvidamos del planeta. *ONU Medio Ambiente*. <https://news.un.org/es/story/2018/06/1435111>

Jahit, I. S., Nazmi, N. N. M., Isa, M. I. N., & Sarbon, N. M. (2016). Effect of drying temperature on the mechanical and physical properties of gelatin-based films blended with CMC and chitosan for food packaging? *International Food Research Journal*, 23(3), 1068–1074.

Julia, W.-H., & Büching, C. (2014). *FabLab: Of Machines, Makers and Inventors*. Transcript.

Kaplan, D. L. (1998). *Biopolymers from renewable resources*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg.

Kwong, O. Y. (2011). *Bio-plastic Handbook*.

LABVA. (2018). Somos LABVA. <https://www.labva.org/somoslabva/>

Lee, S. (2011). Grow your own clothes. *TedTalks*. [https://www.ted.com/talks/suzanne\\_lee\\_grow\\_your\\_own\\_clothes](https://www.ted.com/talks/suzanne_lee_grow_your_own_clothes)

Lu, D. R., Xiao, C. M., & Xu, S. J. (2009). Starch-based completely biodegradable polymer materials. *Express Polymer Letters*, 3(6), 366–375. <https://doi.org/10.3144/expresspolymlett.2009.46>

MaDe. (2019). What is MaDe. <http://materialdesigners.org/about/>

Materiom. (2019). Imagine if all our materials were nutrients. <https://materiom.org/mission-and-vision>

MaDe. (2020). *Material Designers. Boosting talent towards circular economies*. (L. Cleries, V. Rogno, S. Solanki, & P. Llorach (eds.); 1st ed.).

Meikle, J. (1997). *American Plastic: A Cultural History*. Rutgers University Press.

Melo, C., Garcia, P. S., Grossmann, M. V. E., Yamashita, F., Dall'Antônia, L. H., & Mali, S. (2011). Properties of extruded xanthan-starch-clay nanocomposite films. *Brazilian Archives of Biology and Technology*, 54(6), 1223–1333. <https://doi.org/10.1590/S1516-89132011000600019>

- MIT-MediaLab. (2020). About the Lab, Overview. <https://www.media.mit.edu/about/overview/>
- Mwema, F. M., & Akinlabi, E. T. (2020). Fused Deposition Modeling Strategies for Quality Enhancement. Springer. <https://doi.org/10.1007/978-3-030-48259-6>
- National Geographic. (2018, August 9). ¿A quién dañan las impresoras 3D? National Geographic en Español. <https://www.ngenespanol.com/ciencia/impacto-ambiental-impresora-3d-tercera-dimension/>
- PlasticEurope. (2020). Plastics – the Facts 2020. PlasticEurope.
- PlasticsEurope. (2012). Plásticos – Situación en 2012 Análisis de la producción , la demanda y de la recuperación de plástico en Europa en 2011.
- PNPGIR. (2018). Programa Nacional para la Prevención y Gestión Integral de los Residuos 2017-2018. DOF, 82. <https://www.gob.mx/semarnat/acciones-y-programas/prevencion-y-gestion-integral-de-los-residuos>
- Richmond, A. (2004). Biological principles of mass cultivation. In Handbook of microalgal culture. Blackwell.
- Rognoli, V., Bianchini, M., Maffei, S., & Karana, E. (2015). DIY materials. Materials and Design, 86, 692–702. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2015.07.020>
- Science History Institute. (2019, November 20). History and Future of Plastics. <https://www.sciencehistory.org/the-history-and-future-of-plastics>
- SEMARNAT. (2020). Prevención y gestión integral de los residuos. <https://www.gob.mx/semarnat/acciones-y-programas/prevencion-y-gestion-integral-de-los-residuos#:~:text=El artículo 26 de la,y de manejo especial%2C de>
- SEMARNAT. (2020). Diagnóstico Básico para la Gestión Integral de los Residuos.
- Song, R., Murphy, M., Li, C., Ting, K., Soo, C., & Zheng, Z. (2018). Current development of biodegradable polymeric materials for biomedical applications. Drug Design, Development and Therapy, 12, 3117–3145. <https://doi.org/10.2147/DDDT.S165440>
- UNEP. (2009). Developing Integrated Solid Waste Management Plan. In UNEP (Vol. 2). UNEP.
- Van Cauwenberghe, L., Vanreusel, A., Mees, J., & Janssen, C. R. (2013). Microplastic pollution in deep-sea sediments. Environmental Pollution, 182, 495–499. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.envpol.2013.08.013>
- Van Sebille, E., Wilcox, C., Lebreton, L., Maximenko, N., Hardesty, B. D., Van Franeker, J. A., Eriksen, M., Siegel, D., Galgani, F., & Law, K. L. (2015). A global inventory of small floating plastic debris. Environmental Research Letters, 10(12). <https://doi.org/10.1088/1748-9326/10/12/124006>
- Vázquez Malagón, E. del C. (2001). La cerámica en el diseño industrial, algunas propuestas metodológicas para el desarrollo de pastas y vidriados. UNAM.