



UNIVERSIDAD
NACIONAL
DE COLOMBIA

Caracterización de un proceso de manufactura aditiva por extrusión de un biopolímero y definición de su potencial uso como dispositivo para transporte de fármacos

César Augusto Bacca González

Universidad Nacional de Colombia
Facultad de Ingeniería, Departamento de Mecánica y Mecatrónica
Bogotá D.C., Colombia
2020

Caracterización de un proceso de manufactura aditiva por extrusión de un biopolímero y definición de su potencial uso como dispositivo para transporte de fármacos

César Augusto Bacca González

Tesis de investigación presentada como requisito parcial para optar al título de:
Magister en Ingeniería - Materiales y Procesos

Director (a):

Profesor Ernesto Córdoba Nieto

Codirector (a):

Ph.D., M.Sc., Q.F. Bibiana Margarita Vallejo Díaz

Línea de Investigación:

Manufactura aditiva de biomateriales

Grupo de trabajo en nuevas tecnologías de Diseño y Manufactura-Automatización –
DIMA-UN

Procesos de Transformación de Materiales para la Industria Farmacéutica - PTM

Universidad Nacional de Colombia

Facultad de Ingeniería, Departamento de Mecánica y Mecatrónica

Bogotá D.C., Colombia

2020

*A mi tribu: mi padre por ser grande entre los guerreros,
mi madre por su poder creativo y mi hermana por su
espíritu libre*

À toi...

*"If I have seen further it is by standing on the
shoulders of Giants."*

Isaac Newton

Agradecimientos

Al profesor Ernesto Córdoba Nieto, director del Grupo de trabajo en nuevas tecnologías de Diseño y Manufactura-Automatización – DIMA-UN, por su inmenso apoyo y acompañamiento a lo largo de este proceso académico, permitiéndome desplegar esta idea de proyecto, forjada en el Laboratorio Fábrica Experimental - LabFabEx UN, hasta su materialización, basado en la concepción de la ´manufactura´ como un ámbito transversal e inherente en todos los procesos de transformación.

A la profesora Bibiana Margarita Vallejo Díaz, directora del grupo de investigación Procesos de Transformación de Materiales para la Industria Farmacéutica – PTM, por su extensa experiencia y orientación, iluminando todos esos rincones interesantes de las ciencias farmacéuticas y materiales.

Quiero agradecer al profesor Jairo Ernesto Perilla Perilla, por su amable apoyo en el desarrollo de los ensayos mecánicos. A los profesores Clara Eugenia Plazas Bonilla y Helber De Jesús Barbosa, por sus importantes aportes en la definición de la propuesta de investigación. Al profesor Ricardo Emiro Ramírez Heredia, por permitirme disponer de un importante espacio para completar el desarrollo de los experimentos.

Agradezco los aportes de Colciencias en el proyecto “Desarrollo de minifábrica celular robotizada experimental con el paradigma de la nueva industria 4.0: Reconfigurable, flexible y autónoma” (código 1101-715-51855, Contrato 090-2016), y la "Convocatoria Nacional para el Apoyo a Proyectos de Investigación y Creación Artística de la UNAL (2017-2018", Ref: 41719).

A Ruth Edith Peña Ardila del Laboratorio PTM del Departamento de Farmacia, por su profesionalismo y apoyo en la fase experimental. A todos los compañeros del grupo de

investigación DIMA-UN, especialmente a David Sebastián Matamoros Buitrago, Juan Sebastián Echavarría Ramos y Julio Cesar García Carrero.

A todos los profesores, personal administrativo de la Facultad de Ingeniería y quienes me brindaron su apoyo a lo largo de esta experiencia. Y especialmente a mi Alma Mater: Universidad Nacional de Colombia, por todo lo que eres y significas.

Resumen

Se propone el diseño, instalación y caracterización de una plataforma de manufactura aditiva experimental robotizada, para la fabricación de dispositivos de biopolímeros de almidones de yuca y maíz, en estado gelatinizado, con diferentes proporciones de agua y glicerina. La investigación es desarrollada con base en el planteamiento de métodos experimentales, para el control del proceso de extrusión, y caracterización del comportamiento mecánico y geométrico de los dispositivos obtenidos. En la etapa de exploración inicial, se seleccionaron los principales componentes del extrusor (diámetro de boquilla de 0,8 mm) y fueron definidas las dieciocho mezclas, con los factores: tipo de almidón (yuca y maíz), porcentaje de almidón (15%, 20% y 25%) y porcentaje de glicerina (respecto al contenido de base seca: 0%, 15% y 30%). En la etapa experimental se usaron inicialmente bancos de prueba, para identificar los parámetros de ajuste del proceso, se determinó la respuesta de las mezclas en cinco niveles de velocidad del extrusor, y dos niveles de presión en el tanque reservorio, estableciendo las condiciones para determinar el valor promedio de tasa de material extruido en 0,360 g/min, para los dos grupos de almidones, y como consecuencia a ese resultado se obtuvieron los rangos de velocidades de extrusión para el grupo de almidón de yuca en 655 mm/min y 404 mm/min para el grupo de almidón de maíz.

En la caracterización mecánica de los dispositivos, se encontró que la mezcla de agua destilada con almidón de yuca (20%) y glicerina (15% respecto al contenido de base seca), presentaron la mejor respuesta al esfuerzo mecánico. Para la caracterización dimensional y geométrica de los dispositivos, se evaluaron los efectos de las mezclas, en la respuesta de: la altura, longitud de las caras que conforman el área transversal, y la inclinación de las aristas de los dispositivos. Finalmente se examina el potencial uso de un dispositivo (seleccionado por la mejor respuesta de resistencia mecánica), como medio de transporte y liberación de un compuesto activo (Diclofenaco sódico).

Palabras clave: Manufactura aditiva, biopolímero de almidón, control de proceso.

Abstract

The design, installation and characterization of a robotic experimental additive manufacturing platform is proposed, for the manufacture of biopolymer devices from cassava and corn starches, in a gelatinized state, with different proportions of water and glycerin. The research was developed, based on the approach of experimental methods, for the control of the extrusion process, and characterization of the mechanical and geometric behavior of the devices obtained. In the initial exploration stage, the main components of the extruder were selected (nozzle diameter of 0.8 mm), and the eighteen mixtures were defined, with the factors: type of starch (cassava and corn), percentage of starch (15%, 20% and 25%) and percentage of glycerin (with respect to the dry base content: 0%, 15% and 30%). In the experimental stage, test benches were used initially, to identify the adjustment parameters of the process, the response of the mixtures was determined in five levels of extruder speed, and two levels of pressure in the reservoir tank, establishing the conditions to determine the average value of extruded material rate at 0.360 g/min, for the two groups of starches, and as a consequence of that result the extrusion speed ranges were obtained, for the cassava starch group at 655 mm/min, and 404 mm/min for the corn starch group.

In the mechanical characterization of the devices, it was found that the mixture of distilled water with cassava starch (20%) and glycerin (30% with respect to the dry base content), presented the best response to mechanical stress. For the dimensional and geometric characterization of the devices, the effects of the mixtures on the response of: height, length of the faces that make up the cross-sectional area, and the inclination of the edges of the devices were evaluated. Finally, was examined the potential use of a device (selected for the best mechanical resistance response) as a means of transporting and releasing an active compound (Diclofenac sodium).

Keywords: Additive manufacturing, starch biopolymer, process control

Contenido

	Pág.
1. Introducción	1
2. Estado del Conocimiento	5
3. Materiales, Equipos y Métodos	17
4. Caracterización y respuesta del proceso	43
5. Caracterización de los dispositivos.....	67
6. Potencial aplicación del dispositivo	101
Discusión de resultados	111
Conclusiones y recomendaciones.....	115
Referencias.....	119

Lista de figuras

	Pág.
Figura 1. Efecto de las fuerzas superficiales sobre el filamento depositado.....	9
Figura 2. (A) Estructura de la amilosa. (B) Estructura de la amilopectina.....	14
Figura 3. Esquema Banco de Pruebas para la Velocidad de extrusión.....	26
Figura 4. Esquema banco de pruebas del diámetro del material extruido.....	27
Figura 5. Esquema banco de pruebas para la tasa de material extruido.....	28
Figura 6. Esquema de la instalación del proceso experimental de AM Robotizado.....	30
Figura 7. Ejemplo esquemático de la captura de datos dimensionales.....	33
Figura 8. Proceso metodológico del proyecto de investigación.....	41
Figura 9. Evaluación de la capacidad de auto soporte preliminar.....	43
Figura 10. Esquema de control para la extrusión del material.....	45
Figura 11. Medición tacómetro (A) y banco de pruebas velocidad de extrusión (B).....	48
Figura 12. Obtención de la velocidad de extrusión.....	48
Figura 13. Banco de pruebas para la determinación del diámetro del material extruido..	51
Figura 14. Extrusión de almidón de: (A) Maíz y (B) Yuca.....	51
Figura 15. Esquema del extrusor modificado WASP.....	53
Figura 16. Esquema de la instalación del circuito (A) e interfaz del controlador (B).....	54
Figura 17. Componentes del sistema de control del brazo robótico.....	55
Figura 18. Croquis del patrón para la construcción del prisma rectangular.....	56
Figura 19. Esquema de los componentes del tanque reservorio instalado.....	58
Figura 20. Armadura porta mangueras (A) y disposición de la pistola de calor (B).....	59
Figura 21. Ajuste de los conductos de aire caliente proveniente de la pistola de calor....	59
Figura 22. Plataforma experimental robotizada de AM por extrusión.....	60
Figura 23. Proceso de elaboración de un dispositivo de biopolímero.....	63
Figura 24. Cámara de temperatura (A) y desecador (B).....	64
Figura 25. Peso final promedio de los dispositivos obtenidos.....	64
Figura 26. Datos promedio del %Humedad final de cada grupo de dispositivos.....	65
Figura 27. Proceso de dimensionamiento de los dispositivos.....	68
Figura 28. Caracterización de la altura de los dispositivos.....	69
Figura 29. Cara lateral del grupo “M-1-3-0” (A), y del grupo “M-1-6-0,3” (B).....	69
Figura 30. Caracterización promedio de la longitud horizontal (ancho y largo).....	70
Figura 31. Cara lateral del grupo “Y-1-6-0,15”. y del grupo “M-1-4,5-0,3”.....	71
Figura 32. Respuesta del ángulo “a1” por cada mezcla.....	72

Figura 33. Cara superior del grupo “Y-1-3-0” (A). y del grupo “M-1-3-0,3”(B).	72
Figura 34. Respuesta del ángulo “a2”	73
Figura 35. Respuesta del ángulo “a3”	74
Figura 36. Respuesta de los ángulos entre caras “b1” y “b2”	74
Figura 37. Análisis dimensional de las trayectorias “D1” (A) y “D2” (B).....	75
Figura 38. Ancho de las trayectorias depositadas	76
Figura 39. Altura de las trayectorias	76
Figura 40. Dispositivo previo al ensayo (A) y una vez se ha realizado el ensayo (B)	78
Figura 41. Resultados del área transversal total de cada dispositivo	78
Figura 42. Resultados del área ocupado por las trayectorias de cada dispositivo	79
Figura 43. Respuesta mecánica: A. Yuca (A) y A. Maíz (B), bajo porcentaje de glicerina.81	
Figura 44. Respuesta mecánica: A. Maíz (A) y A. Yuca (B), nivel medio de glicerina	82
Figura 45. Respuesta mecánica: A. Yuca (A) y A. Maíz (B), alto porcentaje de glicerina. 82	
Figura 46. Efecto univariado del Modelo 1.....	84
Figura 47. Efecto univariado del Modelo 2.....	87
Figura 48. Efecto univariado del modelo 3.....	89
Figura 49. Efecto univariado del modelo 4.....	91
Figura 50. Efecto univariado del modelo 5.....	94
Figura 51. Efecto univariado del modelo 6.....	95
Figura 52. Efecto multivariado del modelo 7	97
Figura 53. Adecuación de las pruebas de transporte.....	103
Figura 54. Curva de calibración del DS	104
Figura 55. Curvas de liberación del compuesto activo.....	104
Figura 56. Caracterización reológica por barrido de flujo.....	106
Figura 57. Respuesta mecánica dispositivo con DS (A) y dispositivo original (B)	109

Lista de tablas

Pág.

Tabla 1. Ficha técnica de humedad y pH de los almidones adquiridos	18
Tabla 2: Caracterización de la humedad de los almidones	18
Tabla 3. Tamaño de gránulo para cada tipo de almidón.....	19
Tabla 4. Resultados del porcentaje de amilosa y amilopectina	19
Tabla 5. Mezclas preliminares.....	21
Tabla 6. Proporciones preliminares seleccionadas	21
Tabla 7. Proporciones de mezclas seleccionadas.....	22
Tabla 8. Proporciones y porcentajes ajustados para cada mezcla	23
Tabla 9. Factores y niveles de respuesta.....	39
Tabla 10. Composición de las mezclas para la capacidad seleccionada.....	44
Tabla 11. Tasa de material extruido seleccionado por cada tipo de mezcla	46
Tabla 12. Velocidades registradas del motor.	47
Tabla 13. Velocidades de extrusión seleccionadas por cada tipo de mezcla.....	49
Tabla 14. Diámetro promedio del material extruido	52
Tabla 15. Valores teóricos para la fabricación de cada dispositivo de A.Maíz	61
Tabla 16. Valores teóricos para la fabricación de cada dispositivo de A.yuca	62
Tabla 17. Resultados de la prueba mecánica para las mezclas de almidón de maíz	79
Tabla 18. Resultados de la prueba mecánica para las mezclas de almidón de yuca	80
Tabla 19. Hipótesis Modelo 1.....	84
Tabla 20. Resultados análisis varianza de tres vías	85
Tabla 21. Comparación tipos de almidones	85
Tabla 22. Comparación porcentajes de almidón	85
Tabla 23. Comparación contenido de glicerina.....	86
Tabla 24. Hipótesis Modelo 2.....	86
Tabla 25. Resultados análisis varianza de tres vías	87
Tabla 26. Comparación tipos de almidones	88
Tabla 27. Comparación porcentajes de almidón	88
Tabla 28. Comparación contenido de glicerina.....	88
Tabla 29. Hipótesis Modelo 3.....	89
Tabla 30. Resultados análisis de varianza de tres vías	90
Tabla 31. Efecto del tipo de almidón	90
Tabla 32. Efecto contenido de glicerina.....	90

Tabla 33. Hipótesis Modelo 4	91
Tabla 34. Prueba Kruskal-Wallis.....	92
Tabla 35. Efecto del tipo de almidón.....	92
Tabla 36. Efecto del contenido de almidón	92
Tabla 37. Efecto del contenido de glicerina	93
Tabla 38. Hipótesis del Modelo 5	93
Tabla 39. Efecto del contenido de almidón	94
Tabla 40. Hipótesis Modelo 6	95
Tabla 41. Prueba Kruskal-Wallis.....	96
Tabla 42. Efecto del contenido de almidón	96
Tabla 43. Efecto del contenido de glicerina	96
Tabla 44. Hipótesis Modelo 7	97
Tabla 45. Kruskal-Wallis	98
Tabla 46. Efecto contenido de almidón.....	98
Tabla 47. Efecto contenido de glicerina.....	98
Tabla 48. Selección de los dispositivos cargados con DS	102
Tabla 49. Alturas y Longitudes horizontales de los dispositivos cargados con DS.....	106
Tabla 50. Respuesta del ángulo “a1” del dispositivo cargado con DS”	107
Tabla 51. Ancho y altura de las trayectorias	108
Tabla 52. Respuesta mecánica de los dispositivos cargados con DS.....	109

Lista de Símbolos y abreviaturas

Símbolos

Símbolo	Término	Unidades
$D2$	Altura de trayectoria depositada	mm
$D1$	Ancho de trayectoria depositada	mm
a_n	Ángulos entre aristas	Grados
A	Área	m ²
Aa	Área transversal aproximada	mm ²
A	Área transversal del dispositivo	mm ²
$B2$	Cara inferior	(*)
Ln	Cara lateral	(*)
$B1$	Cara superior	(*)
CE	Conductividad Eléctrica	$\mu S/cm$
NA	Contenido líquido	ml
ε	Deformación a carga máxima	%
ΔL	Desplazamiento	mm
D_n	Diámetro de extrusión	mm
dn	Direcciones longitudinales	mm
a	Distancia entre trayectorias	mm
σ_A	Esfuerzo mecánico "Tipo A"	N/mm ²
σ_B	Esfuerzo mecánico "Tipo B"	N/mm ²
F	Fuerza	N
b_n	Inclinación entre caras opuestas	Grados
L	longitud	mm
L_h	Longitud horizontal	Mm
Lo	Longitud inicial	mm
E	Módulo elástico	N/mm ²
M	Numero de capas (par e impar)	(*)
N	Numero de primitivas	(*)
Wt	Peso teórico	g
P	Presión	MPa
Ve	Tasa de material extruido	g/min
We	tasa del material depositado	g/min
T	Temperatura	°C
t_f	Tiempo de fabricación	min
v_n	Velocidad de material extruido	mm/min
Vn	Velocidad de salida del material	mm/min

Símbolo	Término	Unidades
<i>V_{air}</i>	Velocidad del aire	m/s
<i>V_d</i>	Velocidad del volumen de extrusión libre	mm ³ /s

Abreviaturas

Abreviatura	Término
W	Agua destilada
M	Almidón de maíz
Y	Almidón de yuca
BF	Buffer Fosfato
S	Contenido de almidón
G	Contenido de glicerina
DS	Diclofenaco Sódico
AM	Manufactura Aditiva
FDM	Modelado por deposición fundida

(*) Parámetro adimensional

1. Introducción

Los polímeros provenientes de hidrocarburos fueron considerados una gran revolución en todos los sectores en los cuales fueron aplicados a mediados del siglo XX, con una gran incidencia en la fabricación de dispositivos biomédicos y farmacéuticos (Englert et al., 2018). Las circunstancias actuales en un escenario con escasez de hidrocarburos, han fomentado el descubrimiento de nuevos materiales ambientalmente sustentables, para la producción de dispositivos en el sector de la salud, con características biocompatibles y biodegradables.

Los materiales que mejor se adaptan a todas estas necesidades son los biopolímeros, provenientes de recursos renovables y abundantes, como los almidones y celulosas. Dichos materiales son transformados mediante procesos cada vez más innovadores, como las técnicas de manufactura aditiva – AM (por sus siglas en inglés), que permiten la construcción de piezas con características personalizadas en función de las necesidades de cada usuario, en un corto periodo de tiempo y a bajos costos, respecto a los procesos de manufactura tradicional, cuando se requieren mínimos volúmenes de producción.

La AM agrupa un conjunto de técnicas, que permite de forma sencilla desarrollar piezas complejas, apoyado por materias primas de bajo costo, procesado mediante tecnologías flexibles y el posicionamiento preciso para la construcción de geometrías en un espacio determinado, mediante sistemas de Control Numérico Computarizado – CNC.

En esta investigación se propone el diseño, instalación y caracterización de una plataforma robotizada y un extrusor portable, en la construcción de dispositivos con forma de prismas rectangulares, con potenciales aplicaciones para el transporte de compuestos activos de uso biomédico, elaborados de almidones de yuca y maíz pregelatinizado.

1.1 Planteamiento del problema

En la actualidad se está generando un amplio desarrollo en el sector farmacéutico y otras áreas de la salud, a partir de la integración de técnicas tradicionales y tecnologías emergentes las cuales ofrecen soluciones innovadoras a las necesidades específicas de cada paciente, Esto se evidencia por ejemplo en el uso actual de técnicas de AM para la fabricación del primer medicamento aprobado por la Administración de Alimentos y Medicamentos - FDA (Norman et al., 2017).

Los biopolímeros integran una amplia familia de materiales, principalmente provenientes de fuentes biológicas, que han logrado desplazar a los polímeros convencionales obtenidos de hidrocarburos, como medio para el desarrollo de productos aplicados en áreas biomédicas. Pero los biopolímeros presentan diversos desafíos en su procesamiento, principalmente por sus propiedades únicas que demandan procesos específicos para la manufactura de productos.

La presente investigación explora el diseño y caracterización de una plataforma experimental robotizada de AM por extrusión, para la obtención de dispositivos con forma de prisma rectangular, fabricados con dos grupos de almidón: Yuca (*Manihot esculenta*) y Maíz (*Zea mays*), evaluando para cada mezcla el comportamiento mecánico y geométrico de los dispositivos obtenidos, y de esta forma explorar nuevas soluciones de materiales y procesos de manufactura en la obtención de productos para el transporte de principios activos de uso farmacéutico.

1.2 Justificación

Actualmente se buscan tecnologías y materiales para el desarrollo de productos innovadores, con bajos costos y ambientalmente favorables, capaces de proporcionar funciones únicas en el sector biomédico y farmacéutico, con tratamientos personalizados, como dispositivos combinados implantables, nuevos sistemas con perfiles de liberación controlado o incluso complejas estructuras para el transporte de múltiples sustancias activas en un único producto (Goole & Amighi, 2016).

El enfoque del estudio se centra en evaluar el diseño y procesamiento de una plataforma experimental robotizada de AM por extrusión, para obtener piezas de almidones gelatinizados, e identificar la potencial aplicación de la técnica propuesta de AM, para la fabricación de dispositivos biomédicos con capacidad de cargar y liberar un principio activo farmacéutico, y de esta forma difundir el conocimiento alcanzado para generar nuevos productos.

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo General

El objetivo de este trabajo se centra en la caracterización de un proceso de AM por extrusión para la construcción de patrones de biopolímero de almidón y examinar su potencial uso como dispositivo para transporte de fármacos.

1.3.2 Objetivos Específicos

- Caracterizar el proceso experimental de AM por extrusión para la obtención de biopolímero de almidón.
- Identificar el comportamiento mecánico y geométrico de los patrones de biopolímero obtenidos.
- Establecer el potencial uso de los patrones de biopolímero obtenidos mediante el proceso experimental de AM, como dispositivo para transporte de fármacos.

2.Estado del Conocimiento

2.1 Manufactura Aditiva

Los procesos de producción flexible para el desarrollo de productos personalizados, se orienta a un nuevo tipo de manufactura con bajos volúmenes de fabricación, los cuales son altamente costosos bajo los métodos tradicionales de elaboración por lotes o series (Horn & Harrysson, 2012). Con el desarrollo del control numérico computarizado – CNC y técnicas tradicionales para la transformación de materiales, fue posible establecer a finales del siglo XX un nuevo tipo de producción, conocida como manufactura aditiva – AM (por sus siglas en inglés), prototipado rápido o popularmente denominado como “impresión 3D”.

El comité internacional “F72” de la Sociedad Americana para Ensayos y Materiales – ASTM, define la AM como el “proceso de unir materiales para fabricar piezas mediante modelos tridimensionales, contruidos normalmente capa por capa” (ASTM, 2009); Se han agrupado siete tipos de procesos o técnicas globales de AM: “Fotopolimerización”, “Fusión de lecho de polvo”, “Inyección por aglutinante”, “Inyección de material”, “Laminación de hojas”, “Extrusión de material” y “Deposición directa de energía” (Travitzky et al., 2014) (ISO/ASTM, 2015) (Calignano et al., 2017).

Así mismo se ha definido por parte de la ASME (American Society of Mechanical Engineers) y la ISO (International Standart Organization), la definición de Manufactura Aditiva (AM, por sus siglas en inglés), para designar todas aquellas tecnologías con las capacidad de fabricar objetos físicos, a partir de una representación geométrica, mediante la adición sucesiva de material (ISO/ASTM, 2015). En general todas las técnicas de AM conservan las siguientes etapas de fabricación (Gibson et al., 2015):

- Diseño: Se suele representar digitalmente el modelo a fabricar mediante un software de diseño asistido por computador - CAD (por sus siglas en inglés) o definición mediante una macro con un patrón repetible.
- Conversión formato: En muchos casos los modelos CAD se convierten a un formato "STL" (abreviación en inglés de estereolitografía), para ajustar los límites externos del modelo y seccionarlos en capas sucesivas, adaptado posteriormente a las características del software que sirve de interfaz con el equipo AM.
- Materia Prima: Para cada tipo de tecnología AM, se implementan materias primas específicas como filamentos, gránulos o soluciones aglutinantes.
- Impresión: Se agregan y solidifican las materias primas en capas sucesivas, conservando la forma geométrica predefinida.
- Posprocesamiento y Aplicación: En muchos casos los elementos impresos requieren un proceso adicional de pulido, sinterización, secado u otros, para mejorar la presentación final del producto.

2.2 Sistemas de AM por extrusión

Todas las tecnologías de extrusión se caracterizan por la salida controlada de un material desde una zona de confinamiento, transportado por un conducto y depositado a través de una boquilla por efecto de una presión. Para obtener un diámetro constante de material a la salida de la boquilla y generar trayectorias continuas, es necesario mantener una presión de extrusión y velocidad de trayecto constantes. El material a extruir debe cumplir con las siguientes condiciones para implementarse en cualquiera de las técnicas de AM por extrusión (Gibson et al., 2015):

- El material debe estar inicialmente en una forma semisólida y luego tener la capacidad de solidificarse a través del tiempo
- Debe poseer propiedades aditivas para generar una unión entre las superficies de cada trayectoria de construcción
- Presentar homogeneidad en las propiedades reológicas del material depositado, para mantener un diámetro constante a la salida de la boquilla (Ligon et al., 2017).
-

Por lo general los materiales en estado semisólidos procesados con AM, se transportan desde un depósito por medio de un émbolo y/o tornillo sin fin. Los materiales termoplásticos sólidos en forma de filamento o pellets son impulsados por un rodillo a través de una cámara con una resistencia eléctrica de calentamiento, para modificar el estado sólido-liquido del material por medio del cambio de temperatura (técnica Fused Deposition Modeling – FDM)¹ (Gibson et al., 2015).

Tradicionalmente ha existido un gran interés en las técnicas de AM por extrusión, debido a los bajos costos de materias primas y la construcción de los equipos, respecto a otros procesos. Los sistemas de AM con tecnología por extrusión permiten manufacturar piezas con diversos tipos de materiales, como polímeros fundidos, pastas, suspensiones coloidales, siliconas y otras sustancias semisólidas (Norman et al., 2017). Cualquier sistema de AM por extrusión se caracteriza por las siguientes condiciones (Gibson et al., 2015):

- Alimentación del material: El equipo requiere un depósito para la precarga del material o suministro continuo mediante bombeo.
- Cambio de estado del material: En algunas técnicas de extrusión el material sólido en forma de gránulos, polvo o filamento, es transformado hasta un estado semilíquido.
- Aplicación de una presión constante para transportar el material a través del sistema de extrusión.
- Extrusión o liberación del material por una boquilla con una sección transversal definida: La geometría de la boquilla define en parte la forma final de las trayectorias depositadas y la geometría de la pieza.

Las tecnologías de AM por extrusión son adecuadas para la construcción de piezas relativamente grandes debido a que el diámetro de la boquilla de salida es grande respecto a la resolución ofrecida por otras técnicas de AM, y por lo tanto la construcción

¹ FDM es una técnica de AM, basada en la extrusión de un material plástico en forma de filamento a través de una boquilla que se encuentra a una alta temperatura y depositado en un estado semisólido en capas sucesivas sobre una plataforma controlada por CNC

de la pieza se puede hacer a una mayor velocidad, pero también se tendrá menos control sobre la precisión superficial de la pieza.

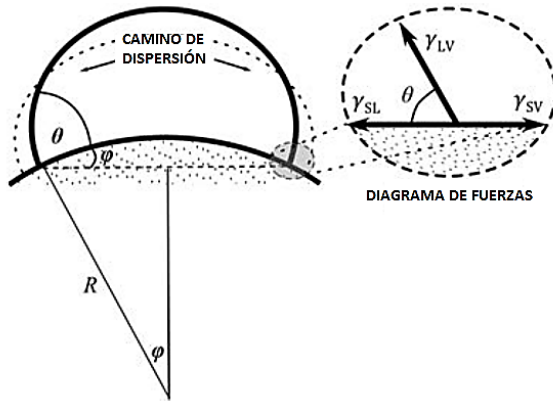
2.3 Materiales semisólidos extruidos por AM

La extrusión de materiales altamente viscosos (dependientes de la velocidad de cizallamiento y temperatura), se pueden simplificar como fluidos newtonianos, hasta la deposición del fluido (Bellini et al., 2005), posteriormente el efecto de la temperatura en los procesos de curado o secado de la pieza para la solidificación del material, posee una alta dependencia del tiempo para mantener la forma y dimensiones de la pieza elaborada, aun cuando el efecto de la tensión superficial, la gravedad, secado y enfriamiento del material, tienden a modificar dicha geometría. Especialmente los materiales de gel presenta un comportamiento de contracción o hinchamiento, dependiendo de las características del gel, junto con una alta porosidad en sus estructuras (Gibson et al., 2015). Otra consecuencia de las estructuras producidas con múltiples trayectorias adyacentes o la deposición de material con un área transversal de un gran tamaño, es la dificultad para mantener un secado constante de toda la trayectoria depositada o incluso de todo el elemento manufacturado, por lo que al enfriarse la pieza puede generar distorsiones geométricas.

El ensamble de múltiples capas hasta formar una geometría o pieza es posible debido a interacciones complejas de múltiples fenómenos físicos, como la geometría de la trayectoria depositada, la adherencia entre capas y los efectos de la temperatura de enfriamiento. La propagación de las trayectorias depositadas, es altamente dependiente de la tensión superficial, unión o sinterización con las capas adyacentes, fluencia por gravedad y humectación. En la literatura científica se ha postulado el modelo de tensión superficial (Figura 1), para definir el conjunto de fuerzas que condicionan la geometría del material depositado (N. Turner et al., 2014), donde γ_{LV} representa la resistencia generada entre el aire circundante y el material depositado, γ_{LV} la resistencia entre el aire y la superficie sólida, y γ_{LV} es la resistencia debida al líquido con la superficie. Para las

construcciones de capas sucesivas con trayectorias de geometría transversal radial, el ángulo θ determina la estabilidad del material depositado, mientras el ángulo φ formado sobre la superficie de la trayectoria de capa precedente condiciona la amplitud de la dispersión (junto con el radio de curvatura de la superficie: R).

Figura 1. Efecto de las fuerzas superficiales sobre el filamento depositado.



Modificado de: Turner, Strong, & Gold (2014).

El cordón de polímero depositado a la salida de la boquilla, fluye debido a un caudal volumétrico Q , cuyo modelo se aproxima a un flujo simple de Hagen-Poiseuille, evaluado en función del diámetro de salida de la boquilla D_2 , como se muestra en la siguiente Ecuación 1, donde ΔP es el cambio de presión a lo largo del extrusor, η el valor de la viscosidad dinámica y L_2 es la longitud de la boquilla (N. Turner et al., 2014):

$$Q = \frac{\pi \left(\frac{D_2}{2} \right)^4 \Delta P}{8 \eta L_2}$$

Ecuación 1

La fuerza de enlace que mantiene unidas las diferentes trayectorias del polímero depositado, se analizan de forma empírica y depende de la energía de adhesión-cohesión, el área transversal en contacto entre las capas, las condiciones térmicas globales del proceso (convección del aire circundante y temperatura del material a la salida de la boquilla), conducción térmica del material, y la sinterización del flujo viscoso, (N. Turner et al., 2014).

Experimentalmente se ha demostrado la interacción térmica entre el material fundido con respecto a la capa precedente, ocasionando un aumento de la temperatura de las capas

adyacentes a la nueva trayectoria depositada, lo cual activa la integración de las diferentes áreas en contacto, y en los materiales termoplásticos decae hasta un valor por debajo de la temperatura vítrea en un corto periodo (Sun et al., 2008) (Bellini et al., 2004).

La aditividad entre diferentes trayectorias adyacentes, se alcanza mediante un agente humectante o disolvente residual, mientras los materiales activados por temperatura requieren de una energía calórica residual. Cuando la energía calórica es superior al estado donde fluye el material, ocasiona una elevada integración entre las capas, y en consecuencia afecta la geometría de la pieza diseñada. Una baja energía residual altera la adhesión entre las trayectorias contiguas generando un desprendimiento o separación entre capas (Gibson et al., 2015).

Para garantizar la unión entre las diferentes trayectorias depositadas se ha sugerido convencionalmente para las técnicas de manufactura aditiva por extrusión, implementar una distancia entre capas del mismo tamaño del diámetro de la boquilla (N. Turner et al., 2014). Cuando la deposición se hace a una mayor altura se afecta la integración y alineación de las trayectorias, y cuando se deposita a una menor distancia se altera la geometría desarrollada previamente por efecto de la acumulación del material o por el contacto de la boquilla con el material (Gibson et al., 2015).

2.4 Sistemas de AM robotizados

En la última década se ha evidenciado un aumento en el uso de diversos tipos de sistemas robotizados de AM, sobrepasando los alcances de los dispositivos CNC convencionales (impresoras de AM: cartesianas, delta y polar), incluso con la capacidad de integrar manufactura sustractiva y aditiva en un mismo centro de mecanizado. Por su alta flexibilidad y precisión los brazos robóticos de seis o más grados de libertad se han implementado en conjunto con sistemas de extrusión para la elaboración de diferentes productos y servicios (acompañamiento en procesos operatorios en áreas médicas o construcción de obras arquitectónicas) (Urhal et al., 2019).

Experimentalmente se han implementado equipos robotizados con seis grados de libertad, para controlar la posición de la extrusión de materiales cerámicos, como en el caso de las

técnicas surgidas en el año 1996 Robocasting – RC, “Liquid Deposition Modeling” o “Three-Dimensional Fibre Deposition” (J. P. Li et al., 2007), donde se hace uso de una boquilla para depositar a temperatura ambiente una suspensión de pasta cerámica para la obtención de piezas de “cerámica en verde”, la cual posteriormente se seca en horno de alta temperatura (Schlordt et al., 2012). Dichas técnicas hacen parte de un grupo de tecnologías denominadas Tecnologías de Formas Libres por Extrusión – EFF (por las siglas en inglés de “Extrusion freeform fabrication”), uno de estos sistemas utiliza un dispensador móvil y una bomba de cavitación progresiva para extruir sustratos de geles acuosos granulares o filamentos, mediante la adaptación de un mini extrusor instalado en una plataforma de posicionamiento de alta precisión (Bellini et al., 2005).

Recientemente se ha explorado los alcances de los brazos robóticos en AM con sistemas de extrusión para la elaboración de dispositivos con polímeros termoestables y termoplásticos (Felbrich et al., 2018), la incorporación de fuentes de luz ultravioleta en procesos que hacen uso de resinas fotocurables (X. Li et al., 2017), y la instalación de sistemas de Deposición Directa de Energía , por medio de una fuente láser o generador de plasma, utilizado en la fabricación de piezas metálicas (acero inoxidable, aluminio, acero de herramienta, titanio, y diversas aleaciones) (Ding et al., 2017).

2.5 AM en el sector farmacéutico

Mediante la AM se ha facilitado el desarrollo de una nueva gama de productos personalizados en las áreas de la salud para la fabricación de prótesis, modelos in vitro, entre otros. Específicamente en el área farmacéutica existe un creciente interés en el estudio de la AM para el desarrollo de dispositivos farmacéuticos, que incluyen formas de dosificación sólidas, dispositivos implantables y administración tópica (Zadpoor & Malda, 2017).

Por definición, un producto farmacéutico es una forma de dosificación terminada que contiene un ingrediente activo destinado para el diagnóstico, curación, mitigación, tratamiento o prevención de enfermedades en el hombre u otros animales, y puede estar integrado en un sistema de entrega de fármaco (FDA, 2017). Dentro de las presentaciones

más difundidas de medicamentos se encuentran las formas de dosificación sólida, obtenidas por medio de procesos tradicionales de manufactura.

La fabricación de productos farmacéuticos mediante AM se pueden elaborar principalmente de ingredientes farmacéuticos activos y excipientes (Norman et al., 2017). En el mes de agosto del año 2015 se estableció un gran hito en la industria farmacéutica con la aprobación por parte de la FDA del primer medicamento fabricado con AM, con lo cual se dio apertura a un creciente conjunto de desarrollos innovadores e investigaciones para comprender el modo como estas tecnologías de AM podían mejorar las funciones de las diversas formas farmacéuticas de medicamentos o dispositivos de manera personalizada, con la promesa de beneficiar a los usuarios finales en cuanto a la eficacia, accesibilidad y seguridad de estos productos, basado en el control de las materias primas, defectos de fabricación y en los parámetros del proceso de AM (Norman et al., 2017).

Las investigaciones tradicionales de medicamentos se centran principalmente en el control del perfil de liberación, pero con la AM es posible ajustar la liberación del compuesto activo, usando la distribución geométrica para obtener complejos sistema de administración con múltiples fármacos y perfiles de liberación integrados (Goyanes et al., 2015).

Otro campo de aplicación se encuentra en el diseño de dispositivos médicos combinados, para el desarrollo de prótesis mediante AM con geometrías y administración de fármacos personalizados, para combatir infecciones o la regeneración de tejidos (Zadpoor & Malda, 2017). La AM ha tenido un alto impacto investigativo al incorporar técnicas y procesos tradicionales como: moldeo en soluciones, separación de fases, lixiviación en partículas y liofilización, entre otras (Yeong et al., 2004).

Se ha implementado la técnica de FDM, para el desarrollo de dispositivos médicos combinados y productos farmacéuticos, con aplicación directa en situaciones anatómicas con una alta variabilidad geométrica o funciones localizadas que requieren un alto control de manufactura. El mayor campo de investigación de AM por FDM para aplicaciones farmacéuticas se centra en el desarrollo de diferentes formas de dosificaciones orales y dispositivos implantables, de policaprolactona - PCL, Polyvinyl alcohol – PVA, etilcelulosa – EC, poli (L-lactida) (PLLA), hidroxipropil metil celulosa HMPC, entre otros, en combinación con principios activos o fármacos, para determinar su comportamiento como sistema de liberación o transporte (Kempin et al., 2017)

2.6 Biopolímeros

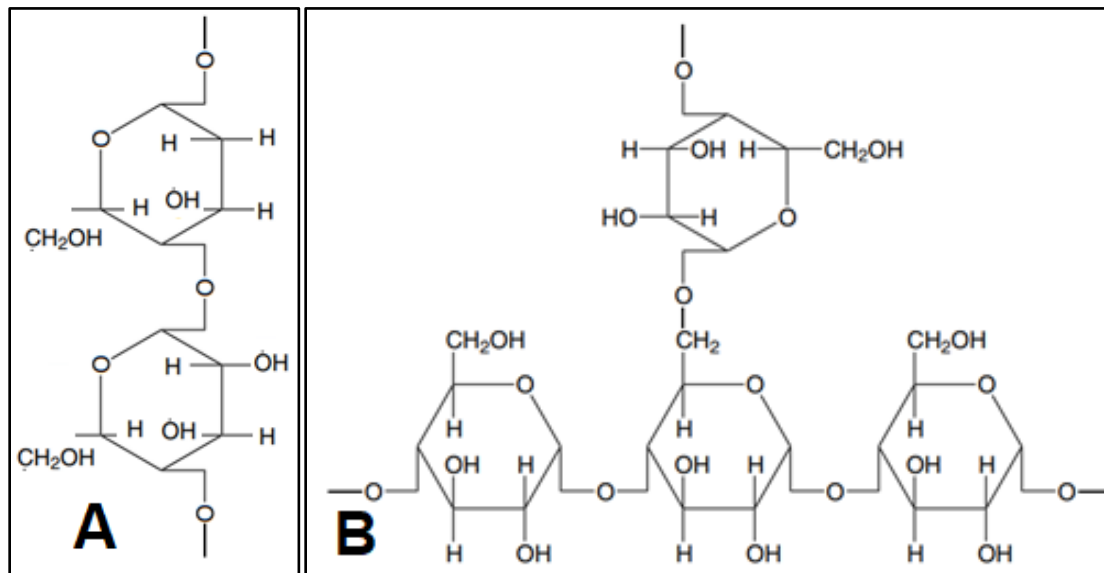
Los polímeros se pueden definir como macromoléculas compuestas por una o múltiples unidades químicas o monómeros, que se repiten a lo largo de toda una cadena. A comienzos del siglo XX se desarrollaron los primeros polímeros sintéticos como la baquelita y el nylon, y desde entonces se ha avanzado en la comprensión de estos materiales (Sperling, 2005). Los polímeros se pueden clasificar según sus propiedades físico-químicas en termoplásticos, termoestables y elastómeros, producidos industrialmente mediante la polimerización por suspensión, emulsión, masa o solución (Carraher, 2017).

Los biopolímeros o polímeros naturales poseen un origen biológico no fósil, y se caracterizan principalmente por sus propiedades biodegradables y sus alcances renovables. Dentro de los biopolímeros se encuentra los polisacáridos como el almidón, celulosa, gelatina, entre otros. La síntesis de los biopolímeros naturales parte de la integración de moléculas en una macromolécula por efecto de reacciones enzimáticas de monómeros activados, formados metabólicamente dentro de las células, que incluyen las proteínas, aceites y/o carbohidratos derivados de bacterias (Carraher, 2017).

2.7 Almidones

Los almidones son polisacáridos de origen vegetal, siendo uno de los materiales biodegradables más abundantes y presentes en un gran porcentaje de los alimentos consumidos por los humanos y animales. Presenta unidades anhídrido glucosa con enlaces $\alpha \rightarrow 4$. Los gránulos de almidón se componen de los polisacáridos amilosa y amilopectina. La amilosa se obtiene a partir de la condensación de D-glucan provenientes de enlaces glucosídicos $1 \rightarrow 4$ (Figura 2 - A). A su vez la amilopectina se caracteriza por poseer ramificaciones que enlazan un tronco central mediante enlaces α -1-6 (Figura 2 - B). A continuación se muestran las estructura de la amilosa y amilopectina (Johnson et al., 2003).

Figura 2. (A) Estructura de la amilosa. (B) Estructura de la amilopectina



Modificado de Johnson, Mwaikambo, & Tucker, 2003.

Los enlaces de hidrógeno de los grupos hidroxilo en la superficie de los gránulos de almidón promueven las propiedades hidrofílicas, afectando el procesamiento térmico del material, siendo la temperatura de descomposición térmica menor a la temperatura de fusión. Por lo anterior el almidón es considerado un polímero termoplástico en presencia de plastificantes como glicerina o agua, entre otros, bajo efectos de cizalladura y temperaturas (Johnson et al., 2003). El plastificante se incorpora en las cadenas de almidón, como consecuencia se obtiene un biopolímero con un procesamiento complejo debido a una alta viscosidad, bajas propiedades mecánicas, baja estabilidad ambiental y soluble en agua, siendo posible contrarrestar dichos efectos mediante procesos de copolimerización por injerto, derivación química, la incorporación de polímeros sintéticos o entrecruzamiento con sales de calcio, zirconio y lignina. Asimismo es posible mejorar las propiedades del almidón como biopolímero termoplástico, mediante el proceso de gelatinización, retrogradación y desestructuración de los gránulos (Nafchi et al., 2013).

El proceso de gelatinización ocurre de forma determinada para cada tipo de almidón, por efecto de una alta concentración de agua y temperatura, posteriormente al romperse la estructura de los polisacáridos se reduce el carácter cristalino de su estructura, aumentando la viscosidad hasta la fragmentación de los gránulos, posterior hinchamiento y movilidad térmica. El aumento de la temperatura origina la difusión de la amilosa, y consecuentemente la desintegración de los gránulos con alto contenido de agua (Nafchi et al., 2013). Una vez se reduce la temperatura de la mezcla del almidón y plastificante, ocurre la retrogradación del almidón, caracterizado por el aumento en la orientación de los puentes de hidrogeno, junto con una alta turbiedad y viscosidad de las mezclas. Finalmente en la etapa de desestructuración se obtiene una distribución de puentes de hidrogeno contenidos en las moléculas de almidón y polímeros amorfos en una matriz homogénea (Nafchi et al., 2013).

2.8 Antecedentes de AM de almidones gelatinizados

Se han publicado diversos artículos de investigación relacionados con la AM de hidrogeles y otros biomateriales dispersos en plastificantes, con aplicaciones en ciencias médicas (J. Liu et al., 2019) y alimentos (Dankar et al., 2018), para la fabricación de “scaffolds” o estructuras soporte, extruidos en gel y posteriormente secado para generar una masa sólida. También se han comparado polímeros naturales y sintéticos, siendo estos últimos más estables y rígidos, mientras los polímeros naturales presentan una mayor biocompatibilidad y aplicación para la construcción de componentes blandos (Gibson et al., 2015).

El almidón se ha implementado usualmente combinado con otros biomateriales (Hassan et al., 2019), cerámicos (L. Yang et al., 2019) y polímeros (Kuo et al., 2016), en dispersiones o mezclas de compuestos. Pero el uso del almidón en forma de gel para aplicaciones en AM es menos frecuente, siendo posible destacar una investigación que relaciona los efectos reológicos en el procesamiento de mezclas compuestas por goma xantana, carrageno y almidón de papa, con la finalidad de determinar la capacidad de impresión por extrusión para generar geometrías de líneas o trayectorias en forma de estrellas de cinco puntas, patrones bidimensionales rectangulares (tejido de trayectorias

5x5) y tridimensionales en forma de cilindros, y evaluar cualitativamente la capacidad de auto soporte y estabilidad geométrica de cada mezcla (Z. Liu et al., 2019). En el estudio de Huan Chen (y otros, 2019), se caracterizan las propiedades reológicas de los geles de arroz, maíz y papa, presentando una primera aproximación de los efectos de cizallamiento en la etapa de extrusión, y finalmente se comparan las diferentes mezclas en la elaboración de tres geometrías de forma libres (rostro, escarabajo y cubeta) (Chen et al., 2019).

En la investigación realizada por Fanli Yang (y otros, 2018), se determina el efecto del zumo de limón en la optimización de la extrusión de los geles de almidón de papa, y estabilidad geométrica de las impresiones por AM al modificar diferentes condiciones del proceso: volumen de extrusión (mejor resultado obtenido: 24 mm³/s), velocidad de movimiento (mejor resultado obtenido: 30 mm/s), ante diferentes diámetros y alturas de la boquilla, y en general presentando las mezclas de almidón y zumo de limón que mejor comportamiento ofrecen (F. Yang et al., 2018).

En otro estudio se obtiene almidón gelatinizado de maíz con hidroxiapatita, para la construcción de dispositivos en forma de prisma rectangular y circular, enfocados a sustituir implantes en trastornos óseos, para lo cual se evaluó la resistencia mecánica compresiva, microestructura de los soportes y biocompatibilidad in vitro mediante células osteoblasticas humanas, consiguiendo altas tasas de resistencia a compresión respecto a otras estructuras compuestas por hidroxiapatita (4,07 a 10,35 MPa), y proliferación de las células cultivadas (Koski et al., 2018).

3. Materiales, Equipos y Métodos

Para la primera etapa del proyecto de investigación, se plantea el uso de los almidones de *Manihot esculenta* (nombre común: yuca o mandioca) y *Zea mays* (nombre común: maíz) pregelatinizados en combinación con los plastificantes agua y glicerina, en diferentes proporciones. Se definió el rango de extrusión admisible de estas mezclas en función de las características del equipo extrusor (marca: WASP). En esta primera etapa se hace uso de bancos de pruebas, con los cuales identificar los rangos de operación del proceso.

Posteriormente se desarrolla el protocolo de fabricación de los dispositivos de biopolímeros, mediante el control de posicionamiento del brazo robótico y correlacionado con la salida del material a través del extrusor. Esta etapa será descrita con mayor detalle en el Capítulo 4: “Caracterización y respuesta del proceso”, del presente trabajo.

En una tercera etapa de la investigación se evaluaron las características dimensionales y resistencia mecánica compresiva de los diferentes dispositivos obtenidos. El dispositivo que presentó la mejor respuesta de resistencia mecánica compresiva, fue elegido para transportar y liberar el compuesto activo seleccionado (Diclofenaco sódico). A continuación se presentan las características principales de los materiales, equipos y métodos implementados a lo largo del proyecto de investigación.

3.1 Materias primas

Para el desarrollo de la investigación se usaron almidones nativos de yuca (Lote: 0001400861) y maíz (Lote: 0001393214), adquiridos en la empresa CIACOMEQ S.A.S., con las siguientes características (Tabla 1).

Tabla 1. Ficha técnica de humedad y pH de los almidones adquiridos

ALMIDÓN	MAÍZ	YUCA
pH	4 – 6,5	4,5 – 7,0
Contenido de humedad (%)	11,5 – 13,0	11,5 – 13,6

La humedad de cada almidón, fue verificada por medio del método de secado al horno, según el protocolo de “pruebas físicas - 731”, publicado por la USP (USP, 2012), registrando la pérdida de humedad en un gramo de almidón, a una temperatura de 130°C, por un periodo de 90 minutos, definido en los reportes de la USP, para los almidones de yuca y maíz, con un criterio de aceptación de humedad del 16% y 15%, respectivamente.

También mediante un equipo Gehaka, modelo “IV 2000”, de radiación infrarroja, se corroboró la humedad del almidón, siguiendo el método establecido por el fabricante: expandiendo 5 gramos de cada almidón en la bandeja de calentamiento del equipo, hasta una temperatura de estabilización de 110 °C. En la siguiente Tabla 2 se muestra los resultados obtenidos, por cada método: Finalmente fue seleccionado el porcentaje de humedad obtenido con el equipo infra rojo, debido a la alta repetibilidad de los resultados.

Tabla 2: Caracterización de la humedad de los almidones

ALMIDÓN	MAÍZ (% humedad)	YUCA (% Humedad)
Método de secado por horno	11,9	12,5
Método por infra rojo	12,9	12,7

Para cada tipo de almidón en polvo, se determinó el tamaño del gránulo, mediante el método de caracterización por microscopia óptica (Patel & Seetharaman, 2006). Inicialmente se hace una suspensión, mezclando 1g de almidón en 100ml de agua, con un agitador magnético, marca: LABTECH, modelo: LMS-1003, a 300 rpm, durante 15 min, a temperatura ambiente. Luego se preparan las suspensiones en portaobjetos y se registran el tamaño del gránulo en un microscopio invertido LECO®500 a 400 aumentos. Para los

gránulos en forma equiaxial se define como distancia de medición el diámetro que circunda el gránulo y para otras geometrías se elige la mayor longitud del granulo (Medina, 2008). Se analizaron 500 gránulos por cada tipo de almidón, y mediante el software Minitab 19 se compararon las distribuciones tipo Normal y Weibull, por ajuste Anderson-Darling, convenidas en otros estudios para el mismo método de análisis (Medina, 2008), obteniendo los siguientes resultados (Tabla 3) (El planteamiento completo del estudio estadístico se presenta en el Anexo A).

Tabla 3. Tamaño de gránulo para cada tipo de almidón

TIPO DE ALMIDÓN	MEDIA DEL TAMAÑO DEL GRÁNULO (μm)	DESVIACIÓN ESTÁNDAR DEL TAMAÑO (μm)
Maíz	14,233	4,202
Yuca	12,748	4,045

La identificación del tamaño de grano es un parámetro fundamental en los procesos de extrusión, ya que se encuentra relacionado con la viscosidad y la generación de porosidad sobre la superficie del material extruido, y especialmente en los almidones procesados se evidencian fenómenos de hinchamiento por efecto de los cambios de temperatura y alto contenido de humedad, ocasionando los fenómenos de gelatinización y degradación, en el interior de la cámara del extrusor (Ye et al., 2018).

También fue determinado el contenido de amilosa y amilopectina de cada almidón, (Informe No: 94888), con la técnica de análisis enzimático, precipitando la amilopectina para cuantificar el contenido de amilosa (Vilaplana et al., 2012), obteniendo los siguientes datos (Tabla 4).

Tabla 4. Resultados del porcentaje de amilosa y amilopectina

TIPO DE ALMIDÓN	ALMIDÓN TOTAL (%)	AMILOSA (%)	AMILOPECTINA (%)
MAÍZ	79,53	49,75	50,25
YUCA	82,18	35,43	64,57

En algunas investigaciones se ha probado la relación entre el tamaño del granulo y el contenido de amilosa (Waterschoot et al., 2016) (Patel & Seetharaman, 2006), otras fuentes documentadas exponen resultados que contradice dicha hipótesis (Escalante-Aburto et al., 2016). Pero de forma más constante se expone la influencia de la viscosidad respecto al contenido de amilosa-amilopectina (Lii et al., 1996) (Zdanowicz & Johansson, 2016), y se ha demostrado que la viscosidad aumenta en cuanto mayor contenido de amilosa se encuentre presente, entre otras condiciones (una menor temperatura y humedad en los procesos de extrusión ocasionan una mayor viscosidad)(Xie et al., 2009). Todas estas características se han aplicado en técnicas de AM por extrusión, al incluir los efectos reológicas de los materiales con las características sistemáticas de la técnica (parámetros de viscosidad, adhesividad, respuesta geométrica, tensión superficial, condiciones de gelatinización, entre otras) (Z. Liu et al., 2019; F. Yang et al., 2018)

La glicerina grado USP (Lote: 201805312), utilizada en el estudio como plastificante en algunos grupos de mezclas, fue adquirida a través de la empresa CIMPA S.A.S. El agua destilada empleada para todas las pruebas, fue obtenida de los laboratorios de Ingeniería Química de la UNAL, cuya conductividad registrada (Monitor: CM-230), fue menor a 0,26 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Como compuesto activo para la evaluación del transporte, se seleccionó Diclofenaco sódico - DS (Lote: 0001219852).

3.2 Selección y preparación de mezclas

Previamente fueron seleccionados los rangos de mezclas, determinando la capacidad de extrusión en función del contenido de agua de las mezclas y para tres tipos de boquillas (diámetros de salida de: 0,41; 0,84 y 1,2 mm). A continuación se presenta el conjunto de mezclas definidas inicialmente (Tabla 5). El código mostrado hace referencia, al tipo de almidón (M: maíz; Y: yuca), seguido de la proporción de almidón, y por último la proporción de agua (respecto al contenido de base seca).

Tabla 5. Mezclas preliminares

Yuca	Y-1-1	Y-1-2	Y-1-3	Y-1-4	Y-1-5	Y-1-6	Y-1-7	Y-1-8	Y-1-9
Maíz	M-1-1	M-1-2	M-1-3	M-1-4	M-1-5	M-1-6	M-1-7	M-1-8	M-1-9

Posteriormente se determinan los rangos viables para el procesamiento de cada una de estas mezclas, mediante una evaluación cualitativa de la capacidad de extrusión (control de la salida del material a través del extrusor) y auto soporte (capacidad de mantener la construcción de capas sucesivas verticales, sin generar un colapso o esparcimiento), siendo esta última condición fundamental para la construcción de los prismas rectangulares. Para determinar el control de la extrusión y capacidad de auto soporte de las mezclas, fueron definidos como parámetros de entrada del proceso: la máxima velocidad del motor del extrusor (aproximadamente 146 rpm) y presión en el tanque reservorio de 0,3 MPa.

Al finalizar estas pruebas exploratorias se obtuvieron las siguientes proporciones con capacidad de extrusión en el equipo WASP (Tabla 6). Las mezclas fueron seleccionadas al encontrar los límites de operación del sistema de extrusión y las condiciones para la construcción del prisma por la técnica de AM, fijando los límites en las composiciones con mayor humedad “1-6” y las mezclas con mayor proporción de almidón: “1-3”. Entre estos grupos se fijó una mezcla intermedia con una proporción “1-4,5”. En la sección “4.1 Selección Condiciones Preliminares”, se muestra en detalle el proceso experimental realizado.

Tabla 6. Proporciones preliminares seleccionadas

Yuca	Y-1-3	Y-1-4,5	Y-1-6
Maíz	M-1-3	M-1-4,5	M-1-6

A dicha selección se incorporó el efecto de la glicerina en tres niveles: 0%, 15% y 30% (respecto al contenido de base seca), quedando finalmente el conjunto de mezclas con la siguiente codificación, siendo el último valor el porcentaje de la glicerina (Tabla 7). El uso de la glicerina se ha reportado en un diverso número de investigaciones de almidones gelatinizados (entre otros polisacáridos), como un potencial plastificante que mejora las propiedades mecánicas y resistencia a la permeabilidad del vapor (Basiak et al., 2017).

Tabla 7. Proporciones de mezclas seleccionadas

Yuca	Maíz
Y-1-3-0	M-1-3-0
Y-1-4,5-0	M-1-4,5-0
Y-1-6-0	M-1-6-0
Y-1-3-0,15	M-1-3-0,15
Y-1-4,5-0,15	M-1-4,5-0,15
Y-1-6-0,15	M-1-6-0,15
Y-1-3-0,3	M-1-3-0,3
Y-1-4,5-0,3	M-1-4,5-0,3
Y-1-6-0,3	M-1-6-0,3

A partir de las proporciones seleccionadas se obtiene la conversión frente al porcentaje de cada combinación, luego se hace una corrección de porcentaje ajustado con los tres niveles definidos de almidón (15%, 20% y 25%) y glicerina (0%, 15% y 30%, respecto al contenido de base seca), y finalmente se hace la corrección (en gramos), basado en el contenido de humedad que presenta cada almidón, según el resultado caracterizado por análisis infra rojo (Maíz: 12,9% y Yuca: 12,7% de humedad). En la Tabla 8 se muestra las equivalencias de la conversión a porcentaje, donde: “W” es el contenido de agua destilada, “S” contenido de almidón y “G” el contenido de glicerina.

Tabla 8. Proporciones y porcentajes ajustados para cada mezcla

Código Mezclas	Proporciones			%			% Ajustado		
	S	W	G	S	W	G	S	W	G*
1-3-0	1	3	0	25,00	75,00	0,00	25,00	75,00	0,00
1-4,5-0	1	4,5	0	18,18	81,82	0,00	20,00	80,00	0,00
1-6-0	1	6	0	14,29	85,71	0,00	15,00	85,00	0,00
1-3-0,15	1	3	0,15	24,10	72,29	3,61	25,00	71,25	3,75
1-4,5-0,15	1	4,5	0,15	17,70	79,65	2,65	20,00	77,00	3,00
1-6-0,15	1	6	0,15	13,99	83,92	2,10	15,00	82,75	2,25
1-3-0,3	1	3	0,3	23,26	69,77	6,98	25,00	67,50	7,50
1-4,5-0,3	1	4,5	0,3	17,24	77,59	5,17	20,00	74,00	6,00
1-6-0,3	1	6	0,3	13,70	82,19	4,11	15,00	80,50	4,50

(*) El contenido de glicerina mantiene los porcentajes seccionados respecto al valor de base seca (0%,15% y 30%). En la columna se presentan los porcentajes de glicerina en la mezcla total.

La preparación del material para las diferentes etapas del proyecto (exploración del rango de procesamiento, ajuste de variables en bancos de pruebas y fabricación de dispositivos de prismas rectangulares), se realizó con el siguiente protocolo (Ver Anexo C):

- Pesaje de las materias primas.
- Homogenización de materiales con agitador magnético por 10 minutos.
- Calentamiento y agitación hasta alcanzar el estado de gelatinización de cada mezcla.
- Vertimiento del material en tanque reservorio.
- Instalación de todos los componentes (dispositivo de extrusión, tanque reservorio, sistema de control de velocidad, pistola de calor y/o brazo robótico, entre otros elementos).

- f. Pruebas de caracterización posteriores (evaluación dimensional, determinación de resistencia mecánica compresiva y transporte de compuesto activo).

Para el pesaje de las mezclas se utilizó una balanza analítica marca: Shimadzu, modelo: UW620H, con un nivel de precisión de fábrica de 0,001g. Para comprobar el margen de error se realizó una comprobación por medio de masas graduadas, del laboratorio de metrología de Universidad Nacional de Colombia- Sede Bogotá.

El agitador magnético con control de temperatura Marca: LABTECH, Modelo: LMS-1003, fue implementado para obtener las diferentes mezclas. La agitación se mantuvo en un rango aproximado de 540 rpm. La temperatura de la placa se ajustó a una velocidad de 20 °C/min, registrado con una termocupla “Tipo J” conectada a un multímetro digital (marca: UNI-T, modelo: UT33C). En el Anexo B se encuentran los parámetros más relevantes para la gelatinización de cada mezcla, cuyos datos fueron obtenidos durante la preparación de cada gel en las etapas experimentales de: bancos de prueba y plataforma experimental robotizada de AM por extrusión.

3.3 Bancos de prueba

En general para todos los ensayos en los bancos de pruebas, se implementó el tanque reservorio y extrusor, diseñados con sistemas de control predefinidos.

El tanque reservorio, está constituido por un tubo de cloruro de polivinilo – PVC, de 33 mm de diámetro y 500 mm de longitud, con una resistencia a la presión de 2,17 MPa (21,7 bar). Se pudo constatar la estabilidad de la temperatura de algunas mezclas por más de 48 horas, por medio de la termocupla “Tipo J” conectada al multímetro digital, aunque para efectos de todas las pruebas se procuró mantener el material dentro del tanque por un periodo menor a 4 horas.

Las mezclas son impulsadas hacia el extrusor por medio de un émbolo de nylon en el interior del tubo de PVC. A su vez el émbolo es empujado por un flujo de aire proveniente de un compresor (marca: Ingersoll Rand de 7,5 HP y presión máxima de 1,034MPa), y controlado por un manómetro con regulador, marca Italmanometri-Cavriago (rango de

control 0 a 1,2 Mpa). Se pudo comprobar el movimiento del émbolo dentro del tubo, sin ningún material, a un nivel de presión “P1” de aproximadamente $0,12 \pm 0,03$ Mpa, pero experimentalmente para procesar las mezclas se seleccionaron los niveles de presión “P2” = $0,2 \pm 0,03$ MPa y “P3” = $0,3 \pm 0,03$ MPa.

El sistema de extrusión marca WASP (v1.0), cuenta con boquillas intercambiables de ajuste “Luer Lock”, con diámetros de salida interno entre 0,21-1,55 mm. Fue necesario seleccionar la boquilla que mejor comportamiento presentaba para el conjunto de mezclas propuestas, eligiendo finalmente una boquilla de 0,84 mm de diámetro (sección: “4.1. Selección Condiciones Preliminares”). En la cámara de extrusión, el flujo es transportado hacia la boquilla, por medio de un tornillo sin fin de hilo afilado, con una longitud de 70 mm, diámetro externo de 5,2 mm, diámetro interno de 3,3 mm y un paso 3,3 mm.

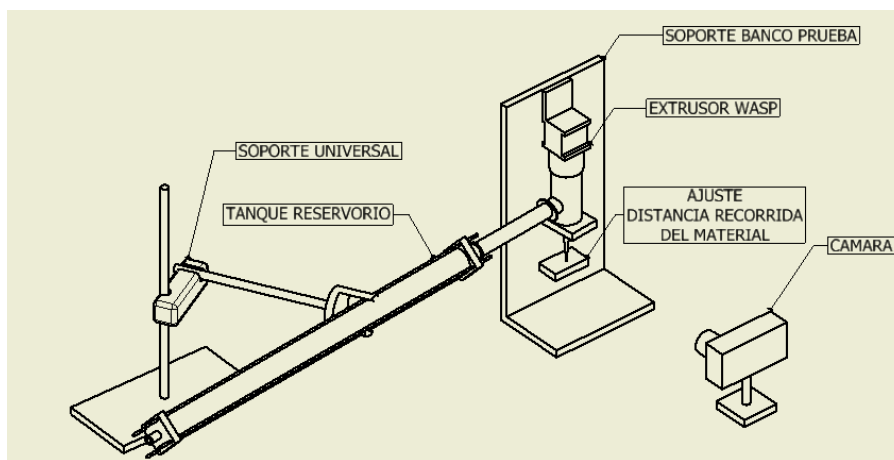
El movimiento del tornillo se produce mediante un servomotor (también conocido como “stepper motor”), marca Pamoco P42-2H-2-A-168-4, con una capacidad de torque de 33 N.cm, controlado por un microcontrolador Arduino ref: “ONE” junto con un circuito ´driver´ bipolar A4988, y una interfaz desarrollada en LabView 2016, con lo cual fue posible variar la velocidad del motor en 5 niveles. En la sección “4.3: Definición del proceso” se presenta con más detalles las características del controlador.

Para el desarrollo de los análisis con los bancos de pruebas, se acuerda como metodología, empezar por el nivel más bajo de presión para el procesamiento de las mezclas “P2” (0,2 MPa) y el menor nivel de velocidad “V5” (ver sección: “4.2.2. Control de Velocidad del material extruido”), hasta estabilizar el flujo de salida de las mezclas por un periodo de tres minutos, luego se capturan los datos por triplicado (velocidad de salida, diámetro y tasa del material extruido), y progresivamente se aumentan los niveles de velocidad hasta el máximo valor “V1”, después se limita la salida del material por un periodo de cinco minutos en un nivel de velocidad “V5” (con la misma presión “P2”), luego se ajusta el manómetro al nivel de presión “P3” (0,3 Mpa), y se capturan los resultados por cada nivel de velocidad incrementalmente.

3.3.1 Medición de la velocidad del material extruido

Con el fin de identificar la velocidad de salida del material a través del extrusor, se diseñó un banco de pruebas, que permitió ajustar el rango de operación del equipo, para mantener las condiciones de salida de flujo aproximado entre las diferentes mezclas preparadas. A continuación se muestra el esquema del sistema de pruebas (Figura 3):

Figura 3. Esquema Banco de Pruebas para la Velocidad de extrusión



Para la conformación del banco de pruebas, se fijó el dispositivo extrusor al soporte de acrílico diseñado para dicho fin. Alineado perpendicularmente a la salida de la boquilla, se fija una cámara Kodak C1550 (Resolución: 16 mega pixeles, acercamiento: 5X y Velocidad fotograma: 25 cuadros/segundo), con la cual se registra la salida del material en un recorrido de 10 mm de distancia respecto a la boquilla del extrusor, para cada una de las cinco velocidades del motor y los dos niveles de presión: “P2” = 0,2 MPa y “P3” = 0,3 MPa. Durante la prueba se registró por triplicado la velocidad del motor para cada mezcla, con un tacómetro Marca: Shimpo, Modelo: DT-209x.

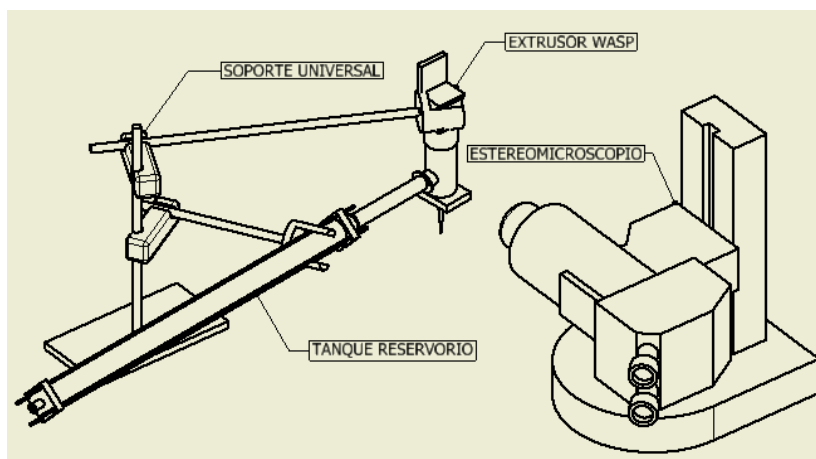
Finalmente cada video de la prueba se analizó mediante el software Tracker (v5.0.7), para determinar la velocidad de salida del material a lo largo de su recorrido, contrastado con un patrón milimétrico instalado en el banco de prueba. Se tomaron tres muestras por cada

tipo de mezcla, velocidad y presión. Los resultados obtenidos se encuentran en la sección “4.2.2. Control de Velocidad del material extruido” y de forma detallada en el Anexo D.

3.3.2 Identificación del diámetro extruido

En las pruebas preliminares de extrusión se identificó una variación en el diámetro de salida de cada uno de los almidones gelatinizados, por lo cual se evidenció la necesidad de caracterizar dicho parámetro por medio de un banco de pruebas específico. En el siguiente esquema se muestra la distribución de los elementos que conforman el banco de pruebas (Figura 4). Para el ensayo se implementó un estereomicroscopio marca: Nikon, modelo: SMZ800), ajustado a 10 aumentos, y dispuesto horizontalmente con el fin de capturar por triplicado el diámetro del material a la salida del extrusor, para cada una de las 5 velocidades del motor y los dos niveles de presión (0,2 y 0,3 MPa).

Figura 4. Esquema banco de pruebas del diámetro del material extruido



Mediante el software ImageJ (v1.52a) se capturaron las dimensiones de cada trayectoria (cinco mediciones). Con los datos obtenidos de velocidad del material extruido (v_n [mm/min]) y diámetro de extrusión de cada mezcla (D_n [mm]), es posible encontrar el valor de la velocidad del volumen de extrusión libre (V_d [mm³/s]) (Ecuación 2) (F. Yang et

al., 2018) y el volumen de extrusión por efecto de la altura de deposición o distancia entre capas “gap” (V_{gap} [mm³/s]), (Ecuación 3) (Derossi et al., 2020). Otros detalles del método son complementados en la sección: “4.2.3. Identificación del diámetro de las muestras extruidas”, y en el Anexo D se encuentran los resultados globales de la prueba.

$$V_d = \frac{\pi}{4} v_n D_n^2 \quad \text{Ecuación 2}$$

$$V_{gap} = \frac{\pi}{4} v_n h_c^2 \quad \text{Ecuación 3}$$

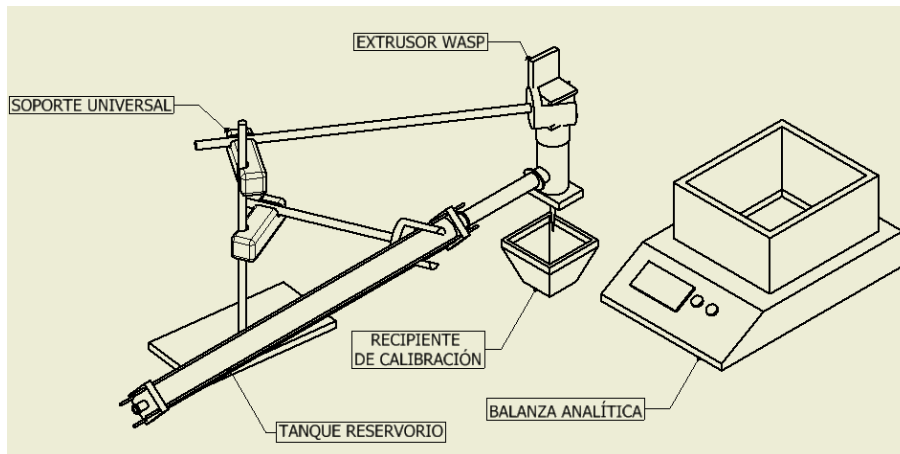
3.3.3 Tasa de material extruido

Con el banco de pruebas propuesto se obtuvo el rango de mezclas que mejor comportamiento presentaba en la extrusión y se caracterizó la tasa del material depositado (W_e [g/min]), en un periodo de un minuto (Ecuación 4) (Mantihal et al., 2017), por cada nivel de velocidad y presión.

$$W_e \left(\frac{g}{min} \right) = \frac{\text{Peso de material impreso (g)}}{\text{Tiempo de impresión (min)}} \quad \text{Ecuación 4}$$

El material extruido fue recolectado en un recipiente plástico, y registrado el valor de su peso en una balanza analítica (marca: Shimadzu, modelo: UW620H). A continuación se muestra el esquema del banco de prueba (Figura 5):

Figura 5. Esquema banco de pruebas para la tasa de material extruido



Los resultados generales del ensayo se muestra en la sección: “4.2.1. Tasa de material extruido”, y los resultados detallados se presentan en el Anexo D. Una vez es definido el conjunto de mezclas y sus respectivos parámetros de ajuste (para homogenizar los parámetros de extrusión por cada grupo de almidón de yuca y maíz), se comprueba nuevamente la cantidad de material depositado, previo a la manufactura de los dispositivos, y se contrasta con los resultados del banco de pruebas, con el propósito de ajustar la presión del manómetro.

3.4 Plataforma experimental robotizada de AM por extrusión

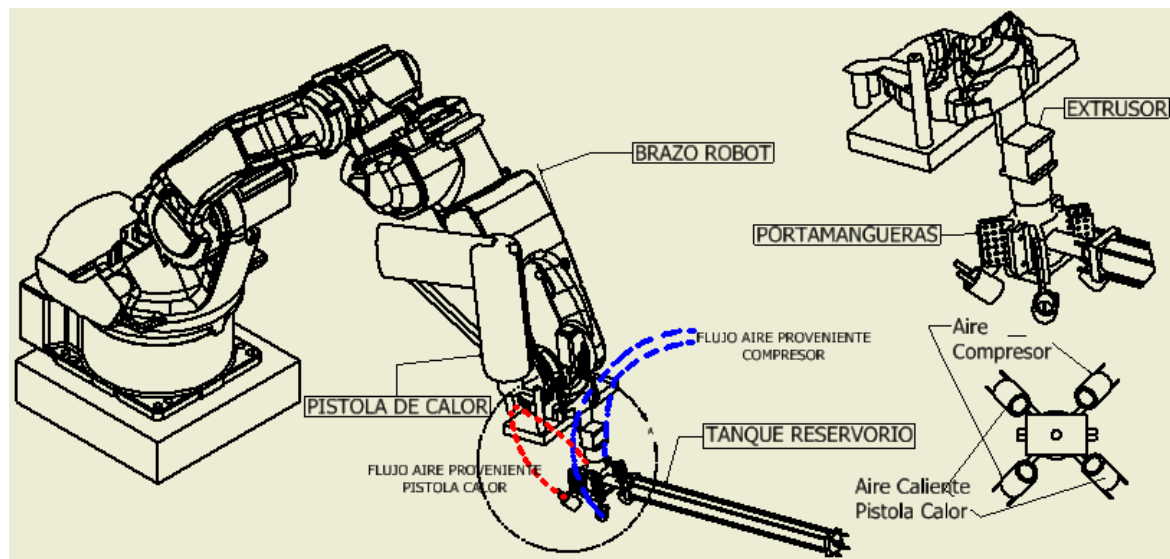
El sistema de AM por extrusión robotizada, incorpora muchos de los dispositivos mencionados anteriormente en los bancos de prueba, ya que el objetivo primordial de estas pruebas preliminares consistió en aislar los efectos del mecanismo del extrusor para el control de las diferentes mezclas. Se propuso inicialmente la construcción de prismas rectangulares (con base cuadrada), cuyos ángulos de vértice forman 90°. Esta geometría fue seleccionada para la caracterización dimensional y resistencia mecánica compresiva de los dispositivos obtenidos por cada una de las 18 mezclas.

Para el sistema de AM experimental propuesto en la investigación, se instaló el tanque reservorio, equipo de extrusión WASP y demás componentes, en un brazo robótico marca: YASKAWA, modelo MOTOMAN-MH6. El equipo robótico tiene la capacidad de cargar hasta 6 kg de peso, ideal para todos los componentes que se requerían instalar en la plataforma.

Por medio del manipulador remoto del brazo robótico: “Teach pendant” (Ref: JZRCR-YPP01-1), se definió una macro para la conformación del patrón del prisma rectangular, construido en función del diámetro obtenido por cada tipo de almidón, en la sección “4.3.3. Sistema de posicionamiento por brazo robótico”, se presenta las condiciones para la configuración de la macro.

También en las pruebas preliminares de fabricación de los dispositivos, fue evidente la necesidad de desalojar parte de la humedad depositada, durante la extrusión de las trayectorias y construcción del prisma rectangular, por lo cual se fabricó una armadura porta mangueras adaptada al sistema de extrusión (mediante la impresora Stratasys, Eden 260V, con tecnología “polijet”), para sujetar dos mangueras derivadas de una pistola de calor (marca: Stanley, 1800W, con un rango de temperatura de 50-450 °C y capacidad de flujo de aire de 300-500 L/min), y dos mangueras provenientes directamente del compresor. En el siguiente esquema se muestra el diseño del sistema porta-mangueras en el extrusor y brazo robótico (Figura 6).

Figura 6. Esquema de la instalación del proceso experimental de AM Robotizado



El flujo de aire caliente proveniente de la pistola de calor, fue transportado a través de mangueras, cuyas salidas se ubicaron adyacentes a la punta de la boquilla, ajustando la temperatura y la velocidad de aire (V_{air}), en: 45 ± 5 °C y $2 \pm 0,3$ m/s, respectivamente. El flujo de aire proveniente del compresor se ajustó a una velocidad de $3 \pm 0,5$ m/s. Las velocidades del aire a la salida de las mangueras se registraron mediante un anemómetro digital (marca: Lutron, modelo: LM-81AM), y las temperaturas se obtuvieron con la termocupla “Tipo J” conectada al multímetro digital (marca: UNI-T, modelo: UT33C). Con

el fin de ajustar la distribución de las dos corrientes de aire caliente proveniente de la pistola de calor, y evitar concentraciones de temperatura a lo largo de las mangueras, se implementó una pistola infrarroja marca: FLIR, Modelo: i40.

3.5 Construcción de los dispositivos

De los datos obtenidos en los bancos de pruebas y las condiciones de programación de las macros con el “TeachPendant”, es posible identificar el tiempo de fabricación calculado (t_f [min]) (Ecuación 5) y el peso teórico de cada dispositivo (W_t [g]), (Ecuación 6) (Derossi et al., 2018), posteriormente contrastados con los valores obtenidos durante las pruebas. Basado en las indicaciones de la sección “4.3.3. Sistema de posicionamiento por brazo robótico”, se especifican los parámetros principales de cada una de las siguientes ecuaciones, para la construcción de los prismas: número de primitivas (N), distancia entre trayectorias (a), número de capas (par e impar) a construir (M), velocidad de salida del material (V_n) y tasa de material extruido (W_e).

$$t_f = \frac{2aN(1+((2N+1)(2M))}{v_n} \quad \text{Ecuación 5}$$

$$W_t = \frac{W_e * t_f}{60} \quad \text{Ecuación 6}$$

Una vez obtenidos los dispositivos, se pesan en una balanza analítica (marca: Shimadzu, modelo: UW620H). Luego las muestras son dispuestas en un horno de convección forzada (marca: Shimadzu, modelo TCE-N300), preparado a una temperatura de 50°C. Se registra el cambio del peso de los dispositivos cada hora, por un periodo de 9 horas. De dicha etapa es posible determinar el porcentaje de humedad final de cada grupo de dispositivos, y la curva de secado (ver Anexo E).

Posteriormente las muestras se introducen en un desecador, diseñado y construido para dicho fin, controlando la humedad interna mediante esferas de “silica gel” (con indicador de humedad), verificando la humedad y temperatura interna, con un termo-higrómetro (marca: KTJ, modelo: TA318). La humedad relativa dentro del desecador se mantuvo en

un rango de 40 ± 6 % de HR. Finalmente se extraen los dispositivos del desecador para la caracterización dimensional y mecánica.

3.6 Caracterización de los dispositivos

Una vez se han realizado todas las pruebas para ajustar los parámetros del proceso de AM por extrusión robotizada, y se han obtenido los dispositivos de biopolímero, se evalúa el comportamiento dimensional y mecánico de todas las muestras, posteriormente se examina la capacidad de transporte del compuesto activo en los dispositivos que presentaron la mejor respuesta de esfuerzo mecánico compresivo. A continuación se presentan las condiciones de los métodos y equipos implementados en cada una de estas etapas de caracterización.

3.6.1 Caracterización dimensional de los dispositivos

Para cada dispositivo fabricado se capturan fotografías de las 6 caras externas, mediante la cámara Kodak C1550 (16 megapíxeles), alineando de forma paralela cada una de las caras capturadas con un calibrador pie de rey Marca Mitutoyo.

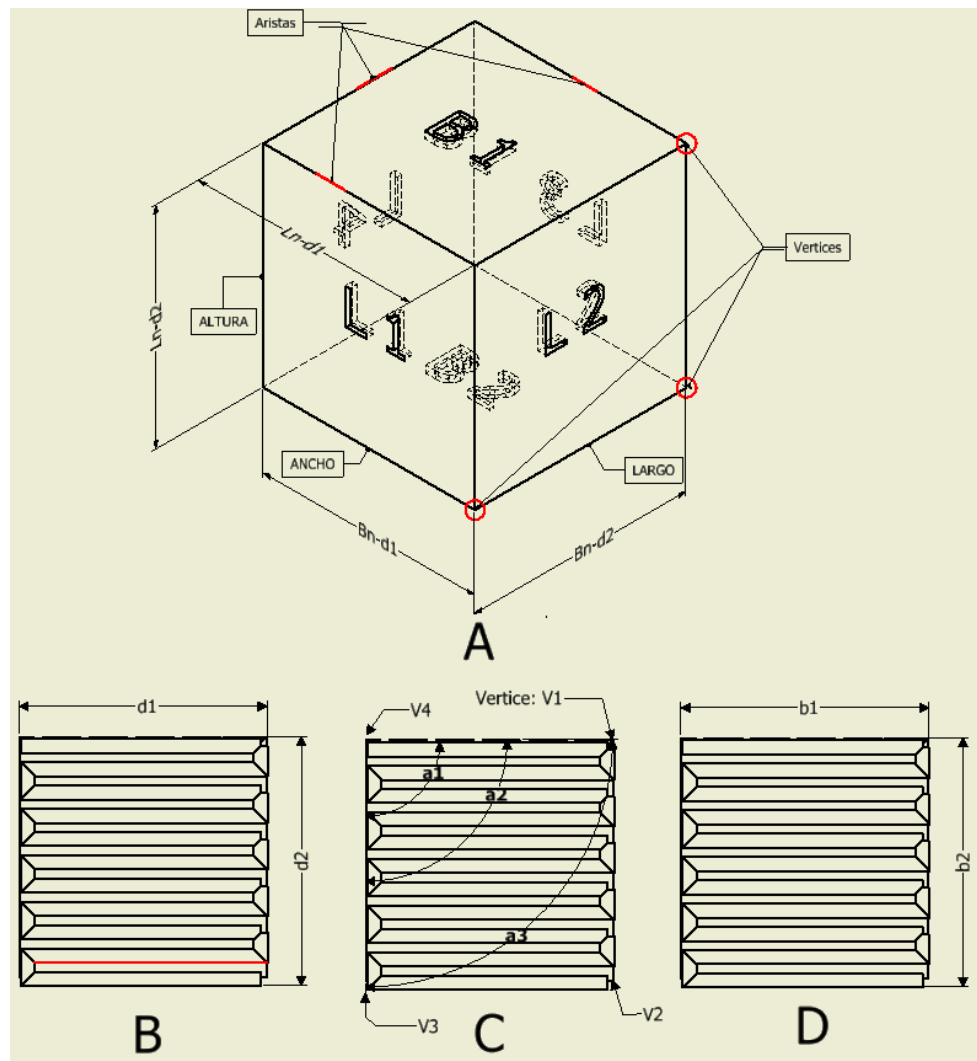
En el siguiente esquema se representa las posiciones espaciales del prisma (Figura 7. “A”): “B1”: Cara superior, “B2”: Cara inferior, “Ln”: Cara lateral ($n=1, 2, 3$ y 4). Mediante el software ImageJ (v1.52a), se capturan cinco distancias por cada una de las dos direcciones longitudinales que conforman cada cara del prisma “d1” y “d2” (Figura 7. “B”), para un total de 60 registros por cada dispositivo. La altura del prisma fue definido por la posición de las distancias “Ln-d2” ($n=1, 2, 3$ y 4), y las longitudes horizontales – “L_h” (promedio del largo y ancho del prisma) se determinan por los datos capturados en la zona del techo-base (Bn-dn) y en las caras laterales “Ln-d1” ($n=1, 2, 3$ y 4).

También se captura tres datos del ángulo que conforma cada vértice “Vn” ($n=1, 2, 3$ y 4), a un cuarto de distancia de las aristas de cada esquina (“a1”), entre los centros que

componen cada lado del respectivo vértice: “a2”, y hasta el final de cada arista “a3” (Figura 7. “C”), para corroborar la perpendicularidad entre cada lado adyacente.

Finalmente se toman registros del ángulo que conforma los lados opuesto de cada cara: “b1” y “b2” (Figura 7. “D”), para comprobar el paralelismo entre caras contrapuestas.

Figura 7. Ejemplo esquemático de la captura de datos dimensionales



3.6.2 Caracterización dimensional de las trayectorias depositadas

Mediante el equipo estereomicroscopio (marca: Nikon, modelo: SMZ800), a 50 aumentos se capturaron imágenes de la cara inferior (base) y superior (última capa construida), para obtener el ancho de las trayectorias (“D1”). También se toman fotografías de las caras laterales con el fin de identificar la altura entre capa y de esta forma aproximar el tamaño de la altura de cada trayectoria (“D2”). Posteriormente con el software ImageJ (v1.52a), se analizaron estas imágenes, para capturar 10 registros de las trayectorias, de forma aleatoria. En el Anexo F se presentan los resultados de las dimensiones de los dispositivos y de las trayectorias depositadas.

3.6.3 Ensayos mecánicos a compresión

Por medio de una máquina universal de ensayos mecánicos, marca: Shimadzu, modelo: AG-IS 250KN, con una celda de carga de 5KN, se realizaron pruebas mecánicas a compresión, basado en la norma ASTM D1621 (ASTM, 2016) y otros referentes (Ling et al., 2019; J. Liu et al., 2019). Se implementó un par de platos de acero de 150 mm de diámetro para comprimir las muestras a una velocidad de 5 mm/min. Se realizaron pruebas de forma triplicada por cada tipo de mezcla. Con el software “Trapezium 2,0” del equipo, se obtuvo el valor de la fuerza máxima y desplazamiento a dicho valor de fuerza, junto el comportamiento de las probetas a lo largo del ensayo (Anexo G).

La relación existe entre los valores de la fuerza (F) y desplazamiento (ΔL) obtenido al finalizar el ensayo, y las dimensiones del área transversal del dispositivo (A) (Ecuación 7), y altura inicial (L_0), posibilita la resistencia mecánica a compresión (σ_A) (Ecuación 8) y deformación a carga máxima (ϵ) (Ecuación 9), respectivamente. Así también es posible obtener el módulo de elasticidad (E) a partir de los resultados de la deformación y esfuerzo (Ecuación 10). El área transversal “A”, se calcula con el valor promedio de las longitudes horizontales (L_h).

$$A[mm^2] = Ancho [mm] \times Largo [mm] = (L_h)^2$$

Ecuación 7

$$\sigma_A \left[\frac{N}{mm^2} \right] = \frac{F [N]}{A [mm^2]} \quad \text{Ecuación 8}$$

$$\varepsilon \left[\frac{mm}{mm} \right] = \frac{\Delta L [mm]}{L_o [mm]} \quad \text{Ecuación 9}$$

$$E \left[\frac{N}{mm^2} \right] = \frac{\sigma \left[\frac{N}{mm^2} \right]}{\varepsilon \left[\frac{mm}{mm} \right]} \quad \text{Ecuación 10}$$

En el planteamiento del comportamiento mecánico, se planteó comparar dos tipos de respuesta de esfuerzo mecánico:

- Esfuerzo A (σ_A): Se define convencionalmente, con la relación de fuerza por el área transversal total del prisma rectangular (Ecuación 8)
- (σ_B): Se relacionó el ancho de las trayectorias depositadas (D_1) (sección: “3.6.2. Caracterización dimensional de las trayectorias depositadas”), con el número de primitivas (N) de trayectorias que conforman las capas dobles (sección: “4.3.3. Sistema de posicionamiento por brazo robótico”), junto con el promedio de las distancias horizontales (L_h) de cada dispositivo, para obtener un “área transversal aproximada” (A_a) (Ecuación 11), cuyo espacio ejerce una resistencia en la dirección de la fuerza compresiva (F), obteniendo como resultado el “Esfuerzo B”² (Ecuación 12).

$$A_a [mm^2] = (D_1)(L_h) \left(2((2N + 1) + 2) \right); \left\{ N: \begin{cases} \text{Mezclas Yuca} = 3 \\ \text{Mezclas Maiz} = 5 \end{cases} \right\} \quad \text{Ecuación 11}$$

$$\sigma_B \left[\frac{N}{mm^2} \right] = \frac{F [N]}{A_a [mm^2]} \quad \text{Ecuación 12}$$

² Se hace mención a un resultado “aproximado”, ya que debido a la complejidad y variabilidad de la geometría de las trayectorias que conforman los prismas rectangulares, los datos para el cálculo de estas variables, se obtuvieron de una caracterización dimensional promedio.

3.6.4 Determinación de la capacidad de transporte de un compuesto activo

El compuesto activo fue incorporado a los dispositivos que presentaron la mayor resistencia mecánica de esfuerzo a compresión, junto con la capacidad de mantener su configuración geométrica ante una inmersión en buffer fosfato – BF (pH de 7,5), durante 2 horas a temperatura ambiente, ya que una de las potenciales aplicaciones consiste en usar estos dispositivos para el transporte de compuestos activos en implantes de larga duración. Se propone incorporar el 1% del compuesto activo de diclofenaco sódico, respecto al peso total de los dispositivos seleccionados,

Para la preparación de la dispersión se calcula la cantidad de Diclofenaco sódico a incorporar en función del peso del dispositivo, y se mezcla con agua destilada, con un agitador magnético (marca: LABTECH, modelo: LMS-1003), a una velocidad de 50 rpm, durante 24 horas (Bartolomei et al., 2007). Posteriormente se mezcla con los demás materiales (almidón, glicerina y el restante contenido de agua destilada), hasta alcanzar la gelatinización del material, bajo las mismas condiciones para la elaboración de las demás mezclas.

Para evaluar la liberación de los dispositivos cargados con DS, se reproduce el método propuesto por la USP, caracterizando la “liberación extendida de tabletas con DS”, usando un espectrofotómetro UV-VIS (USP, 2016).

Inicialmente se prepara el medio receptor de 900 ml (por cada uno de las tres réplicas de dispositivos a evaluar), de buffer fosfato – BF a un pH de 7,5 (pH determinado mediante el equipo, marca: Orion Star, modelo: A211), contenido en vasos precipitados y acondicionado a una temperatura de $37^{\circ}\text{C} \pm 0,5^{\circ}\text{C}$, por medio de un baño termostático con agua destilada. Luego se introduce el dispositivo del biopolímero cargado con diclofenaco sódico (al fondo del recipiente), y se activan las unidades de agitación de pala, instaladas para cada recipiente (marca: Heidolph, modelo: RZR-2020), manteniendo una velocidad de 100 rpm. Posteriormente se toman muestras de 5ml de cada uno de los vasos de precipitado que contiene los dispositivos, Las muestras se analizan en: 1, 4, 7, 10 y 12 horas.

Para cuantificar el DS es necesario realizar las curvas de calibración mediante la “solución blanco” del ensayo (por triplicado), se debe calcular el peso de diclofenaco sódico a mezclar con 100ml de solución madre de medio buffer fosfato - BF. Posteriormente se toman muestras de 1, 3, 5, 7 y 9 ml, mezclando cada alícuota en 100 ml de BF.

La cuantificación del diclofenaco sódico tanto de las “soluciones blanco” y del medio donar, se realizó con un espectrofotómetro UV-VIS (marca PG Instruments Ltd., Modelo: T70), a una longitud de onda de 276nm (USP, 2016). Luego con el software “UVWin” del equipo, se determinan las absorbancias.

Con una hoja de cálculo elaborada en Excel, se realiza una gráfica de concentración y absorbancia, obteniendo la ecuación de la recta para cada conjunto de datos (Ecuación 13), donde: “y” es la respuesta en la gráfica, “a” es el intercepto, “b” la pendiente de la curva y “x” la concentración, determinando el porcentaje de diclofenaco liberado por cada dispositivo a lo largo del ensayo.

$$y = b * x + a$$

Ecuación 13

En la sección: “6.1. Capacidad de transporte”, se presentan los resultados obtenidos en las pruebas de liberación del compuesto activo.

3.6.5 Medición de propiedades reológicas

Se realizó una evaluación de reología a una mezcla en estado gelatinizado, cargado con DS, con la finalidad de identificar la viscosidad de la mezcla seleccionada, en las condiciones de procesamiento en el dispositivo extrusor. Las pruebas se desarrollaron en un equipo marca: Discovery, modelo: HR2-Hybrid rheometer, con el software de análisis TRIOS (V.4,5.1.42498). Se preparó 100 ml de mezcla, con DS.

A continuación se muestran el protocolo desarrollado para estas pruebas. En la sección “6.2. Caracterización de la mezcla y dispositivos cargados”, se muestran los resultados de la prueba y en el Anexo H se encuentra los diferentes resultados de la prueba.

- Barrido de tiempo a 25°C, a 180 segundos, con una deformación de 0,11% y frecuencia angular de 10 rad/s.
- Barrido de amplitud a 25°C, con una frecuencia angular de 10 rad/s, con un rango de deformación de 0,1 a 100%.
- Barrido de tiempo a 25°C a 60 segundos, con una deformación de 1%, frecuencia angular de 10 rad/s
- Barrido de frecuencia a 25°C, con deformación de 1%, y frecuencia angular en el rango de 200 - 0,2 rad/s
- Barrido de flujo a 25°C, con un rango de velocidad de corte de 0,1 a 1000 [1/s]

3.7 Metodología para el análisis estadístico

El análisis estadístico se basó en un diseño experimental de tres factores balanceados: “2x3x3”, para un total de 18 tratamientos, con diferentes niveles de repeticiones por cada factor. En la siguiente Ecuación 14 se presenta el modelo estadístico del diseño experimental (Montgomery, 2012), donde τ_i es el efectos producidos por el nivel i-ésimo del factor A ($\sum \tau_i = 0$), y β_j , por el j-ésimo del factor B $\sum \beta_j = 0$. $(\gamma)_{ij}$, y $(u)_{ijk}$, son los efectos producidos por la interacción A-B y A-B-C (por el nivel k-esimo).

$$Y_{ijk} = \mu + \tau_i + \beta_j + \gamma_{ij} + u_{ijk} ; \begin{cases} i = 1, 2, \dots, a \\ j = 1, 2, \dots, a \\ k = 1, 2, \dots, n \end{cases} \quad \text{Ecuación 14}$$

El objetivo del estudio estadístico consistió en verificar si los factores: “tipo de almidón” (2 niveles), “% de almidón” (3 niveles) y “% de glicerina” (3 niveles) (Tabla 9), afectaban la respuesta mecánica y dimensional de los dispositivos.

Tabla 9. Factores y niveles de respuesta

Tipo de almidón (Almidón)	Porcentaje de almidón (%Almidón)	Porcentaje de Glicerina (%Glicerina)
- Yuca (Y) - Maíz (M)	25% (1-3) 20% (1-4,5) 15% (1-6)	0 0,15 0,3

La hipótesis de investigación estadística se plantea por cada categoría de variable de respuesta (dimensional y mecánica).

1. La respuesta mecánica no es afectada por el tipo de almidón, el % de almidón y el % de glicerina.
2. La respuesta dimensional no es afectada por el tipo de almidón, el % de almidón y el % de glicerina.

Mediante procedimientos estadísticos se rechaza o aprueba la hipótesis, por cada una de las siguientes variables de respuesta.

- Respuesta Mecánica
 - Esfuerzo-A (Modelo 1)
 - Esfuerzo-B (Modelo 2)
 - Deformación (Modelo 3)
- Respuesta Dimensional-Geométrica
 - Altura (Modelo 4)
 - Longitud horizontal (Modelo 5)
 - Ángulo entre vértices (Modelo 6)
 - Angulo entre caras (Modelo 7)

Respecto al muestreo por cada tipo de mezcla, fueron dispuestas 3 muestras por cada respuesta de las pruebas mecánicas. Y en las pruebas dimensionales de los dispositivos se fijaron en función de la rigurosidad de cada análisis: Ángulo entre caras (36 muestra), Ángulo entre vértices (216 muestras), Altura (60 muestras) y distancia horizontal (ancho y espesor) (120 muestras).

La evaluación de los parámetros, se realizaron con el software R (v3.5.3). En general los modelos para evaluar la respuesta mecánica, se ajustan a un análisis parametrizado. A continuación se describe el método propuesto para determinar el efecto de los factores sobre las variables de respuesta mecánica.

- a. Definición de las hipótesis
- b. Descripción inicial de los efectos sobre cada factor individual mediante un gráfico de efecto univariado
- c. Determinación de la varianza: Se realiza un análisis de varianza Anova de tres vías
- d. Análisis post hoc: Test de Dunn, con un nivel de confianza de 95%, efectos de cada factor

Por su parte las variables dimensionales y geométricas, se evaluaron con modelos estadísticos no parametrizados, A continuación se describe el método para el análisis estadístico de las dimensiones:

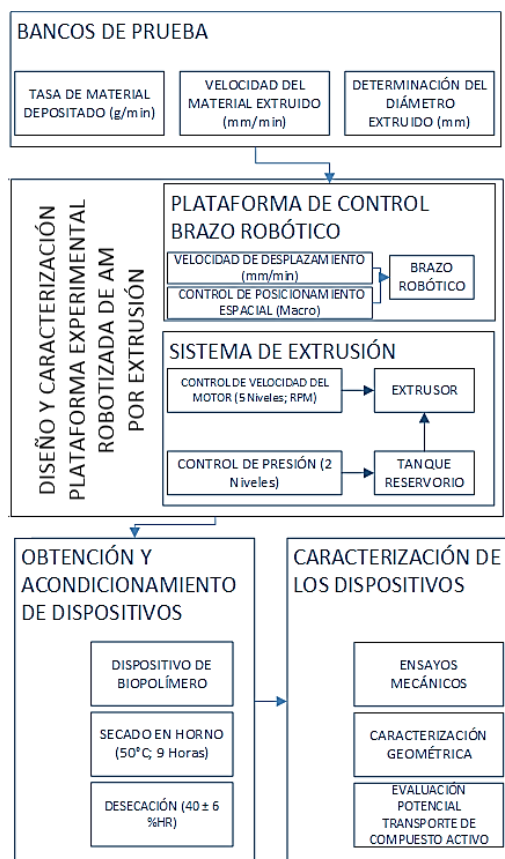
- a. Definición de las hipótesis
- b. Descripción inicial de los efectos de los factores individuales, mediante un gráfico de efecto univariado
- c. Aplicación del modelo no parametrizado, Kruskal Wallis
- d. Análisis post hoc: Wilcoxon con ajuste de Bonferroni en los p-valores, con un nivel de confianza de 95%

3.8 Síntesis del proceso investigativo

En el siguiente esquema (Figura 8), se presenta el conjunto de etapas que conllevaron el proyecto de investigación, partiendo del estudio exploratorio de los alcances del almidón gelatinizado como medio para la construcción de formas aproximadas a sólidos tridimensionales, a través de la manufactura aditiva por extrusión, y definición de parámetros iniciales del proceso con los bancos de prueba. Posteriormente se manufacturaron los dispositivos de biopolímero de almidón, con el ensamble de la plataforma experimental robotizada por extrusión.

Después se acondicionó y caracterizó la respuesta dimensional y mecánica de los dispositivos. Finalmente se evalúa el potencial transporte de un compuesto activo incorporado en un dispositivo seleccionado.

Figura 8. Proceso metodológico del proyecto de investigación



4. Caracterización y respuesta del proceso

Uno de los objetivos del proyecto de investigación consistía en presentar un proceso con el cual realizar dispositivos de biopolímeros de almidón, mediante la técnica de AM. A continuación se describe el desarrollo progresivo que permitió la realización de la plataforma experimental robotizada de AM por extrusión, partiendo de las experiencias alcanzadas durante las fases exploratorias, mediante los bancos de prueba, integración de diferentes componentes y finalmente la producción de los dispositivos de biopolímeros.

4.1 Selección de condiciones preliminares

Para la selección de las diferentes mezclas, se realizaron comparaciones de cada almidón de forma independiente, como fue descrito en la sección: “3.2. Selección y preparación de mezclas”. La capacidad de auto soporte de las mezclas, se determinó inicialmente de forma manual (Figura 9), usando una jeringa de 50ml con sujeción Luer-Lock, sobreponiendo una red de dos trayectorias extruidas, y contrastando los resultados con tres boquillas de diferentes diámetros: 0,41 mm, 0,84 mm y 1,2 mm.

Figura 9. Evaluación de la capacidad de auto soporte preliminar



Las mezclas con un alto contenido de humedad tendían a perder su forma inicial o dispersarse, mientras las mezclas con bajo porcentaje de humedad se atascaban o requerían una alta presión para lograr transportar el fluido hacia la boquilla.

La evaluación cualitativa que permitió determinar la capacidad de extrusión y auto soporte, se presenta en el Anexo B (Condiciones del proceso) De los resultados obtenidos resalta la alta capacidad de auto soporte que presentan las mezclas de almidón de maíz incluso para un mayor contenido de humedad, pero en contraste el almidón de yuca presenta mejores resultados en la extrusión de mezclas con un bajo contenido de humedad. Esto puede estar relacionado con la alta retención de humedad de las estructuras de almidones gelatinizados con un bajo porcentaje de amilosa, (Hernández-Medina et al., 2008), siendo para este caso el almidón de yuca más susceptible a hincharse por su bajo contenido de amilosa respecto al almidón de maíz utilizados en este trabajo.

En la siguiente Tabla 10 se hace la conversión para la carga de cada lote de producción, partiendo de un contenido total de 210 g (capacidad seleccionada para el tanque reservorio), y ajustando las correcciones de humedad de cada almidón.

Tabla 10. Composición de las mezclas para la capacidad seleccionada

Código Mezclas	MEZCLAS MAÍZ (gr)			MEZCLA YUCA (gr)		
	S *	W	G	S *	W	G
1-3-0	60,3	149,7	0,0	60,1	149,9	0,0
1-4,5-0	48,2	161,8	0,0	48,1	161,9	0,0
1-6-0	36,2	173,8	0,0	36,1	173,9	0,0
1-3-0,15	60,3	141,8	7,9	60,1	142,0	7,9
1-4,5-0,15	48,2	155,5	6,3	48,1	155,6	6,3
1-6-0,15	36,2	169,1	4,7	36,1	169,2	4,7
1-3-0,3	60,3	134,0	15,8	60,1	134,1	15,8
1-4,5-0,3	48,2	149,2	12,6	48,1	149,3	12,6
1-6-0,3	36,2	164,4	9,5	36,1	164,5	9,5

(*) El peso de almidón, incluye el contenido de agua obtenido en las pruebas de caracterización del material (Maíz: 12.9%, y Yuca: 12.7% de humedad).

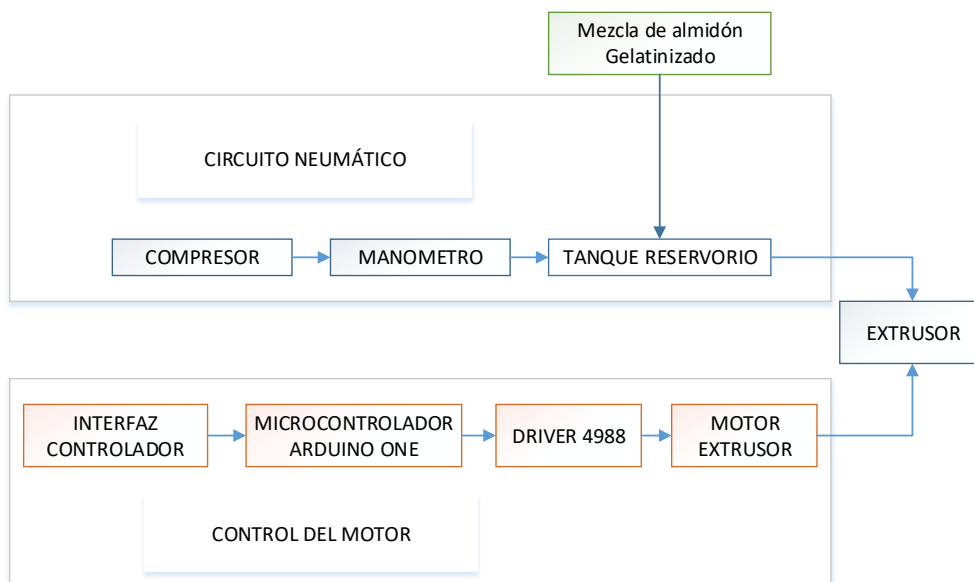
Al finalizar las pruebas fue posible seleccionar el rango de mezclas que mejor comportamiento presentaba para el tipo de proceso experimental propuesto, también acoge los grupos de composiciones para la comparación de los dos tipos de almidón evaluados. Así mismo fue seleccionada la boquilla de 0,84 mm de diámetro, para la caracterización del proceso y obtención de los dispositivos.

4.2 Bancos de prueba

Con los bancos de prueba fue posible cuantificar la tasa de material extruido, velocidad y diámetro de salida del material, para cada una de las variables de control del extrusor: (velocidad del motor y presión ejercida en el tanque reservorio). En general cada banco de prueba contiene: el equipo de extrusión (con un controlador electromecánico) y el tanque reservorio (con un controlador neumático).

La extrusión del material por fuera de la boquilla, responde a la presión ejercida por el émbolo del tanque reservorio. El control de velocidad del motor del extrusor WASP, se realiza por medio del micro controlador Arduino “ONE” y el driver “A4988”, con posibilidad de variar hasta cinco niveles de velocidad mediante la interfaz creada en LabView. En el siguiente esquema (Figura 10) se muestra la relación de estos dos sistemas y en el “Anexo I” se presenta el diagrama de bloques creado.

Figura 10. Esquema de control para la extrusión del material



4.2.1 Tasa de material extruido

El banco de pruebas fue adaptado para establecer la tasa de material extruido, durante un minuto. Se definieron las velocidades del motor extrusor y presión, con el fin de depositar un rango de material similar entre todos los tipos de mezclas (ajustando estas variables como constantes del proceso). Una vez seleccionado el conjunto de mezclas y parámetros con una respuesta similar (tasa de material y velocidad de salida extrusión), se comprueba una vez más la cantidad de material depositado (g/min), previo a la manufactura de los dispositivos, a modo de “calibración” para el ajuste de la presión en el tanque reservorio. En la siguiente Tabla 11 se muestra la tasa de material extruido, definido para el procesamiento de cada mezcla.

Tabla 11. Tasa de material extruido seleccionado por cada tipo de mezcla

Almidón de Maíz		Almidón de Yuca	
Mezclas Selectas	Tasa Extrusión (g/min)	Mezclas Selectas	Tasa Extrusión (g/min)
M 1-3-0	0,316	Y 1-3-0	0,329
M 1-3-0.15	0,328	Y 1-3-0.15	0,376
M 1-3-0.3	0,332	Y 1-3-0.3	0,367
M 1-4,5-0	0,354	Y 1-4,5-0	0,328
M 1-4.5-0.15	0,397	Y 1-4.5-0.15	0,381
M 1-4.5-0.3	0,375	Y 1-4.5-0.3	0,356
M 1-6-0	0,333	Y 1-6-0	0,339
M 1-6-0.15	0,389	Y 1-6-0.15	0,390
M 1-6-0.3	0,372	Y 1-6-0.3	0,370
Promedio	0,355	Promedio	0,360

De los datos obtenidos, se evidencia una alta similitud entre las dos tazas de material depositado, lo cual permite proponer un referente para comparar las condiciones de

procesamiento de los dos grupos de almidones. En el Anexo D se encuentra los datos obtenidos por cada condición del ensayo.

4.2.2 Control de velocidad del material extruido

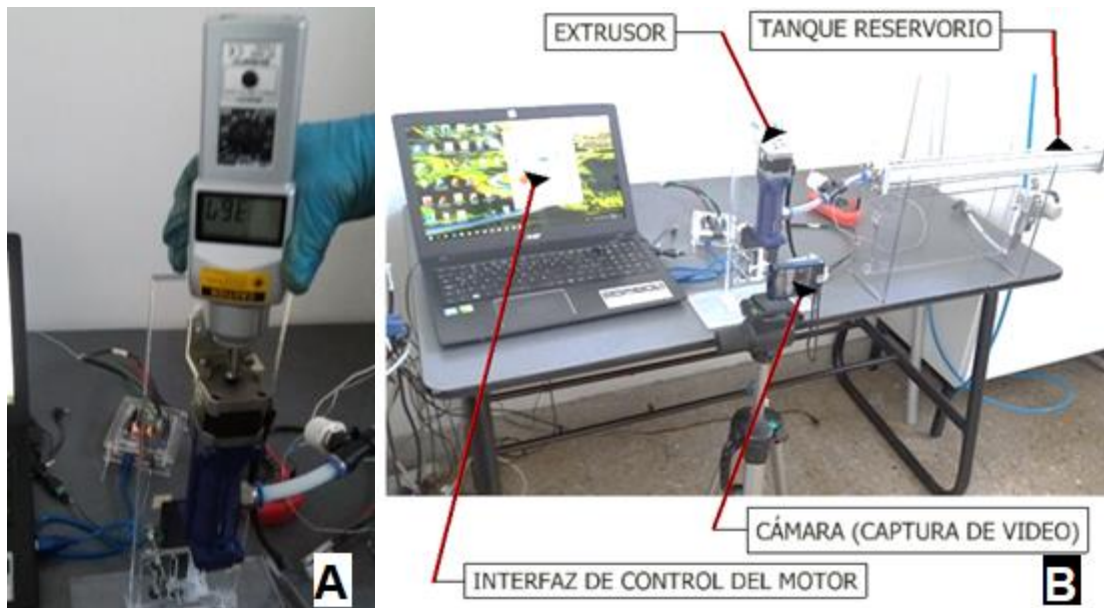
Para determinar los efectos de las diferentes mezclas sobre la velocidad del motor, se implementó un tacómetro, haciendo previamente un registro en vacío y durante el procesamiento de cada mezclas (Figura 11-A), con los cinco niveles de velocidad del motor y los dos niveles de presión del tanque reservorio. De lo anterior se pudo constatar que la velocidad del motor extrusor permanece constante para cada uno de las mezclas procesadas, variando levemente respecto a las mediciones realizadas en vacío (Tabla 12). A continuación se muestra los resultados promedio de la velocidad del motor obtenida para todas las mezclas.

Tabla 12. Velocidades registradas del motor.

Niveles de Velocidad	Datos promedio - Calibración en Vacío (rpm)	Datos promedio - Conjunto total de Mezclas (rpm)
N1	146,7	146,1
N2	73,1	73,0
N3	36,9	36,1
N4	18,5	18,0
N5	9,6	9,0

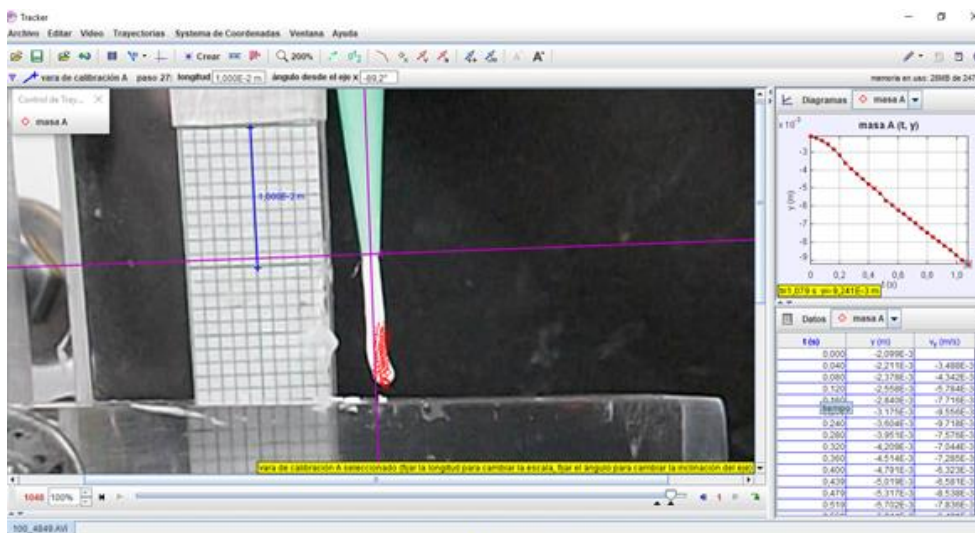
A través del banco de pruebas mostrado en la siguiente fotografía (Figura 11-B), se pudo constatar la velocidad de salida del material, a una distancia de 10 mm de recorrido desde la salida de la boquilla del extrusor.

Figura 11. Medición tacómetro (A) y banco de pruebas velocidad de extrusión (B)



Con la cámara de video se capturó la secuencia de recorrido del material, siendo posible determinar la velocidad del material a lo largo de su trayectoria mediante el software Tracker (v 5.0.7). En la siguiente imagen (Figura 12), se muestra un ejemplo del estado de post procesamiento de uno de los videos capturados.

Figura 12. Obtención de la velocidad de extrusión



En el Anexo D, se presenta los resultados de velocidad de extrusión. En las pruebas no fue posible extruir la mezcla de almidón de maíz “M-1-3-0”, para una presión “P2” (0,2 MPa), ya que el material permanecía suspendido en las mangueras que conectaban el tanque reservorio y el extrusor.

Para cada mezcla se ajustan los mismos parámetros (niveles de velocidad y presión del tanque), definidos en la obtención del rango de la tasa de material extruido, encontrando que las velocidades para cada grupo de almidón se mantienen en un rango similar, pero difieren al comparar estos grupos (velocidad promedio de las mezclas de almidón de maíz: 655,2 mm/min y almidón de yuca: 404,1 mm/min). Esta situación parece estar relacionado la alta capacidad de retención de agua o hinchamiento de las mezclas de almidón de yuca, haciendo que aumente el peso y tamaño del material extruido, y por lo tanto ocasionando el cambio de la velocidad entre los dos grupos de almidones (Mishra & Rai, 2006). En la siguiente Tabla 13 se muestran las velocidades seleccionadas al finalizar los ensayos de los bancos de prueba.

Tabla 13. Velocidades de extrusión seleccionadas por cada tipo de mezcla

Almidón de Maíz		Almidón de Yuca	
Mezclas Selectas	Velocidad Extrusión (mm/min)	Mezclas Selectas	Velocidad Extrusión (mm/min)
M 1-3-0	615	Y 1-3-0	378
M 1-3-0.15	602	Y 1-3-0.15	415
M 1-3-0.3	602	Y 1-3-0.3	408
M 1-4,5-0	641	Y 1-4,5-0	381
M 1-4.5-0.15	712	Y 1-4.5-0.15	416
M 1-4.5-0.3	701	Y 1-4.5-0.3	406
M 1-6-0	645	Y 1-6-0	403
M 1-6-0.15	738	Y 1-6-0.15	414
M 1-6-0.3	641	Y 1-6-0.3	416
Promedio	655,2	Promedio	404,1

Con esta información es posible determinar la velocidad con la cual se debe programar el movimiento del brazo robótico, para depositar la misma cantidad de material que es liberado fuera de la boquilla, y de esta forma evitar la acumulación (bajas velocidades del cabezal) o interrupciones en el flujo (altas velocidades del cabezal) (Bridgewater & Benbow, 1995; Derossi et al., 2020).

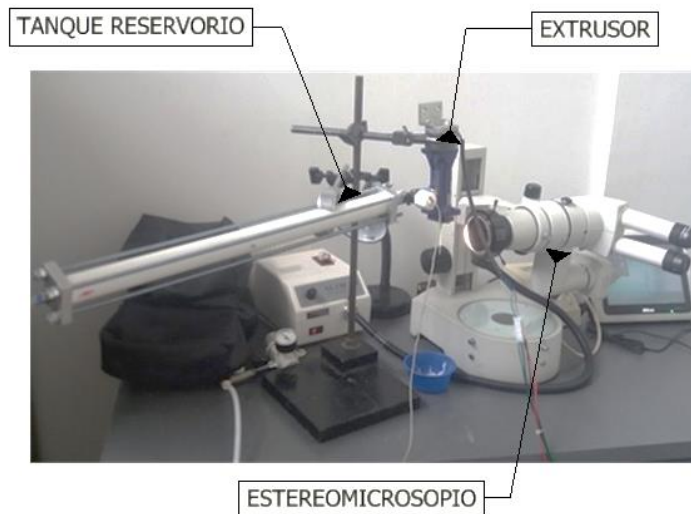
Las muestras con la asignación: “NA” (no aplica), presentaron una velocidad superior al método de registro implementado (captura de videos a 25 cuadros por segundo y post procesamiento de video mediante el software Tracker). Dicha limitación no afectó la selección de los parámetros para la construcción de los dispositivos, ya que el objetivo del análisis consistía en determinar un rango de velocidades similar para todas las mezclas de cada grupo de almidón, pero también un rango mayor de velocidad afectaba la manufactura de los dispositivos, por el nivel de escala de los elementos fabricados y el tiempo requerido para asegurar la deshumidificación del material extruido.

4.2.3 Identificación del diámetro de la mezclas extruidas

En las pruebas preliminares del sistema de manufactura aditiva por extrusión experimental con brazo robótico, se evidenciaron diferencias entre las mezclas de los dos tipos de almidones seleccionados, afectando la geometría de los patrones obtenidos cuando se extruían las trayectorias a la misma distancia. Se determinó que el almidón gelatinizado de yuca presentaba un diámetro mayor frente al almidón de maíz, haciendo que se acumulará una mayor cantidad de material.

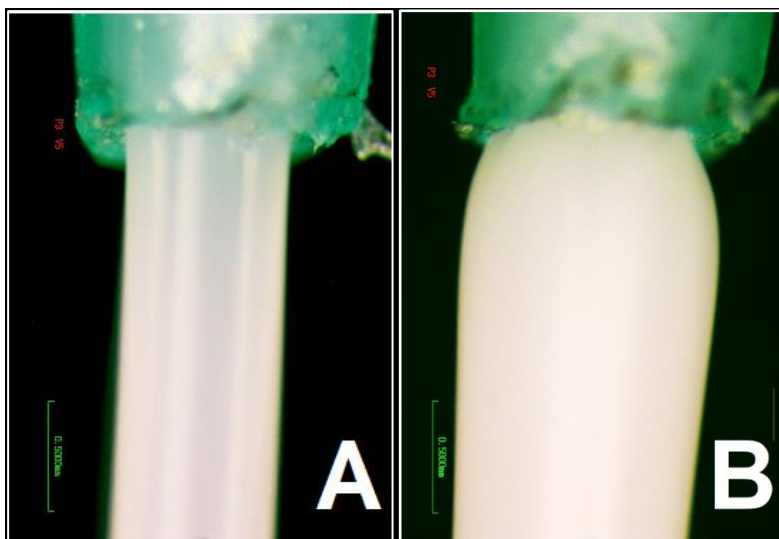
En la siguiente fotografía (Figura 13) se muestra el banco de prueba adaptado para determinar el diámetro de las mezclas a la salida de la boquilla.

Figura 13. Banco de pruebas para la determinación del diámetro del material extruido



En la siguiente imagen se muestra la extrusión de una mezcla representativa de almidón de maíz (Figura 14-A) y de yuca (Figura 14 B), a la salida de la boquilla del dispositivo extrusor. El fenómeno de expansión, especialmente efectuado por el almidón de yuca, puede explicarse mediante el modelo reológico de sistemas dispersos de almidones (Lagarrigue & Alvarez, 2001), relacionando los esfuerzos cortantes, propiedades tixotrópicas y viscoelásticas del material, producidas durante la fase de retrogradación y por efecto del proceso de extrusión (Sandoval, A., Farhat, I., & Fernández, 2007).

Figura 14. Extrusión de almidón de: (A) Maíz y (B) Yuca



Con los resultados obtenidos en este banco de pruebas, fue posible establecer la secuencia de los patrones, mediante el programa del controlador del brazo robótico “TeachPendant”, para ajustar la distancia entre trayectorias y altura entre las capas horizontales.

En la siguiente Tabla 14, se presenta los diámetros promedio obtenidos por cada grupo de almidón y tipo de mezcla. Se puede constatar que la desviación estándar de los tamaños de todas las mezclas extruidas, se encuentra por debajo del 10% del valor promedio, por lo tanto se asumió el diámetro de cada grupo como una constante para la definición de la estrategia de AM. En el Anexo D, se muestra el resultado por cada condición del proceso evaluado.

Tabla 14. Diámetro promedio del material extruido

Tipo de Almidón	Diámetro promedio (mm)	Desviación estándar (mm)
Maíz	0,796	0,046
Yuca	1,221	0,100

4.3 Definición del Proceso de AM

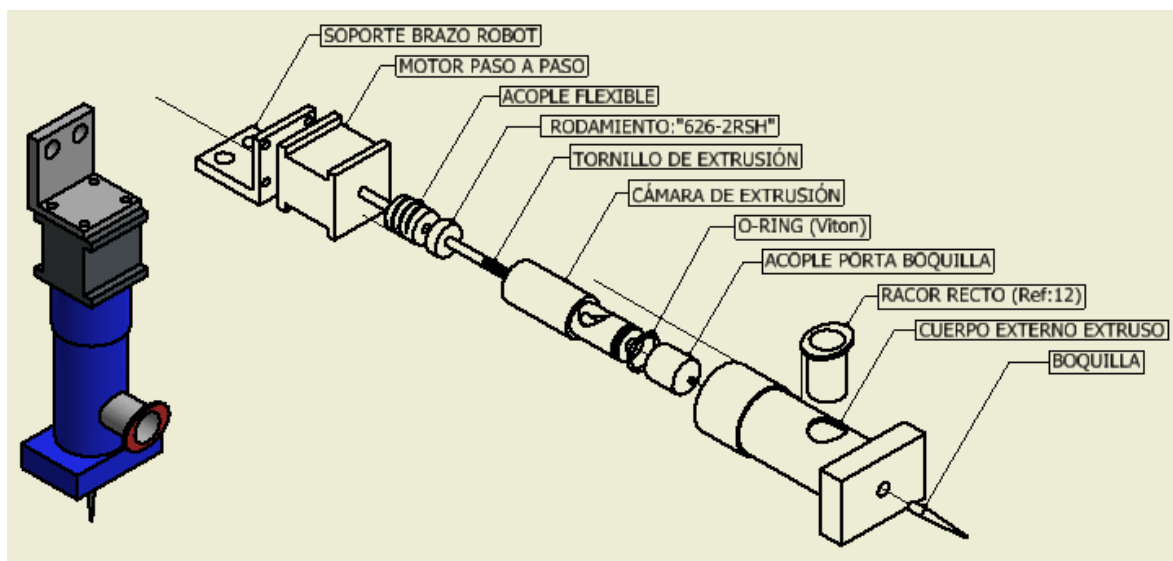
Para la extrusión de los almidones pregelatinizados y posterior obtención de los dispositivos de prisma rectangular, se dispuso de una plataforma experimental robotizada de AM por extrusión, basado en la adquisición de información lograda en los bancos de prueba. En los siguientes apartados se describe el procedimiento de configuración y adaptación de los diferentes componentes que constituyen la plataforma.

4.3.1 Sistema de Extrusión

La extrusora marca WASP, pertenece a una serie de dispositivos comerciales desarrollados inicialmente para aplicaciones por manufactura aditiva de materiales cerámicos, por la técnica denominada “Robocasting”. Para el desarrollo de las pruebas, se modificaron diferentes componentes del extrusor en su configuración inicial.

Se hizo necesario modificar la cámara interna que aloja el husillo y acople del porta boquillas, con la finalidad de generar un módulo de fácil adquisición comercial y controlar las fugas del material, debido a la alta humedad que presentaban las mezclas de almidón gelatinizado en comparación con las pastas cerámicas que podía procesar originalmente el dispositivo. En el siguiente esquema se muestra la disposición de los diferentes elementos que componen el sistema extrusor modificado WASP (Figura 15).

Figura 15. Esquema del extrusor modificado WASP



4.3.2 Controlador del motor del extrusor

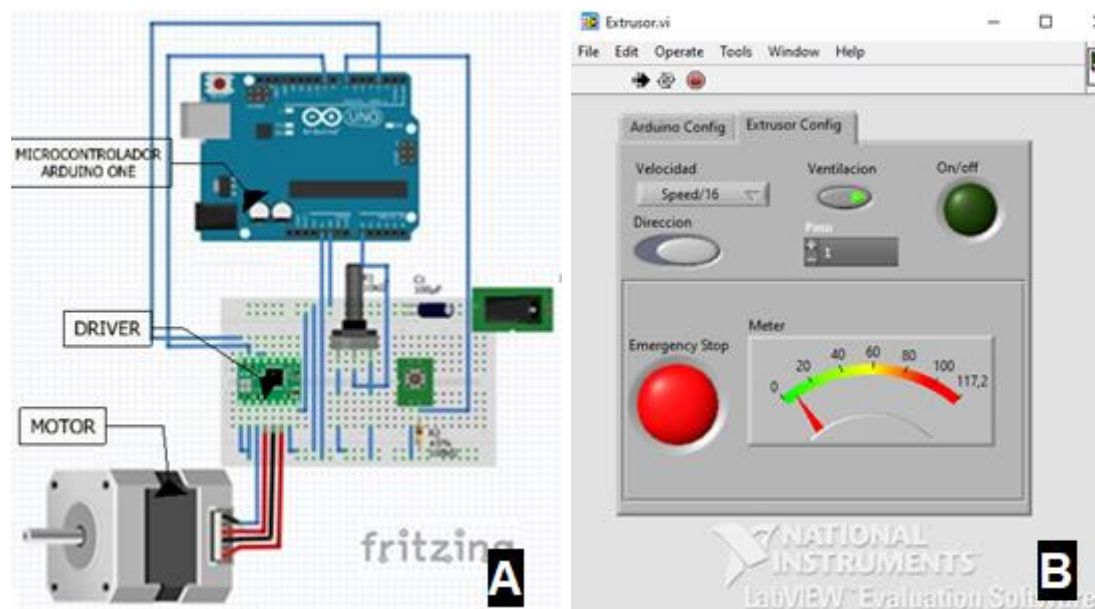
Como fue mencionado los cinco niveles de velocidad del motor fueron controlados mediante una interfaz creada en LabView, utilizando como tarjeta de datos el micro

controlador Arduino “ONE”. También se implementa el driver “A4988” para amplificar y controlar los pulsos de corriente eléctrica, requerida por el motor del extrusor, y posteriormente establecer las salidas digitales: dirección de giro y avance por paso.

Para crear la interfaz de control, inicialmente fue descargado el paquete “Arduino Toolkid” (National.Instruments, 2014), librerías requeridas para operar el microcontrolador Arduino “ONE” desde LabVIEW y el código de control de motores paso a paso desde el software Arduino (v1.8.5) (Adafruit-Industries-LLC, 2009; McCauley, 2011).

El drive “A4988” es conectado a los pines “STEP” y “DIR” del micro controlador, como también a los pines “VDD” y tierra de la fuente de alimentación lógica. La potencia de la tarjeta Arduino se realiza a través del puerto USB, con un voltaje de 5 voltios, mientras la alimentación del motor se hace de forma externa con una fuente de voltaje de 7,5 Voltios, a un amperio de corriente eléctrica (corriente directa), entre los pines “VMOT” y tierra del driver “A4988”. A su vez las bobinas del motor se conectan a los pines “1A”, “2A”, “1B” y “2B” del driver. En la siguiente imagen se muestra la instalación del circuito electrónico (creado con el software Fritzing, v0.9.3b) (Figura 16 - A).y la interfaz creada para el control de las velocidades del motor (Figura 16 - B).

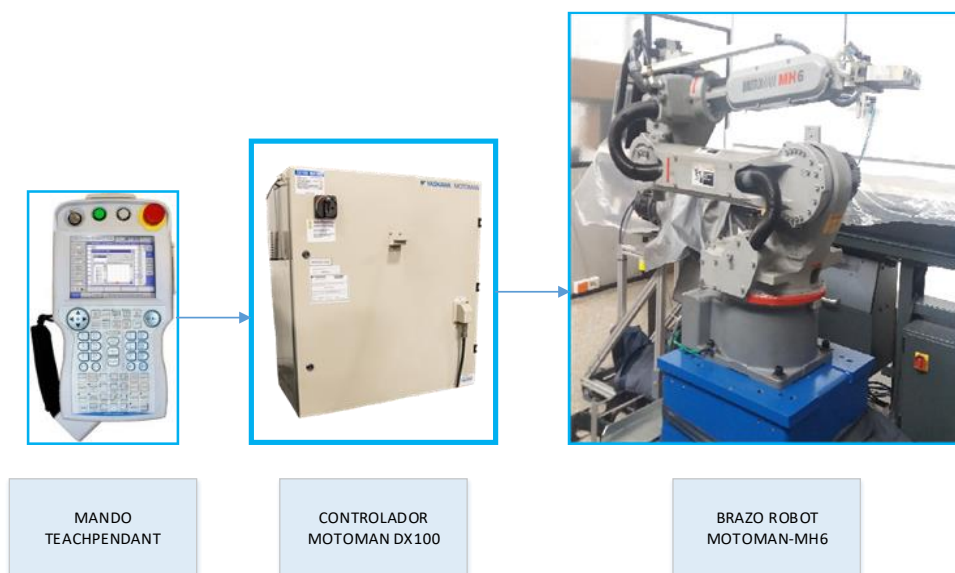
Figura 16. Esquema de la instalación del circuito (A) e interfaz del controlador (B)



4.3.3 Sistema de posicionamiento por brazo robótico

Con el fin de posicionar el sistema extrusor en sus diferentes trayectorias para conformar el patrón de prisma rectangular, y soportar el peso de los múltiples componentes que integraban la plataforma de AM (sistema de extrusión, tanque reservorio, pistola de calor, entre otros), se optó por el brazo robotizado industrial MOTOMAN-MH6, por su alto desempeño, controlabilidad y repetibilidad dimensional en su posicionamiento (± 0.08 mm). Esquemáticamente el sistema de control del brazo robótico está compuesto por los siguientes componentes (Figura 17).

Figura 17. Componentes del sistema de control del brazo robótico

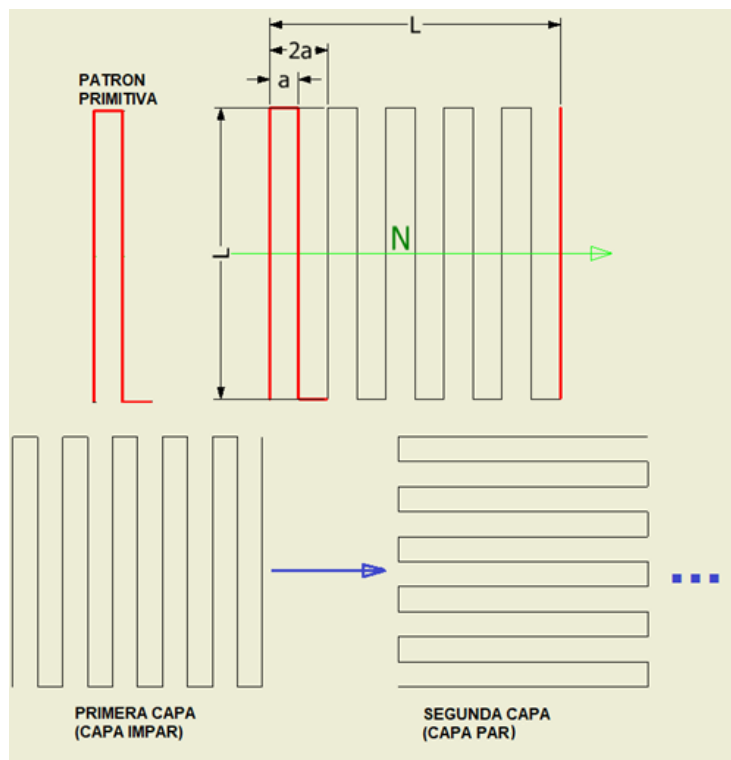


El control de la posición del brazo robótico, para la conformación de los prismas rectangulares, se realizó por medio una macro definida desde el mando “Teach Pendant”. En la siguiente figura se muestra la distribución del patrón con el que se conformó todos los dispositivos de biopolímeros de almidón (Figura 18).

Los principales parámetros para definir los comandos de la macro, son: distancia entre trayectorias (a), número de primitivas (N), longitud de las aristas horizontales del prisma rectangular " L ", la cantidad de capas dobles (par e impar) a construir (" M ") y la distancia entre capas (b). También se especifica la rotación del patrón a 90° , empezando desde el final de la última línea trazada, para conformar la siguiente capa.

La distancia de la trayectoria " a " y distancia entre capas " b ", fueron definidas a partir de los resultados del banco de pruebas para la identificación del diámetro de extrusión (sección "4.2.3. Identificación del diámetro de las mezclas extruidas"). Para el conjunto de mezclas de almidón de yuca se asumió un diámetro de trayectoria de 1,22 mm, y para las mezclas de almidón de maíz de 0,80 mm.

Figura 18. Croquis del patrón para la construcción del prisma rectangular



La apertura “a” entre trayectorias, se estableció a una distancia de tres veces el diámetro obtenido por cada grupo de mezclas (almidón de yuca: 3,66 mm y almidón de maíz: 2,4mm). La distancia “b” entre capas, para las mezclas de almidón de maíz se ajustó a la mitad del diámetro encontrado ($a/2$): 0,40 mm, mientras en las mezclas de almidón de yuca se definió una distancia de $2 * a / 5 = 0,488\text{mm}$. Todo esto como resultado de las pruebas preliminares, donde se evidenció un efecto de desprendimiento entre capas cuando la amplitud de “b” superaba dichas distancias, y una acumulación de material a una distancia menor a “b”.

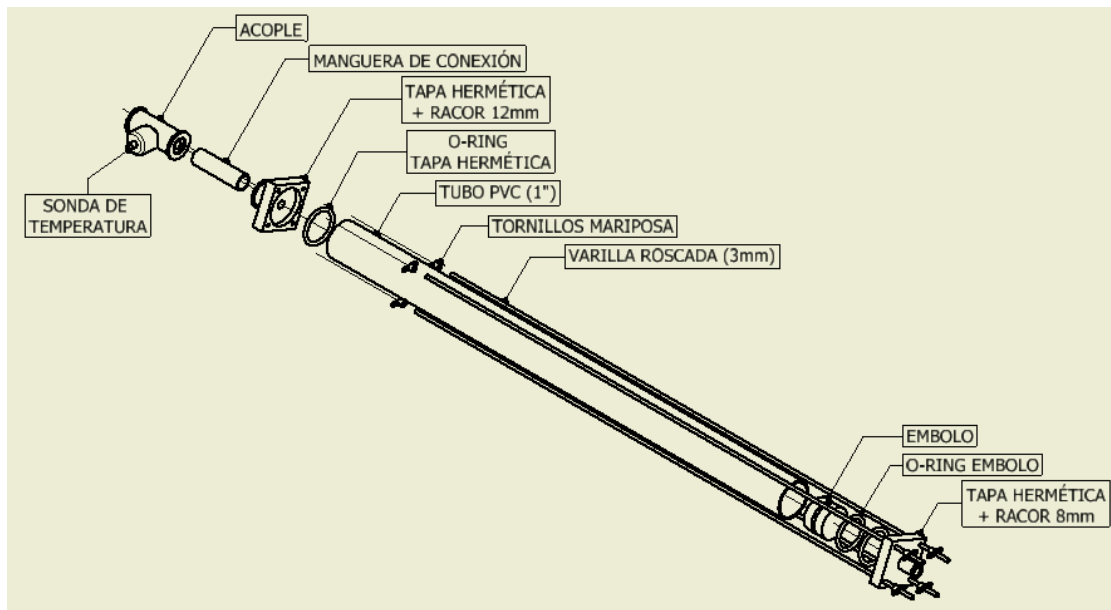
Las dimensiones longitudinales teóricas del ancho, largo y alto del prisma rectangular fueron de 25mm. Junto con el tamaño del diámetro y las condiciones antes mencionadas, se define la cantidad de primitivas o patrones elementales (Figura 18) por cada mezcla de almidón de yuca ($N=3$) y maíz ($N=5$). De esta misma forma fue establecido el número de capas verticales para el maíz ($M=31$) y la yuca ($M=26$), con lo cual se alcanza una altura de diseño del prisma de 24,8 mm (grupo de mezclas de almidón maíz) y 25,38 mm (yuca). Por su parte la longitud teórica (“L”), de las aristas que definen la base cuadrada del prisma, fueron: 24,8 mm (maíz) y 23,18 mm (yuca).

4.3.4 Componentes adicionales de la plataforma de AM

- **Tanque reservorio**

Entre los componentes originales suministrados con el sistema WASP, se tuvo que modificar el tanque reservorio, principalmente para ofrecer un mejor acondicionamiento al biopolímero gelatinizado de almidón (aislamiento térmico de las mezclas durante el procesamiento), mejorar la adaptación con el brazo robótico al reducir el volumen contenido para el tipo de geometrías a manufacturar y hacer un efectivo control del material. En el siguiente esquema se presentan los diferentes componentes que conforman el tanque en su última versión (Figura 19).

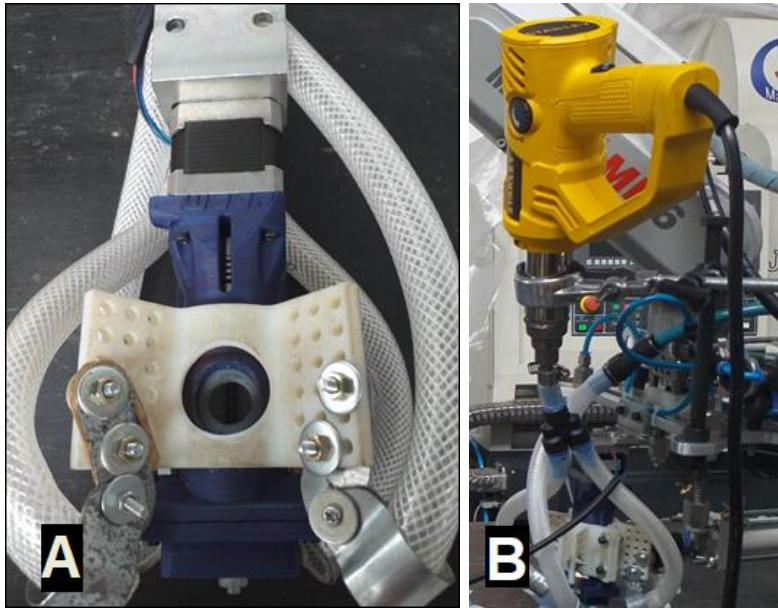
Figura 19. Esquema de los componentes del tanque reservorio instalado



Mediante una sonda de temperatura tipo “J”, instalada en el acople de conexión, entre el tanque reservorio y el extrusor, fue posible corroborar la estabilidad de la temperatura de cada mezcla del proceso. En el émbolo fue alojado un imán de neodimio con el propósito de rastrear la tasa de consumo del material dentro del tanque reservorio.

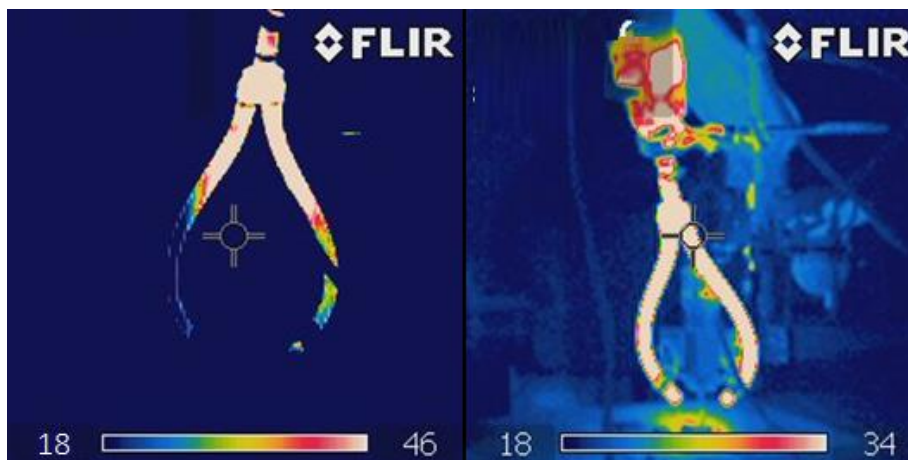
Como se mencionó en la sección “3.4. Plataforma experimental robotizada de AM por extrusión”, fue necesario instalar una pistola de calor para desalojar la humedad inicial de las trayectorias depositadas, ya que algunas mezclas con alta humedad colapsaban a poca altura (10-15 mm). Se derivaron dos salidas de aire caliente desde la pistola de calor, transportadas a través de mangueras de 12 mm de diámetro, también se derivaron dos salidas de aire proveniente del compresor. Las cuatro salidas de aire se ubicaron de forma intercalada en dirección a la boquilla del extrusor, mediante una armadura porta mangueras. A continuación se muestra la instalación de la armadura en el extrusor (Figura 20).

Figura 20. Armadura porta mangueras (A) y disposición de la pistola de calor (B)



Para comprobar la simetría de distribución del flujo de aire caliente proveniente de la pistola de calor, se implementó una cámara térmica. Como se puede observar en las siguientes imágenes (Figura 21), cuando el flujo de aire caliente a la salida de los conductos era asimétrico, se podía distinguir un desfase de temperatura entre las dos salidas de las mangueras. La temperatura obtenida por cada salida de aire también fue corroborada mediante una termocupla “Tipo J” conectada a un multímetro digital (marca: UNI-T, modelo: UT33C).

Figura 21. Ajuste de los conductos de aire caliente proveniente de la pistola de calor



Estos ajustes fueron determinantes para aumentar las características de auto soporte de las mezclas con un mayor contenido de humedad. Para la fabricación de todos los dispositivos se mantuvo el mismo protocolo de acondicionamiento.

4.3.5 Consolidación de la plataforma experimental robotizada de AM

Los dispositivos pistola de calor, tanque reservorio y extrusor, fueron instalados en el efector terminal del brazo robótico. El tanque reservorio fue sujetado en sus extremos por un sistema de guayas o cables, manteniendo la horizontalidad de su posición, a una distancia fija respecto al extrusor (la distribución espacial de los componentes fue similar al planteado en los bancos de prueba). En la siguiente imagen se muestra la adecuación de los componentes para la conformación de la plataforma experimental (Figura 22).

Figura 22. Plataforma experimental robotizada de AM por extrusión



Del conjunto total de mezclas y parámetros de extrusión (cinco niveles de velocidad del motor y dos niveles de presión), se seleccionó la tasa de material que mejor comportamiento presentó en las pruebas preliminares. En la Tabla 11 se muestra el conjunto de condiciones elegidas a partir de los resultados del banco de pruebas.

La velocidad programada del brazo robótico, para el posicionamiento del extrusor, se ajustó con los resultados obtenidos en el banco de pruebas (sección: “4.2.1. Control de velocidad del material extruido”), definido por el rango de condiciones para la selección de la tasa de material extruido. Para el grupo de mezclas de almidón de yuca se obtuvo una velocidad promedio de 655,22 mm/min, y para las mezclas de almidón de maíz una velocidad promedio de 404,11 mm/min

Con esta información fue posible calcular el tiempo de fabricación (Ecuación 5) y la cantidad de material total teórico que compondrá cada dispositivo (Ecuación 6). En las siguientes tablas se muestra los resultados para el grupo de almidón de Maíz (Tabla 15) y Yuca (Tabla 16).

Tabla 15. Valores teóricos para la fabricación de cada dispositivo de A.Maíz

Mezclas	Condiciones del proceso	Tiempo teórico de manufactura (segundos)	Material depositado (teórico) (g/min)
M 1-3-0	P3-V3	1742,0	9,17
M 1-3-0,15	P3-V5	1779,7	9,73
M 1-3-0,3	P3-V4	1779,7	9,86
M 1-4,5-0	P2-V5	1671,4	9,86

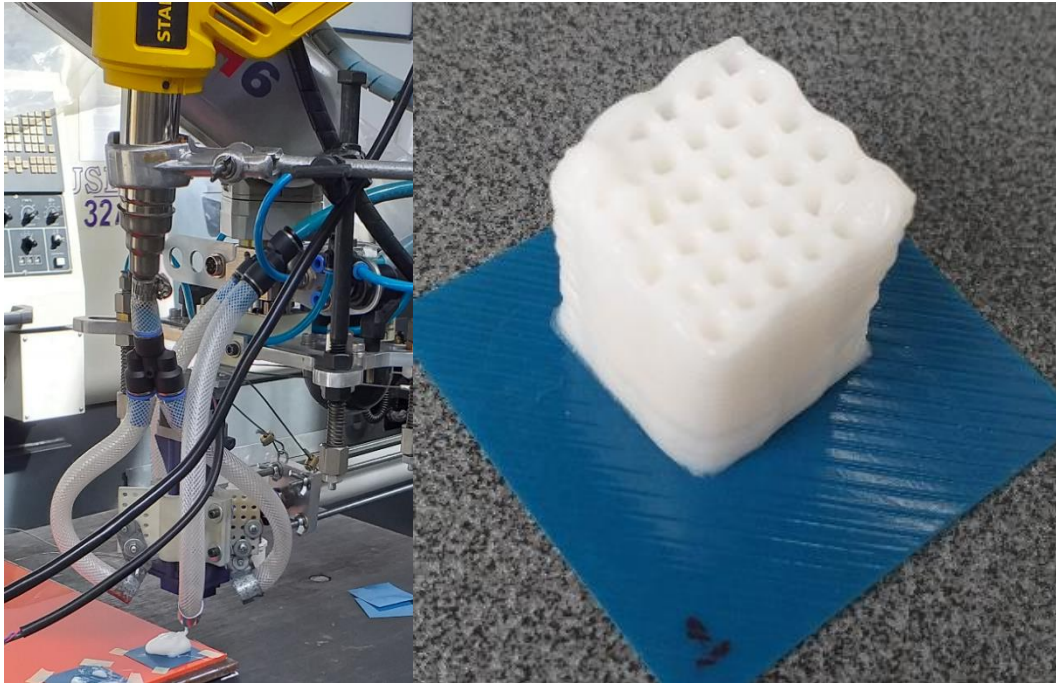
M 1-4,5-0,15	P3-V5	1504,7	9,96
M 1-4,5-0,3	P2-V2	1528,3	9,56
M 1-6-0	P2-V5	1661,0	9,22
M 1-6-0,15	P2-V5	1451,7	9,41
M 1-6-0,3	P2-V5	1671,4	10,35
Promedio		1643,3	9,68

Tabla 16. Valores teóricos para la fabricación de cada dispositivo de A.yuca

Mezclas	Condiciones del proceso	Tiempo teórico de manufactura (segundos)	Material depositado (teórico) (g/min)
Y 1-3-0	P3-V2	1450,1	7,95
Y 1-3-0,15	P3-V4	1320,8	8,28
Y 1-3-0,3	P3-V4	1343,4	8,21
Y 1-4,5-0	P3-V5	1438,6	7,86
Y 1-4,5-0,15	P2-V3	1317,6	8,37
Y 1-4,5-0,3	P3-V4	1350,1	8,02
Y 1-6-0	P3-V4	1360,1	7,68
Y 1-6-0,15	P2-V2	1324,0	8,61
Y 1-6-0,3	P2-V3	1317,6	8,13
Promedio		1358,0	8,12

En las siguientes fotografías se muestra el proceso de elaboración de uno de los dispositivos y el resultado final (Figura 23), previo al secado y conservación en el desecador.

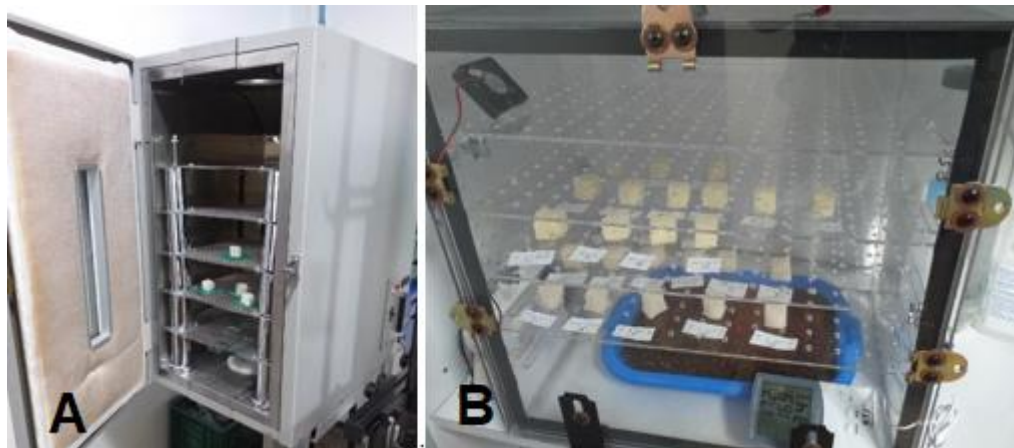
Figura 23. Proceso de elaboración de un dispositivo de biopolímero



4.3.6 Preparación de dispositivos manufacturados

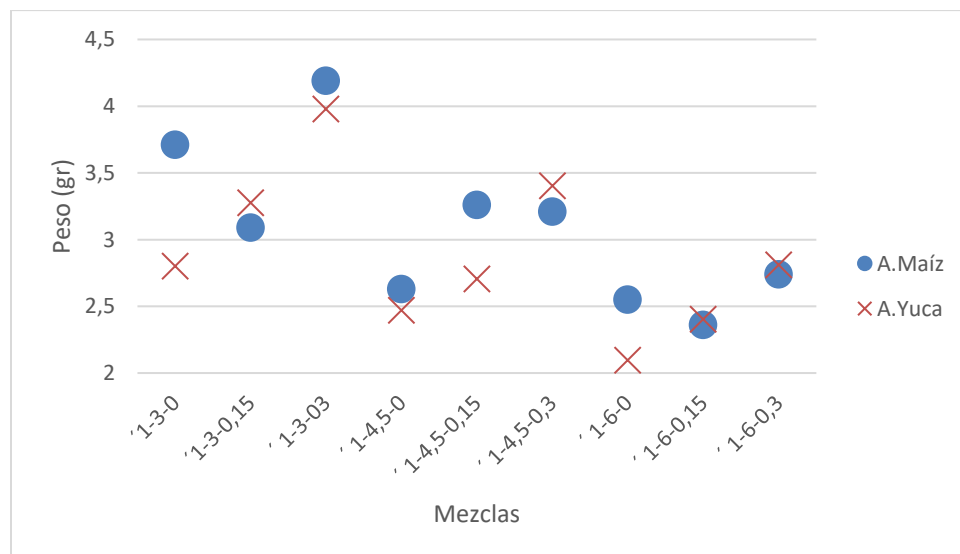
Las muestras obtenidas en el proceso de AM, fueron pesadas en una balanza analítica, y secadas en un horno a una temperatura de 50°C (Figura 24 A), por un periodo de 9 horas (Lam et al., 2002). Cada hora fue modificada la orientación de los dispositivos, cada hora, con la finalidad de homogenizar el secado de las piezas. En la siguiente fotografía se muestra la disposición de los dispositivos dentro del horno. Una vez se han secado las muestras son dispuestas en un desecador a humedad controlada (40 ± 6 %). En la siguiente imagen se muestra el desecador con las muestras en su interior (Figura 24 B) y en la Figura 25 se presenta el peso final promedio de cada mezcla.

Figura 24. Cámara de temperatura (A) y desecador (B)



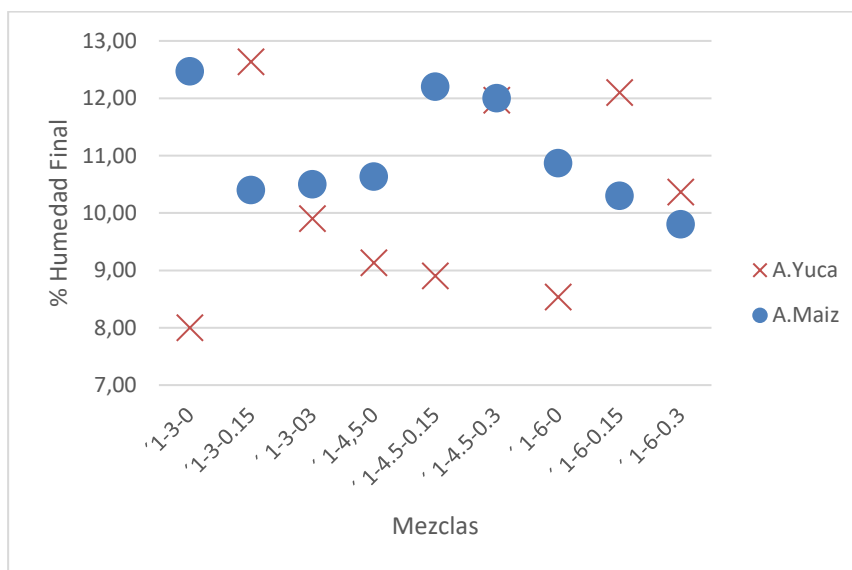
A lo largo del secado fue registrado el peso del material en intervalos regulares de una hora. Con esta información fue posible obtener las curvas de secado, el porcentaje de humedad calculado (partiendo del contenido de material de almidón y glicerina de cada mezcla) y el peso final de los dispositivos.

Figura 25. Peso final promedio de los dispositivos obtenidos



En la siguiente figura (Figura 26) se muestra el porcentaje de humedad promedio, al finalizar el proceso de secado para cada tipo de mezcla. De la gráfica se observa la alta dispersión de los resultados, incluso entre los mismos grupos de almidón. Se destaca el rango de porcentaje de humedad obtenido al finalizar las 9 horas de secado, por el almidón de maíz entre 9,8 y 12,5 %, y para el almidón de yuca entre 8,0 y 12,63 %, en el Anexo E se muestran las curvas de secado por cada dispositivo.

Figura 26. Datos promedio del %Humedad final de cada grupo de dispositivos



Cada una de las etapas de evaluación experimental, propuestas para adecuar el proceso de AM por extrusión, proporcionaron la información necesaria para ajustar las condiciones del proceso, en la conformación de los dispositivos y posterior acondicionamiento. En el siguiente capítulo se evaluarán los dispositivos obtenidos, mediante la caracterización dimensional y mecánica, para determinar la efectividad del proceso desarrollado en la conformación de prismas con una geometría definida y comparar la respuesta mecánica de cada combinación de mezcla.

5.Caracterización de los dispositivos

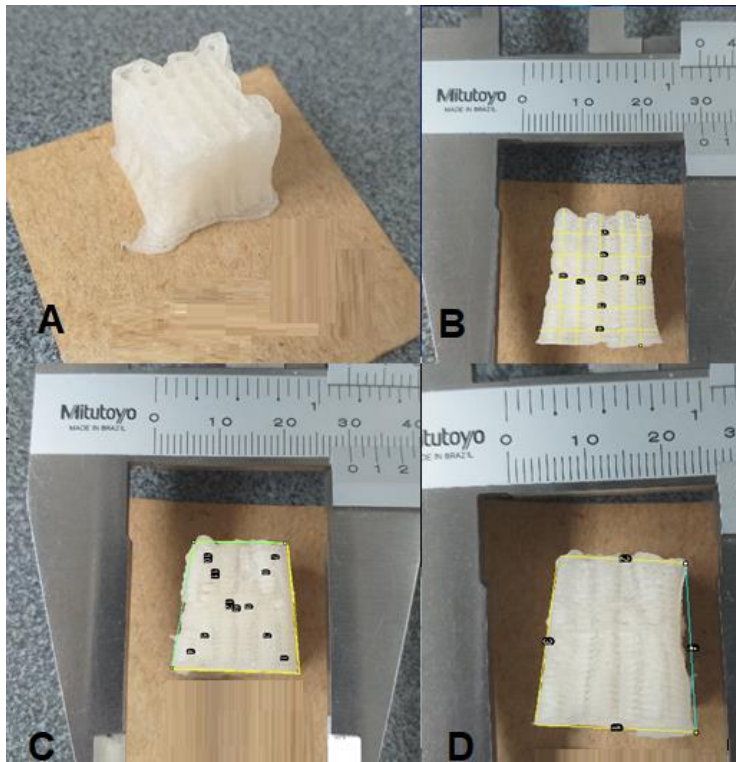
Uno de los objetivos del proyecto de investigación consistió en la caracterización dimensional y mecánica de los dispositivos obtenidos mediante la técnica de AM por extrusión. A continuación se muestran los resultados y el análisis estadístico elaborado para determinar los posibles efectos de los factores definidos para la elaboración de las mezclas (dos tipos de almidón, tres niveles de porcentaje de almidón y tres niveles de porcentaje de glicerina).

5.1 Caracterización Dimensional de los Dispositivos

La caracterización dimensional se apoya en la metodología descrita en la sección “5.1. Caracterización dimensional de los dispositivos”. En la siguiente figura se muestra las diferentes mediciones realizadas sobre cada uno de los dispositivo (Figura 27 - A), obteniendo las distancias longitudinales (altura y ancho de la base) (Figura 27 - B), ángulo que conforma los vértices del prisma (Figura 27 - C), y nivel de paralelismo entre caras opuestas (Figura 27 - D),

El estudio dimensional planteado permite segmentar rasgos característicos de los diferentes prismas, como es la distancia de las aristas por cada una de sus orientaciones (ancho, largo y alto), comparaciones de tamaño entre caras principales (“B1”: Techo, “B2”: Base y caras laterales.), entre otros.

Figura 27. Proceso de dimensionamiento de los dispositivos

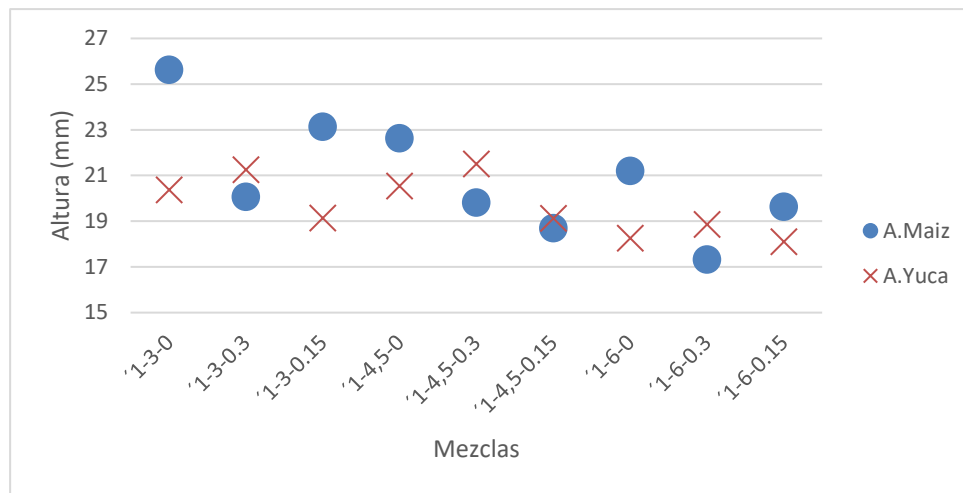


5.1.1 Altura de los dispositivos

En la Figura 28 se encuentra el conjunto de resultados de la altura promedio que posee cada prisma, obtenido a partir de los datos registrados sobre las diferentes caras del prisma “Ln-d2” (n: 1, 2, 3 y 4). De la gráfica es posible observar que la mayoría de mezclas se contraen respecto a la dimensión de altura objetivo: 25mm.

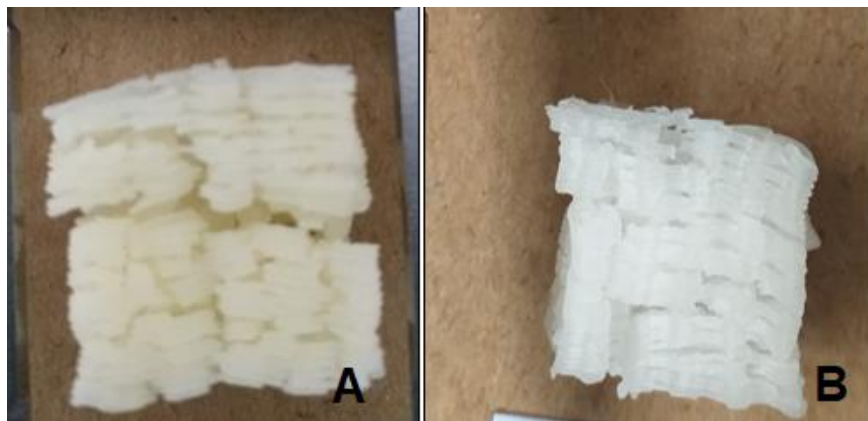
En el caso del almidón de yuca, sus resultados se ubican en el rango aproximado de los 18,1 mm (Y-1-6-0,15) a los 21,5 mm (Y-1-4,5-03). Y para el almidón de maíz las alturas abarcan los 17,3 mm (M-1-6-0,3) a los 25,6 mm (M-1-3-0).

Figura 28. Caracterización de la altura de los dispositivos



La mezcla “M-1-3-0”, aparentemente alcanza la mejor respuesta dimensional de altura, respecto al valor objetivo (aproximadamente 25 mm), pero dicha respuesta contrasta con el efecto real mostrado en la siguiente fotografía (Figura 29 A), donde se observa una abertura en la estructura. Dicho efecto se relaciona posiblemente con la retrogradación del material, debido al bajo contenido de plastificante, la estructura tiende a perder flexibilidad y en el proceso de contracción se separa. De forma menos pronunciada los dispositivos “M-1-6-0,3” (Figura 29 B), en algunas de sus caras presentan una apertura de la estructura, pero mantiene su geometría de una forma más estable.

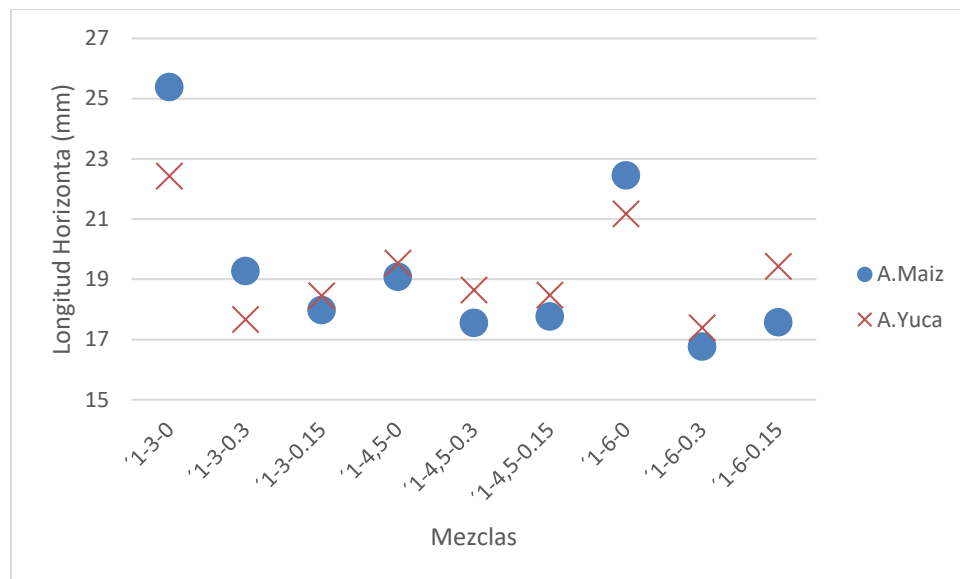
Figura 29. Cara lateral del grupo “M-1-3-0” (A), y del grupo “M-1-6-0,3” (B).



5.1.2 Obtención de la longitud horizontal

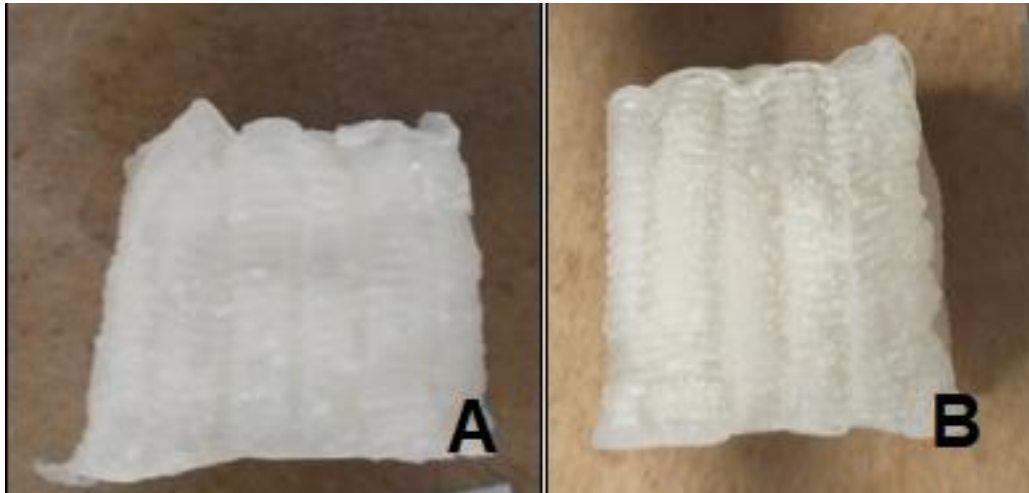
En la siguiente grafica (Figura 30) se muestra el promedio de las distancias horizontales, obtenidas de los vértices de las bases de cada prisma (“B1” y “B2”) y las distancias del plano horizontal de cada cara lateral (“Ln-d1”) (sección: “4.3.3. Sistema de posicionamiento por brazo robótica”). Para el grupo de almidón de maíz parece repetirse la situación mostrada en el análisis de la altura de los dispositivos, variando el rango de longitud entre 17,3 mm (“M-1-3-0”) y 25,6 mm (“M-1-6-0,3”).

Figura 30. Caracterización promedio de la longitud horizontal (ancho y largo)



Para el almidón de yuca los grupos “Y-1-6-0,15” (18,1 mm) (Figura 31 A) y “Y-1-4,5-0,3” (21,5 mm) (Figura 31 B), representan los puntos extremos de respuesta, como se observa en las siguientes fotografías, el grupo “Y-1-6-0,15”, tiende a colapsar debido a su mayor contenido de humedad, mientras el grupo “Y-1-4,5-0,3” representa de forma más aproximada la geometría de un prisma rectangular.

Figura 31. Cara lateral del grupo “Y-1-6-0,15”. y del grupo “M-1-4,5-0,3”.

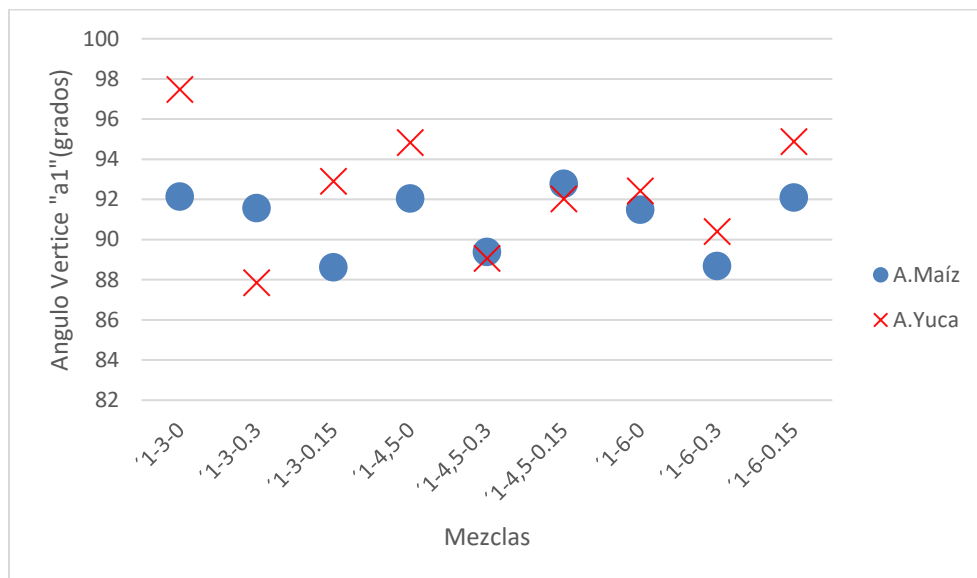


5.1.3 Obtención de los ángulos de los vértices

La identificación de los ángulos entre vértices, permitió determinar el grado de inclinación que presentan las aristas adyacentes, comparado con el ángulo ideal de un prisma rectangular (90°). Del estudio se puede diferenciar la inclinación entre las caras adyacentes, en diferentes puntos de referencia respecto a las aristas que componen cada uno de los vértices (“a1”, “a2” y “a3”).

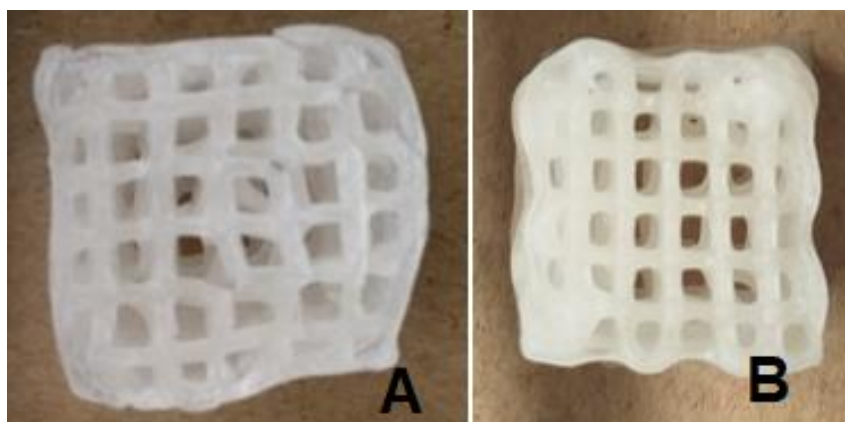
La medición del ángulo adyacente a una distancia de un cuarto de las aristas “a1” (Figura 32), permite comprobar el efecto de perpendicularidad entre las esquinas de cada vértice, presentando una mayor acumulación de material para las diferentes técnicas de AM por extrusión, debido al cambio de dirección y velocidad del recorrido. De los resultados obtenidos parece existir entre los grupos de almidón de maíz una mayor aproximación al ángulo objetivo (90°).

Figura 32. Respuesta del ángulo “a1” por cada mezcla



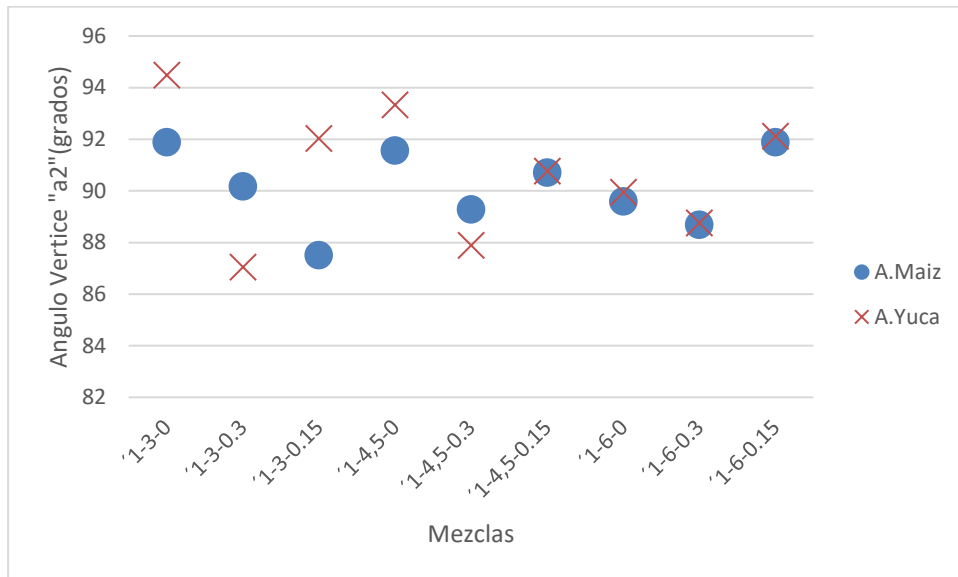
Las mezclas de almidón de yuca: “Y-1-3-0” (97,5°) (Figura 33 A) y “Y-1-3-0,3” (87,8°) (Figura 33 B), presentan los cambios más extremos del ángulo de inclinación “a1”, de lo cual se puede afirmar que el mayor contenido de almidón y glicerina ofrece la mejor respuesta.

Figura 33. Cara superior del grupo “Y-1-3-0” (A). y del grupo “M-1-3-0,3”(B).



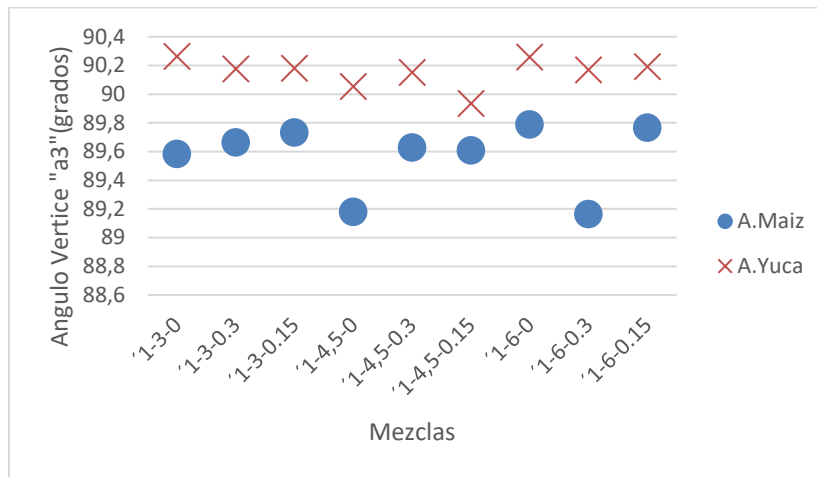
El ángulo “a2” obtenido al tomar como referencia el centro de las aristas adyacentes (Figura 34), puede reflejar un hinchamiento (ángulo mayor a 90°) o contracción (ángulo menor a 90°) del dispositivo. En la Figura 34–A de la mezcla “Y-1-3-0”, se observa dicho efecto de hinchamiento en algunas de sus aristas, en contraste la mezcla “M-1-3-0,3” mantiene su forma a lo largo de los extremos de cada vértice (Figura 34–B). Finalmente de los datos obtenidos resalta la similitud de respuesta entre los grupos: “1-4,5-0,15”, “1-6-0”, “1-6-0,3” y “1-6-0,15” de cada almidón, para el ángulo “a2”.

Figura 34. Respuesta del ángulo “a2”



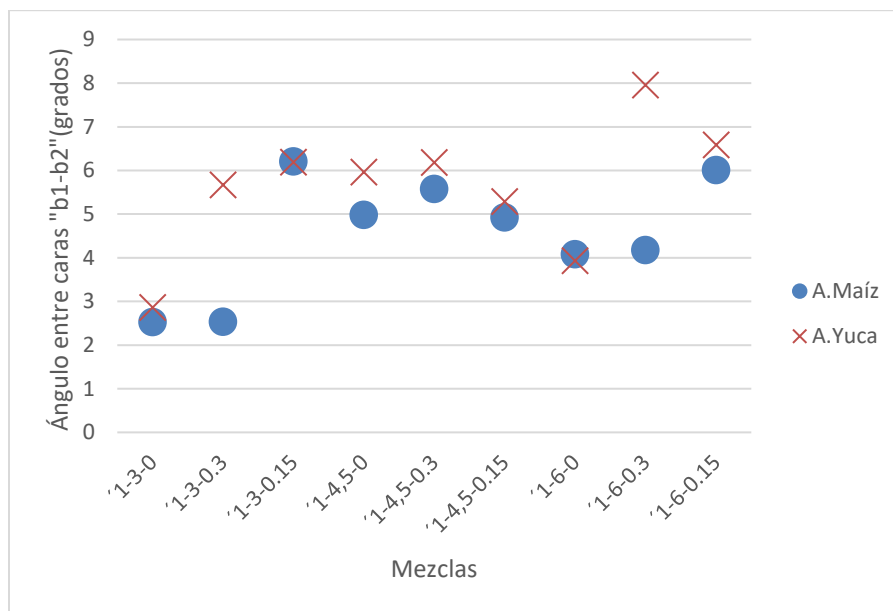
El ángulo de referencia entre los extremos de las aristas “a3” (Figura 35), establece si la construcción de cada cara del prisma se encuentra alineada respecto a los vértice opuestos. De los resultados se encuentra una marcada diferencia en la respuesta de cada grupo de almidón, pero en general manteniéndose próximos al ángulo objetivo (90°).

Figura 35. Respuesta del ángulo “a3”



Respecto a los resultados del ángulo “b1” y “b2”, es posible con esta información evidenciar aquellos dispositivos que presentan una forma diferente a un paralelogramo, ya que este tipo de sólido presenta una disposición paralela entre sus caras (incluso cuando presenta un ángulo entre aristas contiguas diferente a 90°). A continuación se muestran los datos adquiridos del ángulo que conforman las aristas de las caras opuestas (Figura 36).

Figura 36. Respuesta de los ángulos entre caras “b1” y “b2”

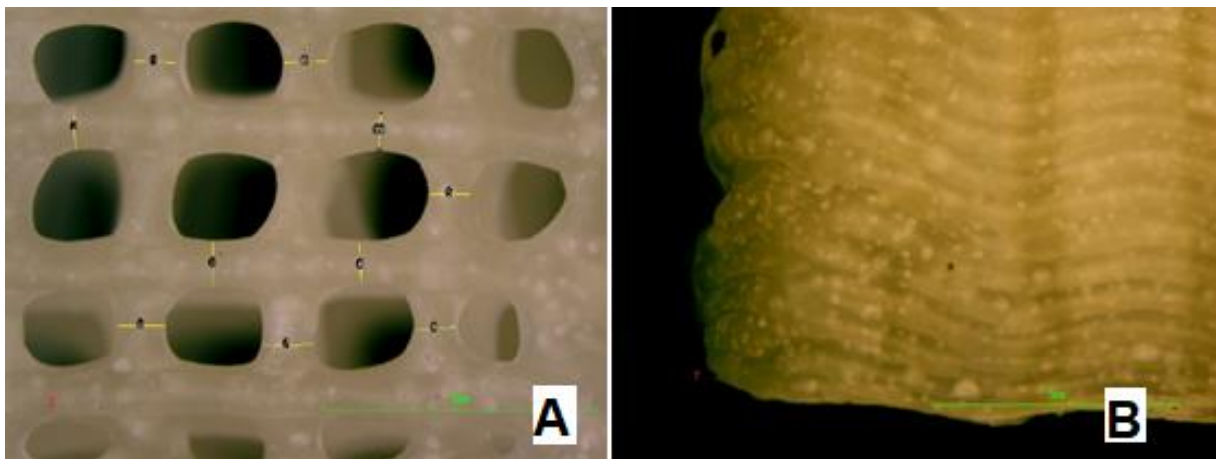


A partir de los resultados se encuentra que todas las mezclas presentan algún nivel de inclinación entre las caras opuestas, especialmente para la mezcla de almidón de yuca “Y-1-6-0,3”, con un ángulo promedio entre sus caras de 7,96 grados.

5.1.4 Dimensiones de las trayectorias depositadas

El conjunto de datos del ancho – “D1” (Figura 37 A) y altura – D2 (Figura 37 B), de las trayectorias depositadas, permite contrastar la diferencia entre el tamaño de las trayectorias durante la extrusión y el tamaño de la trayectoria cuando los dispositivos se han secado.

Figura 37. Análisis dimensional de las trayectorias “D1” (A) y “D2” (B)

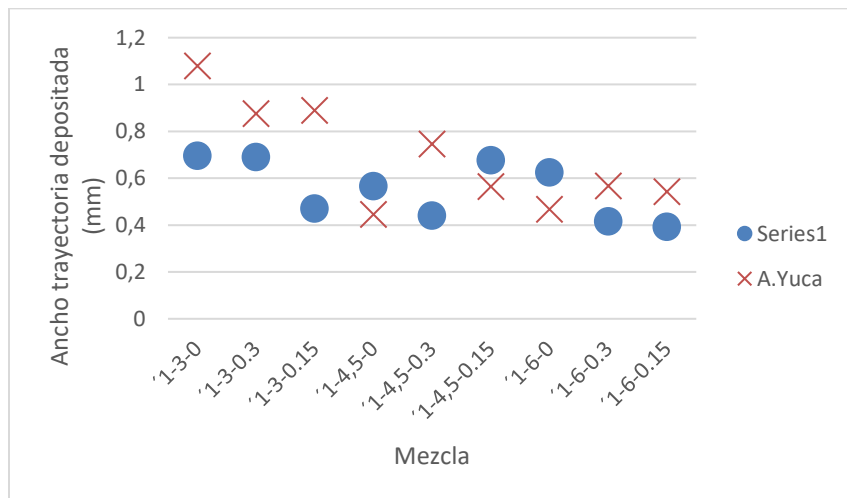


También con la información del ancho de las trayectorias es posible definir la resistencia mecánica compresiva, denominado “Esfuerzo B” (Ecuación 12), al ajustar el área de presión sobre la superficie – Aa (Ecuación 11), (sección. “5.2. Caracterización mecánica de los dispositivos”)

Se tomaron fotografías de la cara superior y base de los dispositivos con un estereomicroscopio, para caracterizar el ancho de las trayectorias (D1). En la siguiente imagen se muestra el conjunto de resultados promedio obtenidos (Figura 38). Se observa que en la mayoría de los datos el ancho de los filamentos de almidón de yuca suelen ser

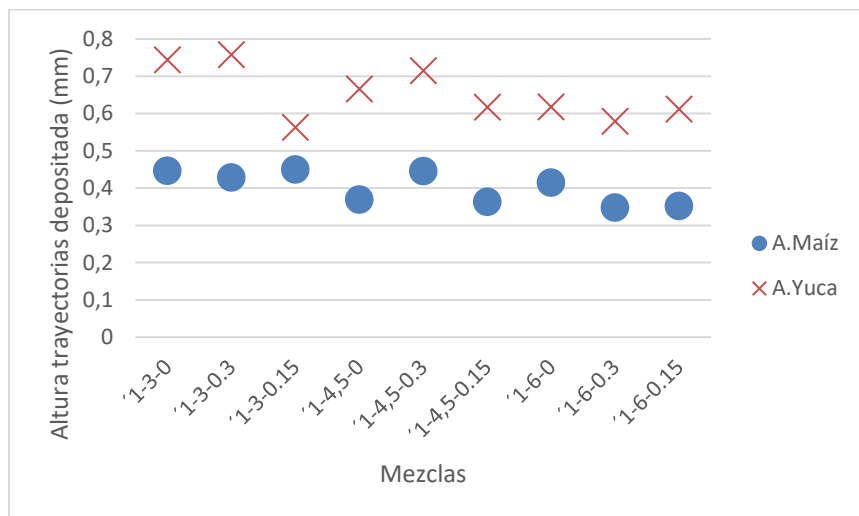
más grandes que el ancho de los filamentos de almidón de maíz, incluso al punto de superar la distancia de 1,08mm ("Y-1-3-0").

Figura 38. Ancho de las trayectorias depositadas



De las caras laterales de cada dispositivo, se determina las alturas entre capas de trayectorias (D2) (Figura 39). En general las trayectorias de almidones de yuca presentaron una mayor altura, en el rango de 0,56 mm ("Y-1-3-0,15") y 0,76mm ("Y-1-6-0,15").

Figura 39. Altura de las trayectorias



Al contrastar el ancho y altura de las trayectorias que conforman los dispositivos secos, se encuentra que la altura entre capas para el grupo de almidón de maíz tiene una reducción del tamaño de aproximadamente 27% respecto a las dimensiones registradas del ancho, respectivamente, mientras el cambio para el grupo de almidón de yuca es de 5%, es posible que la reducción entre estas dos dimensiones se produzca como efecto de la deformación producida entre las capas, lo cual indicaría que las trayectorias del almidón de maíz tiende a colapsar con mayor facilidad, mientras el promedio de las dimensiones “D2” de las trayectorias de almidón de yuca demuestran una mayor resistencia a las capas superpuestas.

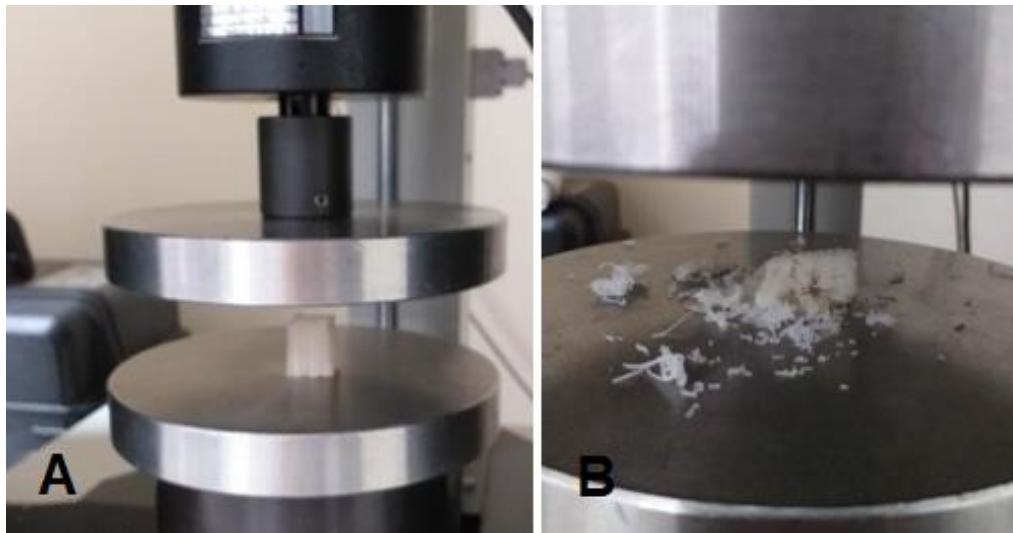
Finalmente al comparar la diferencia entre las dimensiones del diámetro extruido y las dimensiones promedio de las trayectorias (ancho y alto), de los dispositivos en su estado final, se evidencia que las dimensiones de las mezclas de almidón de yuca se redujeron un 55%, en contraste del grupo de almidón de maíz, donde se tuvo una reducción del 60%. Esto puede demostrar que las mezclas de almidón de yuca son menos propensas a perder humedad debido a un mayor afianzamiento del contenido húmedo entre sus cadenas moleculares (en forma de puentes de hidrogeno), en la fase de retrogradación, pero se deben hacer más estudios al respecto.

5.2 Caracterización mecánica de los dispositivos

Para la caracterización mecánica de los dispositivos, fue seleccionada la prueba compresiva, ya que por las características del material y el proceso de AM propuesto, se facilitaba la reproducción de las probetas en forma de prisma rectangular con una altura de 25mm. Las probetas de tensión y flexión presentaban una altura o espesor menor (3 – 8 mm), lo cual producía una alta deformación geométrica por efecto de la humedad y el cambio térmico circundante.

Con las pruebas mecánicas a compresión fue posible identificar la fuerza máxima registrada por cada dispositivo, como también los efectos de la resistencia a lo largo del desplazamiento hasta la compresión (Figura 40).

Figura 40. Dispositivo previo al ensayo (A) y una vez se ha realizado el ensayo (B)



Para hallar la deformación se tomaron los datos promedio de alturas obtenidas por cada dispositivo, y se contrastó con el recorrido del cabezal de la máquina universal de ensayos mecánicos. También se evaluó el efecto del área transversal (respecto a la fuerza aplicada sobre el esfuerzo del dispositivo, al considerar el área transversal completa que ocupaba la cara superior e inferior de los dispositivos “A” (“Esfuerzo A”: Ecuación 7) (Figura 41) y el área ocupada por las trayectorias del material “Aa” (“Esfuerzo B”: Ecuación 11) (Figura 42), respectivamente.

Figura 41. Resultados del área transversal total de cada dispositivo

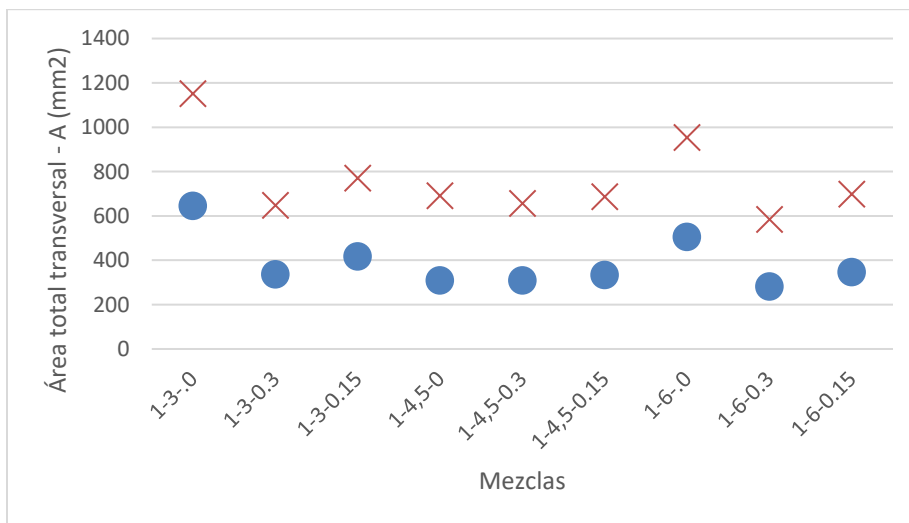
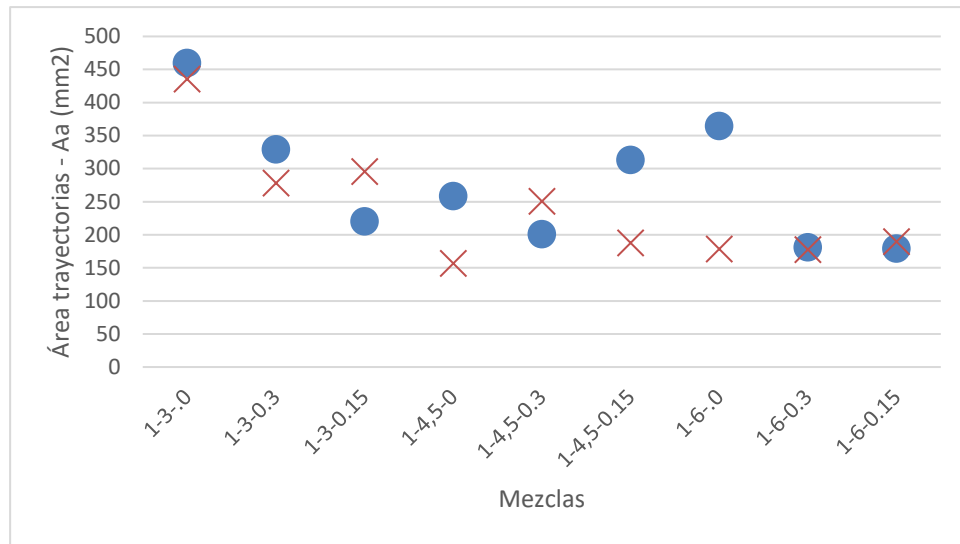


Figura 42. Resultados del área ocupado por las trayectorias de cada dispositivo



En las siguientes tablas se presentan los resultados de las pruebas mecánicas, para los grupos de almidón de maíz (Tabla 17) y almidón de yuca (Tabla 18), Para el almidón de maíz la mejor respuesta se presentó con la mezcla “M_1-3-0.3” (Esfuerzo A: 2,79 N/mm², Esfuerzo B: 2,83 N/mm², deformación de 35,31%),

Tabla 17. Resultados de la prueba mecánica para las mezclas de almidón de maíz

MEZCLA	ESFUERZO-A (N/mm2)	ESFUERZO-B (N/mm2)	DEFORMACIÓN (%)	MODULO ELASTICIDAD (N/mm2)
M_1-3-0	0,47	0,66	24,42	3,72
M_1-3-0.3	2,79	2,83	35,31	17,00
M_1-3-0.15	0,31	0,59	49,64	1,62
M_1-4,5-0	0,26	0,31	29,29	0,64
M_1-4,5-0.3	1,39	2,13	39,46	8,18
M_1-4,5-0.15	1,20	1,31	35,61	6,44
M_1-6-0	0,41	0,57	24,07	3,32
M_1-6-0.3	0,87	1,36	40,40	3,73
M_1-6-0.15	0,27	0,52	36,51	1,06

No siempre un alto valor de esfuerzo repercute en una menor deformación. Las mezclas “M_1-4,5-0.3” y “M_1-6-0.3” presentaron los mayores esfuerzos y deformaciones.

El módulo de elasticidad fue determinado a partir de la Ecuación 10, contrastando el “Esfuerzo A” y la deformación. En general los módulos de elasticidad presentaron una alta desviación, frente a las demás variables de respuesta mecánica, posiblemente debido al tipo de incertidumbre que presentan las muestras con un comportamiento del tipo frágil, ya que generaban diferentes respuestas del módulo en función de la zona elástica o pendiente evaluada, por lo tanto estos resultados no fueron examinados en los análisis estadísticos.

Del grupo almidón de yuca, se encuentra la mejor respuesta de esfuerzo en la mezcla “Y_1-4.5-0.15” (Esfuerzo A: 1,87 N/mm², y Esfuerzo B: 3,854 N/mm²), y el mejor comportamiento de deformación se presenta con la mezcla “Y_1-3-0.15” (28,03 %)

Tabla 18. Resultados de la prueba mecánica para las mezclas de almidón de yuca

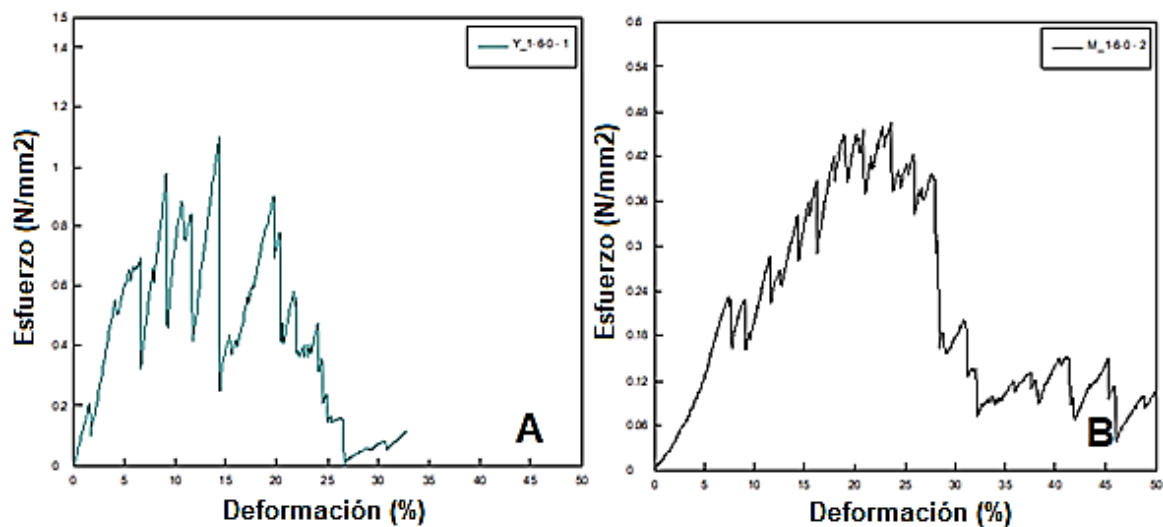
MEZCLA	ESFUERZO-A (N/mm2)	ESFUERZO-B (N/mm2)	DEFORMACIÓN (%)	MODULO ELASTICIDAD (N/mm2)
Y_1-3-0	0,53	0,63	8,99	20,61
Y_1-3-0.3	1,70	1,92	13,12	20,20
Y_1-3-0.15	1,44	1,71	26,03	1,44
Y_1-4.5-0	1,19	2,92	10,19	31,80
Y_1-4.5-0.3	1,24	1,73	8,88	20,75
Y_1-4.5-0.15	1,87	3,54	9,26	34,81
Y_1-6-0	1,07	2,72	17,60	20,23
Y_1-6-0.3	1,71	2,92	10,93	27,54
Y_1-6-0.15	1,10	2,04	9,86	25,23

La diferencia del Esfuerzo A y Esfuerzo B, en ocasiones no es tan evidente, debido a que las trayectorias de cada capa, abarcan una gran área del dispositivo, similar al espacio ocupado por el área transversal que contiene el prisma rectangular.

De los resultados obtenidos se evidencia una mayor deformación con las muestras que contenían un alto porcentaje de glicerina, por lo cual se utilizó dicho parámetro de referencia para analizar las curvas de Esfuerzo-Deformación.

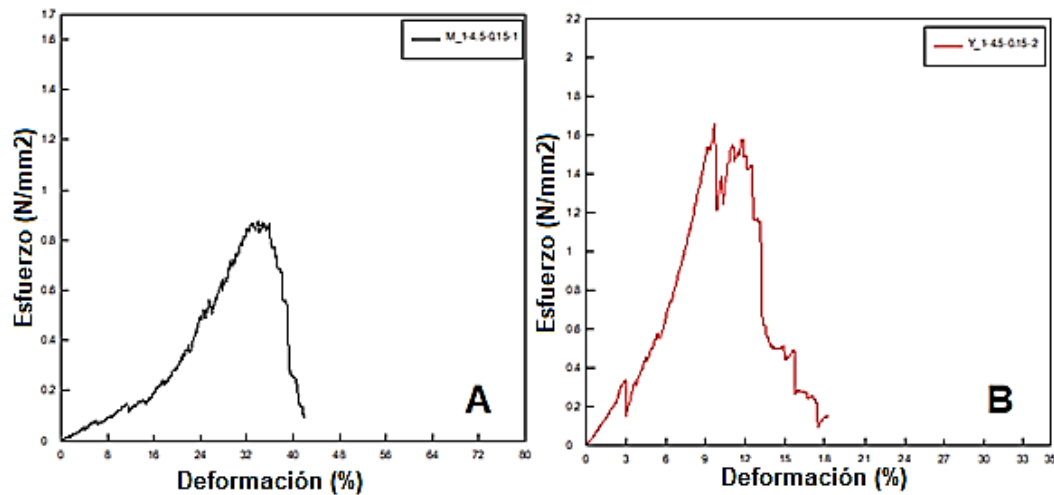
Al comparar las gráficas de esfuerzo-deformación, obtenidas de las mezclas sin glicerina y con un alto nivel de humedad (Figura 43), se observa que los grupos de almidón de maíz conservan una respuesta más continua. En cambio los almidones de yuca con mezclas sin glicerina, presentan una respuesta más frágil, con grandes cambios de la resistencia a lo largo del desplazamiento compresivo.

Figura 43. Respuesta mecánica: A. Yuca (A) y A. Maíz (B), bajo porcentaje de glicerina.



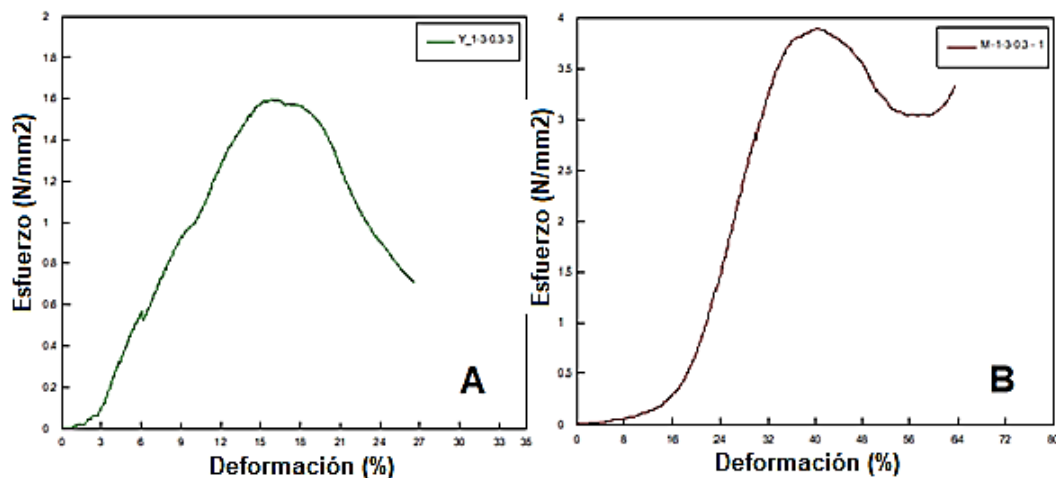
Las mezclas con niveles medios de glicerina (15%, respecto al contenido seco) y almidón ("4,5") (Figura 44), mantenían una respuesta más continua, respecto al presentado por las muestras sin glicerina, pero se generaba un comportamiento quebradizo, especialmente para los almidones de yuca, aun cuando estas mezclas dieron los mejores registros de esfuerzo mecánico.

Figura 44. Respuesta mecánica: A. Maíz (A) y A. Yuca (B), nivel medio de glicerina



Finalmente las muestras con altos contenidos de almidón (“1-3”) y glicerina (“0,3”), presentaron muy pocos cambios abruptos de pendiente a lo largo de su deformación (Figura 45), lo cual indica que el mayor contenido de glicerina y el mínimo contenido de humedad puede utilizarse para la conformación de dispositivos con una alta resistencia y deformación controlable.

Figura 45. Respuesta mecánica: A.Yuca (A) y A. Maíz (B), alto porcentaje de glicerina



En la investigación de Feng (y otros, 2019), se compara la respuesta mecánica compresiva de diferentes biopolímeros, elaboradas con diversas técnicas, incluyendo AM, por ejemplo

entre los polímeros naturales mencionados se encuentra la gelatina (manufacturada con AM) con esfuerzos compresivos en el rango de 0,099-41,8 Pa, el alginato con respuestas de 190 a 260 Pa, el quitosano con un esfuerzo entre 7 y 38 Pa (Feng et al., 2019).

Los resultados de compresión se pueden comparar con los alcances que ofrecen otros polímeros sintéticos con aplicaciones biomédicas, como el poliéster éter cetona - PEEK, con una respuesta de deformación a la compresión de 5,6% y una resistencia de 102,4 MPa (Vaezi & Yang, 2015), el ácido poliláctico PLA con una resistencia entre los 2,1 a 2,6 MPa, policaprolactona – PCL con una resistencia de 2 a 3,2 MPa, y el Ácido poliglicólico de 10,57 MPa (Feng et al., 2019).

De los datos anteriores se puede comprobar que la respuesta presentada por muchos de los dispositivos elaborados con almidones de maíz y yuca (bajo el procedimiento desarrollado con la plataforma robotizada de AM), poseen una mejor condición de esfuerzo compresivo, respecto a otros polímeros naturales, y algunos polímeros sintéticos.

5.3 Análisis estadístico de los resultados

Como fue mencionado en la sección: “3.7. Metodología para el análisis estadístico”, los resultados de las pruebas mecánicas se analizaron mediante un análisis parametrizado, basado en el modelo Anova de tres vías. Mientras las pruebas dimensionales, se ajustaron a un modelo no parametrizado de Kruskal-Wallis. A continuación se presentan los modelos de los parámetros mecánicos y dimensionales.

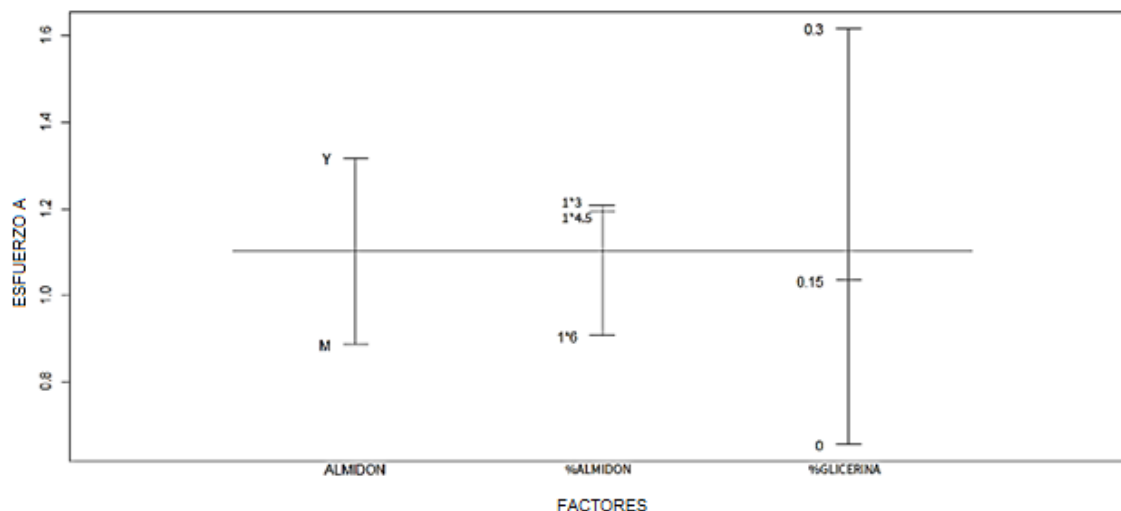
5.4.1. Modelo 1: Esfuerzo A

Inicialmente se define la hipótesis del parámetro a evaluar (Tabla 19). De la gráfica de efecto univariado (Figura 46) se constata un mayor “Esfuerzo A”, usando el almidón de yuca en los porcentajes: “1-3” y “1-4,5”, junto con un alto porcentaje de glicerina (“0,3”).

Tabla 19. Hipótesis Modelo 1

Hipótesis nula:	El nivel de Esfuerzo-A no depende del tipo de almidón, el % de almidón y el % de glicerina.
Hipótesis alternativa:	El nivel de Esfuerzo-A depende del tipo de almidón, el % de almidón y el % de glicerina.
Nivel de significancia	5% = 0,05
Elección de la prueba estadística	Análisis de varianza ANOVA de tres vías

Figura 46. Efecto univariado del Modelo 1



Del análisis Anova (Tabla 20), se observa que todos los p-valor son menores a 0,05, por lo cual los resultados son significativos, y tanto las variables individuales y sus combinaciones afectan la respuesta del “Esfuerzo-A”

Tabla 20. Resultados análisis varianza de tres vías

Variable	Grados de libertad	Suma Cuadrados	Media cuadrática	F	P-Valor
ALMIDÓN	1	2,504	2,504	34,323	0,00000107
%ALMIDÓN	2	1,039	0,519	7,116	0,002487
%GLICERINA	2	8,449	4,225	57,895	5,64E-12
ALMIDÓN:%ALMIDÓN	2	1,252	0,626	8,578	0,000898
ALMIDÓN:%GLICERINA	2	2,394	1,197	16,405	0,00000863
%ALMIDÓN:%GLICERINA	4	5,125	1,281	17,56	4,48E-08
ALMIDÓN: %ALMIDÓN: %GLICERINA	4	2,268	0,567	7,771	0,000127
Residuales	36	2,627	0,073		

De los resultados del “Test de Dunn”, se demuestra una diferencia significativa entre los dos tipos de almidones (Tabla 21) y específicamente para los porcentajes de almidón “1-6” y “1-3” (Tabla 22), como también de la interacción “1-6” y “1-4,5”. Pero no existe efecto o diferencia entre “1-4,5” y “1-3”. También se comprueba que un alto porcentaje de glicerina afecta el “Esfuerzo-A” (Tabla 23).

Tabla 21. Comparación tipos de almidones

Grupos de comparación	Diferencia	P-Valor	Decisión
Y-M	0,4307163	0,0000011	Rechazar la hipótesis nula

Tabla 22. Comparación porcentajes de almidón

Grupos de comparación	Diferencia	P-Valor	Decisión
“1-4,5” “1-3”	-0,01375056	1	No rechazar la hipótesis nula
“1-6” “1-3”	-0,30081556	0,0059	Rechazar la hipótesis nula
“1-6” “1-4,5”	-0,287065	0,0089	Rechazar la hipótesis nula

Tabla 23. Comparación contenido de glicerina

Grupos de comparación	Diferencia	P-Valor	Decisión
"0,15" – "0"	0,3784833	0,0005	Rechazar la hipótesis nula
"0,3" – "0"	0,9616706	3,1E-12	Rechazar la hipótesis nula
"0,3" – "0,15"	0,5831872	0,00000048	Rechazar la hipótesis nula

5.4.2. Modelo 2: Esfuerzo-B

En la Tabla 24 se formula las hipótesis del modelo. Al observar la respuesta mecánica "Esfuerzo-B" de efectos univariado (Figura 47) se visualiza la influencia del almidón de yuca para generar una mayor respuesta mecánica. También se analizó la respuesta con el porcentaje de almidón "1-4,5" y altos porcentajes de glicerina. El resultado de los P-valores del análisis de varianza Anova de tres vías (Tabla 25), generaron valores por debajo de 0,05, por lo tanto todas las variables individuales y combinadas afectan la respuesta de la resistencia aproximada.

Tabla 24. Hipótesis Modelo 2

Hipótesis nula:	El nivel de Esfuerzo-B no depende del tipo de almidón, el % de almidón y el % de glicerina.
Hipótesis alternativa:	El nivel de Esfuerzo-B depende del tipo de almidón, el % de almidón y el % de glicerina.
Nivel de significancia	5% = 0,05
Elección de la prueba estadística	Análisis de varianza ANOVA de tres vías

Figura 47. Efecto univariado del Modelo 2

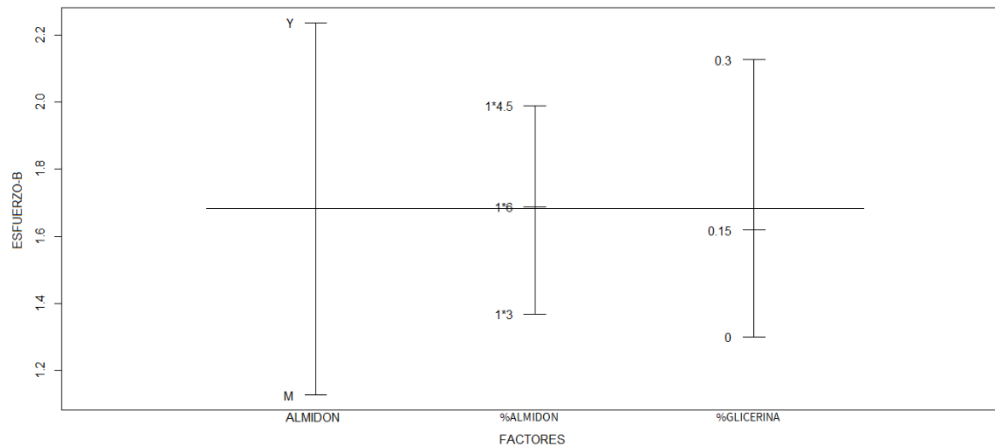


Tabla 25. Resultados análisis varianza de tres vías

Variable	Grados de libertad	Suma Cuadrados	Media cuadrática	F	P-Valor
ALMIDÓN	1	16,571	16,571	117,693	6,74E-13
%ALMIDÓN	2	3,464	1,732	12,301	0,0000849
%GLICERINA	2	6,246	3,123	22,182	5,28E-07
ALMIDÓN:%ALMIDÓN	2	6,978	3,489	24,778	1,71E-07
ALMIDÓN:%GLICERINA	2	6,557	3,278	23,284	3,24E-07
%ALMIDÓN:%GLICERINA	4	6,778	1,695	12,035	0,00000261
ALMIDÓN: %ALMIDÓN: %GLICERINA	4	4,637	1,159	8,233	0,0000802
Residuales	36	5,069	0,141		

Mediante el “Test de Dunn”, se confirma el efecto de los dos tipos de almidón, en la respuesta del Esfuerzo-B (Tabla 26), obteniendo mayores valores con el almidón de yuca. El porcentaje de almidón afecta la resistencia de los dispositivos, y es mayor la respuesta

mecánica en la combinación “1-4,5” (Tabla 27), y aumenta también en presencia de un mayor porcentaje de glicerina (Tabla 28)

Tabla 26. Comparación tipos de almidones

Grupos de comparación	Diferencia	P-Valor	Decisión
Y-M	1,1	6.70E-13	Rechazar la hipótesis nula

Tabla 27. Comparación porcentajes de almidón

Grupos de comparación	Diferencia	P-Valor	Decisión
“1-4,5”- “1*3”	0,62	5,10E-05	Rechazar la hipótesis nula
“1*6” – “1*3”	0,31	0,0455	Rechazar la hipótesis nula
“1*6” - “1*4,5”	-0,3	0,0636	Rechazar la hipótesis nula

Tabla 28. Comparación contenido de glicerina

Grupos de comparación	Diferencia	P-Valor	Decisión
“0,15” – “0”	0,31	0,04553	Rechazar la hipótesis nula
“0,3”- “0”	0,82	3,30E-07	Rechazar la hipótesis nula
“0,3” – “0,15”	0,5	0,00077	Rechazar la hipótesis nula

5.4.3. Modelo 3: Deformación

En la siguiente Tabla 29 se presenta las condiciones del modelo para la evaluación estadística del parámetro de deformación. Del gráfico de efecto univariado (Figura 48) se evidencia la influencia del almidón de maíz sobre la respuesta de deformación, siendo mayor con un porcentaje de almidón de “1-3” (aunque la respuesta es más concentrada

respecto a las otras variables de respuesta mecánicas), y un contenido de glicerina al “0,15”.

Por medio del análisis de varianza Anova de tres vías (Tabla 30), se comprueba una influencia directa del porcentaje de glicerina y tipo de almidón, sobre la respuesta de deformación mecánica de los dispositivos.

Tabla 29. Hipótesis Modelo 3

Hipótesis nula:	El nivel de deformación no depende del tipo de almidón, el % de almidón y el % de glicerina.
Hipótesis alternativa:	El nivel de deformación depende del tipo de almidón, el % de almidón y el % de glicerina.
Nivel de significancia	5% = 0,05
Elección de la prueba estadística	Análisis de varianza ANOVA de tres vías

Figura 48. Efecto univariado del modelo 3

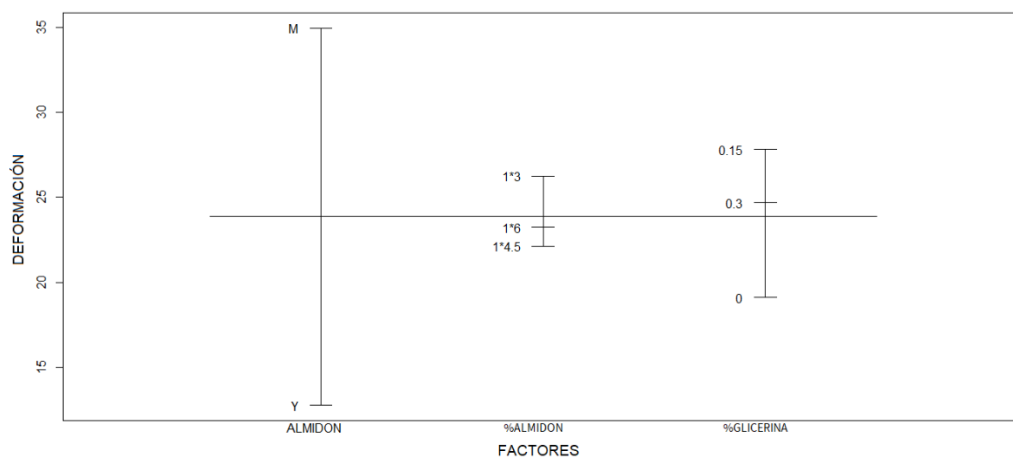


Tabla 30. Resultados análisis de varianza de tres vías

Variable	Grados de libertad	Suma Cuadrados	Media cuadrática	F	P-Valor
ALMIDÓN	1	6657	6657	80,916	7,2E-12
%ALMIDÓN	2	165	82	1,002	0,3747
%GLICERIN A	2	703	351	4,27	0,0196
Residuales	48	3949	82		

Con el “Test de Dunn” se comprueba que el grupo de “almidón de maíz” logra un mayor nivel de deformación (Tabla 31), y tiene un mayor efecto con un alto porcentaje de glicerina de “0,15” (Tabla 32).

Tabla 31. Efecto del tipo de almidón

Grupos de comparación	Diferencia	P-Valor	Decisión
Y-M	-22,2	5.00E-12	Rechazar la hipótesis nula

Tabla 32. Efecto contenido de glicerina

Grupos de comparación	Diferencia	P-Valor	Decisión
“0,15”-“0”	8,72	0,01	Rechazar la hipótesis nula
“0,3”-“0”	5,58	0,21	No rechazar la hipótesis nula
“0,3”-“0,15”	-3,13	0,91	No rechazar la hipótesis nula

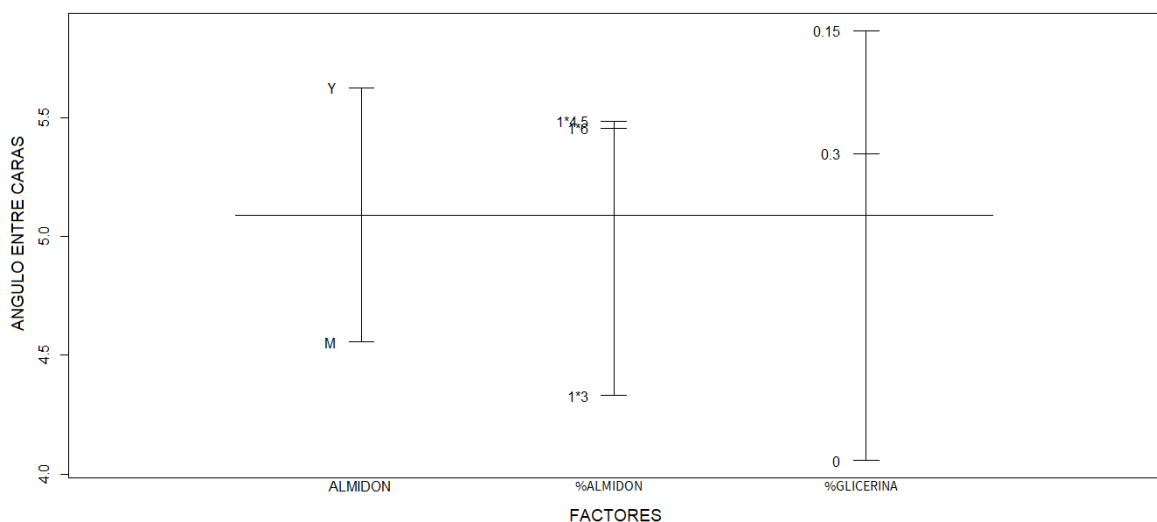
5.4.4. Modelo 4: Ángulo entre Caras

En la siguiente tabla se formula la hipótesis nula del modelo para el análisis del ángulo entre caras (Tabla 33). En el gráfico de efectos univariados (Figura 49) se distingue de forma individual el mayor efecto del almidón de yuca sobre el aumento del ángulo entre caras, influenciado también por el porcentaje de almidón “1-4,5” y “1-6”, y un contenido de glicerina de “0,15”.

Tabla 33. Hipótesis Modelo 4

Hipótesis nula:	El valor objetivo del ángulo en las caras no depende del tipo de almidón, el % de almidón y el % de glicerina.
Hipótesis alternativa:	El valor objetivo del ángulo en las caras depende del tipo de almidón, el % de almidón y el % de glicerina.
Nivel de significancia	5% = 0,05
Elección de la prueba estadística	Prueba de Kruskal-Wallis

Figura 49. Efecto univariado del modelo 4



Al comprobar el efecto de los tipos de almidón con la prueba “Kruskall-Wallis” (Tabla 34), bajo la hipótesis nula a un nivel de confianza de 95%, se confirma que el almidón de maíz se acercó mucho más al valor objetivo de esta variable (pendiente de cero grados)

Tabla 34. Prueba Kruskall-Wallis

Efecto	P-Valor
Valor objetivo en las caras en función del tipo de almidón	0.022
Valor objetivo en las caras en función del porcentaje de almidón	0.002
Valor objetivo en las caras en función del porcentaje de glicerina	0.001

El porcentaje de almidón afecta la variable de respuesta del ángulo entre caras (Tabla36), siendo menor su efecto sobre el valor objetivo de inclinación con la combinación “1-3”. Se comprueba que el menor contenido de glicerina ofrece los mejores resultados (Tabla 37).

Tabla 35. Efecto del tipo de almidón

Grupos de comparación	P-Valor	Decisión
Y-M	0,02	Rechazar la hipótesis nula

Tabla 36. Efecto del contenido de almidón

Grupos de comparación	P-Valor	Decisión
“1-4,5”-“1-3”	0,002	Rechazar la hipótesis nula
“1-6”-“1-3”	0,09	No rechazar la hipótesis nula
“1-6”-“1-4,5”	0,57	No rechazar la hipótesis nula

Tabla 37. Efecto del contenido de glicerina

Grupos de comparación	P-Valor	Decisión
"0,15"- "0"	0	Rechazar la hipótesis nula
"0,3"- "0"	0,20	No rechazar la hipótesis nula
"0,3"- "0,15"	0,32	No rechazar la hipótesis nula

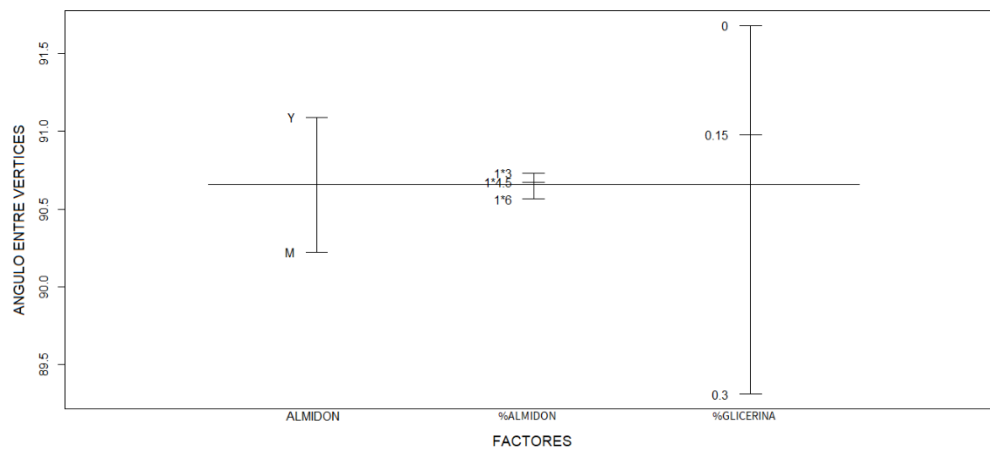
5.4.5. Modelo 5: Ángulos entre vértices

En la siguiente Tabla 38 se muestra la hipótesis del modelo. En la gráfica de efectos univariados (Figura 50), se identifica el efecto del almidón de yuca y el bajo contenido de glicerina ("0" y "0,15"), en el aumento de la pendiente de las caras adyacentes. En contraste el porcentaje de almidón, posee una mínima influencia sobre el ángulo entre vértices.

Tabla 38. Hipótesis del Modelo 5

Formulación de hipótesis	
Hipótesis nula:	El valor objetivo del ángulo entre los vértices no depende del tipo de almidón, el % de almidón y el % de glicerina.
Hipótesis alternativa:	El valor objetivo del ángulo entre los vértices depende del tipo de almidón, el % de almidón y el % de glicerina.
Nivel de significancia	5% = 0,05
Elección de la prueba estadística	Prueba de Kruskal-Wallis

Figura 50. Efecto univariado del modelo 5



Se puede concluir a partir de la Tabla 39, que los porcentajes de glicerina entre “0” y “0,15”, no presenta diferencias significativas, pero el contenido comparado entre “0” con “0,3” o “0,15” afecta el ángulo entre vértices

Tabla 39. Efecto del contenido de almidón

Grupos de comparación	P-Valor	Decisión
“0,15”-“0”	0,13	No rechazar la hipótesis nula
“0,3”-“0”	0	Rechazar la hipótesis nula
“0,3”-“0,15”	0	Rechazar la hipótesis nula

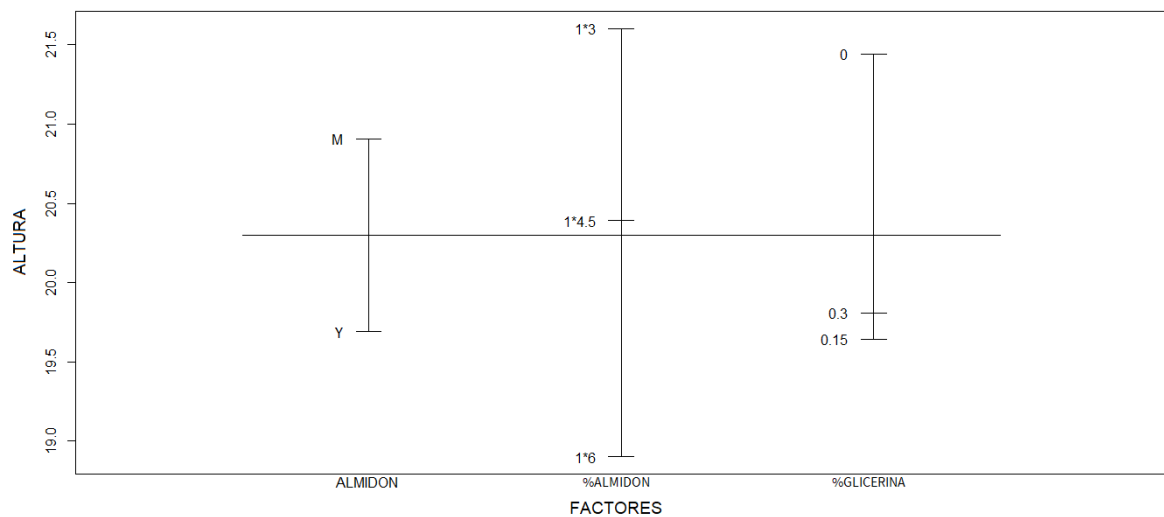
5.4.6. Modelo 6: Altura del dispositivo

En la siguiente Tabla 40 se muestra la hipótesis del modelo. De la gráfica de efectos univariados (Figura 51), se observa las diferencias entre los distintos niveles de cada factor; donde el almidón de maíz produce valores más cercanos al tamaño objetivo de altura de los dispositivos (25mm), con un porcentaje de almidón “1-3” y porcentaje de glicerina de “0”.

Tabla 40. Hipótesis Modelo 6

Formulación de hipótesis	
Hipótesis nula:	El valor objetivo de longitud en altura no depende del tipo de almidón, el % de almidón y el % de glicerina.
Hipótesis alternativa:	El valor objetivo de longitud en altura depende del tipo de almidón, el % de almidón y el % de glicerina.
Nivel de significancia	5% = 0,05
Elección de la prueba estadística	Prueba de Kruskal-Wallis

Figura 51. Efecto univariado del modelo 6



En la siguiente Tabla 41 se muestra la prueba “Kruskal-Wallis”, confirmando el efecto de las variables sobre el valor objetivo de la longitud en altura (25mm). En la prueba post hoc, de rangos de Wilcoxon con ajuste de Bonferroni en los p-valores, se comprueba que el almidón de maíz genera una mejor respuesta respecto al valor objetivo (Tabla 42), Con el porcentaje de almidón se obtiene mejores resultados en la combinación “1-3”. El porcentaje de glicerina también afecta el valor objetivo de la altura, alcanzando la mejor respuesta con el menor contenido (0%) (Tabla 43).

Tabla 41. Prueba Kruskal-Wallis

Efecto	P-Valor
Valor objetivo en longitud altura en función del tipo de almidón	0
Valor objetivo en longitud altura en función del porcentaje de almidón	0
Valor objetivo en longitud altura en función del porcentaje de glicerina	0

Tabla 42. Efecto del contenido de almidón

Grupos de comparación	P-Valor	Decisión
"1-4.5"-"1-3"	0	Rechazar la hipótesis nula
"1-6"-"1-3"	0	Rechazar la hipótesis nula
"1-6"-"1-4.5"	0	Rechazar la hipótesis nula

Tabla 43. Efecto del contenido de glicerina

Grupos de comparación	P-Valor	Decisión
"0,15"-"0"	0	Rechazar la hipótesis nula
"0,3"-"0"	0	Rechazar la hipótesis nula
"0,3"-"0,15"	0,02	Rechazar la hipótesis nula

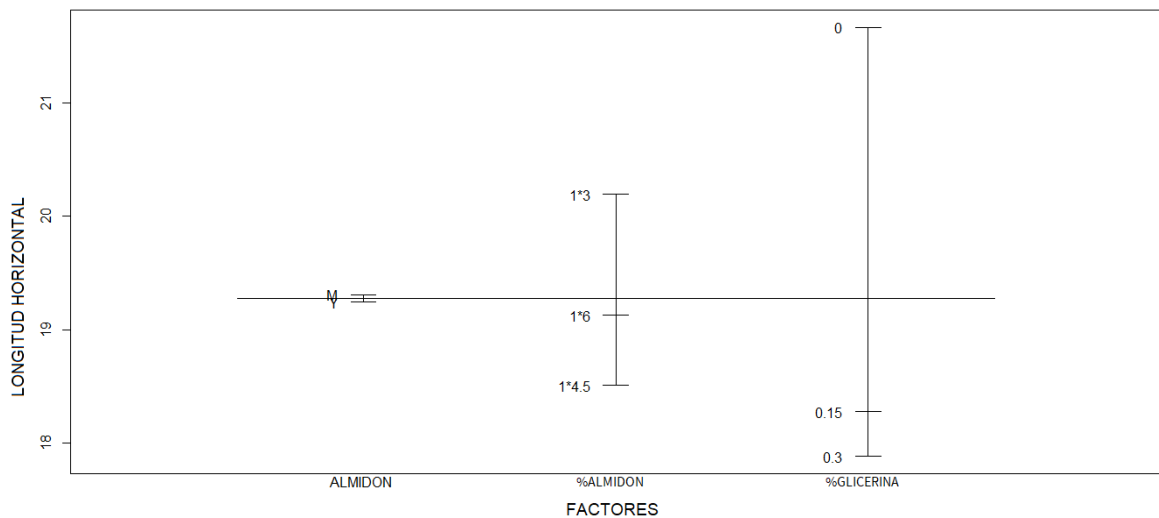
5.4.7. Modelo 7: Longitud horizontal

En la siguiente tabla se muestra la hipótesis del modelo (Tabla 44). De la gráfica de efectos univariados (Figura 52), se comprueba que el tipo de almidón no afecta el tamaño de la longitud horizontal.

Tabla 44. Hipótesis Modelo 7

Formulación de hipótesis	
Hipótesis nula:	El valor objetivo de longitud horizontal no depende del tipo de almidón, el % de almidón y el % de glicerina.
Hipótesis alternativa:	El valor objetivo de longitud horizontal depende del tipo de almidón, el % de almidón y el % de glicerina.
Nivel de significancia	5% = 0,05
Elección de la prueba estadística	Prueba de Kruskal-Wallis

Figura 52. Efecto multivariado del modelo 7



Por lo anterior se analiza los efectos individuales y combinados del porcentaje de almidón y glicerina, verificando con la prueba de “Kruskal-Wallis” la influencia de estos dos factores en la respuesta de la longitud horizontal (Tabla 45).

Tabla 45. Kruskall-Wallis

Prueba de Kruskall-Wallis	
Efecto	P-Valor
Valor objetivo en longitud altura en función del porcentaje de almidón	0
Valor objetivo en longitud altura en función del porcentaje de glicerina	0

Nuevamente se realiza un análisis post hoc de rangos de Wilcoxon con ajuste de Bonferroni en los p-valores, para comprobar de forma detallada el efecto de las variables, concluyendo que el contenido de almidón afecta el comportamiento de la respuesta, ejerciendo un mayor efecto con un porcentaje de almidón de “1-3” (Tabla 46), y en el caso del porcentaje de glicerina se obtuvieron mayores cambios con un contenido de “0 %” (Tabla 47).

Tabla 46. Efecto contenido de almidón

Grupos de comparación	P-Valor	Decisión
“1-4.5”-“1-3”	0	Rechazar la hipótesis nula
“1-6”-“1-3”	0	Rechazar la hipótesis nula
“1-6”-“1-4.5”	0	Rechazar la hipótesis nula

Tabla 47. Efecto contenido de glicerina

Grupos de comparación	P-Valor	Decisión
0.15-0	0	Rechazar la hipótesis nula
0.3-0	0	Rechazar la hipótesis nula
0.3-0.15	0	Rechazar la hipótesis nula

- SÍNTESIS DE LOS RESULTADOS

Una vez establecidos estos resultados se puede hacer una síntesis del comportamiento de los dispositivos de forma particular por cada variable examinada.

- Esfuerzo A y Esfuerzo B: se encontró una alta influencia del contenido de glicerina ("0,3"), particularmente presenta una mayor resistencia con las mezclas de almidón de yuca.
- Deformación: La mayor deformación se encuentra para las mezclas de maíz, con un porcentaje medio de glicerina ("0,15")
- Ángulo entre caras: La mejor combinación posible para alcanzar el valor objetivo (0° de inclinación entre caras opuestas), se encuentra al implementar almidón de maíz, con un alto porcentaje de almidón ("1-3"), y un bajo porcentaje de glicerina (0%).
- Ángulo entre vértices: Los mejores resultados para la repuesta objetivo de este parámetro (90° de inclinación entre vértices), se alcanza con los almidones de maíz y un alto contenido de glicerina ("0,3").
- Altura del dispositivo: Las variables combinadas que más se aproximan al valor objetivo de la altura del dispositivo (25mm), fue la proporción de "1-3" de almidón de maíz, con el menor porcentaje de glicerina (0%).
- Longitud horizontal: El valor objetivo de este parámetro se establece en un tamaño de 25mm, siendo posible alcanzar dicho valor con cualquiera de los dos almidones, pero en las proporciones de almidón en "1-3" y con un bajo contenido de glicerina.

6. Potencial aplicación del dispositivo

6.1 Capacidad de transporte

Para el estudio del potencial transporte de compuestos activos mediante los dispositivos de almidón gelatinizado, se propone inicialmente evaluar la estabilidad de las estructuras de almidón de yuca y maíz que mejor respuesta al esfuerzo mecánico presentaba. En la sección “5.2. Caracterización Mecánica de los dispositivos”, se comprobó que la mezcla “Y_1-4,5-0,15”, con un contenido de almidón de yuca de 20% y 15% de glicerina (porcentaje respecto al contenido de base seca) presenta la mejor respuesta de esfuerzo mecánico (Esfuerzo-A: 1,871MPa; Esfuerzo-B 3,539MPa). En el caso del almidón de maíz se encontró que la mezcla “M_1-3-0.3” presentó la mejor respuesta de esfuerzo mecánico dentro del conjunto de resultados de las pruebas mecánicas (Esfuerzo-A: 2,791MPa; Esfuerzo-B 2,829MPa).

Una prueba adicional consistió en sumergir los dispositivos de almidón de maíz y yuca, con el mayor esfuerzo mecánico, en un recipiente PBS durante 2 horas a temperatura ambiente, de lo cual fue posible comprobar que las estructuras de almidón de maíz colapsaban en un corto periodo de tiempo (30 a 60 min), mientras la estructura de almidón de yuca mantenía su forma, con un mínimo desprendimiento de material. Por lo anterior se propuso evaluar el potencial uso de las estructuras de almidón de yuca “Y_1-4,5-0,15”, usando como medio de transporte para el compuesto activo Diclofenaco sódico - DS.

Se incorporó un contenido del 1% de DS, respecto al peso final del dispositivo seleccionado, tomando como referencia la dosificación para aplicaciones tópicas en forma de gel (1%) (Altman et al., 2015) (Kołodziejska & Kołodziejczyk, 2018), y la investigación de Nikkola (2008) donde se elabora un dispositivo combinado, como medio de implante y transporte de DS, incorporando hasta un 8% del compuesto activo respecto al peso total

del dispositivo (Nikkola et al., 2008). También se incorporó el 1% de DS, con el fin de evitar grandes efectos respecto a la mezcla seleccionada (Y_1-4,5-0,15).

Para definir la cantidad de DS a incluir en la mezcla, se determina el promedio del peso de los prismas obtenidos con el tipo de mezcla seleccionada (peso de los dispositivos de la mezcla “Y-1-4,5-0,15”: 2,627g), comparado con el promedio del material extruido previo al secado (8,227g), y se calcula el valor del 1% de DS que debe permanecer en el dispositivo al finalizar el proceso de manufactura, conteniendo cada dispositivo un total aproximado de DS de 27mg.

En total se elaboraron 6 dispositivos cargados con DS, de los cuales tres se usaron para comprobar el transporte y liberación del compuesto activo (1T, 2T y 3T), y otras tres muestras se usaron para evaluar las características mecánicas y dimensionales (1M, 2M y 3M). En la siguiente Tabla 48 se muestra los parámetros obtenidos de peso (gr) y % de humedad por cada uno de los dispositivos elaborados.

Tabla 48. Selección de los dispositivos cargados con DS

Destino	Dispositivo	Peso (gr)	% Humedad
Evaluación Carga y Transporte	MUESTRA 1T	2,849	10,3
	MUESTRA 2T	2,318	8,7
	MUESTRA 3T	2,592	9,1
Pruebas Mecánicas y DS	MUESTRA 1M	2,663	9,3
	MUESTRA 2M	2,423	9,0
	MUESTRA 3M	2,469	8,1

Según el método descrito en la sección “3.6.4. Determinación de la capacidad de transporte de un compuesto activo”, se prepara el medio receptor de buffer fosfato, en el baño termostatado con agitación, para el acondicionamiento del dispositivo. En la siguiente fotografía se muestra el montaje del experimento (Figura 53). Se toman muestras 1, 4, 7, 10 y 12 horas, para posteriormente caracterizar la liberación del compuesto activo mediante el método por espectrometría UV-VIS con una longitud de onda a 276nm.

Figura 53. Adecuación de las pruebas de transporte

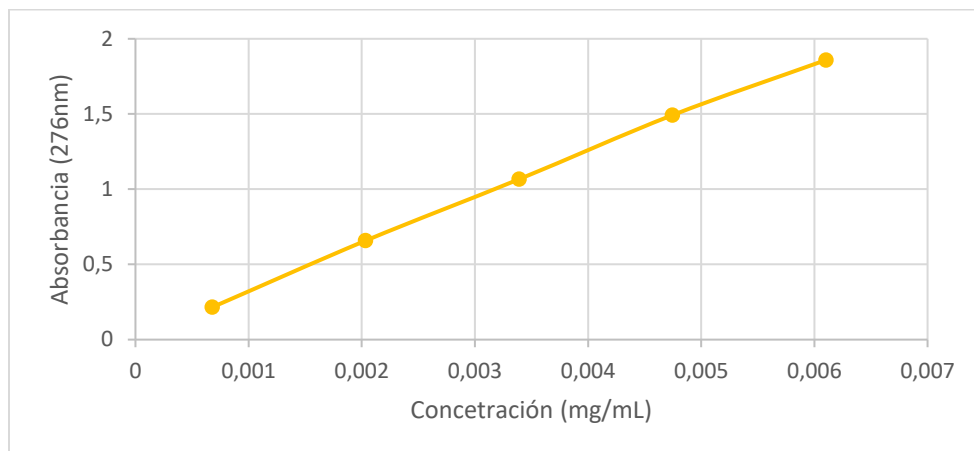


Para cuantificar el DS que se entrega al medio desde el dispositivo, se elaboraron por triplicado curvas de calibración, haciendo la preparación de las soluciones madre con un contenido de DS, de: 67,5; 68,0 y 67,9 mg. A partir de la ecuación de la recta (Ecuación 13), se establece la concentración de los dispositivos por cada registro. En las siguientes graficas se muestra la línea de calibración resultante (Figura 54), que responde a la siguiente Ecuación 15, con un nivel de significancia $R^2=0,9929$.

$$y = 304,03x + 0,0275$$

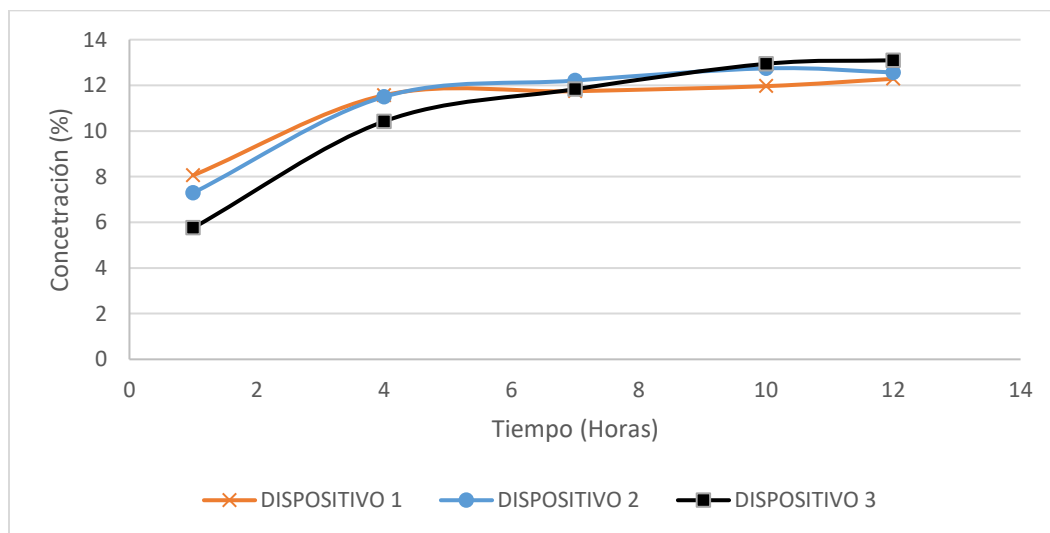
Ecuación 15

Figura 54. Curva de calibración del DS



A continuación se presenta las curvas de liberación de cada dispositivo evaluado (Figura 55). Como se observa los dispositivos pueden liberar en un periodo de 12 horas, una concentración de 12 a 14% de DS, respecto al contenido inicial cargado. En el Anexo H se muestran las curvas obtenidas por cada dispositivo.

Figura 55. Curvas de liberación del compuesto activo



Los prismas manufacturados presentan un transporte controlado, siendo posible inicialmente cargar la mezcla con el compuesto activo, para la conformación del dispositivo, y posterior liberación en el medio seleccionado.

6.2 Caracterización de la mezcla y dispositivo cargados

6.2.1 Medición de reología de la mezcla seleccionada

Para la caracterización reológica de la mezcla “Y-1-4,5-0,15”, con el 1% de DS, se preparó previamente la dispersión con DS, hasta la gelatinización. La mezcla se mantuvo en un rango de temperaturas de 20 - 25°C (temperatura inicial de las mezclas dentro del tanque reservorio).

Se identificaron los valores de los módulos de almacenamiento y pérdida (comportamiento viscoelástico lineal), para cada uno de los métodos de estado oscilatorio, con barridos de tiempo, amplitud y frecuencia, realizados a una temperatura de 25°C y una frecuencia constante de 10 rad/seg. Para el primer análisis por barrido de tiempo, se hizo un análisis de 180 segundos a una deformación de 0,1%, obteniendo una resistencia continua en los módulos de almacenamiento ($G' = 220,98$ Pa) y pérdida ($G'' = 1031,32$ Pa).

De la gráfica del barrido de amplitud, obtenida en un rango de deformación de 0,1 a 100%, se aprecia un decrecimiento de la resistencia del módulo de almacenamiento en 2,52% de deformación, con un valor de esfuerzo de 1016,36 Pa, el módulo de pérdida presenta un leve aumento de pendiente en el mismo rango de deformación y un decaimiento posterior al 50%.

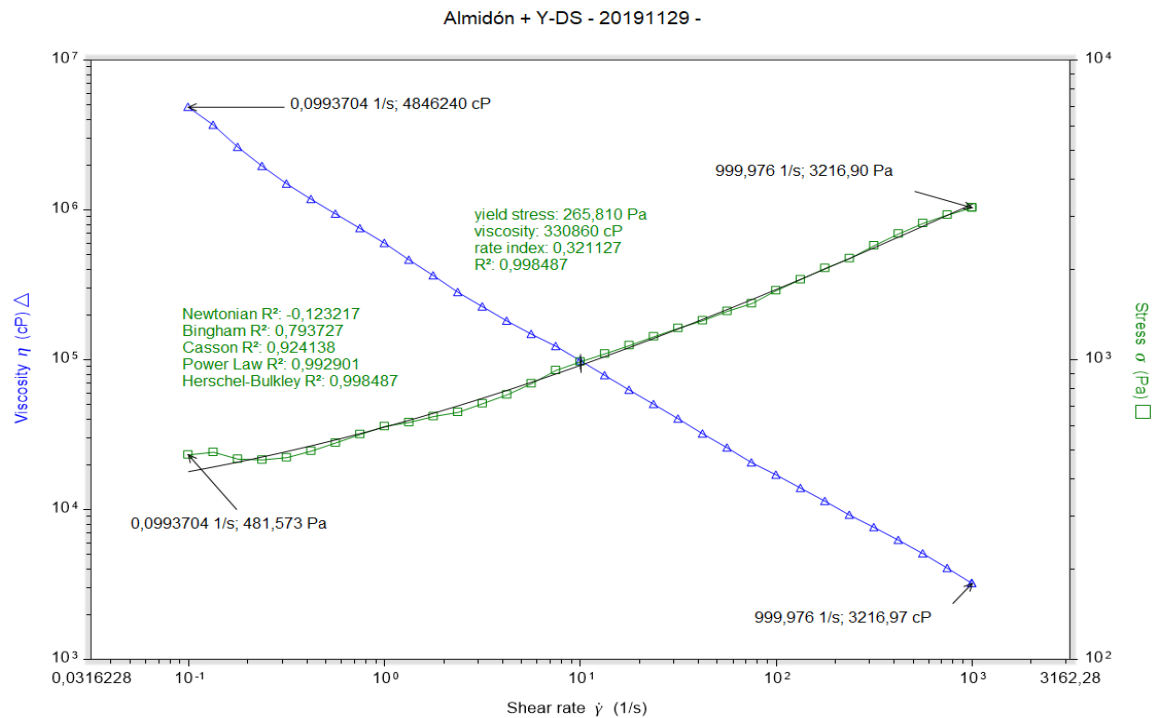
En el segundo barrido de tiempo (preparado a 60 segundos y a una deformación de 1%), se evidencia un leve aumento en la resistencia de los módulos a lo largo del tiempo.

En el barrido de frecuencias de 200 a 0,2 rad/seg, el comportamiento de los módulos es creciente (G' : de 107,49 Pa hasta 487,23 Pa, y G'' : de 597,91 Pa a 1481,78 Pa), con una pendiente mayor para el módulo de pérdida. En contraste la viscosidad compleja “ G^* ” mantiene un decaimiento como respuesta a los esfuerzos de corte en el rango de frecuencias. La viscosidad compleja ($G^* = (G'^2 + G''^2)^{0.5}$) se puede relacionar con la capacidad de la mezcla de resistir deformación a cargas compresivas (Z. Liu et al., 2019).

Finalmente En el barrido de flujo (Figura 56), se presenta el comportamiento de la mezcla expuesta a una velocidad de corte en el rango de 0,1 a 1000 s⁻¹, respecto a la viscosidad dinámica (η) y esfuerzo (σ). A partir del análisis, con el software del equipo, se identifica que el comportamiento de la mezcla se aproxima a un modelo de ley de potencias (con un

valor aproximado de significancia $R^2=0,9929$) o a un modelo Herschel-Bulkley ($R^2=0,9985$). También se observan los resultados para la viscosidad dinámica (330,86 Pa/s), esfuerzo a fluencia (265,81 Pa), y el valor del índice de fluidez (0,321).

Figura 56. Caracterización reológica por barrido de flujo



6.2.2 Análisis dimensional de los dispositivos

Se registran las dimensiones de los dispositivos cargados con DS, usando la misma metodología planteada para analizar los demás dispositivos, obteniendo los siguientes resultados (Tabla 49). Al comparar la respuesta de la altura de los dispositivos cargados con DS, con los dispositivos en su combinación original (Y_1-4,5-0,15), se identifica que decrece la altura de los dispositivos cargados con DS en un 2,45% (Figura 28). De la misma forma las longitudes horizontales de los dispositivos se reducen cuando se incorpora el DS en un 6,17% (Figura 30), lo cual puede tratarse de un encogimiento del material por efecto de la incorporación del DS, pero se deben hacer más pruebas para confirmar esta hipótesis.

Tabla 49. Alturas y Longitudes horizontales de los dispositivos cargados con DS

Altura del dispositivo cargado con DS(mm)				
Muestra	Muestra 1	Muestra 2	Muestra 3	Promedio Total
Promedio	19,63	17,88	18,47	
SD	0,84	1,46	1,4	
Longitudes horizontales del dispositivo cargado con DS (mm)				
Muestra	Muestra 1	Muestra 2	Muestra 3	Promedio Total (mm)
Promedio	17,84	16,85	17,29	17,32
SD	2,67	2,78	1,68	

En la siguiente Tabla 50 se presenta la respuesta de los ángulos que forman los dispositivos cargados con DS.

Tabla 50. Respuesta del ángulo “a1” del dispositivo cargado con DS”

Angulo “a1” (grados)				
Muestra	Muestra 1	Muestra 2	Muestra 3	Promedio Total (grados)
Promedio	100,14	93,48	87,58	93,73
SD	12,45	13,56	13,11	
Angulo “a2” (grados)				
Muestra	Muestra 1	Muestra 2	Muestra 3	Promedio Total (grados)
Promedio	95,98	89,77	87,21	90,99
SD	12,32	8,52	11,95	
Angulo “a3” (grados)				
Muestra	Muestra 1	Muestra 2	Muestra 3	Promedio Total (grados)
Promedio	90,45	90,75	90,39	90,53
SD	10,38	7,57	11,16	
Angulo entre caras “b1-b2” (grados)				
Muestra	Muestra 1	Muestra 2	Muestra 3	Promedio Total (grados)
Promedio	9,19	6,43	9,16	8,26
SD	10,09	5,49	5,16	

Nuevamente al comparar estos resultados con la respuesta del dispositivo sin DS, para cada uno de los ángulos: “a1”, “a2”, “a3” y “b1-b2”, se evidencia que las pieza con DS presentaron una deformación levemente superior respecto al dispositivo sin DS.

Las dimensiones de las trayectorias depositadas se muestran a continuación (Tabla 51), De los resultados obtenidos se identifica un cambio respecto a los datos obtenidos con el dispositivo sin DS, con leves cambios para las mediciones “D1” y “D2”.

Tabla 51. Ancho y altura de las trayectorias

Ancho trayectorias (mm)				
Muestra	Muestra 1	Muestra 2	Muestra 3	Promedio Total (mm)
Promedio	0,571	0,585	0,494	0,550
SD	0,039	0,092	0,03	
Altura trayectorias (mm)				
Muestra	Muestra 1	Muestra 2	Muestra 3	Promedio Total (mm)
Promedio	0,682	0,71	0,635	0,676
SD	0,025	0,073	0,072	

6.2.3 Ensayos Mecánicos de los dispositivos

Bajo las mismas condiciones de ensayo dispuestas para la caracterización mecánica de los demás dispositivos, se identifica la resistencia mecánica de las probetas cargadas con DS. El área transversal (A) para los dispositivos con DS se aproximó a 283,92 mm² y para el dispositivo sin DS fue de 353,52 mm². El área cubierta por las trayectorias “Aa” presenta un valor de 171,2 mm².

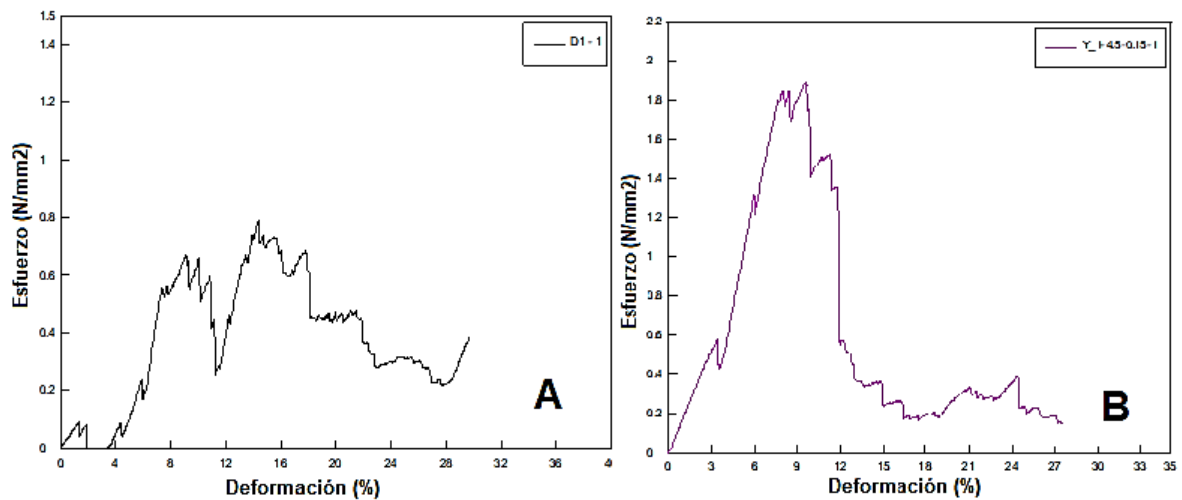
De las propiedades mecánicas se encuentra que los dispositivos cargados con DS en general presentaron un menor esfuerzo y módulo de elasticidad (Tabla 52), respecto a los dispositivos sin DS con un cambio del 54,8% en el Esfuerzo B, y 59,5% para el módulo de elasticidad promedio), pero aumentó el porcentaje de deformación (desde un valor de 9,26 a 12,8%).

Tabla 52. Respuesta mecánica de los dispositivos cargados con DS

PROPIEDAD MECÁNICA	ESFUERZO A (N/mm ²)	ESFUERZO B (N/mm ²)	DEFORMACIÓN (%)	MÓDULO ELASTICIDAD (N/mm ²)
Promedio	0,9	1,6	12,8	14,1
SD	0,1	0,4	5,9	3,9

Así mismo la respuesta grafica del ensayo mecánico total de los dos tipos de dispositivos: con DS (Figura 57-A) y sin DS (Figura 57-B), demuestra una respuesta frágil de las muestras cargadas con DS, con efectos de grandes y pequeñas fracturas continuas a lo largo de la prueba de compresión. De todo lo anterior se puede evidenciar un efecto en la incorporación del DS, que afecta en menor medida el comportamiento geométrico, pero altera la respuesta mecánica de los dispositivos, posiblemente debido a la baja solubilidad del DS en agua (Žilnik et al., 2007), pero se deben realizar otras pruebas para confirmar dicha afirmación.

Figura 57. Respuesta mecánica dispositivo con DS (A) y dispositivo original (B)



Discusión de resultados

Las diferentes técnicas de AM se han constituido como un referente de manufactura flexible, por su fácil operación y bajos costos en el desarrollo de productos personalizados, y especialmente la AM por extrusión ofrece una alternativa accesible para el procesamiento de materiales con características especiales, como los biopolímeros, biocerámicos, entre otros materiales aplicados en el sector farmacéutico.

Los almidones propuestos en los grupos de mezclas, presentaron respuestas diferentes ante las mismas condiciones de procesamiento. El tamaño del diámetro de cada mezcla de almidón gelatinizado, fue el primer referente para ajustar las condiciones del proceso por AM de forma particular por cada grupo de almidón, aun cuando era similar la tasa de material depositado para todas las mezclas (0,360 g/min, ajustando los parámetros de la velocidad del extrusor y presión, para cada tipo de mezcla). A partir de estos resultados se propuso caracterizar cada grupo de almidón de forma independiente, ya que se trataba de dos biopolímeros con respuestas diferentes.

Se ha documentado ampliamente el efecto de hinchamiento de los almidones gelatinizados, por efecto de los fenómenos térmicos y la interacción molecular con plastificantes (Gurgel et al., 2011; Yingfeng et al., 2015), pero las diferencias en los diámetros de salida entre los almidones de maíz y yuca también se relaciona con el efecto de las propiedades de los sistemas de almidones dispersos (Solarte-Montúfar et al., 2019), y la proporción de cadenas de amilosa y amilopectina en los procesos de retrogradación (Yussof et al., 2013), evidenciando un efecto directo entre el porcentaje de amilosa y un inhibidor del hinchamiento (Lii et al., 1996), el almidón gelatinizado de yuca generalmente presenta un bajo porcentaje de amilosa respecto al almidón de maíz (Hernández-Medina et al., 2008), lo cual puede desencadenar el resultado observado en el proceso.

Se pudo identificar una mayor velocidad de extrusión de las mezclas de almidón de maíz, respecto a las mezclas de almidón de yuca, bajo condiciones similares de procesamiento (temperatura, diámetro de la boquilla, niveles de velocidad y presión). Esta respuesta puede estar relacionada con la viscosidad propia de los almidones gelatinizados, explorado en otros procesos de extrusión, teniendo en cuenta que se ha evidenciado una mayor viscosidad en los almidones de yuca frente a los resultados del almidón de maíz (Fallahi et al., 2016).

Las mezclas con un contenido de almidón de 15% tendían a mantener un mejor comportamiento dimensional respecto al valor objetivo: dimensiones longitudinales de 25 mm (ancho, largo y alto), ángulo entre caras adyacentes de 90° y ángulo entre caras opuestas de 0°. En contraste las mezclas con el mayor contenido de humedad presentaron una mayor diferencia dimensional y geométrica, respecto al valor objetivo.

El mejor comportamiento para el esfuerzo mecánico del grupo de mezclas de almidón de yuca (Esfuerzo A: 1,9 MPa y Esfuerzo B: 3,5 MPa), se alcanzó al combinar un contenido de almidón del 20% y glicerina del 15% (respecto al contenido de base seca). La mezcla de almidón de maíz con la mejor respuesta de resistencia mecánica (Esfuerzo A: 2,7 MPa y Esfuerzo B: 2,8 MPa), se obtuvo con la combinación de 25% de almidón de maíz y 30% de glicerina (respecto al contenido de base seca).

Se pudo constatar el potencial transporte y liberación del compuesto activo incorporado en el dispositivo seleccionado. Obteniendo una liberación similar entre las tres replicas evaluadas. La prueba de medición reológica permitió identificar el valor de la viscosidad dinámica (330,86 Pa/s) y esfuerzo a fluencia (265,81 Pa) de la mezcla gelatinizada que contenía el compuesto activo, aproximando su comportamiento a un modelo Herschel-Bulkley (con un valor de significancia $R^2=0,9929$).

La incorporación de la pistola de calor para la eliminación de humedad permitió mejorar la capacidad de auto soporte de las estructuras, incluso para las mezclas con un alto contenido de humedad. La temperatura y flujo de aire aplicado sobre los dispositivos durante el procesamiento, se mantuvo en un rango similar para todas las mezclas (Flujo proveniente de la pistola de calor: 45 ± 5 °C y $2 \pm 0,3$ m/s, y velocidad de la corriente de aire del compresor: $3 \pm 0,5$ m/s). Las condiciones en la manufactura de cada mezcla

pueden optimizarse según sus características particulares. Por lo anterior es probable que algunos dispositivos puedan alcanzar una mejor respuesta mecánica y dimensional, al ajustar todas las variables que afectan la estrategia de manufactura de forma específica.

En sus inicios la técnica conocida como "Hot Melt Extrusion" o extrusión de fusión en caliente, se desarrolló para la producción masiva de productos plásticos y alimentos, pero desde hace tres décadas fue implementada por la industria farmacéutica para la producción de medicamentos pocos solubles, principalmente por la eficiente obtención de soluciones solidas estables, siendo su principal desventaja los efectos térmicos sobre los ingredientes activos sensibles al calor (Maniruzzaman et al., 2012). Por lo tanto el desarrollo de nuevos procesos para la obtención de sistemas de transporte farmacéuticos, deben adecuarse no solo a las necesidades del paciente y su tratamiento, sino también a las condiciones funcionales del compuesto activo. Posiblemente la técnica de AM por extrusión en frio para el procesamiento de los almidones pre-gelatinizados, pueda suplir dicha necesidad, ya que las mezclas se mantendrían en un rango de temperaturas por debajo de la alteración del compuesto activo, siendo necesario constatar esta hipótesis en futuras investigaciones.

Conclusiones y recomendaciones

6.3 Conclusiones

La plataforma experimental robotizada de AM por extrusión fue concebida a través de la experiencia desarrollada a lo largo del proyecto de investigación, partiendo del interés por adaptar las diversas características de los dos grupos de almidones gelatinizados, a las condiciones de operación del equipo extrusor y brazo robótico, en la construcción de dispositivos de biopolímeros de almidón con una geometría predefinida. Las etapas para la transformación de las materias primas y posterior obtención de los dispositivos de biopolímero, tuvieron los siguientes estudios característicos del proceso: definición del rango de operación de los dispositivos (niveles de velocidad del motor y presión del tanque reservorio), restricción de mezclas a procesar, efecto del procesamiento sobre los almidones gelatinizados (velocidad y tasa de material extruido), control de velocidad y posicionamiento del brazo robot. De forma específica el proceso fue caracterizado para la transformación de los almidones gelatinizados, y posiblemente a futuro ampliar su capacidad en el procesamiento de otros materiales con características similares, aplicados a una gran gama de productos.

Cada uno de los grupos de almidón de maíz y yuca fueron procesados de forma similar, pero se obtuvieron diferentes respuestas geométricas, las cuales se caracterizaron mediante una metodología particular, con la cual diferenciar cada parámetros de respuesta (altura, distancia horizontal o lateral, ángulo entre caras adyacentes y opuestas), siendo posible interpretar de forma cuantitativa el grado aproximación de la geometría obtenida respecto a las características de un prisma rectangular ideal.

Los ensayos mecánicos de los dispositivos presentaron un amplio rango de respuestas, definidos por las propiedades únicas, tanto del material como del proceso de AM por extrusión, obteniendo tanto comportamientos frágiles como deformaciones constantes. Cada una de estas respuestas puede tener una aplicación diferente y no necesariamente se descartan los resultados obtenidos. También es importante reconocer el amplio espectro de posibles modificaciones del proceso, que pueden mejorar las respuestas de los dispositivos, incluso con las mismas proporciones de ingredientes-

Se comprobó el potencial alcance de la plataforma experimental robotizada de AM por extrusión, en la fabricación de dispositivos de biopolímeros de almidón, y la capacidad de incorporar un compuesto activo en una mezcla seleccionada, para posteriormente liberarlo el DS en un medio de BF. Todo lo cual no había tenido precedentes, para el tipo de ingredientes procesados con la técnica de AM por extrusión (almidón, glicerina y agua destilada) y el campo de aplicación en áreas farmacéuticas de estos dispositivos.

6.4 Recomendaciones

El uso del brazo robótico para la construcción de los dispositivos de biopolímero, ofrece una alta resolución y repetibilidad de la respuesta obtenida, especialmente para análisis exploratorios en AM por extrusión. Pero se debe enlazar con otras interfaces para gestionar la manufactura de piezas con una mayor complejidad, ya que comercialmente estos equipos están diseñados para realizar tareas repetitivas puntuales de alta precisión a escala industrial (aplicaciones de soldadura y pintura, entre otros).

Con el fin de mejorar el procesamiento de las mezclas de almidón mediante la técnica de AM por extrusión, y eventualmente optimizar las propiedades mecánicas y dimensionales de los dispositivos fabricados, se propone para las futuras investigaciones, correlacionar el comportamiento reológico de las mezclas con las características geométricas del extrusor. También se puede evaluar la incorporación de otros componentes biocompatibles en las mezclas, para mejorar las propiedades de los dispositivos.

Mediante los bancos de prueba fue posible evaluar el comportamiento de las mezclas ante los diferentes niveles de velocidad del extrusor y presión proveniente del tanque reservorio, y de esta forma ajustar un rango de respuesta del sistema y aplicar dichas condiciones en la plataforma de AM. Esta metodología puede ser replicada por otros investigadores que deseen explorar la AM de nuevos materiales.

Se sugiere seguir explorando las técnicas de AM, para determinar las condiciones que permitan la elaboración de piezas a una escala micrométrica, con potenciales aplicaciones en el campo biomédico y farmacéutico, ya que es un campo de acción que puede tener grandes implicaciones, principalmente por las características biocompatibles del almidón.

Referencias

- Adafruit-Industries-LLC. (2009). *Motor shield library*. <https://cdn-learn.adafruit.com/downloads/pdf/adafruit-motor-shield-v2-for-arduino.pdf>
- Altman, R., Bosch, B., Brune, K., Patrignani, P., & Young, C. (2015). Advances in NSAID development: Evolution of diclofenac products using pharmaceutical technology. *Drugs*, 75(8), 859–877. <https://doi.org/10.1007/s40265-015-0392-z>
- ASTM. (2009). *ASTM F2792-10*.
- ASTM. (2016). *Standard Test Method for Compressive Properties of Rigid Cellular Plastics* 1. 16–20. <https://doi.org/10.1520/D1621-16.2>
- Bartolomei, M., Rodomonte, A., Antoniella, E., Minelli, G., & Bertocchi, P. (2007). *Hydrate modifications of the non-steroidal anti-inflammatory drug diclofenac sodium: Solid-state characterisation of a trihydrate form*. 45, 443–449. <https://doi.org/10.1016/j.jpba.2007.07.002>
- Basiak, E., Lenart, A., & Debeaufort, F. (2017). International Journal of Biological Macromolecules Effect of starch type on the physico-chemical properties of edible films. *International Journal of Biological Macromolecules*, 98, 348–356. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2017.01.122>
- Bellini, A., Güçeri, S., & Bertoldi, M. (2004). Liquefier Dynamics in Fused Deposition. *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, 126(2), 237. <https://doi.org/10.1115/1.1688377>
- Bellini, A., Shor, L., & Guceri, S. I. (2005). New developments in fused deposition modeling of ceramics. *Rapid Prototyping Journal*, 11(4), 214–220. <https://doi.org/10.1108/13552540510612901>
- Bridgewater, J., & Benbow, J. (1995). *Paste flow and extrusion*. Oxford University Press (Vol. 41).
- Calignano, F., Manfredi, D., Ambrosio, E. P., Biamino, S., Lombardi, M., Atzeni, E., Salmi,

- A., Minetola, P., Iuliano, L., & Fino, P. (2017). Overview on additive manufacturing technologies. *Proceedings of the IEEE*, 105(4), 593–612. <https://doi.org/10.1109/JPROC.2016.2625098>
- Carraher, C. E. J. (2017). Chapter 2 Polymer Structure (Morphology). In *Introduction to Polymer Chemistry* (pp. 27–53).
- Chen, H., Xie, F., Chen, L., & Zheng, B. (2019). Effect of rheological properties of potato , rice and corn starches on their hot- extrusion 3D printing behaviors. *Journal of Food Engineering*, 244(July 2018), 150–158. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2018.09.011>
- Dankar, I., Haddarah, A., Omar, F. E. L., & Sepulcre, F. (2018). *Trends in Food Science & Technology 3D printing technology: The new era for food customization and elaboration*. 75(March), 231–242. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2018.03.018>
- Derossi, A., Caporizzi, R., Azzollini, D., & Severini, C. (2018). Application of 3D printing for customized food . A case on the development of a fruit-based snack for children. *Journal of Food Engineering*, 220, 65–75. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2017.05.015>
- Derossi, A., Paolillo, M., Caporizzi, R., & Severini, C. (2020). Extending the 3D food printing tests at high speed . Material deposition and effect of non-printing movements on the final quality of printed structures. *Journal of Food Engineering*, 275(August 2019), 109865. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2019.109865>
- Ding, Y., Dwivedi, R., & Kovacevic, R. (2017). Robotics and Computer-Integrated Manufacturing Process planning for 8-axis robotized laser-based direct metal deposition system: A case on building revolved part. *Robotics and Computer Integrated Manufacturing*, 44, 67–76. <https://doi.org/10.1016/j.rcim.2016.08.008>
- Englert, C., Brendel, J. C., Majdanski, T. C., Yildirim, T., Schubert, S., Gottschaldt, M., Windhab, N., & Schubert, U. S. (2018). Progress in Polymer Science Pharmapolymers in the 21st century : Synthetic polymers in drug delivery applications. *Progress in Polymer Science*, 87, 107–164. <https://doi.org/10.1016/j.progpolymsci.2018.07.005>
- Escalante-Aburto, A., Ponce-García, N., Ramírez-Wong, B., Santiago-Ramos, D., Véles-Medina, J. J., & de Dios Figueroa Cárdenas, J. (2016). Effect of extrusion factors and particle size on starch properties of nixtamalized whole blue corn snacks. *Starch/Staerke*, 68(11–12), 1111–1120. <https://doi.org/10.1002/star.201500316>
- Fallahi, P., Muthukumarappan, K., & Rosentrater, K. A. (2016). Functional and structural

- properties of corn, potato, and cassava starches as affected by a single-screw extruder. *International Journal of Food Properties*, 19(4), 768–788. <https://doi.org/10.1080/10942912.2015.1042112>
- FDA. (2017). *Classification of Products as Drugs and Devices & Additional Product Classification Issues: Guidance for Industry and FDA Staff*. Septiembre, 1–12. [papers2://publication/uuid/2AA84724-F418-49FE-ACEA-395A17AD430D](https://www.fda.gov/oc/papers2/publication/uuid/2AA84724-F418-49FE-ACEA-395A17AD430D)
- Felbrich, B., Wulle, F., Allgaier, C., Menges, A., Verl, A., Wurst, K., & Nebelsick, J. H. (2018). A novel rapid additive manufacturing concept for architectural composite shell construction inspired by the shell formation in land snails A novel rapid additive manufacturing concept for architectural composite shell construction inspired by the shell fo.
- Feng, P., He, J., Peng, S., Gao, C., Zhao, Z., Xiong, S., & Shuai, C. (2019). Characterizations and interfacial reinforcement mechanisms of multicomponent biopolymer based scaffold. *Materials Science and Engineering C*, 100(December 2018), 809–825. <https://doi.org/10.1016/j.msec.2019.03.030>
- Gibson, I., Rosen, D. W., & Stucker, B. (2015). Introduction and Basic Principles. In *Additive Manufacturing Technologies: Rapid Prototyping to Direct Digital Manufacturing* (pp. 1–18). Springer US. https://doi.org/10.1007/978-1-4419-1120-9_1
- Goole, J., & Amighi, K. (2016). 3D printing in pharmaceuticals: A new tool for designing customized drug delivery systems. *International Journal of Pharmaceutics*, 499(1–2), 376–394. <https://doi.org/10.1016/j.ijpharm.2015.12.071>
- Goyanes, A., Wang, J., Buanz, A., Martínez-Pacheco, R., Telford, R., Gaisford, S., & Basit, A. W. (2015). 3D Printing of Medicines: Engineering Novel Oral Devices with Unique Design and Drug Release Characteristics. *Molecular Pharmaceutics*, 12(11), 4077–4084. <https://doi.org/10.1021/acs.molpharmaceut.5b00510>
- Gurgel, M., Vieira, A., Altenhofen, M., Oliveira, L., & Beppu, M. M. (2011). Natural-based plasticizers and biopolymer films : A review. *European Polymer Journal*, 47(3), 254–263. <https://doi.org/10.1016/j.eurpolymj.2010.12.011>
- Hassan, M., Dave, K., Chandrawati, R., Dehghani, F., & Gomes, V. G. (2019). 3D printing of biopolymer nanocomposites for tissue engineering : Nanomaterials , processing and structure-function relation. *European Polymer Journal*, 121(October), 109340. <https://doi.org/10.1016/j.eurpolymj.2019.109340>
- Hernández-Medina, M., Torruco-Uco, J. G., Chel-Guerrero, L., & Betancur-Ancona, D. (2008). Caracterización fisicoquímica de almidones de tubérculos cultivados en

- Yucatán, México. *Ciencia e Tecnología de Alimentos*, 28(3), 718–726. <https://doi.org/10.1590/s0101-20612008000300031>
- Horn, T. J., & Harrysson, O. L. A. (2012). Overview of current additive manufacturing technologies and selected applications. *Science Progress*, 95(3), 255–282. <https://doi.org/10.3184/003685012X13420984463047>
- ISO/ASTM. (2015). *ISO/ASTM 52900:2015(en), Additive manufacturing — General principles — Terminology*. <https://www.iso.org/obp/ui/#iso:std:iso-astm:52900:ed-1:v1:en>
- Johnson, R. ., Mwaikambo, L. ., & Tucker, N. (2003). *Rapra Review Re ports*. 14(3), 3144.
- Kempin, W., Franz, C., Koster, L. C., Schneider, F., Bogdahn, M., Weitschies, W., & Seidlitz, A. (2017). Assessment of different polymers and drug loads for fused deposition modeling of drug loaded implants. *European Journal of Pharmaceutics and Biopharmaceutics*, 115, 84–93. <https://doi.org/10.1016/j.ejpb.2017.02.014>
- Kołodziejska, J., & Kołodziejczyk, M. (2018). Diclofenac in the treatment of pain in patients with rheumatic diseases. *Reumatologia*, 56(3), 174–183. <https://doi.org/10.5114/reum.2018.76816>
- Koski, C., Onuike, B., Bandyopadhyay, A., & Bose, S. (2018). Starch-hydroxyapatite composite bone sca ff old fabrication utilizing a slurry extrusion-based solid freeform fabricator. *Additive Manufacturing*, 24(August), 47–59. <https://doi.org/10.1016/j.addma.2018.08.030>
- Kuo, C., Liu, L., Teng, W., & Chang, H. (2016). Preparation of starch / acrylonitrile-butadiene-styrene copolymers (ABS) biomass alloys and their feasible evaluation for 3D printing applications. *Composites Part B*, 86, 36–39. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2015.10.005>
- Lagarrigue, S., & Alvarez, G. (2001). The rheology of starch dispersions at high temperatures and high shear rates: A review. *Journal of Food Engineering*, 50(4), 189–202. [https://doi.org/10.1016/S0260-8774\(00\)00239-9](https://doi.org/10.1016/S0260-8774(00)00239-9)
- Lam, C. X. F., Mo, X. M., Teoh, S. H., & Hutmacher, D. W. (2002). Scaffold development using 3D printing with a starch-based polymer. *Materials Science and Engineering C*, 20(1–2), 49–56. [https://doi.org/10.1016/S0928-4931\(02\)00012-7](https://doi.org/10.1016/S0928-4931(02)00012-7)
- Li, J. P., Habibovic, P., van den Doel, M., Wilson, C. E., de Wijn, J. R., van Blitterswijk, C. A., & de Groot, K. (2007). Bone ingrowth in porous titanium implants produced by 3D fiber deposition. *Biomaterials*, 28(18), 2810–2820.

- <https://doi.org/10.1016/j.biomaterials.2007.02.020>
- Li, X., Lian, Q., Li, D., Xin, H., & Jia, S. (2017). *applied sciences Development of a Robotic Arm Based Hydrogel Additive Manufacturing System for In-Situ Printing*. <https://doi.org/10.3390/app7010073>
- Ligon, S. C., Liska, R., Stampfl, J., Gurr, M., & Mülhaupt, R. (2017). Polymers for 3D Printing and Customized Additive Manufacturing. *Chemical Reviews*, 117(15), 10212–10290. <https://doi.org/10.1021/acs.chemrev.7b00074>
- Lii, C. Y., Tsai, M. L., & Tseng, K. H. (1996). Effect of amylose content on the rheological property of rice starch. *Cereal Chemistry*, 73(4), 415–420.
- Ling, C., Cernicchi, A., Gilchrist, M. D., & Cardiff, P. (2019). Mechanical behaviour of additively-manufactured polymeric octet-truss lattice structures under quasi-static and dynamic compressive loading. *Materials & Design*, 162, 106–118. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2018.11.035>
- Liu, J., Sun, L., Xu, W., Wang, Q., Yu, S., & Sun, J. (2019). Current advances and future perspectives of 3D printing natural-derived biopolymers. *Carbohydrate Polymers*, 207(June 2018), 297–316. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2018.11.077>
- Liu, Z., Bhandari, B., Prakash, S., Mantihal, S., & Zhang, M. (2019). Food Hydrocolloids Linking rheology and printability of a multicomponent gel system of carrageenan-xanthan-starch in extrusion based additive manufacturing. *Food Hydrocolloids*, 87(August 2018), 413–424. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2018.08.026>
- Maniruzzaman, M., Boateng, J. S., Snowden, M. J., & Douroumis, D. (2012). A Review of Hot-Melt Extrusion: Process Technology to Pharmaceutical Products. *ISRN Pharmaceutics*, 2012, 1–9. <https://doi.org/10.5402/2012/436763>
- Mantihal, S., Prakash, S., Godoi, F. C., & Bhandari, B. (2017). Optimization of chocolate 3D printing by correlating thermal and flow properties with 3D structure modeling. *Innovative Food Science and Emerging Technologies*, 44(May), 21–29. <https://doi.org/10.1016/j.ifset.2017.09.012>
- McCauley, M. (2011). *Stepper Library*. <https://www.arduino.cc/en/Reference/Stepper>
- Medina, J. A. (2008). Caracterización morfológica del granulo de almidón nativo Apariencia, forma, tamaño y su distribución. *Revista de Ingeniería*, unknown(27), 56–62. <https://doi.org/10.16924/riua.v0i27.280>
- Mishra, S., & Rai, T. (2006). Morphology and functional properties of corn, potato and tapioca starches. *Food Hydrocolloids*, 20(5), 557–566. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2005.01.001>

- Montgomery, D. (2012). Randomized Blocks, Latin Squares, and Related Designs. In *Design and Analysis of Experiments* (pp. 141–152).
- N. Turner, B., Strong, R., & A. Gold, S. (2014). A review of melt extrusion additive manufacturing processes: I. Process design and modeling. *Rapid Prototyping Journal*, 20(3), 192–204. <https://doi.org/10.1108/RPJ-01-2013-0012>
- Nafchi, A. M., Moradpour, M., Saeidi, M., & Alias, A. K. (2013). Thermoplastic starches: Properties, challenges, and prospects. *Starch/Staerke*, 65(1–2), 61–72. <https://doi.org/10.1002/star.201200201>
- National Instruments. (2014). *Arduino Toolkit*. http://www.ni.com/gate/gb/GB_EVALTLKTLVARDIO/US
- Nikkola, L., Viitanen, P., & Ashammakhi, N. (2008). Diclofenac sodium loaded multicomponent implant. *AIP Conference Proceedings*, 973(2008), 766–771. <https://doi.org/10.1063/1.2896878>
- Norman, J., Madurawe, R. D., Moore, C. M. V., Khan, M. A., & Khairuzzaman, A. (2017). A new chapter in pharmaceutical manufacturing: 3D-printed drug products. *Advanced Drug Delivery Reviews*, 108, 39–50. <https://doi.org/10.1016/j.addr.2016.03.001>
- Patel, B. K., & Seetharaman, K. (2006). Effect of heating rate on starch granule morphology and size. *Carbohydrate Polymers*, 65(3), 381–385. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2006.01.028>
- Sandoval, A., Farhat, I., & Fernández, a. (2007). COMPORTAMIENTO REOLÓGICO DE HARINAS Y ALMIDONES DE YUCA (Manihot esculenta CRANTZ) DURANTE. *Vitae*, 14(1), 6–15.
- Schlördt, T., Keppner, F., Travitzky, N., & Greil, P. (2012). Robocasting of alumina lattice truss structures. In *Journal of Ceramic Science and Technology* (Vol. 3, Issue 2, pp. 81–88). <https://doi.org/10.4416/JCST2012-00003>
- Solarte-Montúfar, J. G., Díaz-Murangal, A. E., Osorio-Mora, O., & Mejía-España, D. F. (2019). Rheological and functional properties of the starch from three varieties of Creole potato. *Informacion Tecnologica*, 30(6), 35–44. <https://doi.org/10.4067/S0718-07642019000600035>
- Sperling, L. H. (2005). Introduction to Polymer Science. In *Introduction to Physical Polymer Science* (pp. 1–28). John Wiley & Sons, Inc. <https://doi.org/10.1002/0471757128.ch1>
- Sun, Q., Rizvi, G. M., Bellehumeur, C. T., & Gu, P. (2008). Effect of processing conditions on the bonding quality of FDM polymer filaments. *Rapid Prototyping Journal*, 14(2),

- 72–80. <https://doi.org/10.1108/13552540810862028>
- Travitzky, N., Bonet, A., Dermeik, B., Fey, T., Filbert-Demut, I., Schlier, L., Schlördt, T., & Greil, P. (2014). Additive manufacturing of ceramic-based materials. *Advanced Engineering Materials*, 16(6), 729–754. <https://doi.org/10.1002/adem.201400097>
- Urhal, P., Weightman, A., Diver, C., & Bartolo, P. (2019). Robot assisted additive manufacturing: A review. 59(July 2018), 335–345. <https://doi.org/10.1016/j.rcim.2019.05.005>
- USP. (2012). *Physical Tests - Loss on Drying*.
- USP. (2016). Diclofenac Sodium Extended-Release Tablets. In *Diclofenac Sodium Extended-release Tablets*.
- Vaezi, M., & Yang, S. (2015). Extrusion-based additive manufacturing of PEEK for biomedical applications. *Virtual and Physical Prototyping*, 10(3), 123–135. <https://doi.org/10.1080/17452759.2015.1097053>
- Vilaplana, F., Hasjim, J., & Gilbert, R. G. (2012). Amylose content in starches: Toward optimal definition and validating experimental methods. *Carbohydrate Polymers*, 88(1), 103–111. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2011.11.072>
- Waterschoot, J., Gomand, S. V., & Delcour, J. A. (2016). Impact of swelling power and granule size on pasting of blends of potato, waxy rice and maize starches. *Food Hydrocolloids*, 52, 69–77. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2015.06.012>
- Xie, F., Yu, L., Su, B., Liu, P., Wang, J., Liu, H., & Chen, L. (2009). Rheological properties of starches with different amylose/amylopectin ratios. *Journal of Cereal Science*, 49(3), 371–377. <https://doi.org/10.1016/j.jcs.2009.01.002>
- Yang, F., Zhang, M., Bhandari, B., & Liu, Y. (2018). LWT - Food Science and Technology Investigation on lemon juice gel as food material for 3D printing and optimization of printing parameters. *LWT - Food Science and Technology*, 87, 67–76. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2017.08.054>
- Yang, L., Tang, S., Li, G., Qian, L., Mei, J., Jiang, W., & Fan, Z. (2019). Layered extrusion forming of complex ceramic structures using starch as removable support. *Ceramics International*, 45(17), 21843–21850. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2019.07.193>
- Ye, J., Hu, X., Luo, S., Liu, W., Chen, J., Zeng, Z., & Liu, C. (2018). Properties of Starch after Extrusion: A Review. *Starch/Stärke*, 70(11–12), 1–8. <https://doi.org/10.1002/star.201700110>
- Yeong, W.-Y., Chua, C.-K., Leong, K.-F., & Chandrasekaran, M. (2004). Rapid prototyping in tissue engineering: challenges and potential. *Trends in Biotechnology*, 22(12), 643–

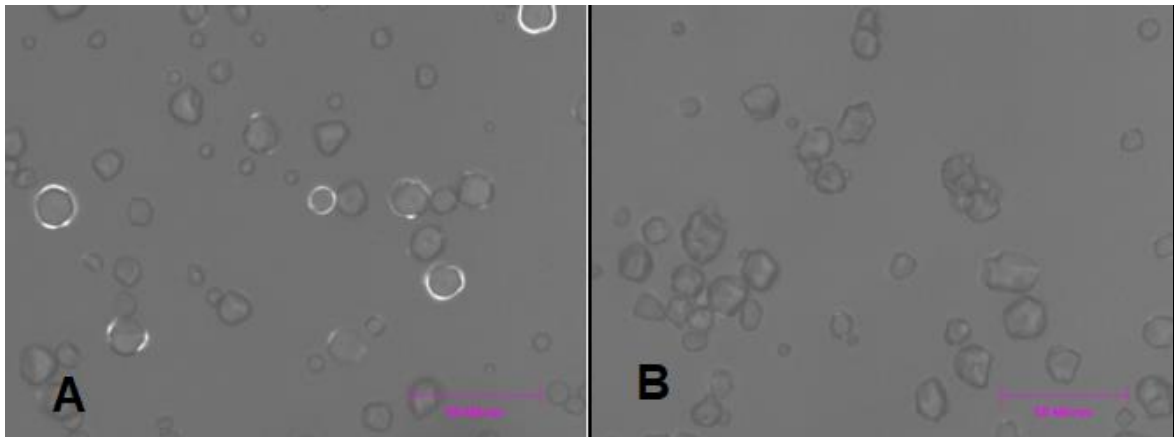
652. <https://doi.org/10.1016/j.tibtech.2004.10.004>

- Yingfeng, Z. U. O., Jiyu, G. U., Haiyan, T. A. N., & Yanhua, Z. (2015). *Thermoplastic Starch Prepared with Different Plasticizers : Relation between Degree of Plasticization and Properties*. 423–428. <https://doi.org/10.1007/s11595-015-1164-z>
- Yussof, N. S., Utra, U., & Alias, A. K. (2013). Hydrolysis of native and cross-linked corn, tapioca, and sweet potato starches at sub-gelatinization temperature using a mixture of amylolytic enzymes. *Starch/Staerke*, 65(3–4), 285–295. <https://doi.org/10.1002/star.201200002>
- Zadpoor, A. A., & Malda, J. (2017). Additive Manufacturing of Biomaterials, Tissues, and Organs. *Annals of Biomedical Engineering*, 45(1). <https://doi.org/10.1007/s10439-016-1719-y>
- Zdanowicz, M., & Johansson, C. (2016). Mechanical and barrier properties of starch-based films plasticized with two- or three component deep eutectic solvents. *Carbohydrate Polymers*, 151, 103–112. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2016.05.061>
- Žilnik, L. F., Jazbinšek, A., Hvala, A., Vrečer, F., & Klamt, A. (2007). Solubility of sodium diclofenac in different solvents. *Fluid Phase Equilibria*, 261(1–2), 140–145. <https://doi.org/10.1016/j.fluid.2007.07.020>

A. Evaluación tamaño gránulos de almidón

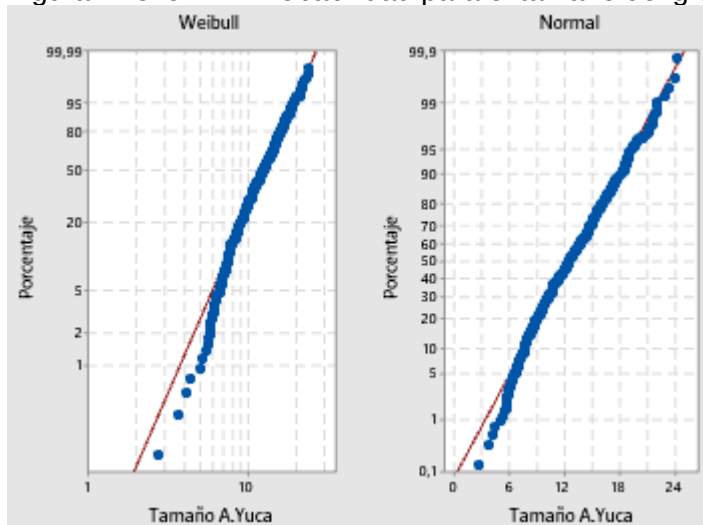
Se seleccionaron 500 muestras de granulos, por cada tipo de almidón de yuca (Figura Anexo A - A) y maíz (Figura Anexo A - B). El método de ajuste se estableció por Anderson-Darling, se evaluaron las distribuciones bajo los modelos Weibull y Normal.

Figura Anexo A 1. Gránulos de almidón de yuca (A) y maíz (B)



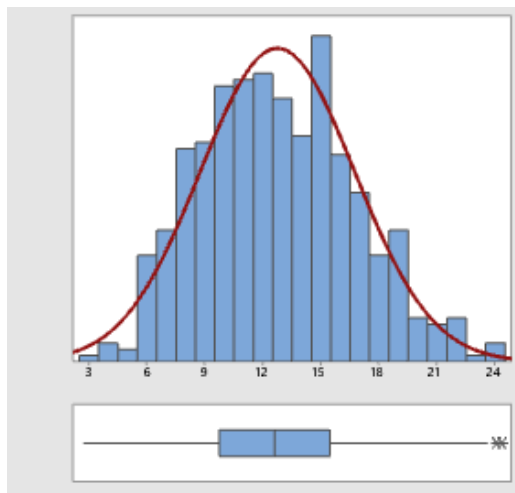
Para determinar el modelo que mejor se adapta al muestreo realizado, mediante la herramienta Grafica ID de Distribución, del software Minitab, se analizan las dos principales alternativas de distribución con la menor dispersión respecto al parámetro de referencia que presenta cada modelo (valor de ajuste: AD), obteniendo una mayor aproximación mediante el método Weibull para un nivel de confianza del 95%.

Figura Anexo A 2. Probabilidad para el tamaño del grano de almidón de yuca



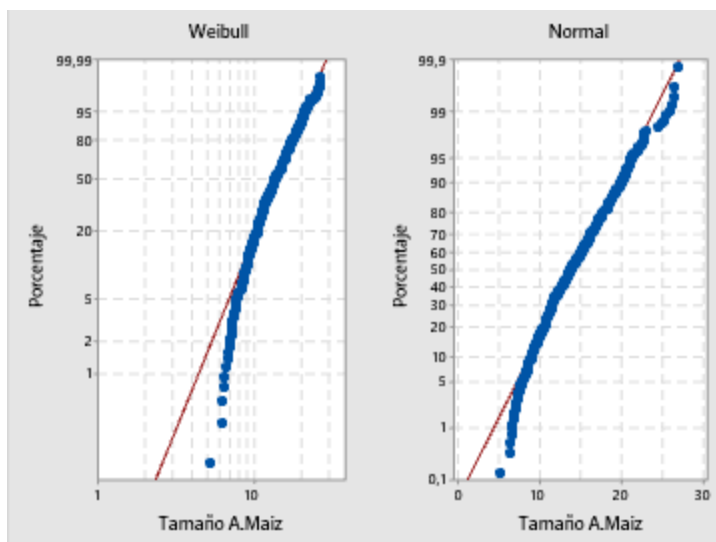
En el análisis de bondad de ajuste se encuentra una similitud de 0,845 con el modelo Weibull y 1,082 con el modelo normalizado. Es viable aceptar la distribución normalizada para un nivel de significancia α menor a 0,01 (Figura Anexo A3), considerando el tamaño del granulo de almidón de yuca para este caso como una variable aleatoria continua normal, con una media de 12,743 μm y una desviación estándar de 3,991 μm .

Figura Anexo A 3. Distribución normalizada del tamaño de granulo de A. Yuca



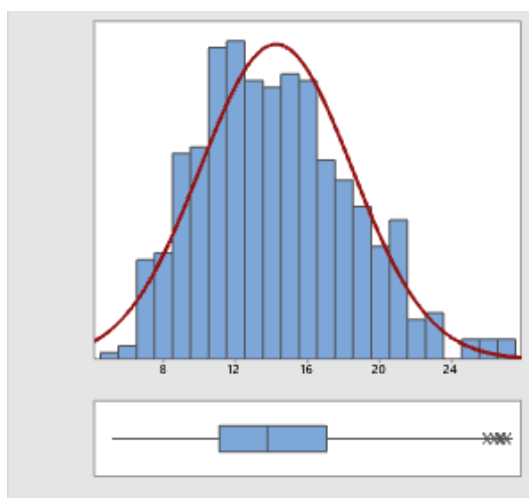
En el caso del almidón de maíz, se vuelve a evaluar la probabilidad de coincidencia, con los dos modelos (Figura Anexo A -4), obteniendo una bondad de ajuste de 2,11 y 1,94, respectivamente para el método Weibull y normalizado.

Figura Anexo A 4. Probabilidad para el tamaño del grano de almidón de yuca



Para este caso se encuentra una mejor distribución por el método normalizado, obteniendo un valor medio de tamaño de grano de almidón de maíz de $14,233\mu\text{m}$, con una desviación estándar de $4,202\mu\text{m}$. A continuación se observa la distribución normalizada (Figura Anexo A -5).

Figura Anexo A 5. Distribución normalizada del tamaño de granulo de A. Maíz



B. Anexo: Condiciones del proceso

- EVALUACIÓN DE SELECCIÓN PRELIMINAR

Los parámetros de valoración del comportamiento de las diferentes mezclas de almidones gelatinizados, fueron definidos en un rango de: “1” (peor comportamiento:) a “5” (mejor comportamiento), según el criterio de valoración expuesto en la Tabla Anexo B-1.

Tabla Anexo B 1. Criterio de valoración de las mezclas de extrusión y auto soporte

Escala numérica	Efecto Extrusión	Efecto Auto Soporte
1	Salida sin control del material	Dispersión total de las trayectorias
2	Salida con mínimo control	Perdida de forma moderada
3	Salida con control retardado	Dispersión moderada
4	Mínima inercia del material extruido	Mínima dispersión
5	Parada instantánea de la extrusión	Conservación de la altura final

Tabla Anexo B 2. Valoración preliminar de las mezclas del almidón de yuca

Diámetro de Boquilla (mm)	Mezcla	Yuca-Agua									
		Y-1-1	Y-1-2	Y-1-3	Y-1-4	Y-1-5	Y-1-6	Y-1-7	Y-1-8	Y-1-9	Promedio Total
1,2	Auto soporte	5,0	4,0	3,0	2,0	2,0	2,0	1,0	1,0	1,0	2,3
	Control Extrusión	1,0	1,0	3,0	3,0	3,0	2,0	2,0	2,0	1,0	2,0
Promedio		3,0	2,5	3,0	2,5	2,5	2,0	1,5	1,5	1,0	2,2
0,84	Auto soporte	5,0	5,0	4,0	4,0	4,0	3,0	2,0	1,0	1,0	3,2

	Control Extrusión	2,0	2,0	3,0	4,0	5,0	4,0	4,0	3,0	3,0	3,3
Promedio		3,5	3,5	3,5	4,0	4,5	3,5	3,0	2,0	2,0	3,3
0,41	Auto soporte	5,0	5,0	5,0	4,0	4,0	3,0	2,0	1,0	1,0	3,3
	Control Extrusión	1,0	1,0	2,0	2,0	4,0	4,0	4,0	3,0	3,0	2,7
Promedio		3,0	3,0	3,5	3,0	4,0	3,5	3,0	2,0	2,0	3,0

Tabla Anexo B 3. Valoración preliminar de las mezclas del almidón de maíz

Diámetro de Boquilla (mm)	Mezcla	Maíz-Agua									
		M-1-1	M-1-2	M-1-3	M-1-4	M-1-5	M-1-6	M-1-7	M-1-8	M-1-9	Promedio Total
Gris=1,2	Auto soporte	5,0	5,0	3,0	4,0	2,0	1,0	1,0	1,0	1,0	2,6
	Control Extrusión	1,0	1,0	3,0	3,0	3,0	2,0	2,0	1,0	1,0	1,9
Promedio		3,0	3,0	3,0	3,5	2,5	1,5	1,5	1,0	1,0	2,2
Verde=0,84	Auto soporte	5,0	5,0	4,0	4,0	4,0	3,0	2,0	2,0	1,0	3,3
	Control Extrusión	1,0	2,0	3,0	4,0	5,0	3,0	3,0	3,0	3,0	3,0
Promedio		3,0	3,5	3,5	4,0	4,5	3,0	2,5	2,5	2,0	3,2
Azul=0,41	Auto soporte	5,0	5,0	5,0	4,0	4,0	3,0	2,0	2,0	1,0	3,4
	Control Extrusión	1,0	1,0	1,0	3,0	4,0	4,0	4,0	3,0	3,0	2,7
Promedio		3,0	3,0	3,0	3,5	4,0	3,5	3,0	2,5	2,0	3,1

- TEMPERATURA DE GELATINIZACIÓN

Tabla Anexo B 4. . Datos sintetizados de las curvas de gelatinización del A. Maíz

Mezcla	Etapa de preparación	Condiciones Ambientales		Tgel (°C)	Tiempo total Gelatinización. (min)
		Tamb (°C)	HR (%)		
M 1-3-0	Banco Pruebas	18	54,1	65	12,38
	Plataforma Robotizada	17	52,1	64	12,33

M-1-3-0.15	Banco Pruebas	19	57	66	12,75
	Plataforma Robotizada	17	47,8	65	12,67
M 1-3-0.3	Banco Pruebas	18	56	66	12,93
	Plataforma Robotizada	18	52,3	64	12,83
M 1-4,5-0	Banco Pruebas	18	55,7	65	12,17
	Plataforma Robotizada	18	56,2	66	12,83
M 1-4.5-0.15	Banco Pruebas	19	52,3	65	12,25
	Plataforma Robotizada	18	51,4	65	12,67
M 1-4.5-0.3	Banco Pruebas	19	55,9	66	12,67
	Plataforma Robotizada	20	49,8	65	12,92
M 1-6-0	Banco Pruebas	18	56,8	65	13,02
	Plataforma Robotizada	20	51,4	64	12,67
M 1-6-0.15	Banco Pruebas	18	56,7	66	12,5
	Plataforma Robotizada	17	48,3	65	12,83
M 1-6-0.3	Banco Pruebas	17	56,8	66	13,03
	Plataforma Robotizada	21	56,2	67	13,17
Promedio total gelatinización mezclas Almidón Maíz				65	12,7

Tabla Anexo B 5. Datos sintetizados de las curvas de gelatinización del A. Yuca

Mezcla	Etapa de preparación	Condiciones Ambientales		Tgel (°C)	Tiempo total Gelatinización (min)
		Tamb (°C)	HR (%)		
Y 1-3-0	Banco Pruebas	18	53,1	63	12,17
	Plataforma Robotizada	18	55,3	63	11,67
Y-1-3-0.15	Banco Pruebas	20	51,4	63	11,33

	Plataforma Robotizada	18	58	62	12,67
Y 1-3-0.3	Banco Pruebas	19	56,6	64	11,83
	Plataforma Robotizada	19	55,3	63	12,92
Y 1-4,5-0	Banco Pruebas	19	54,1	64	11,42
	Plataforma Robotizada	21	52,7	64	12,58
Y 1-4.5-0.15	Banco Pruebas	17	56,9	65	12,08
	Plataforma Robotizada	18	53,6	63	12,33
Y 1-4.5-0.3	Banco Pruebas	17	57,1	62	12,33
	Plataforma Robotizada	18	56,9	63	12,83
Y 1-6-0	Banco Pruebas	19	56,2	63	12,38
	Plataforma Robotizada	20	49,5	64	12,33
Y 1-6-0.15	Banco Pruebas	19	55,1	63	12,38
	Plataforma Robotizada	18	55,9	63	12,83
Y 1-6-0.3	Banco Pruebas	20	52,5	64	12,17
	Plataforma Robotizada	18	54,6	63	12,08
Promedio total gelatinización mezclas Almidón Yuca				63	12,24

- TEMPERATURA MATERIAL TANQUE RESERVORIO

Tabla Anexo B 6. Temperaturas del tanque reservorio para el A. Maíz

Mezcla	Etapas de Evaluación	Temperatura de ingreso al tanque (°C)	Menor temperatura Registrada durante la etapa (°C)
M 1-3-0	Banco Pruebas	27	16

	Plataforma Robotizada	28	15
M-1-3-0.15	Banco Pruebas	26	18
	Plataforma Robotizada	24	16
M 1-3-0.3	Banco Pruebas	28	19
	Plataforma Robotizada	25	15
M 1-4,5-0	Banco Pruebas	24	15
	Plataforma Robotizada	25	17
M 1-4.5-0.15	Banco Pruebas	28	15
	Plataforma Robotizada	26	16
M 1-4.5-0.3	Banco Pruebas	24	18
	Plataforma Robotizada	25	15
M 1-6-0	Banco Pruebas	27	16
	Plataforma Robotizada	26	16
M 1-6-0.15	Banco Pruebas	25	18
	Plataforma Robotizada	26	17
M 1-6-0.3	Banco Pruebas	25	17
	Plataforma Robotizada	26	16

Tabla Anexo B 7. Temperaturas del tanque reservorio para el A. Yuca

Mezcla	Etapas de Evaluación	Temperatura de ingreso al tanque (°C)	Menor temperatura Registrada durante la etapa (°C)
Y 1-3-0	Banco Pruebas	31	15
	Plataforma Robotizada	24	16
Y-1-3-0.15	Banco Pruebas	25	16
	Plataforma Robotizada	25	16
Y 1-3-0.3	Banco Pruebas	28	18
	Plataforma Robotizada	27	17
Y 1-4,5-0	Banco Pruebas	25	16
	Plataforma Robotizada	26	15
Y 1-4.5-0.15	Banco Pruebas	28	16
	Plataforma Robotizada	27	18
Y 1-4.5-0.3	Banco Pruebas	26	16
	Plataforma Robotizada	26	16
Y 1-6-0	Banco Pruebas	28	15
	Plataforma Robotizada	25	17
Y 1-6-0.15	Banco Pruebas	25	15
	Plataforma Robotizada	27	15
Y 1-6-0.3	Banco Pruebas	28	18

	Plataforma Robotizada	28	17
--	-----------------------	----	----

- **REGISTRO VELOCIDAD MOTOR PASO A PASO**

Tabla Anexo B 8. Velocidad del motor para las mezclas de A. Maíz

MEZCLA	P / V	Medición de Velocidad del Motor con Tacómetro (RPM)														
		V1			V2			V3			V4			V5		
M-1-3-0	P2	146,1	146,0	146,2	72,8	72,8	72,9	36,1	35,9	35,9	17,8	17,8	18,1	8,9	8,9	9,1
M-1-3-0.15		146,0	146,1	146,0	73,0	72,9	72,9	36,1	36,0	36,1	18,1	18,1	18,0	9,0	9,2	9,0
M 1-3-03		146,3	146,1	146,2	73,1	73,1	73,0	35,8	35,9	36,1	17,9	17,8	17,9	8,9	8,9	9,0
M 1-4,5-0		145,9	146,1	146,1	73,0	73,1	73,1	36,1	36,0	36,1	17,9	17,9	17,9	9,0	9,0	9,1
M1-4.5-0.15		146,0	146,2	146,1	73,0	73,1	73,0	36,1	36,2	36,2	17,9	18,0	18,0	9,0	9,1	8,9
M 1-4.5-0.3		146,1	146,0	146,0	72,9	72,9	73,1	36,1	36,1	36,0	18,2	18,1	18,0	9,0	9,1	9,2
M 1-6-0		146,1	146,3	146,3	72,9	73,1	73,1	36,6	36,5	36,3	17,9	17,9	18,0	8,9	8,9	9,1
M 1-6-0.15		146,1	145,9	146,1	73,1	73,1	73,1	36,1	36,0	36,1	18,1	18,1	18,1	9,1	9,1	9,0
M 1-6-0.3		146,1	146,3	146,1	72,9	73,1	72,9	36,1	35,9	36,0	18,1	17,9	17,9	8,9	8,8	9,0
M-1-3-0	P3	146,0	146,2	146,1	73,1	73,2	73,1	36,1	35,9	35,9	18,0	18,1	18,0	9,3	9,0	8,9
M-1-3-0.15		146,0	146,1	146,1	73,0	73,1	73,0	36,2	36,0	36,0	18,0	18,1	18,1	9,1	9,0	9,1
M 1-3-03		146,1	146,0	146,0	73,0	73,1	72,9	36,3	36,1	36,1	18,0	17,8	17,8	9,0	8,9	9,0
M 1-4,5-0		146,0	146,1	146,1	72,9	73,1	72,9	36,1	36,1	36,0	18,0	18,1	18,1	9,0	9,1	9,0
M1-4.5-0.15		146,1	146,0	146,1	73,0	73,2	73,1	36,1	36,1	36,2	17,9	18,0	18,0	8,8	9,0	8,7
M 1-4.5-0.3		146,1	146,0	146,1	73,1	73,1	73,0	36,2	36,1	36,1	18,2	18,1	18,1	9,1	9,0	8,9
M 1-6-0		146,2	146,0	146,3	72,9	73,1	72,9	35,9	36,0	36,1	17,9	18,0	18,1	8,9	8,9	8,9
M 1-6-0.15		146,2	146,1	146,0	72,9	73,1	73,0	36,1	36,2	36,1	18,2	18,0	18,1	9,2	9,1	9,1
M 1-6-0.3		145,9	146,0	146,1	73,1	72,9	73,1	36,2	36,0	36,0	18,1	18,1	17,9	9,0	9,0	8,9

Tabla Anexo B 9. Velocidad del motor para las mezclas de A. Yuca

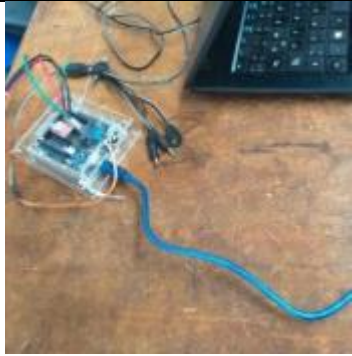
MEZCLAS	P / V	Medición de Velocidad del Motor con Tacómetro (RPM)														
		V1			V2			V3			V4			V5		
Y-1-3-0	P2	146,1	146,3	146,1	72,9	73,0	73,1	35,9	35,9	35,9	17,9	17,8	18,0	8,9	8,9	9,0
Y-1-3-0,15		146,1	146,0	146,0	73,1	72,9	73,1	36,2	36,1	36,1	18,1	18,2	18,1	9,2	9,1	9,1

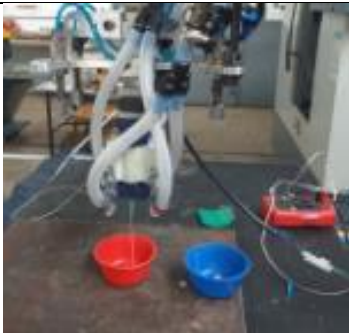
Y-1-3-0.3		145,9	146,1	146,3	72,9	72,8	72,9	36,1	36,2	36,2	18,0	18,0	17,9	9,0	9,1	8,9
Y-1-4.5-0		146,0	146,1	146,0	73,0	73,0	73,0	36,2	36,0	36,0	18,1	18,0	18,1	9,1	9,1	9,1
Y-1-4.5-0.15		146,2	146,3	146,2	73,1	73,0	73,0	36,3	36,3	36,1	18,0	17,9	18,0	8,9	9,0	8,9
Y 1-4.5-0.3		146,1	146,1	146,2	73,0	73,1	73,1	36,1	36,0	36,1	18,0	17,9	18,0	9,1	8,9	9,0
Y 1-6-0		146,3	146,1	146,3	73,0	73,1	73,0	36,1	36,1	36,0	17,8	17,9	17,8	8,9	9,0	9,1
Y 1-6-0.15		146,1	146,0	146,1	73,2	72,9	73,1	36,1	36,0	36,1	18,0	18,1	18,1	9,1	9,1	9,0
Y 1-6-0.3		145,9	146,1	146,0	72,9	72,9	73,1	36,2	35,9	36,1	18,1	17,9	17,8	8,8	8,9	9,0
Y-1-3-0	P3	145,2	146,2	146,0	72,9	72,9	72,8	36,1	35,8	35,9	17,8	17,9	17,9	8,8	9,1	9,2
Y-1-3-0,15		146,1	146,1	146,0	73,0	73,1	72,9	36,0	36,1	36,0	18,1	18,0	18,0	9,0	9,1	9,0
Y-1-3-0.3		146,1	146,0	146,0	72,9	72,8	72,9	36,1	36,1	36,2	17,8	17,9	17,9	8,9	9,0	9,1
Y-1-4.5-0		146,1	146,2	146,0	72,9	73,1	72,9	36,0	36,1	36,0	18,1	18,0	18,0	9,1	9,0	9,0
Y-1-4.5-0.15		146,2	146,1	146,2	72,9	73,0	73,0	36,3	36,2	36,3	17,9	18,0	18,1	8,8	8,9	9,1
Y 1-4.5-0.3		146,0	146,1	146,2	72,9	72,9	73,1	36,1	36,0	36,0	18,1	18,0	18,2	9,1	9,1	8,9
Y 1-6-0		146,0	145,8	146,1	72,9	73,1	72,8	36,2	36,0	36,3	17,9	17,9	18,1	8,8	9,0	8,9
Y 1-6-0.15		146,1	146,0	146,0	72,9	73,0	73,0	36,1	36,0	36,2	18,0	17,9	18,0	9,2	9,1	9,1
Y 1-6-0.3		145,9	146,1	146,1	73,1	73,0	72,9	36,2	36,1	36,1	18,3	17,9	18,0	9,1	8,9	8,9

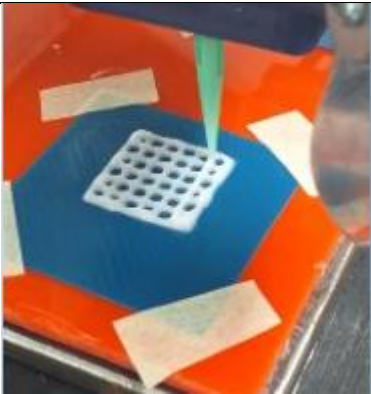
C. Anexo: Protocolo de elaboración de los dispositivos

No	ETAPA	CARACTERÍSTICAS	FOTOGRAFÍA
1	Preparación de los geles	Se verifican las condiciones de las materias primas Se introduce el almidón, agua destilada y/o glicerina en las proporciones definidas, en un vaso de precipitado En un agitador con control de temperatura, se mezclan hasta la gelatinización del material	
2	Carga del material en el tanque extrusor	Una vez realizada la gelatinización, se toman las medidas de temperatura de las muestras seleccionadas, con el fin de cargar las mezclas en el tanque reservorio	

3	Adecuar espacio de trabajo	Se ubica una mesa estable próximo al brazo robótico Se nivela la superficie para asegurar una posición horizontal	
4	Activación del compresor	Se activa el compresor y se verifica el flujo de aire en los puntos de alimentación Son conectadas las mangueras de aire	
5	Alistamiento del extrusor	Se ensamblan todos los componentes del extrusor, e instala la armadura porta mangueras, junto con las mangueras de alimentación	

6	Activación del Microcontrolador	Se conecta al PC el microcontrolador, y energiza con un adaptador de corriente a 7,5V y 1A Se conecta el extrusor y verifica su funcionamiento.	
7	Activación del controlador del brazo robot	Se quita el forro protector del brazo robot y del controlador Se energiza el controlador Motoman DX100. Y se activa el mando "Teach Pendant"	
8	Posicionamiento del brazo robot	Desde el "Teach Pendant" se controla la posición del brazo robot, hasta la ubicación en la mesa de trabajo Se realiza una prueba para verificar la configuración del patrón programado desde el mando	

9	Instalación de dispositivos en brazo robot	Se instala el extrusor y la pistola en el brazo robot Se ajusta la boquilla de concentración de la pistola de calor, y se conectan las mangueras a la boquilla.	
10	Instalación del tanque reservorio	Con el tanque reservorio cargado con la mezcla, se conecta al extrusor y sujeta por medio de cables metálicos Se conectan las mangueras, manómetro y sonda de temperatura	
11	Revisión de los parámetros de extrusión	Se comprueba el flujo y temperatura de la pistola de calor, y el flujo proveniente del compresor, para la deshumidificación de los dispositivos manufacturados	
12	Pruebas preliminares con el extrusor y brazo robot	Se verifica la capacidad de extrusión del material En esta etapa se ajustan los parámetros del extrusor (tasa de material extruido)	

13	AM para la fabricación de los dispositivos	Una vez se ha corroborado la tasa de material extruido, y ajustado los parámetros del extrusor y ventilación, son contruidos los dispositivos	
14	Acondicionamiento de los dispositivos obtenidos	Una vez se han fabricado los dispositivos con las propiedades requeridas, se ubica en un horno, a 50°C, por un periodo de 9 horas. Posteriormente se introducen los dispositivos en un desecador (40 ± 6 % de HR), hasta la caracterización geométrica y mecánica.	
15	Limpieza y ensamble de los dispositivos	Al terminado el proceso de fabricación de los dispositivos, se limpia los componentes del extrusor. Luego se vuelven a ensamblar los elementos del extrusor y finalmente se apaga y cubre el brazo robot y controlador.	

D. Anexo: Resultados bancos de prueba

- VELOCIDAD MATERIAL EXTRUIDO

Tabla Anexo D 1. Velocidad de extrusión promedio, mezclas A. Maíz

PRESIÓN / VEL.	Velocidad Salida Mezclas Almidón Maíz (mm/min)								
	M-1-3-0	M-1-3-0.15	M 1-3-03	M 1-4.5-0	M 1-4.5-0.15	M 1-4.5-0.3	M 1-6-0	M 1-6-0.15	M 1-6-0.3
P2-V1	NA	NA	632	NA	NA	1924	NA	NA	NA
P2-V2	NA	1455	565	2972	1211	701	2431	NA	NA
P2-V3	NA	742	402	1440	894	442	1929	2594	2843
P2-V4	NA	454	276	871	484	173	714	1541	1242
P2-V5	NA	220	207	641	401	120	645	738	641
P3-V1	1557	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA
P3-V2	852	2731	2226	NA	NA	NA	NA	NA	NA
P3-V3	615	1350	1322	2376	2839	2024	NA	NA	NA
P3-V4	302	993	602	1313	1282	1427	NA	NA	NA
P3-V5	190	602	400	759	712	860	1063	1456	1557

Tabla Anexo D 2. Velocidad de extrusión promedio, mezclas A. Yuca

PRESIÓN / VEL.	Velocidad Salida Mezclas Almidón Yuca (mm/min)								
	Y-1-3-0	Y-1-3-0.15	Y-1-3-0.3	Y-1-4.5-0	Y-1-4.5-0.15	Y 1-4.5-0.3	Y 1-6-0	Y 1-6-0.15	Y 1-6-0.3
P2-V1	385	479	428	535	633	363	508	471	743
P2-V2	239	396	376	398	463	292	356	414	547
P2-V3	165	314	307	371	416	210	280	352	416

P2-V4	139	252	215	285	300	142	228	263	362
P2-V5	112	196	171	203	239	105	175	212	239
P3-V1	376	820	703	938	1062	606	771	1170	1344
P3-V2	378	685	620	742	817	518	651	867	964
P3-V3	274	529	467	543	615	444	487	818	635
P3-V4	228	415	408	580	565	406	403	603	600
P3-V5	178	297	270	381	335	290	282	513	507

- IDENTIFICACIÓN DEL DIÁMETRO

Tabla Anexo D 3. Diámetro de extrusión promedio, mezclas A. Maíz

PRESIÓN / VELOCIDAD AD	Diámetro salida Almidón Maíz (mm)								
	M-1-3-0	M-1-3-0.15	M 1-3-03	M 1-4.5-0	M 1-4.5-0.15	M 1-4.5-0.3	M 1-6-0	M 1-6-0.15	M 1-6-0.3
P2-V1	0,808	0,770	0,843	0,714	0,807	0,720	0,864	0,766	0,859
P2-V2	0,839	0,798	0,847	0,742	0,703	0,724	0,848	0,790	0,815
P2-V3	0,843	0,783	0,813	0,723	0,738	0,763	0,894	0,781	0,831
P2-V4	0,872	0,781	0,791	0,770	0,820	0,802	0,867	0,778	0,814
P2-V5	0,836	0,801	0,817	0,758	0,699	0,737	0,821	0,743	0,831
P3-V1	0,842	0,766	0,831	0,723	0,764	0,757	0,840	0,771	0,829
P3-V2	0,825	0,766	0,829	0,736	0,719	0,769	0,833	0,778	0,827
P3-V3	0,841	0,776	0,814	0,740	0,745	0,796	0,842	0,792	0,825
P3-V4	0,836	0,788	0,827	0,739	0,772	0,728	0,847	0,901	0,838
P3-V5	0,827	0,748	0,808	0,769	0,783	0,814	0,875	0,765	0,826

Tabla Anexo D 4. Diámetro de extrusión promedio, mezclas A. Yuca

PRESIÓN / VELOCIDAD AD	Diámetro extruido Almidón Yuca (mm)								
	Y-1-3-0	Y-1-3-0,15	Y-1-3-0.3	Y-1-4.5-0	Y-1-4.5-0.15	Y 1-4.5-0.3	Y 1-6-0	Y 1-6-0.15	Y 1-6-0.3
P2-V1	1,334	1,229	1,120	1,407	1,140	1,307	1,257	1,332	1,187
P2-V2	1,220	1,156	1,144	1,299	1,037	1,006	1,223	1,243	1,154
P2-V3	1,228	1,124	1,201	1,169	1,059	1,208	1,352	1,212	1,086
P2-V4	1,313	1,076	1,163	1,234	1,071	1,291	1,385	1,204	1,136
P2-V5	1,175	1,077	1,165	1,379	1,199	1,357	1,282	1,302	1,163
P3-V1	1,295	1,175	1,196	1,351	1,126	1,259	1,440	1,449	1,178

P3-V2	1,237	1,155	1,166	1,313	1,274	1,235	1,450	1,289	1,143
P3-V3	1,179	1,137	1,123	1,234	1,059	1,208	1,254	1,267	1,133
P3-V4	1,230	1,169	1,179	1,196	1,018	1,133	1,253	1,247	1,181
P3-V5	1,367	1,252	1,243	1,380	1,103	1,345	1,410	1,267	1,221

- TASA DEL MATERIAL EXTRUIDO

Tabla Anexo D 5. Tasa de material extruido promedio, mezclas A. Maíz

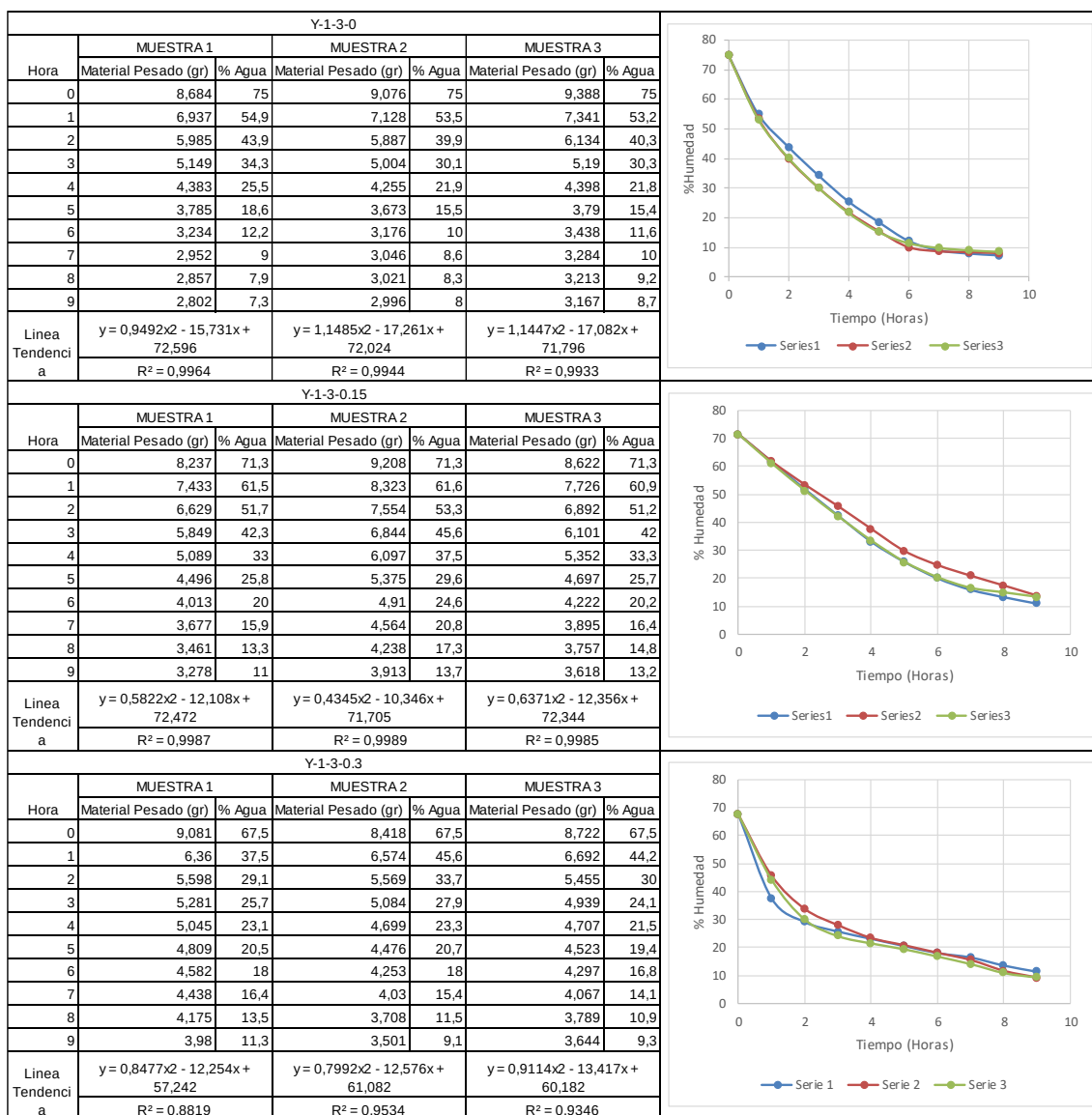
PRESIÓN / VELOCIDAD	Material depositado Mezclas Almidón Maíz (g/min)								
	M-1-3-0	M-1-3-0.15	M 1-3-03	M 1-4.5-0	M 1-4.5-0.15	M 1-4.5-0.3	M 1-6-0	M 1-6-0.15	M 1-6-0.3
P2-V1	NA	1,529	0,570	2,280	1,017	0,888	2,977	3,292	2,559
P2-V2	NA	0,847	0,344	1,511	0,748	0,358	1,542	2,035	1,933
P2-V3	NA	0,430	0,244	0,685	0,441	0,206	1,149	1,237	1,324
P2-V4	NA	0,237	0,166	0,439	0,246	0,102	0,467	0,729	0,583
P2-V5	NA	0,106	0,117	0,347	0,189	0,084	0,341	0,374	0,375
P3-V1	0,945	2,377	1,853	3,606	4,415	2,665	5,314	7,811	7,196
P3-V2	0,528	1,355	1,116	1,925	2,451	1,506	2,338	4,110	3,809
P3-V3	0,321	0,731	0,645	1,161	1,075	0,980	1,841	2,515	2,196
P3-V4	0,176	0,520	0,330	0,701	0,686	0,744	0,901	1,344	1,284
P3-V5	0,103	0,315	0,213	0,354	0,394	0,401	0,487	0,736	0,821

Tabla Anexo D 6. Tasa de material extruido promedio, mezclas A. Yuca

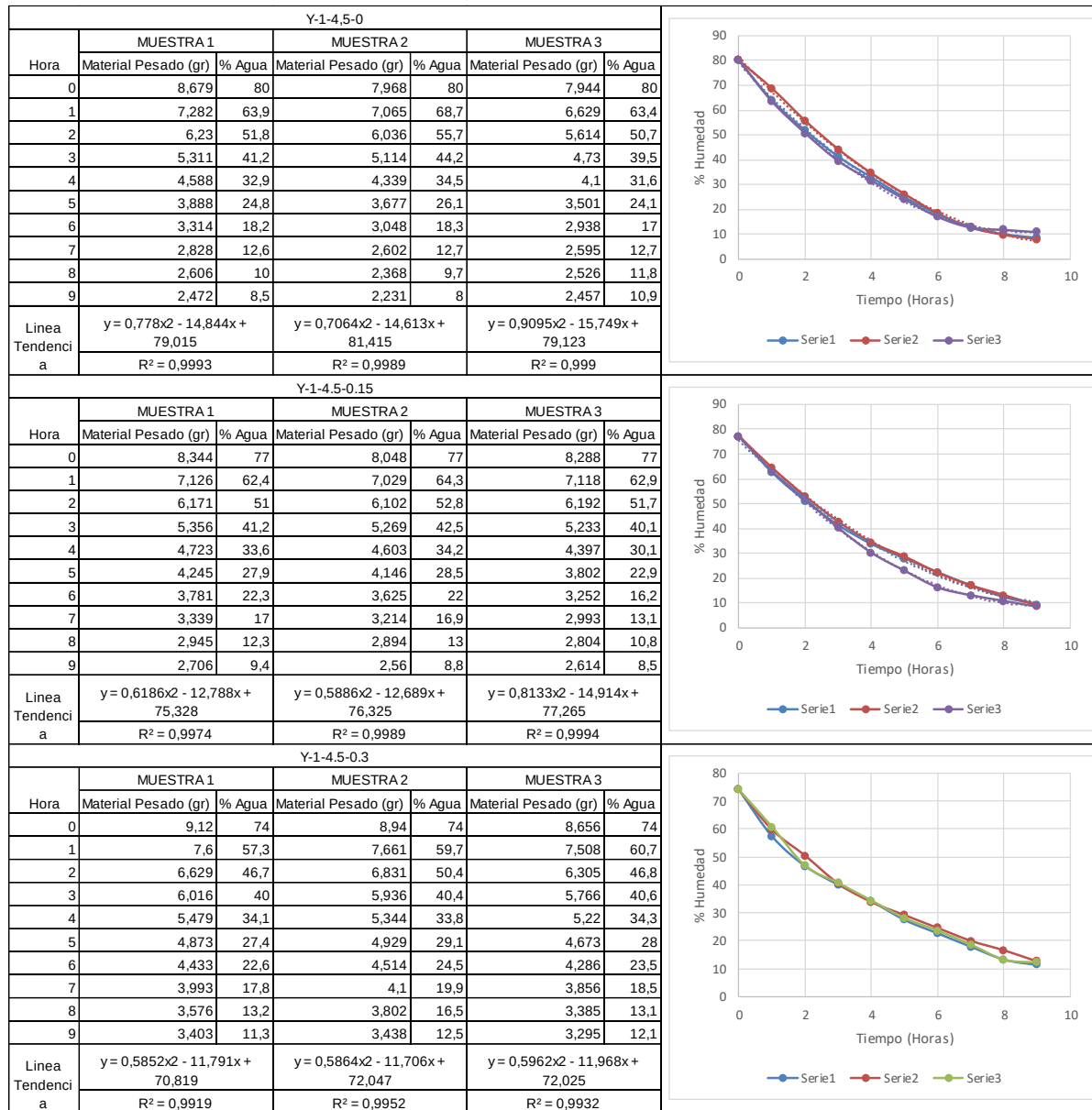
PRESIÓN / VELOCIDAD	Material depositado Mezclas Almidón Yuca (g/min)								
	Y-1-3-0	Y-1-3-0.15	Y-1-3-0.3	Y-1-4.5-0	Y-1-4.5-0.15	Y 1-4.5-0.3	Y 1-6-0	Y 1-6-0.15	Y 1-6-0.3
P2-V1	0,370	0,556	0,573	0,661	0,594	0,406	0,518	0,553	0,866
P2-V2	0,233	0,361	0,443	0,395	0,425	0,275	0,380	0,376	0,628
P2-V3	0,172	0,285	0,285	0,372	0,373	0,195	0,300	0,316	0,365
P2-V4	0,130	0,229	0,198	0,279	0,286	0,138	0,201	0,241	0,325
P2-V5	0,104	0,179	0,159	0,187	0,212	0,106	0,152	0,192	0,231
P3-V1	0,438	1,071	0,930	1,155	1,177	0,774	0,913	1,504	1,597
P3-V2	0,345	0,814	0,689	0,912	0,899	0,645	0,652	1,111	1,036
P3-V3	0,290	0,617	0,503	0,696	0,645	0,538	0,487	0,829	0,754
P3-V4	0,223	0,380	0,366	0,523	0,504	0,375	0,347	0,624	0,598
P3-V5	0,166	0,287	0,314	0,340	0,354	0,219	0,276	0,507	0,489

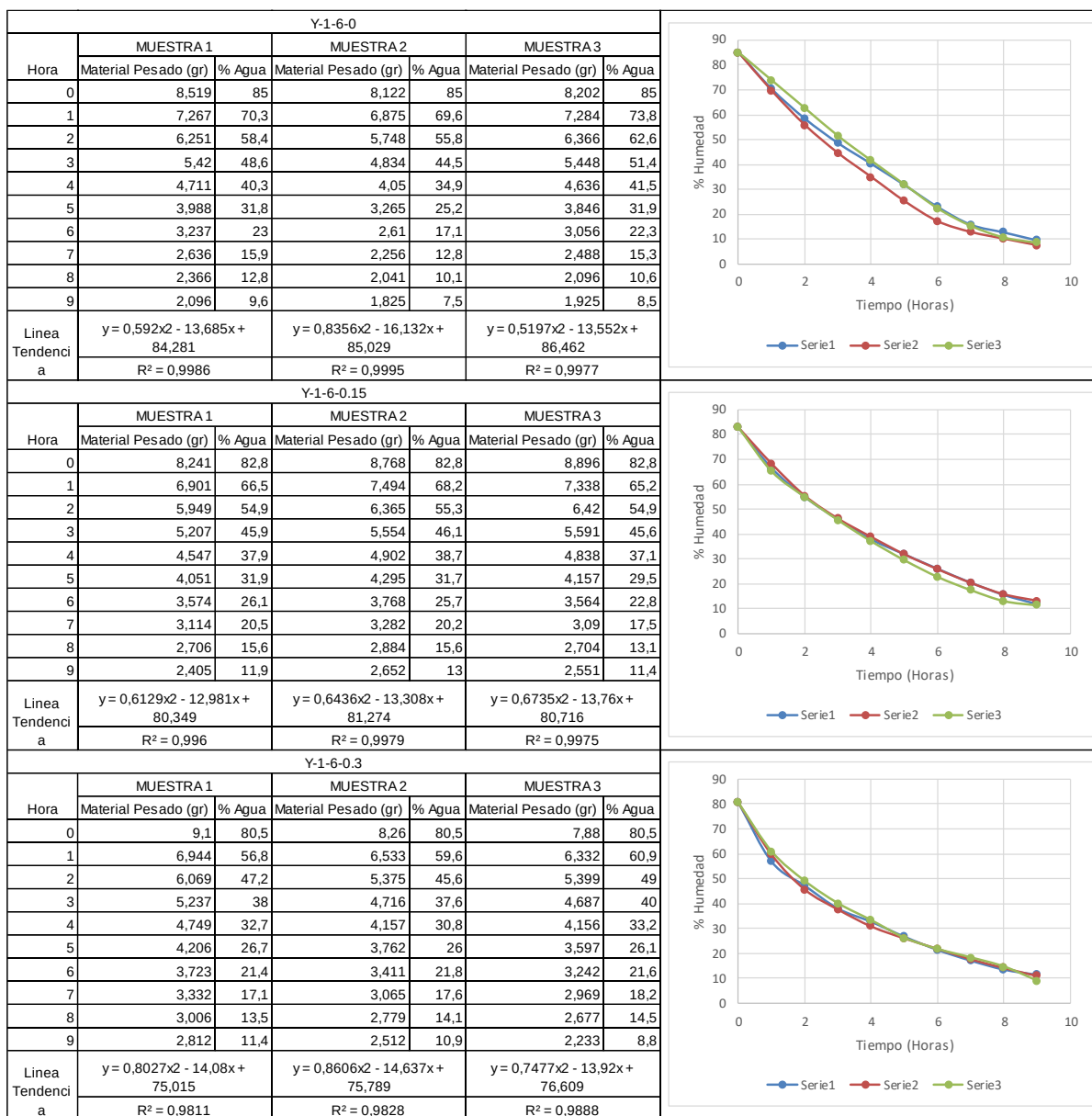
E. Anexo: Curvas de secado

- CURVAS DE SECADO ALMIDÓN DE YUCA



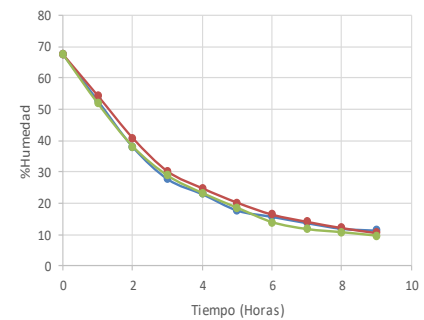
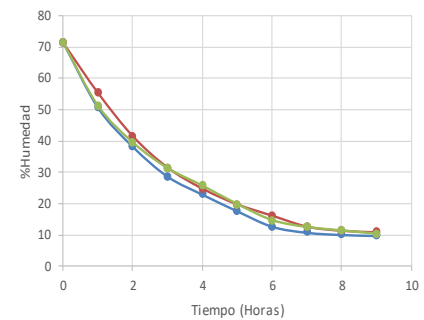
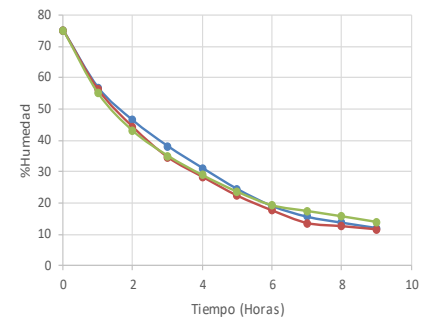
148 Caracterización de un proceso de manufactura aditiva por extrusión de un biopolímero y definición de su potencial uso como dispositivo para transporte de fármacos

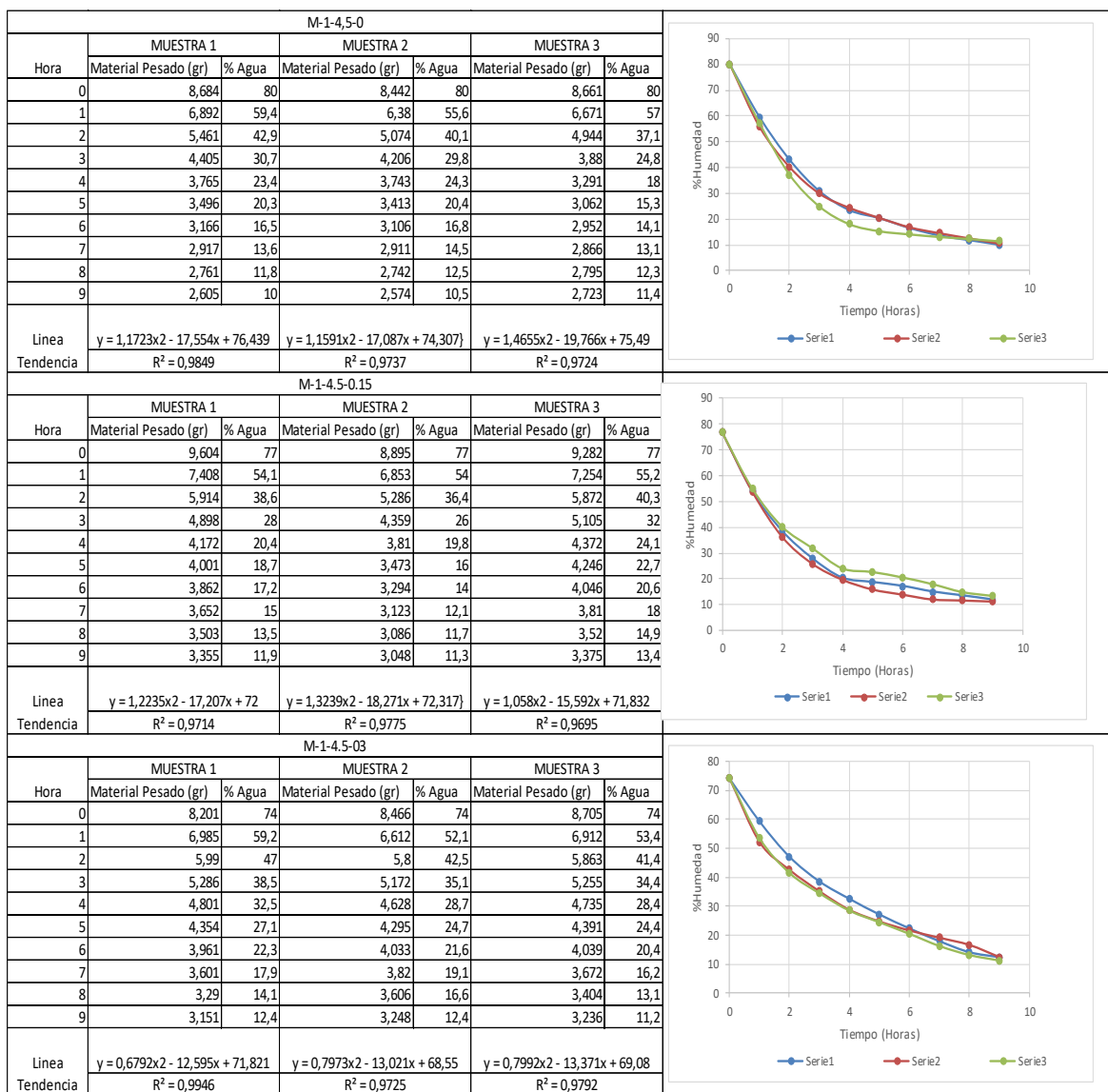




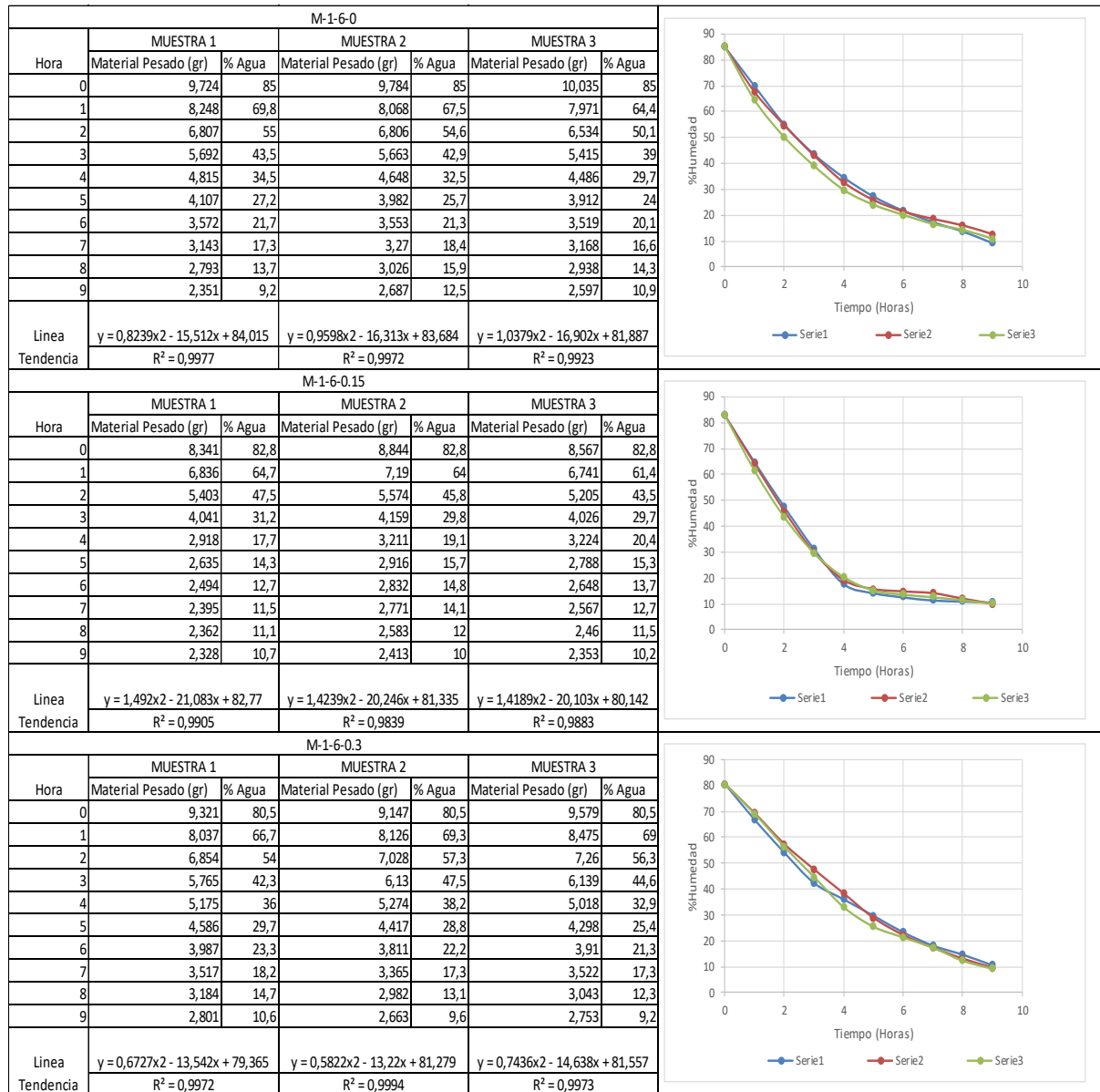
- CURVAS DE SECADO ALMIDÓN DE MAÍZ

M-1-3-0						
Hora	MUESTRA 1		MUESTRA 2		MUESTRA 3	
	Material Pesado (gr)	% Agua	Material Pesado (gr)	% Agua	Material Pesado (gr)	% Agua
0	10,095	75	9,309	75	10,308	75
1	8,258	56,8	7,552	56,1	8,238	54,9
2	7,196	46,3	6,437	44,1	6,994	42,9
3	6,365	38,1	5,536	34,5	6,187	35
4	5,664	31,1	4,951	28,2	5,548	28,8
5	4,991	24,4	4,39	22,2	4,999	23,5
6	4,444	19	3,96	17,5	4,56	19,2
7	4,102	15,6	3,58	13,5	4,376	17,4
8	3,903	13,7	3,49	12,5	4,191	15,7
9	3,736	12	3,4	11,5	4,007	13,9
Linea Tendencia	$y = 0,7871x^2 - 13,667x + 72,269$		$y = 0,9129x^2 - 14,802x + 72,102$		$y = 0,9186x^2 - 14,355x + 71,048$	
	$R^2 = 0,9948$		$R^2 = 0,9938$		$R^2 = 0,9868$	
M-1-3-0.15						
Hora	MUESTRA 1		MUESTRA 2		MUESTRA 3	
	Material Pesado (gr)	% Agua	Material Pesado (gr)	% Agua	Material Pesado (gr)	% Agua
0	7,955	71,3	7,413	71,3	8,29	71,3
1	6,311	50,6	6,228	55,3	6,63	51,2
2	5,325	38,2	5,205	41,5	5,656	39,9
3	4,57	28,7	4,465	31,5	4,976	31,3
4	4,12	23	3,968	24,8	4,512	25,7
5	3,692	17,7	3,596	19,8	4,026	19,8
6	3,306	12,8	3,333	16,2	3,602	14,7
7	3,151	10,9	3,075	12,7	3,417	12,5
8	3,096	10,2	2,978	11,4	3,331	11,4
9	3,078	9,9	2,936	10,9	3,246	10,4
Linea Tendencia	$y = 1,0318x^2 - 15,498x + 67,664$		$y = 0,9504x^2 - 14,892x + 69,466$		$y = 0,922x^2 - 14,464x + 67,591$	
	$R^2 = 0,9896$		$R^2 = 0,9951$		$R^2 = 0,9891$	
M-1-3-0.3						
Hora	MUESTRA 1		MUESTRA 2		MUESTRA 3	
	Material Pesado (gr)	% Agua	Material Pesado (gr)	% Agua	Material Pesado (gr)	% Agua
0	9,522	67,5	10,256	67,5	9,442	67,5
1	8,118	52,7	8,898	54,3	7,964	51,8
2	6,713	38	7,52	40,8	6,666	38,1
3	5,741	27,8	6,435	30,2	5,79	28,8
4	5,284	23	5,875	24,8	5,255	23,2
5	4,788	17,8	5,407	20,2	4,817	18,5
6	4,602	15,8	5,017	16,4	4,379	13,9
7	4,409	13,8	4,776	14,1	4,176	11,7
8	4,233	12	4,571	12,1	4,076	10,7
9	4,183	11,4	4,415	10,5	3,976	9,6
Linea Tendencia	$y = 0,9735x^2 - 14,531x + 65,625$		$y = 0,8564x^2 - 13,695x + 66,31$		$y = 0,9201x^2 - 14,282x + 65,426$	
	$R^2 = 0,9894$		$R^2 = 0,9935$		$R^2 = 0,9933$	





152 Caracterización de un proceso de manufactura aditiva por extrusión de un biopolímero y definición de su potencial uso como dispositivo para transporte de fármacos



F. Anexo: Dimensiones de los Dispositivos

Tabla Anexo F 1. Dimensiones de la Altura de los Dispositivos de A. Maíz

Mezcla		Altura (mm)			Promedio Total (mm)
		Muestra 1	Muestra 2	Muestra 3	
M_1-3-0	Promedio	25,00	26,94	24,95	25,63
	SD	1,27	0,93	0,61	
M_1-3-0.3	Promedio	20,35	19,14	20,71	20,07
	SD	1,02	0,62	0,77	
M_1-3-0.15	Promedio	23,18	23,33	22,91	23,14
	SD	2,28	1,38	1,36	
M_1-4,5-0	Promedio	22,47	23,47	21,96	22,63
	SD	1,12	1,37	1,50	
M_1-4,5-0.3	Promedio	19,57	19,27	20,60	19,81
	SD	0,76	1,25	1,78	
M_1-4,5-0.15	Promedio	19,71	15,74	20,65	18,70
	SD	1,73	0,52	2,70	
M_1-6-0	Promedio	18,04	22,50	23,08	21,21
	SD	2,92	0,91	0,91	
M_1-6-0.3	Promedio	17,11	16,97	17,91	17,33
	SD	1,26	1,29	0,71	
M_1-6-0.15	Promedio	22,37	18,40	18,13	19,63
	SD	1,74	1,05	0,80	

Tabla Anexo F 2. Dimensiones de la Altura de los Dispositivos de A.Yuca

Mezcla		Altura (mm)			Promedio Total (mm)
		Muestra 1	Muestra 2	Muestra 3	
Y_1-3-0	Promedio	21,29	19,18	20,65	20,37
	SD	1,00	0,46	1,24	
Y_1-3-0.3	Promedio	21,05	21,29	21,42	21,26
	SD	0,96	0,77	0,88	
Y_1-3-0.15	Promedio	17,33	20,80	19,31	19,15
	SD	0,96	0,89	1,37	
Y_1-4.5-0	Promedio	19,51	21,58	20,56	20,55
	SD	1,18	0,95	1,56	
Y_1-4.5-0.3	Promedio	22,18	21,44	20,93	21,52
	SD	1,00	0,52	0,68	
Y_1-4.5-0.15	Promedio	19,07	20,06	18,27	19,14
	SD	0,65	0,69	1,15	
Y_1-6-0	Promedio	16,34	20,09	18,36	18,27
	SD	0,94	1,30	2,33	
Y_1-6-0.3	Promedio	19,73	18,90	17,98	18,87
	SD	0,69	0,85	0,81	
Y_1-6-0.15	Promedio	18,58	18,44	17,31	18,11
	SD	1,07	0,81	0,98	

Tabla Anexo F 3. Dimensiones de la L.Horizontal de los Dispositivos de A.Maíz

Mezcla		Longitudes Horizontales (mm)			Promedio Total (mm)
		Muestra 1	Muestra 2	Muestra 3	
M_1-3-0	Promedio	24,51	26,18	25,43	25,37
	SD	0,94	0,83	1,04	
M_1-3-0.3	Promedio	19,69	19,12	19,01	19,27
	SD	0,91	0,91	0,81	
M_1-3-0.15	Promedio	17,85	17,91	18,16	17,97
	SD	1,54	1,88	1,77	
M_1-4,5-0	Promedio	19,76	18,91	18,55	19,07
	SD	1,46	1,00	1,07	
M_1-4,5-0.3	Promedio	17,40	16,94	18,30	17,54

	SD	0,99	1,35	1,29	
M_1-4,5-0.15	Promedio	18,64	16,93	17,71	17,76
	SD	1,22	0,60	1,10	
M_1-6-0	Promedio	21,88	22,02	23,42	22,44
	SD	1,26	1,07	0,87	
M_1-6-0.3	Promedio	17,22	16,16	16,92	16,77
	SD	1,67	1,13	0,83	
M_1-6-0.15	Promedio	18,14	18,11	16,45	17,57
	SD	1,26	3,81	0,82	

Tabla Anexo F 4. Dimensiones de la L.Horizontal de los Dispositivos de A.Yuca

Mezcla		Longitudes Horizontales (mm)			Promedio Total (mm)
		Muestra 1	Muestra 2	Muestra 3	
Y_1-3-0	Promedio	23,34	21,45	22,48	22,42
	SD	2,44	1,51	1,25	
Y_1-3-0.3	Promedio	17,52	17,62	17,86	17,67
	SD	1,80	1,43	0,97	
Y_1-3-0.15	Promedio	17,29	19,76	18,31	18,45
	SD	1,86	1,25	1,48	
Y_1-4.5-0	Promedio	19,18	20,15	19,29	19,54
	SD	2,54	1,49	1,84	
Y_1-4.5-0.3	Promedio	18,45	19,28	18,19	18,64
	SD	1,43	1,40	1,71	
Y_1-4.5-0.15	Promedio	18,36	18,83	18,21	18,47
	SD	1,35	1,22	1,47	
Y_1-6-0	Promedio	21,19	21,44	20,90	21,17
	SD	1,27	1,48	2,32	
Y_1-6-0.3	Promedio	17,64	17,85	16,68	17,39
	SD	1,86	2,14	2,46	
Y_1-6-0.15	Promedio	19,57	19,74	18,97	19,42
	SD	2,44	1,28	2,06	

Tabla Anexo F 5. Dimensiones de la AnchoTrayectorias de los Dispositivos de A. Maíz

Mezcla		Ancho trayectorias (mm)			Promedio Total (mm)
		Muestra 1	Muestra 2	Muestra 3	
M_1-3-0	Promedio	0,630	0,680	0,780	0,696
	SD	0,062	0,085	0,124	
M_1-3-0.3	Promedio	0,641	0,709	0,722	0,691
	SD	0,086	0,083	0,071	
M_1-3-0.15	Promedio	0,493	0,453	0,467	0,471
	SD	0,047	0,043	0,058	
M_1-4,5-0	Promedio	0,566	0,576	0,558	0,566
	SD	0,048	0,094	0,034	
M_1-4,5-0.3	Promedio	0,409	0,475	0,438	0,440
	SD	0,038	0,029	0,040	
M_1-4,5-0.15	Promedio	0,803	0,690	0,536	0,676
	SD	0,072	0,093	0,061	
M_1-6-0	Promedio	0,661	0,618	0,597	0,625
	SD	0,096	0,083	0,077	
M_1-6-0.3	Promedio	0,378	0,420	0,449	0,416
	SD	0,035	0,047	0,022	
M_1-6-0.15	Promedio	0,355	0,445	0,377	0,393
	SD	0,042	0,032	0,027	

Tabla Anexo F 6. Dimensiones de la AnchoTrayectorias de los Dispositivos de A.Yuca

Mezcla		Ancho trayectorias (mm)			Promedio Total (mm)
		Muestra 1	Muestra 2	Muestra 3	
Y_1-3-0	Promedio	1,014	1,216	1,008	1,079
	SD	0,133	0,181	0,136	
Y_1-3-0.3	Promedio	0,983	0,872	0,775	0,877
	SD	0,134	0,046	0,053	
Y_1-3-0.15	Promedio	0,843	0,903	0,922	0,890
	SD	0,080	0,127	0,137	
Y_1-4.5-0	Promedio	0,416	0,484	0,438	0,446
	SD	0,028	0,061	0,043	
Y_1-4.5-0.3	Promedio	0,759	0,777	0,705	0,747

	SD	0,099	0,075	0,096	
Y_1-4.5-0.15	Promedio	0,590	0,471	0,636	0,565
	SD	0,092	0,071	0,089	
Y_1-6-0	Promedio	0,415	0,545	0,444	0,468
	SD	0,056	0,076	0,055	
Y_1-6-0.3	Promedio	0,604	0,540	0,558	0,567
	SD	0,052	0,092	0,080	
Y_1-6-0.15	Promedio	0,543	0,557	0,529	0,543
	SD	0,087	0,081	0,089	

Tabla Anexo F 7. Dimensiones de la Altura Trayectorias de los Dispositivos de A. Maíz

Mezcla		Altura trayectorias (mm)			Promedio Total (mm)
		Muestra 1	Muestra 2	Muestra 3	
M_1-3-0	Promedio	0,466	0,443	0,430	0,446
	SD	0,045	0,051	0,052	
M_1-3-0.3	Promedio	0,430	0,442	0,413	0,428
	SD	0,054	0,037	0,043	
M_1-3-0.15	Promedio	0,411	0,471	0,467	0,449
	SD	0,035	0,031	0,032	
M_1-4,5-0	Promedio	0,367	0,388	0,352	0,369
	SD	0,047	0,033	0,027	
M_1-4,5-0.3	Promedio	0,428	0,460	0,448	0,445
	SD	0,030	0,064	0,048	
M_1-4,5-0.15	Promedio	0,347	0,367	0,375	0,363
	SD	0,038	0,049	0,042	
M_1-6-0	Promedio	0,428	0,391	0,427	0,415
	SD	0,046	0,061	0,037	
M_1-6-0.3	Promedio	0,315	0,360	0,369	0,348
	SD	0,018	0,033	0,042	
M_1-6-0.15	Promedio	0,327	0,368	0,363	0,352
	SD	0,029	0,068	0,023	

Tabla Anexo F 8. Dimensiones de la Altura Trayectorias de los Dispositivos de A.Yuca

Mezcla		Altura trayectorias (mm)			Promedio
		Muestra 1	Muestra 2	Muestra 3	Total (mm)
Y_1-3-0	Promedio	0,718	0,788	0,728	0,745
	SD	0,082	0,054	0,049	
Y_1-3-0.3	Promedio	0,724	0,795	0,756	0,758
	SD	0,076	0,054	0,079	
Y_1-3-0.15	Promedio	0,523	0,530	0,636	0,563
	SD	0,040	0,049	0,038	
Y_1-4.5-0	Promedio	0,623	0,705	0,672	0,667
	SD	0,057	0,059	0,051	
Y_1-4.5-0.3	Promedio	0,716	0,768	0,661	0,715
	SD	0,049	0,053	0,046	
Y_1-4.5-0.15	Promedio	0,623	0,653	0,577	0,618
	SD	0,046	0,060	0,047	
Y_1-6-0	Promedio	0,601	0,579	0,674	0,618
	SD	0,074	0,043	0,062	
Y_1-6-0.3	Promedio	0,617	0,593	0,529	0,580
	SD	0,030	0,053	0,036	
Y_1-6-0.15	Promedio	0,637	0,560	0,640	0,612
	SD	0,037	0,040	0,061	

G. Anexo: Resultados de pruebas mecánicas

Tabla Anexo G 1. Resultados de la prueba mecánica Mezclas A. Maíz

MUESTRA	ESFUERZO A (N/mm ²)	ESFUERZO B (N/mm ²)	DEFORMACIÓ N (%)	MODULO ELASTICIDAD (N/mm ²)
M_1-3-0 - 1	0,75	0,50	21,88	4,51
M_1-3-0 - 2	0,61	0,41	24,64	3,27
M_1-3-0 - 3	0,61	0,49	26,75	3,39
PROMEDIO	0,66	0,47	24,42	3,72
DESVIACIÓN ESTANDAR	0,08	0,05	2,44	0,68
M-1-3-0.3 - 1	3,91	3,91	40,18	22,05
M-1-3-0.3 - 2	2,10	2,11	40,60	12,84
M_1-3-0.3 - 3	2,11	2,36	25,14	16,10
PROMEDIO	2,71	2,79	35,31	17,00
DESVIACIÓN ESTANDAR	1,04	0,98	8,81	4,67
M_1-3-0.15-1	0,57	0,31	62,94	1,93
M_1-3-0.15-3	0,61	0,32	38,69	0,88
M_1-3-0.15-2	0,59	0,30	47,30	2,05
PROMEDIO	0,59	0,31	49,64	1,62
DESVIACIÓN ESTANDAR	0,02	0,01	12,29	0,65
M_1-4.5-0-1	0,28	0,24	32,39	0,56

M_1-4.5-0-2	0,32	0,28	27,35	0,74
M_1-4.5-0-3	0,33	0,27	28,13	0,61
PROMEDIO	0,31	0,26	29,29	0,64
DESVIACIÓN ESTANDAR	0,03	0,02	2,71	0,09
M_1-4.5-0.3-1	2,21	1,35	34,69	8,84
M_1-4.5-0.3-2	2,08	1,52	46,65	7,44
M_1-4.5-0.3-3	2,09	1,30	37,04	8,25
PROMEDIO	2,13	1,39	39,46	8,18
DESVIACIÓN ESTANDAR	0,07	0,11	6,34	0,70
M_1-4.5-0.15-1	0,83	0,88	33,93	4,31
M_1-4.5-0.15-2	1,37	1,56	27,84	8,97
M_1-4.5-0.15-3	1,74	1,17	45,05	6,05
PROMEDIO	1,31	1,20	35,61	6,44
DESVIACIÓN ESTANDAR	0,46	0,34	8,72	2,35
M_1-6-0 - 1	0,46	0,36	27,98	2,05
M_1-6-0 - 2	0,64	0,47	23,60	4,31
M_1-6-0 - 3	0,61	0,40	20,64	3,60
PROMEDIO	0,57	0,41	24,07	3,32
DESVIACIÓN ESTANDAR	0,10	0,05	3,70	1,16
M_1-6-0.3-1	1,50	0,86	41,12	4,54
M_1-6-0.3-2	1,36	0,92	34,72	3,71
M_1-6-0.3 - 3	1,23	0,85	45,36	2,95
PROMEDIO	1,36	0,87	40,40	3,73
DESVIACIÓN ESTANDAR	0,14	0,04	5,36	0,80
M_1-6-0.15-1	0,53	0,22	53,82	0,38
M_1-6-0.15-2	0,47	0,29	35,56	1,01
M_1-6-0.15-3	0,56	0,30	20,16	1,79
PROMEDIO	0,52	0,27	36,51	1,06
DESVIACIÓN ESTANDAR	0,05	0,05	16,85	0,71

Tabla Anexo G 2. Resultados de la prueba mecánica Mezclas A.Yuca

MUESTRA	ESFUERZO A (N/mm2)	ESFUERZO B (N/mm2)	DEFORMACIÓ N (%)	MODULO ELASTICIDAD (N/mm2)
Y_1-3-0 - 1	0,68	0,53	6,81	11,78
Y_1-3-0 - 2	0,45	0,46	3,66	27,19
Y_1-3-0 - 3	0,76	0,61	16,50	22,85
PROMEDIO	0,63	0,53	8,99	20,61
DESVIACIÓN ESTANDAR	0,16	0,07	6,69	7,94
Y_1-3-0.3-1	1,68	1,69	11,10	22,27
Y_1-3-0.3-2	2,03	1,80	12,38	24,19
Y_1-3-0.3-3	2,05	1,60	15,88	14,12
PROMEDIO	1,92	1,70	13,12	20,20
DESVIACIÓN ESTANDAR	0,21	0,10	2,47	5,34
Y_1-3-0.15-2	1,66	1,30	47,43	1,30
Y_1-3-0.15-1	1,74	1,52	19,32	1,52
Y_1-3-0.15-3	1,74	1,50	11,32	1,50
PROMEDIO	1,71	1,44	26,03	1,44
DESVIACIÓN ESTANDAR	0,04	0,12	18,97	0,12
Y_1-4.5-0 - 1	3,43	1,34	16,00	25,57
Y_1-4.5-0 - 2	2,03	0,88	4,08	41,58
Y_1-4.5-0 - 3	3,29	1,34	10,50	28,25
PROMEDIO	2,92	1,19	10,19	31,80
DESVIACIÓN ESTANDAR	0,77	0,27	5,96	8,57
Y_1-4.5-0.3-1	1,75	1,30	7,42	31,60
Y_1-4.5-0.3-2	1,45	1,05	8,65	13,91
Y_1-4.5-0.3-3	1,98	1,38	10,58	16,75
PROMEDIO	1,73	1,24	8,88	20,75
DESVIACIÓN ESTANDAR	0,27	0,17	1,59	9,50
Y_1-4.5-0.15-1	3,40	1,90	9,55	41,01
Y_1-4.5-0.15-2	3,93	1,66	9,71	28,00
Y_1-4.5-0.15-3	3,29	2,06	8,51	35,43
PROMEDIO	3,54	1,87	9,26	34,81

DESVIACIÓN ESTANDAR	0,34	0,20	0,65	6,53
Y_1-6-0 - 1	3,13	1,10	14,31	19,41
Y_1-6-0 - 2	2,55	1,17	11,37	25,61
Y_1-6-0 - 3	2,47	0,94	27,12	15,67
PROMEDIO	2,72	1,07	17,60	20,23
DESVIACIÓN ESTANDAR	0,36	0,11	8,38	5,02
Y_1-6-0.3-1	2,45	1,51	13,30	11,71
Y_1-6-0.3-2	3,31	1,80	9,04	34,13
Y_1-6-0.3-3	3,00	1,81	10,46	36,78
PROMEDIO	2,92	1,71	10,93	27,54
DESVIACIÓN ESTANDAR	0,44	0,17	2,17	13,77
Y_1-6-0.15-2	1,92	1,05	8,20	25,62
Y_1-6-0.15-1	2,00	1,05	6,99	36,38
Y_1-6-0.15-3	2,20	1,21	14,38	13,71
PROMEDIO	2,04	1,10	9,86	25,23
DESVIACIÓN ESTANDAR	0,14	0,09	3,96	11,34

Figura Anexo G - 1. Grafica Esfuerzo Deformación Mezcla Y-1-6-0

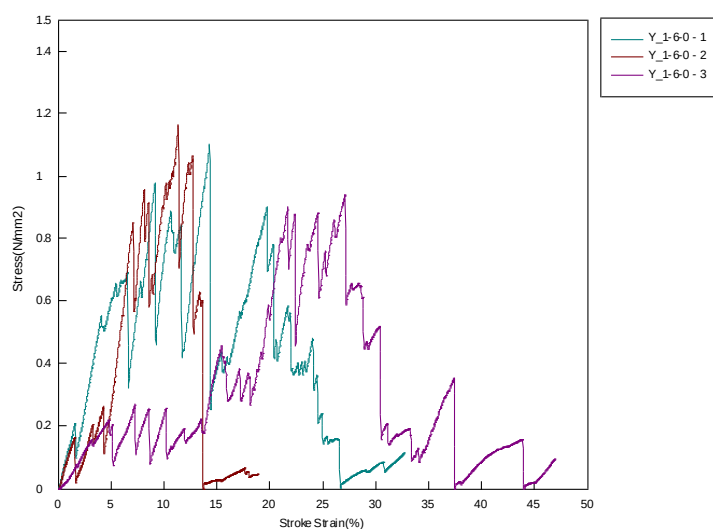


Figura Anexo G - 2. Grafica Esfuerzo Deformación Mezcla M-1-6-0

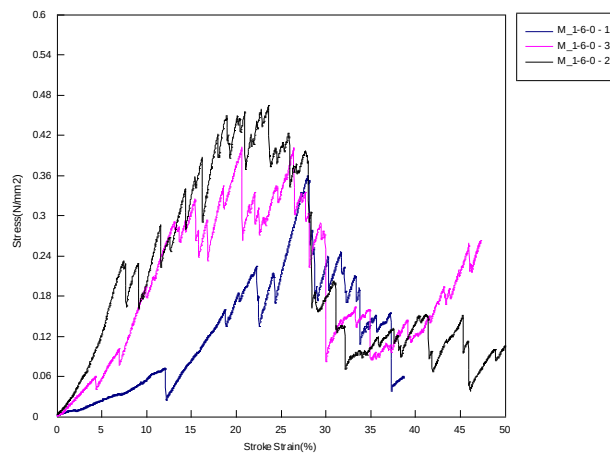


Figura Anexo G - 3. Grafica Esfuerzo Deformación Mezcla Y-1-4.5-0

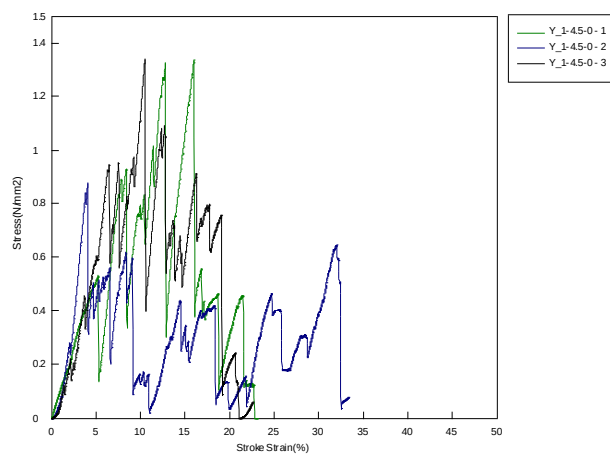


Figura Anexo G - 4. Grafica Esfuerzo Deformación Mezcla Y-1-3-0

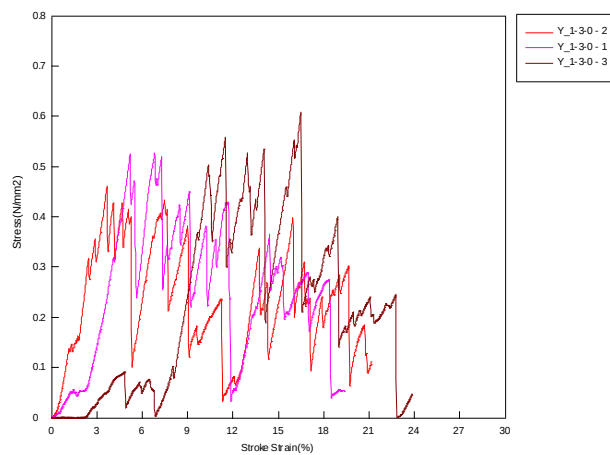


Figura Anexo G - 5. Grafica Esfuerzo Deformación Mezcla M-1-3-0

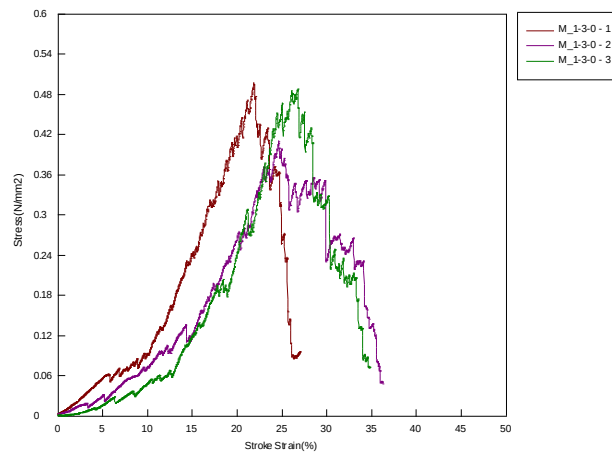


Figura Anexo G - 6. Grafica Esfuerzo Deformación Mezcla M-1-3-0,15

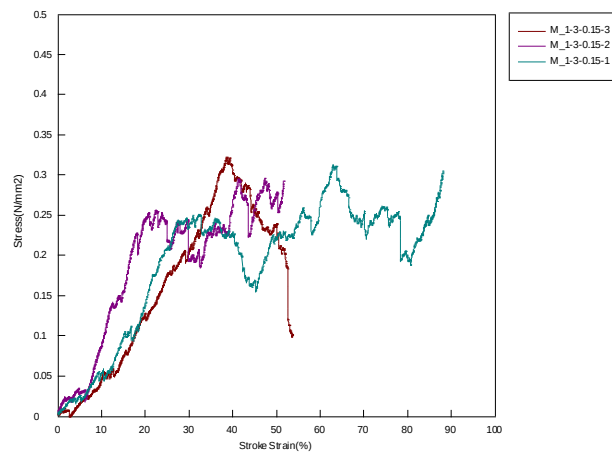


Figura Anexo G - 7. Grafica Esfuerzo Deformación Mezcla M-1-4.5-0.15

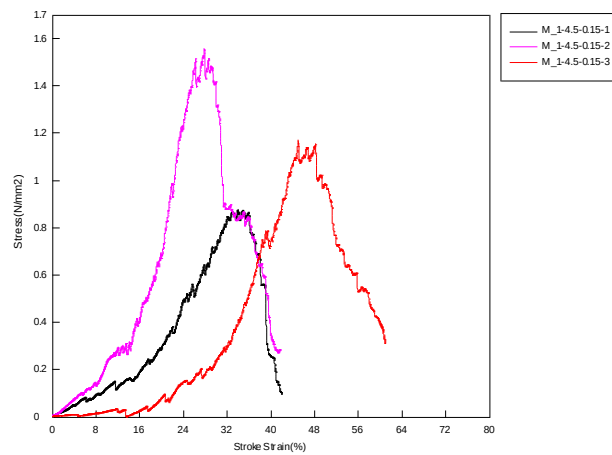


Figura Anexo G - 8. Grafica Esfuerzo Deformación Mezcla M-1-6-0.15

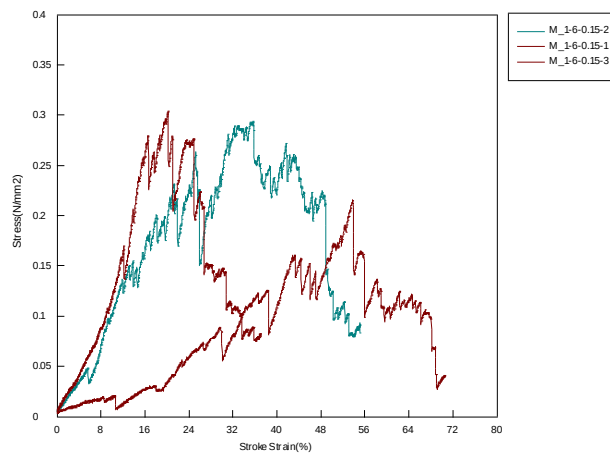


Figura Anexo G - 9. Grafica Esfuerzo Deformación Mezcla Y-1-3-0.15

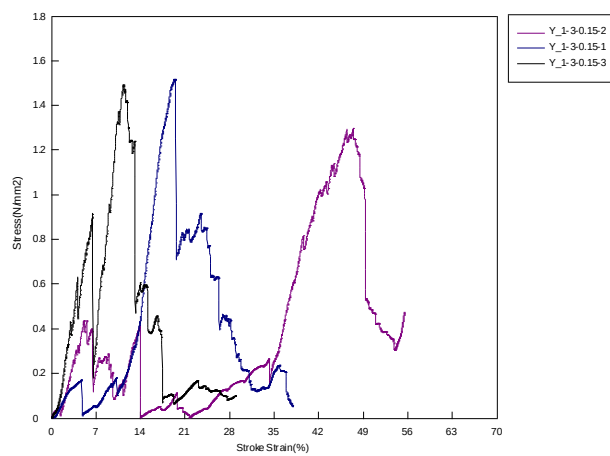


Figura Anexo G - 10. Grafica Esfuerzo Deformación Mezcla Y-1-4.5-0.15

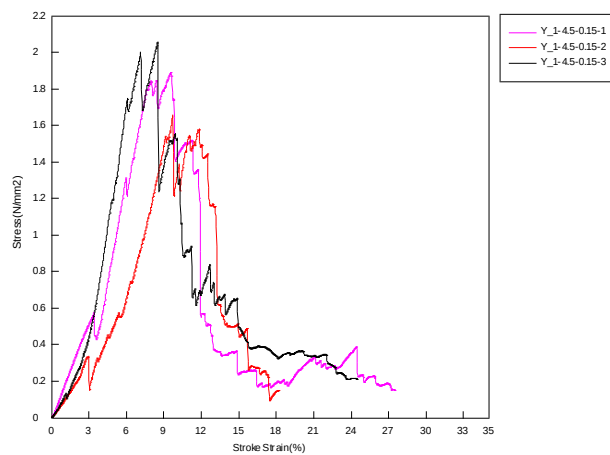


Figura Anexo G - 11. Grafica Esfuerzo Deformación Mezcla Y-1-6-0.15

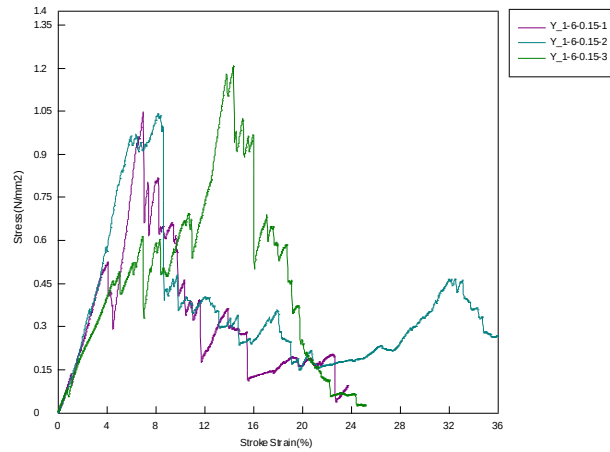


Figura Anexo G - 12. Grafica Esfuerzo Deformación Mezcla M-1-4.5-0.3

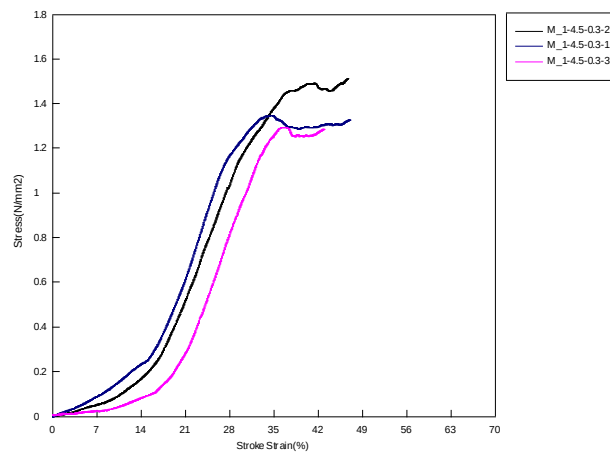


Figura Anexo G - 13. Grafica Esfuerzo Deformación Mezcla Y-1-4.5-0.3

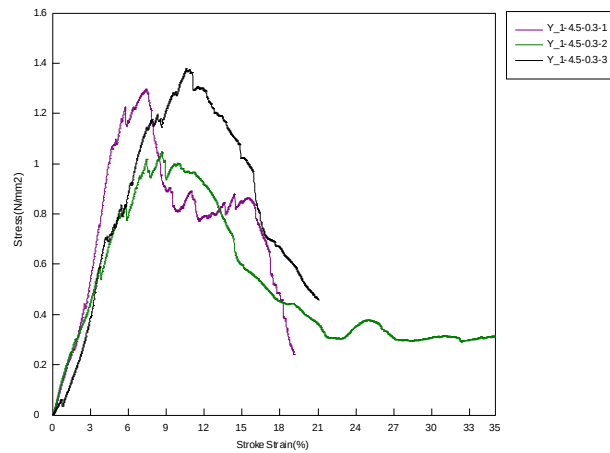


Figura Anexo G - 14. Grafica Esfuerzo Deformación Mezcla Y-1-6-0.3

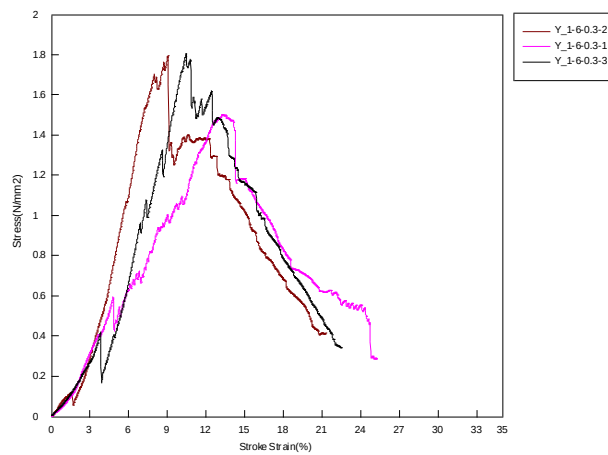


Figura Anexo G - 15. Grafica Esfuerzo Deformación Mezcla Y-1-3-0.3

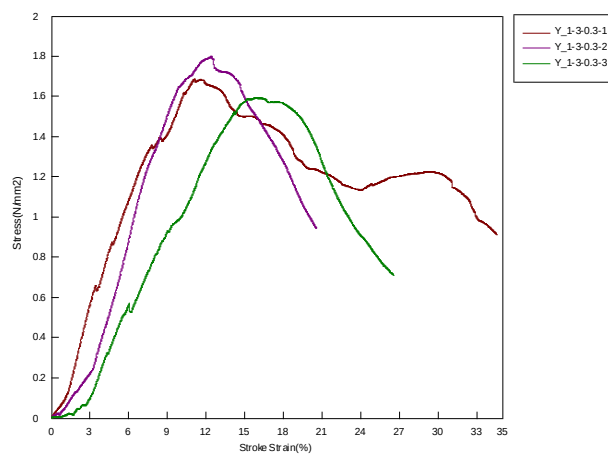


Figura Anexo G - 16. Grafica Esfuerzo Deformación Mezcla M-1-4.5-0

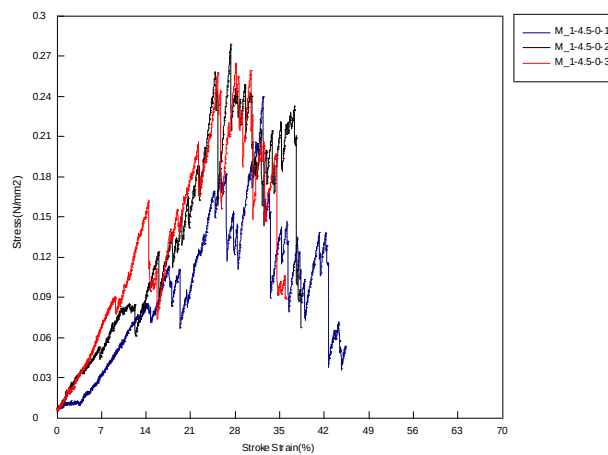


Figura Anexo G - 17. Grafica Esfuerzo Deformación Mezcla M-1-3-0.3

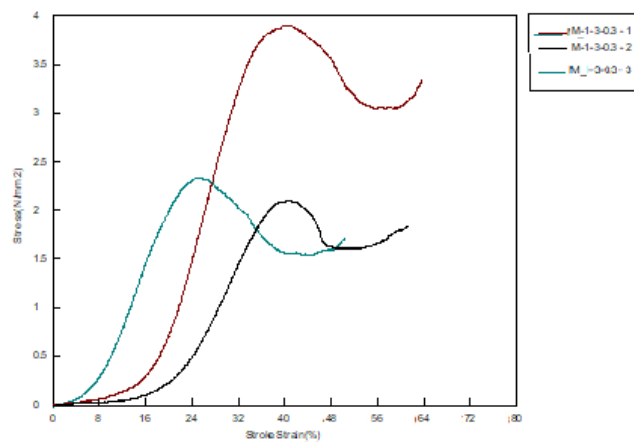


Figura Anexo G - 18. Grafica Esfuerzo Deformación Mezcla M-1-6-0.3

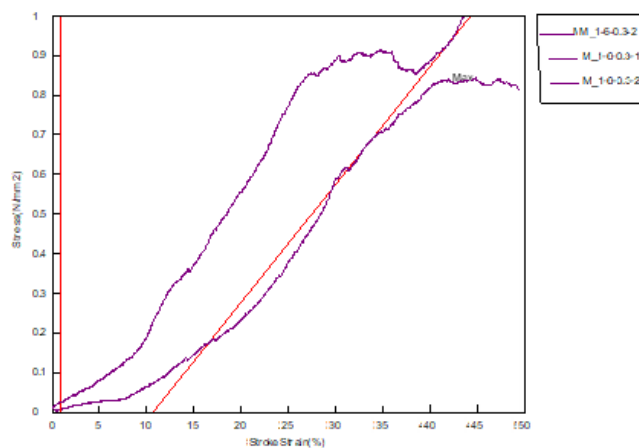
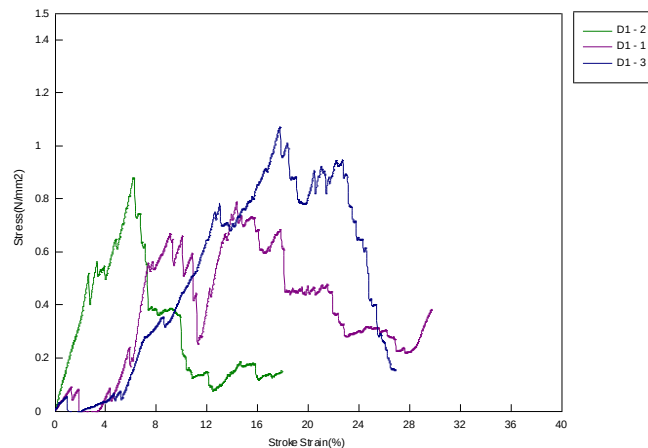


Figura Anexo G - 19. Grafica Esfuerzo Deformación Mezcla Y-1-4.5-0.15, con DS



H. Anexo: Complemento pruebas de transporte y reológicas

A continuación se muestran los espectros capturados para cada dispositivo, en un tiempo de 1 (A), 4 (B), 7 (C), 10 (D) y 12 horas (E), a una longitud de onda a 276nm.

Figura Anexo H - 1. Espectros UV-VIS, Muestra 1

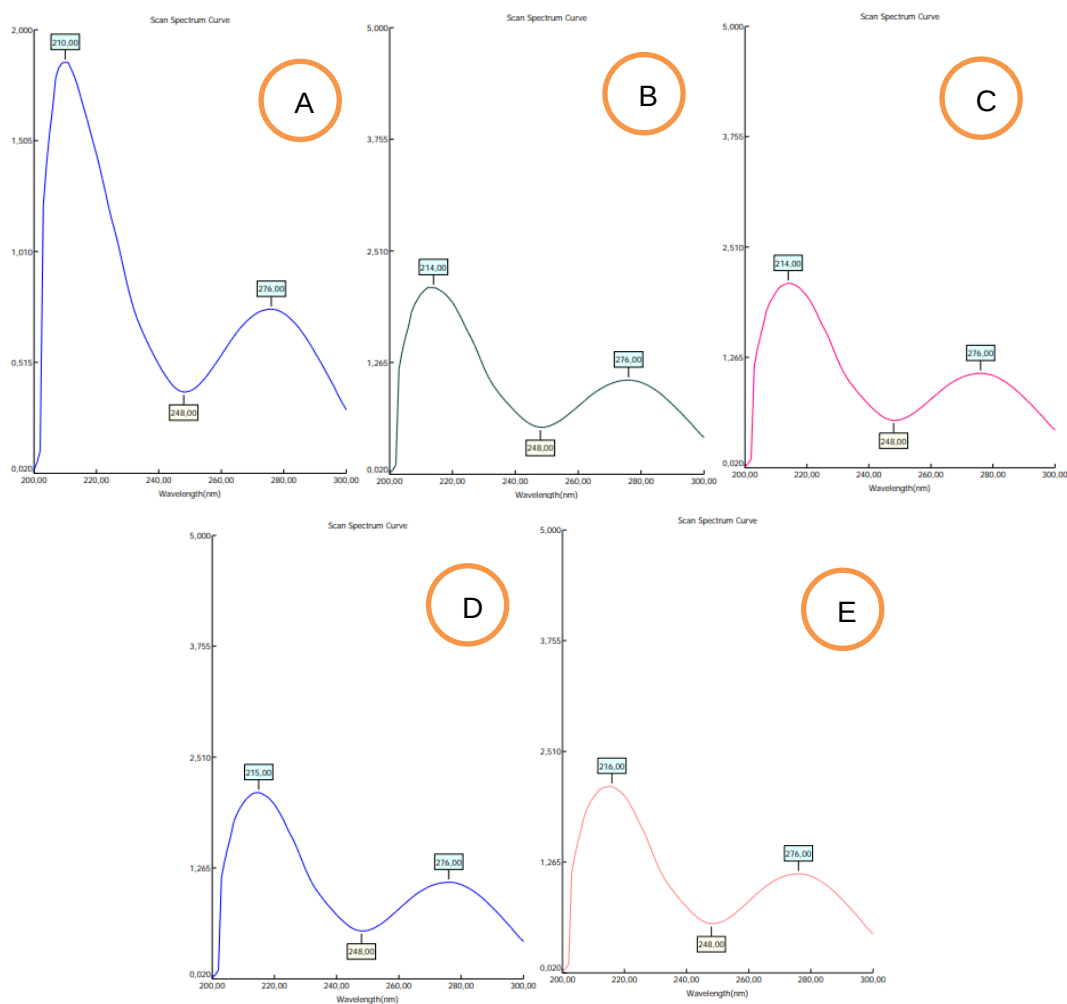


Figura Anexo H - 2. Espectros UV-VIS, Muestra 2

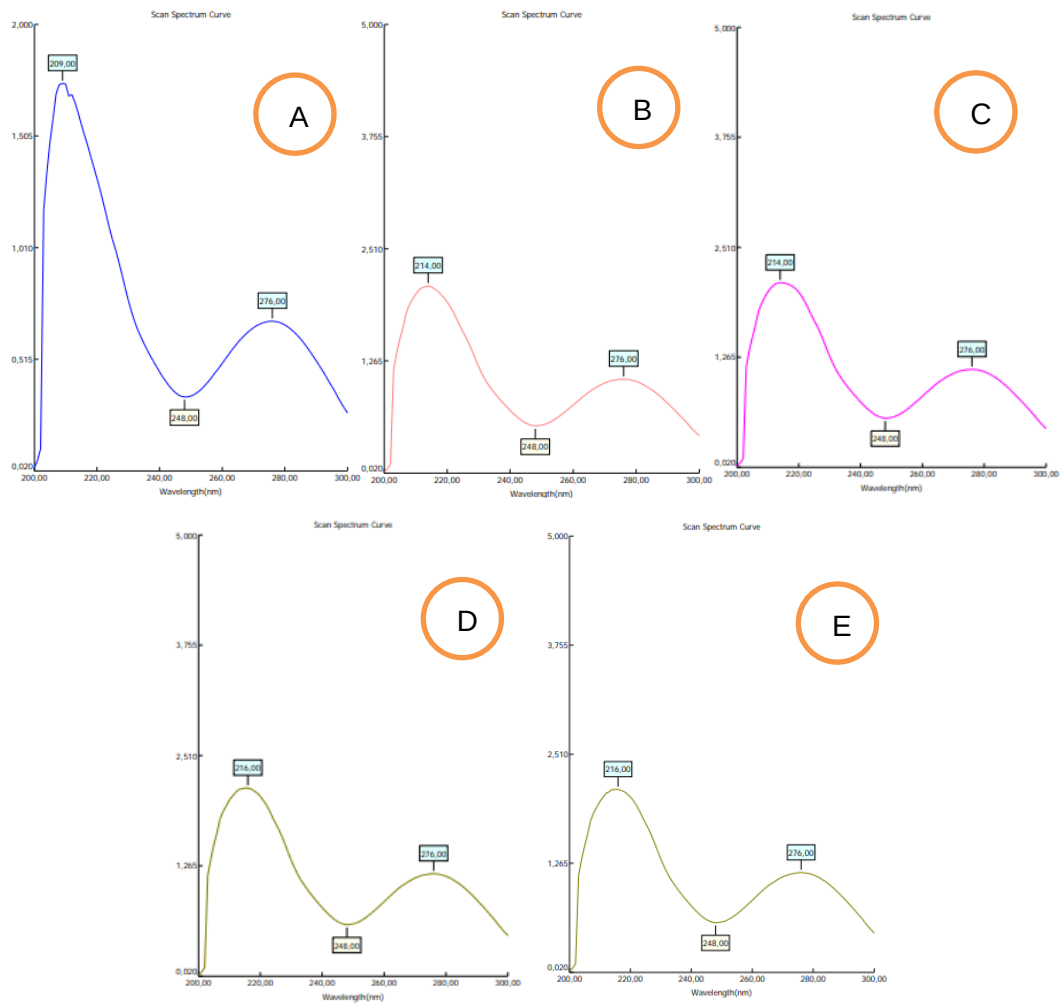
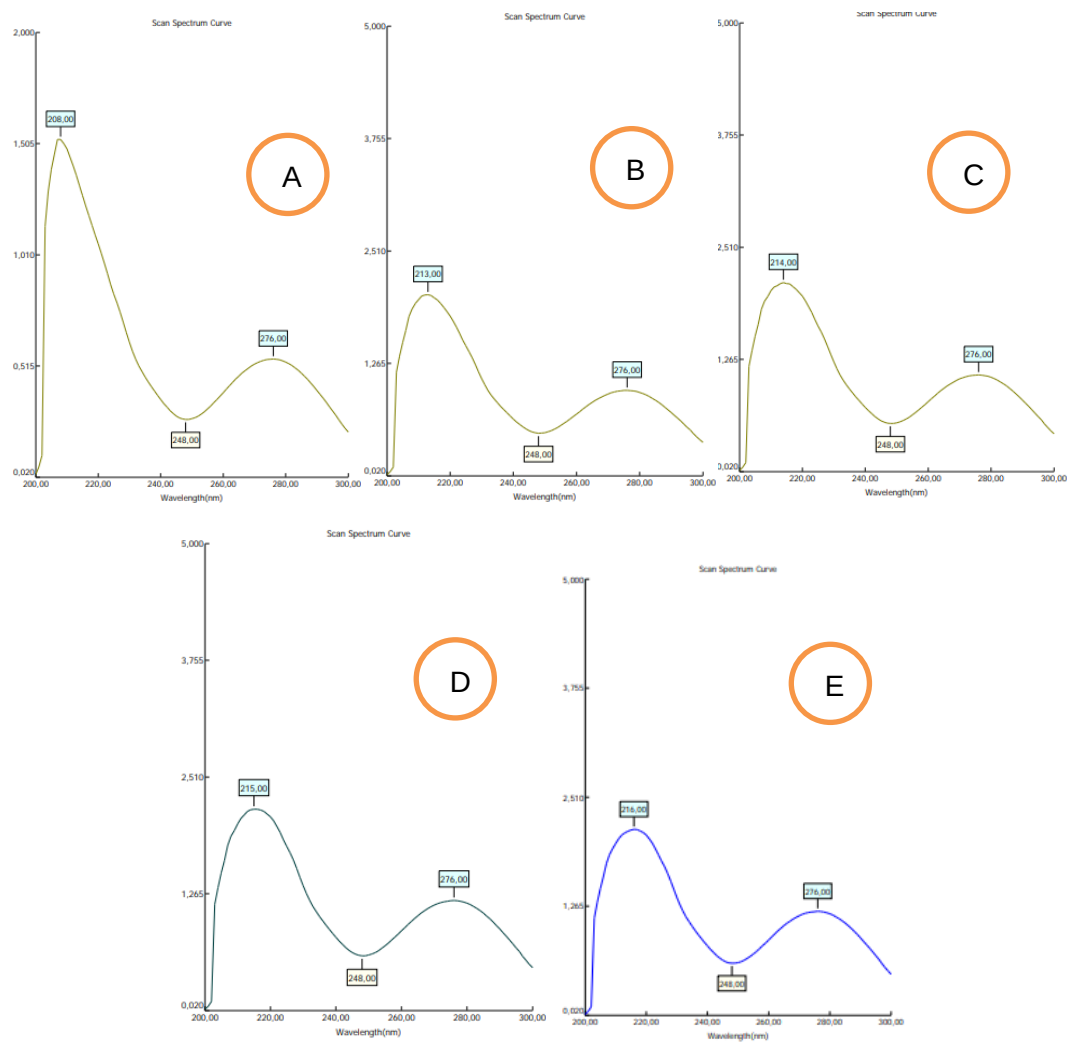


Figura Anexo H - 3. Espectros UV-VIS, Muestra 3



- RESPUESTA CARACTERIZACIÓN REOLÓGICA DE MEZCLA SELECCIONADA

Figura Anexo H - 4. Barrido de tiempo 1 (*Oscillation-Time*)

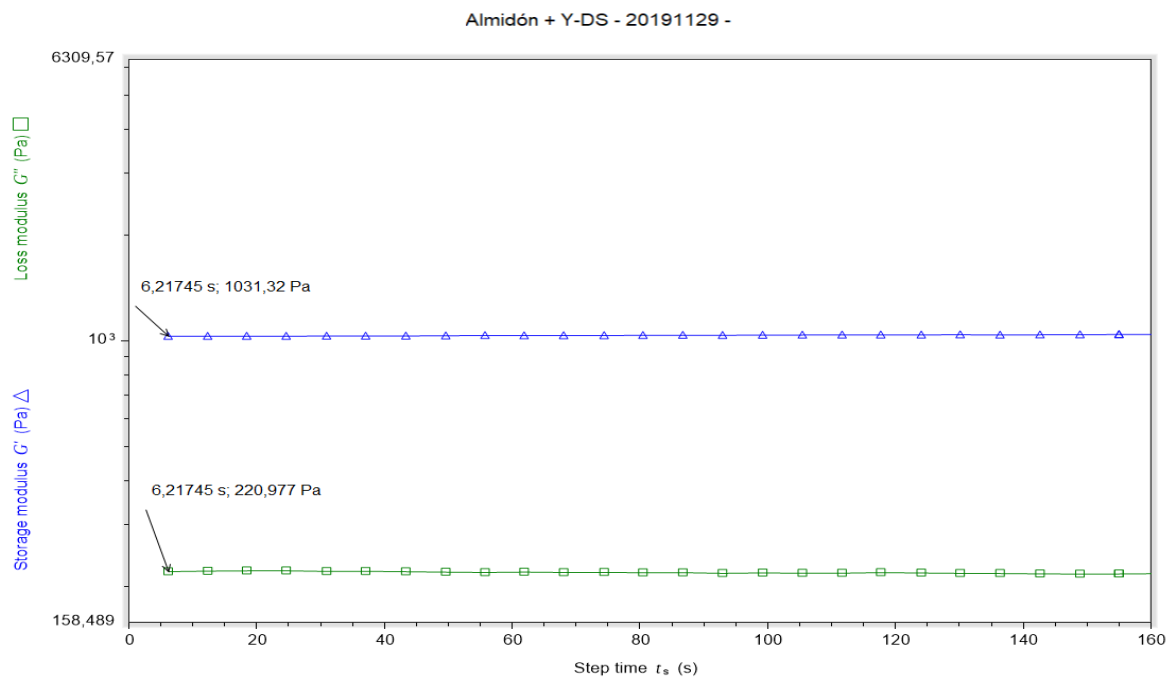


Figura Anexo H - 5. Barrido de amplitud (*Oscillation-Amplitude*)

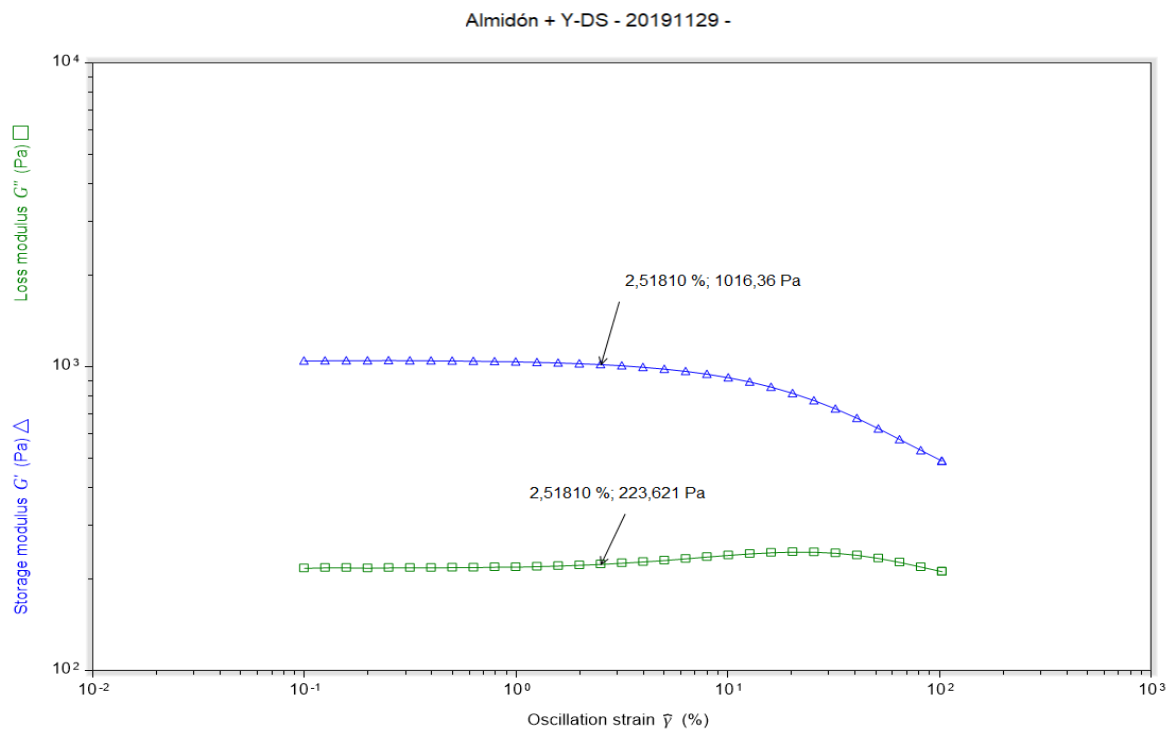
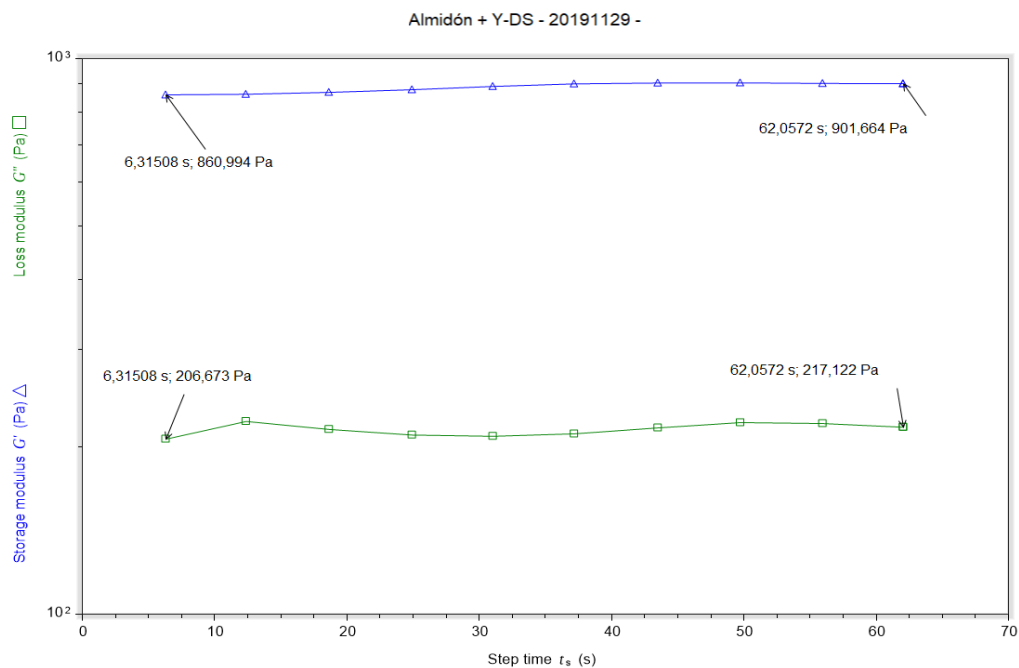
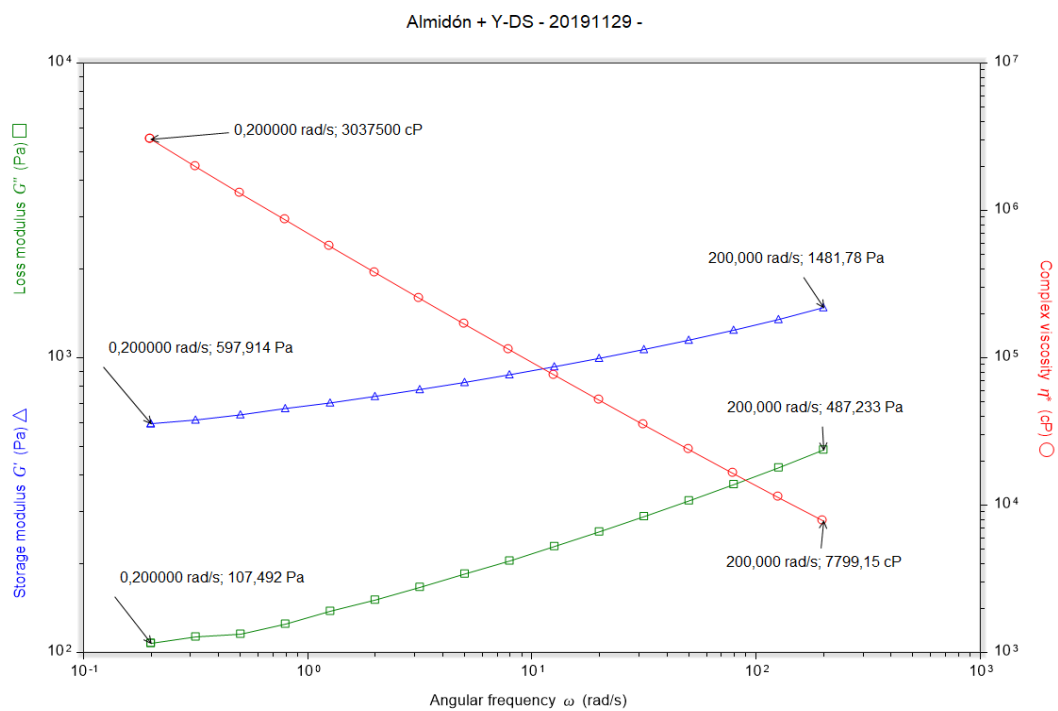


Figura Anexo H - 6. Barrido de tiempo 2 (*Oscillation-Time*)Figura Anexo H - 7 Barrido de frecuencia (*Oscillation-Frequency*)

I. Anexo: Diagrama de bloques del controlador del motor

A continuación se resumen los pasos de diseño:

- Se asigna un bloque “While Loop”, en la sección de “programación”
- Incorporar los bloques “Init” y “Close”, de la biblioteca “Arduino”, para abrir y cerrar el puerto de conexión del micro controlador
- Seleccionar el bloque “Analog Read Pin”, para leer las entradas analógicas de Arduino. Luego se conectan los diferentes bloques y se especifica los números de clavijas o “pines” de la tarjeta Arduino para activar las bobinas del motor.
- En la carpeta de “sensores” se ubica el bloque de “Stepper”, configurando las entradas para establecer el control de los “pasos” del motor, por cada uno de los cinco niveles de velocidad y dirección de giro.
- Finalmente se establecen los comandos visuales con sus respectivas etapas de activación (eventos de interfaz: interruptores) y control (variables locales).

Figura Anexo I - 1 Esquema del diagrama de bloques

