

UNIVERSIDAD
NACIONAL
DE COLOMBIA

**EFFECTOS DE LA INCORPORACIÓN DE MICROORGANISMOS,
METABOLITOS Y FERTILIZANTES EN HIDROGELES REFORZADOS CON
NANOCELULOSA SOBRE SUS PROPIEDADES FÍSICAS Y
FISICOQUÍMICAS**

Luisa Fernanda Gil Henao

Universidad Nacional de Colombia
Facultad de Ingeniería y Arquitectura, Departamento de Ingeniería química
Manizales, Colombia
2026

**EFFECTOS DE LA INCORPORACIÓN DE MICROORGANISMOS,
METABOLITOS Y FERTILIZANTES EN HIDROGELES REFORZADOS CON
NANOCELULOSA SOBRE SUS PROPIEDADES FÍSICAS Y
FISICOQUÍMICAS**

Luisa Fernanda Gil Henao

Tesis presentada como requisito parcial para optar al título de:

Maestría en Ingeniería - Ingeniería Química

Directora:

PhD., Sneyder Rodríguez Barona

Codirector:

Msc., Marcelo Guancha Chalapud

Línea de Investigación:

Agroindustria de Productos no Alimentarios

Grupo de Investigación:

Bacterias Acido Lácticas y sus Aplicaciones Biotecnológicas Industriales

Universidad Nacional de Colombia

Facultad de Ingeniería y Arquitectura, Departamento de Ingeniería química

Manizales, Colombia

2026

Agradecimientos

Quiero expresar mi más profundo agradecimiento a mis padres, por su amor incondicional, apoyo constante y por ser el pilar fundamental en cada etapa de mi vida. A mis hermanos y sobrinos, por su cariño, motivación y por brindarme siempre alegría y fortaleza en este camino.

A la PhD Sneyder Rodríguez Barona, por su confianza, orientación y valiosas enseñanzas a lo largo de este proceso. Su acompañamiento y dedicación fueron fundamentales para el desarrollo de este trabajo.

Al MSc. Marcelo Guancha, por su guía, enseñanzas y acompañamiento durante este proceso, los cuales fueron clave para mi formación y crecimiento académico.

Al programa UNALEE, por su apoyo y acompañamiento durante la escritura de este documento.

Finalmente, a mis amigos, por su apoyo incondicional, comprensión y compañía emocional a lo largo de este camino.

Resumen

EFECTOS DE LA INCORPORACIÓN DE MICROORGANISMOS, METABOLITOS Y FERTILIZANTES EN HIDROGELES REFORZADOS CON NANOCELULOSA SOBRE SUS PROPIEDADES FÍSICAS Y FISICOQUÍMICAS

En el contexto de la agricultura sostenible, el desarrollo de materiales funcionales que mejoren la eficiencia en el uso de agua y nutrientes representa un desafío clave. En este estudio se evalúan los efectos de la incorporación de microorganismos, metabolitos y fertilizantes en hidrogeles reforzados con nanocelulosa obtenida a partir de cutícula de Aloe vera, sobre sus propiedades físicas, fisicoquímicas y funcionales. La nanocelulosa se obtuvo con un rendimiento del 7,84% respecto a la fibra inicial, confirmándose su morfología nanométrica ($24 \pm 6,8$ nm) mediante microscopía electrónica de barrido (SEM) y la presencia de grupos característicos mediante FTIR, validando el aprovechamiento de este residuo agroindustrial como fuente sostenible de refuerzo polimérico.

Los hidrogeles fueron sintetizados mediante reticulación, incorporando de forma independiente fertilizantes (NPK), metabolitos y bacterias ácido lácticas (BAL). La adición de fertilizante en concentraciones de 5, 10 y 15% generó una disminución en la capacidad de hinchamiento y retención de agua, atribuida a la ocupación de sitios activos de la red polimérica, mientras que aumentó la rigidez y resistencia mecánica del material. Por su parte, los hidrogeles con metabolitos mostraron comportamientos dependientes de la cepa, donde la presencia de ácidos orgánicos, principalmente ácido láctico, indujo modificaciones en la red polimérica sin afectar significativamente la retención hídrica, constituyendo un enfoque innovador no reportado previamente.

La incorporación de *Lactobacillus plantarum* y *Weissella cibaria* mediante inmersión post-polimerización permitió mantener la viabilidad bacteriana durante 8 días, evidenciando además un incremento en la capacidad de hinchamiento respecto al control, lo que sugiere interacciones entre las células y la matriz polimérica. En conjunto, los resultados demuestran que la incorporación de fertilizantes, metabolitos y BAL permite modular de manera diferenciada las propiedades del hidrogel, destacando su potencial como sistema multifuncional para retención hídrica, liberación controlada y biofuncionalidad en aplicaciones agrícolas sostenibles.

Resumen y

Abstract

Palabras claves: Hidrogeles, Nanocelulosa, Bacterias ácido lácticas, Metabolitos, fertilizantes

Abstract

Effects of the Incorporation of Microorganisms, Metabolites, and Fertilizers into Nanocellulose-Reinforced Hydrogels on Their Physical and Physicochemical Properties

In the context of sustainable agriculture, the development of functional materials that improve water and nutrient use efficiency represents a key challenge. This study evaluates the effects of incorporating microorganisms, metabolites, and fertilizers into nanocellulose-reinforced hydrogels derived from Aloe vera cuticle, focusing on their physical, physicochemical, and functional properties. Nanocellulose was obtained with a yield of 7.84% relative to the initial fiber, and its nanometric morphology (24 ± 6.8 nm) was confirmed by scanning electron microscopy (SEM), while Fourier-transform infrared spectroscopy (FTIR) verified the presence of characteristic cellulose functional groups. These results validate the potential of this agro-industrial residue as a sustainable and renewable source for reinforcing polymeric matrices.

Hydrogels were synthesized through polymer network crosslinking, incorporating fertilizers (NPK), metabolites, and lactic acid bacteria (LAB) independently. The addition of fertilizer at concentrations of 5, 10, and 15% led to a decrease in swelling capacity and water retention, attributed to the occupation of active sites within the polymeric network, while increasing the rigidity and compressive strength of the material. In contrast, hydrogels containing metabolites exhibited strain-dependent behavior; the presence of organic acids, mainly lactic acid, induced modifications in the polymer network without significantly affecting water retention, representing an innovative approach not previously reported.

The incorporation of *Lactobacillus plantarum* and *Weissella cibaria* via post-polymerization immersion maintained bacterial viability for up to 8 days. Additionally, these hydrogels showed increased swelling capacity compared to the control, suggesting interactions between the cells and the polymer matrix. Overall, the results demonstrate that the incorporation of fertilizers,

Resumen y

Abstract

metabolites, and LAB allows for the tailored modulation of hydrogel properties. Fertilizers enhance mechanical strength but reduce water retention, while LAB promote swelling and introduce potential biofunctional properties. These findings support the development of multifunctional hydrogels for water retention, controlled release, and bioactive applications in sustainable agriculture.

Keywords: Hydrogel, Nanocellulosa, Lactic acid bacteria, Metzzabolites, Fertilizer

Tabla de contenido

Contenido	6
Lista de figuras	6
Contenido	8
Lista de tablas	8
Objetivos	9
1. Objetivo general	9
1. Objetivo general	9
1.1 Objetivos específicos	9
2. Pregunta de investigación	10
3. Hipótesis	10
4. Introducción	11
4. Justificación	14
5. Planteamiento del problema	17
6. Marco teórico	21
6.1 Hidrogeles en la agricultura	21
6.2 Diferentes sistemas de riego en la agricultura	22
6.3 Pruebas de caracterización para los hidrogeles	23
6.3.1 Prueba de capacidad y cinética de hinchamiento	24
6.3.2 Resistencia máxima a la compresión	24
6.3.3 Módulo elástico	24
6.3.4 Análisis infrarrojo (FTIR)	24
6.3.5 Análisis Termo Gravimétrico (TGA)	25
6.3.6 Microscopía Electrónica de Barrido (SEM)	25
7. Metodología	26
7.1 Metodología para el objetivo 1.	28
7.1.1 Etapa 1. Pretratamiento de la materia prima	29
7.1.2 Etapa 2. Obtención de nanofibras de celulosa de <i>Aloe vera</i>	29
7.2 Metodología objetivo 2	30
7.2.1 Etapa 3. Síntesis de hidrogeles con nanofibras de nanocelulosa de <i>Aloe vera</i>	30
7.2.2 Etapa 4. Incorporación de fertilizantes a hidrogeles	32

7.2.3	Etapa 5 Reactivación de las cepas microbianas	32
7.2.4	Etapa 6. Incorporación de metabolitos microbianos a hidrogeles	34
7.2.5	Etapa 7. Caracterización física, fisicoquímica y funcional de los hidrogeles	35
7.2.5.1	Evaluación de las variables de respuesta	35
7.2.5.2	Cinética de hinchamiento	35
7.2.5.3	Capacidad de retención de agua	36
7.2.5.4	Resistencia máxima a la compresión y módulo elástico	36
7.2.5.5	Análisis infrarrojo (FTIR)	37
7.2.5.6	Análisis de calorimetría diferencial de barrido (DSC).....	37
7.3	Metodología objetivo 3.....	37
7.3.1	Etapa 8. Incorporación de las BAL a los hidrogeles con nanocelulosa.....	37
7.3.2	Etapa 9. Medición de la viabilidad de las BAL incorporadas en los hidrogeles reforzados con nanocelulosa.....	39
10	Resultados y Discusión	40
10.1	Obtención de nanofibras de celulosa.....	40
	Resultados y Discusión	41
10.1.1	Tamaño de las nanofibras de celulosa de <i>Aloe vera</i>	41
	Resultados y Discusión	42
10.1.2	Análisis infrarrojo FTIR de nanofibras de celulosa	42
	Resultados y Discusión	43
	Resultados y Discusión	44
10.2.	Síntesis de hidrogeles con nanofibra de nanocelulosa de <i>Aloe vera</i>	44
	Resultados y Discusión	45
10.3	Incorporación de fertilizantes y metabolitos de las BAL a hidrogeles reforzados con nanocelulosa	45
10.3.1	Incorporación de fertilizantes	45
10.3.2	Producción y recuperación de metabolitos	45
	Resultados y Discusión	46
10.3.3	Incorporación de metabolitos a los hidrogeles reforzados con nanocelulosa	46
10.4	Incorporación de las BAL	46
	Resultados y Discusión	47
	Resultados y Discusión	48
10.5	Caracterización física, fisicoquímica y funcional de los hidrogeles	48

10.5.1	Cinética de hinchamiento	48
10.5.1.1	Hidrogel con nanocelulosa y fertilizante	48
	Resultados y Discusión	49
10.5.1.2	Hidrogel con nanocelulosa y metabolitos.....	49
	Resultados y Discusión	50
	Resultados y Discusión	51
10.5.1.3	Hidrogel con nanocelulosa y BAL	51
	Resultados y Discusión	52
	Resultados y Discusión	53
	Resultados y Discusión	54
10.5.2.1	Capacidad de retención de agua	54
10.5.2.1	Hidrogel con nanocelulosa y fertilizante	54
10.5.2.2	Hidrogel con nanocelulosa y metabolitos.....	55
10.5.2.3	Hidrogel con nanocelulosa y BAL	55
	Resultados y Discusión	56
	Resultados y Discusión	56
10.5.3	Resistencia máxima a la compresión y módulo elástico	57
	Resultados y Discusión	57
10.5.3.1	Hidrogel con nanocelulosa y fertilizantes.....	58
10.5.3.2	Hidrogel con nanocelulosa y metabolitos.....	58
	Resultados y Discusión	58
10.5.3.3	Hidrogel con nanocelulosa y BAL	59
	Resultados y Discusión	60
	Resultados y Discusión	60
	Resultados y Discusión	61
10.5.4.	Análisis SEM.....	64
10.5.4.1	Hidrogeles con nanocelulosa y fertilizantes	64
10.5.4.2	Hidrogeles con nanocelulosa y metabolitos.....	64
10.5.4.3	Hidrogeles con nanocelulosa y BAL	65
10.5.5	Análisis DSC	68
10.5.6	Análisis infrarrojo FTIR hidrogeles.....	71
10.5.6.1	Hidrogeles con nanocelulosa y fertilizantes	71

10.5.6.2	Hidrogeles con nanocelulosa y metabolitos de las BAL	72
10.5.7	Medición de viabilidad de la incorporación de BAL en hidrogeles con nanocelulosa.....	75
10.	Conclusiones	76
11	Bibliografía.....	78
12.	Declaración uso de IA.....	88
13.	Anexo 1. Evidencia fotográfica de los montajes de laboratorio realizados	89
	Anexo 2. Divulgación de resultados, en el evento Momentus Unal Palmira 2025.....	90
	Anexo 3. Resultados diámetro de nanocelulosa obtenidos en el software Imagej.....	91
	Anexo 4. Imágenes SEM de nanofibras de cutícula de <i>Aloe vera</i>	93
	Anexo 5. Soporte de los datos experimentales	94
	Anexo 6. Análisis estadístico en software Minitab ®	124

Lista de figuras

Figura 1. Esquema de la metodología (Elaboración propia).....	23
Figura 2. Análisis morfológico de las nanofibras de celulosa	36
Figura 3. Distribución del diámetro de la nanofibra de celulosa	37
Figura 4. Análisis FTIR nanofibras de celulosa.....	39
Figura 5. Apariencia de los hidrogeles con nanocelulosa.	40
Figura 6. Colonias BAL en medio MRS.....	43
Figura 7 Cinética de hinchamiento hidrogeles con nanocelulosa y fertilizantes	47
Figura 8 Cinética de hinchamiento hidrogeles con nanocelulosa y metabolitos.....	47
Figura 9 Cinética de hinchamiento de hidrogeles con nanocelulosa y BAL	47
Figura 10 E Hidrogel con nanocelulosa.....	57
Figura 11 E Hidrogel con nanocelulosa y fertilizante 5%.....	57
Figura 12 E Hidrogel con nanocelulosa y fertilizante 10%.....	57
Figura 13 E Hidrogel con nanocelulosa y fertilizante 15%.....	57
Figura 14 E Hidrogel con naocelulosa y Metabolito <i>Lactobacillus platarum</i> (IBUN-041-39)	57
Figura 15 E Hidrogel con nanocelulosa y Metabolito de <i>Weissella cibaria</i> (IBUN-090-03684).....	57
Figura 16 E Hidrogel con nanocelulosa y Metabolito de <i>Lactobacillus plantarum</i> (IBUN-090-03774).....	58
Figura 17 E Hidrogel con nanocelulosa y <i>Lactobacillus plantarum</i> (IBUN-041-39).....	58
Figura 18 E Hidrogel con nanocelulosa y <i>Weissella cibaria</i> ((IBUN-090-03684).....	58
Figura 19 E Hidrogel con nanocelulosa <i>Lactobacillus plantaru</i> (IBUN-090-03774).....	58
Figura 20 SEM Hidrogel con nanocelulosa y fertilizante 5%	61
Figura 21 SEM Hidrogel con nanocelulosa y fertilizante 10%	61
Figura 22 SEM Hidrogel con nanocelulosa y fertilizante 15%	61
Figura 23 SEM Hidrogel con nanocelulosa y Metabolito <i>Lactobacillus plantarum</i> IBUN-090-03774.....	61

Figura 24 SEM Hidrogel con nanocelulosa y Metabolito <i>Lactobacillus plantarum</i> IBUN-IBUN-041-39	62
Figura 25 SEM Hidrogel con nanocelulosa y Metabolito <i>Weissella cibaria</i> IBUN-090-03684	62
Figura 26 SEM Hidrogel con nanocelulosa y <i>Weissella cibaria</i> IBUN-090-03684.....	62
Figura 27 SEM Hidrogel con nanocelulosa y Metabolito <i>Lactobacillus plantarum</i> IBUN-090-03774	62
Figura 28 SEM Hidrogel con nanocelulosa y Metabolito <i>Lactobacillus plantarum</i> IBUN-IBUN-041-39	63
Figura 29 SEM Hidrogel con nanocelulosa	63
Figura 30 DSC Hidrogel con nanocelulosa.....	65
Figura 31 DSC Hidrogel con nanocelulosa y fertilizante 5%.....	65
Figura 32 Hidrogel con nanocelulosa y fertilizante 10%.....	65
Figura 33 Hidrogel con nanocelulosa y fertilizante 15%.....	65
Figura 34 Hidrogel con naocelulosa y Metabolito <i>Lactobacillus platarum</i> (IBUN-041-39)	66
Figura 35 Hidrogel con nanocelulosa y metabolito de <i>Weissella cibaria</i> (IBUN-090-03684)	66
Figura 36 Hidrogel con naocelulosa y Metabolito <i>Lactobacillus platarum</i> (IBUN-090-03774).....	66
Figura 37 FTIR hidrogel con nanocelulosa y fertilizantes.....	69
Figura 38 FTIR hidrogel con nanocelulosa y metabolitos.....	69
Figura 39 Viabilidad de las bacterias en la matriz de los hidrogel	71
Figura 40 Anexo 1. Montaje para la síntesis de hidrogel	84
Figura 41 Anexo 2. Biorreactores y entorno electrónico para la fermentación de BAL	84

Lista de tablas

Tabla 1. Resultados relevantes reportados en los antecedentes de hidrogeles agrícolas y BAL 17

Tabla 2. Cuadro comparativo de técnicas de caracterización de hidrogeles (Elaboración propia)..... 21

Tabla 3. Diseño experimental. 23

Tabla 4. Condiciones de crecimiento para cada cepa 30

Tabla 5. Adaptación de la metodología Guancha-Chalapud, Serna-Cock & Tirado (2022) para obtener nanocelulosa..... 35

Tabla 5. Hinchamiento de los hidrogeles con nanocelulosa y fertilizantes 48

Tabla 7. Hinchamiento de los hidrogeles con nanocelulosa y metabolitos de BAL..... 48

Tabla 8. Hinchamiento de los hidrogeles con nanocelulosa y BAL 48

Tabla 9. Capacidad de hinchamiento hidrogeles con nanocelulosa y fertilizantes 51

Tabla 10. Capacidad de hinchamiento hidrogeles con nanocelulosa y metabolitos 51

Tabla 11. Capacidad de hinchamiento hidrogeles con nanocelulosa y BAL..... 52

Tabla 12. Resistencia a la máxima compresión de hidrogeles con nanocelulosa y fertilizantes..... 55

Tabla 13. Resistencia a la máxima compresión de hidrogeles con nanocelulosa y metabolitos de las BAL..... 55

Tabla 14. Resistencia a la máxima compresión de hidrogeles con nanocelulosa y BAL 56

1. Objetivo general

1. Objetivo general

- Evaluar de las propiedades de hidrogeles reforzados con nanocelulosa y funcionalizados con bacterias ácido-lácticas, metabolitos y fertilizantes.

1.1 Objetivos específicos

- Determinar las propiedades morfológicas y químicas de nanofibras de *Aloe vera* obtenidas por hidrólisis ácida combinada con ultrasonido, mediante análisis de sus propiedades morfológicas y químicas.
- Establecer las condiciones de incorporación de BAL en hidrogeles reforzados con nanocelulosa antes de la polimerización.
- Determinar las propiedades fisicoquímicas y de interacción con el agua de hidrogeles reforzados con nanocelulosa con adición de metabolitos, BAL y fertilizantes.

2. Pregunta de investigación

¿Cuál es el efecto de la incorporación de bacterias ácido lácticas, sus metabolitos y fertilizantes en hidrogeles reforzados con nanocelulosa sobre sus propiedades físicas, químicas y funcionales, específicamente en términos de capacidad y cinética de hinchamiento, capacidad de retención de agua y propiedades mecánicas como la fuerza máxima de compresión y el módulo de elasticidad?

3. Hipótesis

La incorporación de bacterias ácido-lácticas, sus metabolitos, y fertilizantes en hidrogeles reforzados con nanocelulosa se asociará con variaciones en sus propiedades físicas, químicas, mecánicas, térmicas y de hinchamiento, en comparación con hidrogeles no funcionalizados, atribuibles a modificaciones en la estructura de la red polimérica y en las interacciones entre la matriz de nanocelulosa y los componentes incorporados.

4.Introducción

En la actualidad, la agricultura consume aproximadamente el 69% del agua dulce en todo el mundo, principalmente destinada al riego suplementario de cultivos y la ganadería. La industria energética se ubica en segundo lugar con un 19% del consumo total. En tercer lugar está el sector doméstico, que emplea aproximadamente el 12% (UNESCO, 2024).

La Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO) proyecta que para el año 2050 será necesario aumentar la producción de alimentos en un 60%, de los cuales un 50% corresponderá a cultivos que requieren riego suplementario (Calicioglu, et al., 2019). Sin embargo, la FAO pronostica que la disponibilidad de agua destinada a la agricultura solo podría aumentar en un 10%.

Colombia en la actualidad enfrenta desafíos en el manejo eficiente del agua para usos agrícolas, principalmente por la dependencia del agua lluvia, el uso ineficiente de tecnologías y políticas públicas que aseguren la disponibilidad del agua a largo plazo (Góngora, et al., 2025). Para el año 2022, la demanda nacional de agua fue de 43,25 % en actividades agrícolas; el porcentaje restante se utilizó para la generación de energía hidroeléctrica, consumo doméstico, industria y ganadería (Ordóñez, 2020).

La importancia actual relacionada con la conservación y uso eficiente del agua en la agricultura ha motivado una mayor investigación en alternativas sostenibles de riego (UNESCO, 2024). Algunas de estas alternativas incluyen el riego por goteo, que consiste en aplicar agua directamente a las raíces de las plantas a través de goteros o emisores que liberan una cantidad precisa de agua para un óptimo crecimiento de las plantas (Arenas y Bautista 2012). Otra opción es el tratamiento de aguas residuales, que implica la eliminación de contaminantes y la reducción de la carga orgánica y bacteriana a través de procesos como filtración, sedimentación, desinfección y eliminación de nutrientes (Arenas y Bautista 2012). También existe el riego inteligente, que emplea tecnología de automatización y sensores para optimizar el uso del agua al recopilar datos sobre las condiciones del suelo, clima, humedad superficial y otros factores relevantes, y luego determina la cantidad adecuada de agua para cada área del campo (Gimpel, et al., 2021), entre otras metodologías.

En este contexto, los hidrogeles surgen como una alternativa sostenible para la agricultura de riego. Los hidrogeles están formados por cadenas de polímeros que se unen entre sí por

enlaces químicos o físicos en una red tridimensional; tienen la capacidad de absorber hasta el 99,9% de su peso en agua, aumentando su volumen sin perder su forma. El agua se une a las cadenas de polímero por medio de fuerzas de atracción intermoleculares. Los hidrogeles tienen una gran variedad de propiedades y aplicaciones. Pueden utilizarse en campos como la medicina, la agricultura, la industria y la ciencia de los materiales (Ramirez, et al., 2016).

En cuanto a la agricultura, los hidrogeles base acrílica se han utilizado como materiales absorbentes para retener agua y nutrientes en el suelo, reduciendo la frecuencia de riego y mejorando la fertilización. Sin embargo, dentro de las desventajas se encuentra su baja resistencia mecánica debido a la presión que ejercen la planta y la capa de suelo sobre el hidrogel. La adición de fibras de celulosa a escala nanométrica es una alternativa viable para mejorar esta limitación. Adicionalmente, la nanocelulosa es un material biodegradable y renovable. La combinación de hidrogeles y nanocelulosa puede mejorar aún más la capacidad de retención de agua y nutrientes del suelo, debido a la presencia de los grupos funcionales presentes en las cadenas de celulosa, principalmente grupos hidroxilo (-OH), (Zhang, et al., 2023).

Los hidrogeles pueden ser utilizados en diferentes formas, como gránulos, polvo o láminas, y aplicarse directamente al suelo o mezclarse con otros materiales, como fertilizantes o sustratos para plantas. Además de mejorar la eficiencia del riego, los hidrogeles también pueden beneficiar la calidad del suelo y reducir la erosión (Cock & Guancha, 2017). Sin embargo, debido a la degradación del suelo, la tendencia actual se orienta hacia la utilización de hidrogeles como matrices para la inmovilización de microorganismos y la incorporación de metabolitos específicos y fertilizantes con el objetivo de mejorar la liberación controlada de agua y nutrientes e incrementar la actividad biológica del suelo (Hernández, 2007).

En la presente investigación se sintetizaron hidrogeles reforzados con nanocelulosa, y se incorporaron de forma separada bacterias ácido lácticas (*Lactobacillus plantarum* (IBUN-090-03774), *Weisella cibaria* (IBUN-090-03684), *Lactiplantibacillus plantarum* (IBUN-090-03774) y sus metabolitos, además de un fertilizante comercial. Estas bacterias han arrojado resultados positivos en investigaciones previas en el ámbito agrícola. Asimismo, se evaluará la integración de un fertilizante comercial NPK para mejorar las propiedades físicas, fisicoquímicas y funcionales de los hidrogeles, validándolos a través de pruebas tecno

funcionales (Jaini et al., 2022).

Finalmente, se determinaron pruebas tecno-funcionales, como la capacidad y cinética de hinchamiento, resistencia máxima a la compresión, análisis infrarrojo (FTIR), análisis termo gravimétrico (TGA), microscopía SEM, para determinar la morfología y la viabilidad de los hidrogeles incorporados con (BAL).

4. Justificación

En la agricultura, el agua desempeña un papel fundamental en la producción de alimentos, siendo un pilar crucial para garantizar la seguridad alimentaria. En vista de las actuales tendencias que señalan el crecimiento constante de la población mundial; existe una imperante necesidad de aumentar la producción de alimentos, principalmente a cargo de la industria agrícola. Sin embargo, esta depende en gran medida de su capacidad para gestionar eficazmente los recursos hídricos disponibles (Faraj, et al., 2020).

La creciente escasez de agua dulce en numerosas regiones del mundo se ha convertido en un tema de discusión crítico y esencial desde la perspectiva de la supervivencia de la sociedad. La agricultura de regadío, que ocupa aproximadamente el 20% de las tierras cultivadas y genera el 40% de la producción mundial de alimentos, desempeña un papel esencial en esta lucha. Se ha comprobado que la agricultura de regadío es cerca de dos veces más productiva que la agricultura de secano (Cheng, et al., 2021).

Dado el aumento constante de la población mundial y el hecho de que el recurso hídrico se utiliza en diversas industrias, se anticipa una mayor competencia por su uso en los próximos años (Vörösmarty, et al., 2010). Para el año 2050, se proyecta que la población global alcance los 10 mil millones de personas, y se estima que la producción agrícola deberá expandirse en un 70% para poder satisfacer las demandas (World Bank. 2024).

La agricultura de regadío es uno de los pilares fundamentales en la producción de alimentos a nivel mundial, lo que subraya la necesidad de explorar alternativas sostenibles para mejorar su eficiencia. Entre estas alternativas se incluyen métodos como el riego por goteo, el tratamiento de aguas residuales para fines agrícolas y el riego inteligente. Los hidrogeles se presentan como una opción sostenible, ya que son polímeros con la capacidad de absorber y liberar paulatinamente grandes cantidades de agua y nutrientes. Esto, a su vez, mejora el crecimiento vegetal y la producción agrícola (Cock & Guancha, 2017).

Un hidrogel es un material que se forma por la reacción polimérica de dos o más sustancias, las cuales se unen entre sí para formar una red tridimensional. Esta red tiene la capacidad de

Justificación

absorber grandes cantidades de agua y aumentar su tamaño, sin perder su forma original (Ramirez, et al., 2016). En la agricultura, los hidrogeles son utilizados para mejorar la capacidad de retención de agua y dar nutrientes al suelo, en especial en zonas áridas o con poca agua. Por su parte, los hidrogeles han demostrado disminuir la cantidad de agua usada en el riego además de favorecer el crecimiento de las raíces (Madramootoo, et al., 2023). En consecuencia, estos polímeros pueden ser utilizados en diferentes formas, como gránulos, polvo o láminas, y aplicarse directamente al suelo o mezclarse con otros materiales, como fertilizantes o sustratos para plantas. Asimismo, mejora la eficiencia del riego, también beneficia la calidad del suelo y reduce la erosión (Cock & Guancha, 2017).

En la “Convocatoria nacional para el fomento de alianzas estratégicas interdisciplinarias que articulen los procesos misionales de la Universidad Nacional de Colombia 2022-2024” fue aprobado para su financiación el proyecto titulado “Alianza estratégica para aumentar el nivel de madurez tecnológica de hidrogeles reforzados con nanofibras de celulosa para uso agrícola”. Cuyo objetivo contribuirá a mejorar la madurez tecnológica de un activo del conocimiento de la Universidad Nacional de Colombia, que incluye un proceso para obtener nanofibras de cutículas de plantas suculentas, un proceso para fabricar hidrogeles con estas nanofibras y un hidrogel terminado. El proyecto evalúa el efecto de la incorporación de fertilizantes y microorganismos en hidrogeles reforzados con fibra de nanocelulosa, y en otra etapa, su desempeño en sustrato tanto en laboratorio como en campo. El proyecto se alinea con los Objetivos de Desarrollo Sostenible 2 y 6, ya que tiene el potencial de reducir el consumo de agua y mejorar la eficiencia en el uso del agua para la agricultura (Agut, 2015). El presente proyecto de investigación se enmarca en el primer objetivo específico del proyecto mencionado y considera la evaluación de los efectos de la incorporación de bacterias ácido lácticas, metabolitos microbianos y fertilizantes de hidrogeles reforzados con nanocelulosa de residuos de cutícula de *Aloe vera* sobre sus propiedades físicas, químicas y funcionales para aplicaciones agrícolas. Cabe resaltar que, tras una exhaustiva búsqueda bibliográfica en bases de datos científicas reconocidas (Scopus, Web of Science, ScienceDirect, SpringerLink, entre otras), no se encontraron reportes relacionados con la incorporación de bacterias ácido lácticas ni de sus metabolitos en hidrogeles destinados a aplicaciones agrícolas. Esto evidencia la originalidad y novedad del presente estudio, que

Justificación

propone integrar el potencial biotecnológico de estos microorganismos y sus compuestos con el desempeño funcional de los hidrogeles, generando una alternativa innovadora y sostenible para enfrentar los desafíos de la agricultura actual.

5. Planteamiento del problema

La industria agrícola es la que más consume agua dulce en el mundo, empleando cerca del 69% de los recursos disponibles, especialmente en riego y ganadería (UNESCO, 2024). No obstante, para el año 2050 será necesario aumentar en un 60% la producción de alimentos; sin embargo, la disponibilidad de agua para riego solo podrá crecer un 10% (Calicioglu et al., 2019). Esta situación demanda tecnologías que mejoren la eficiencia en el uso del agua y de los insumos agrícolas.

Asimismo, el uso intensivo de fertilizantes químicos ha permitido incrementar el rendimiento de los cultivos, pero también enfrenta pérdidas significativas por lixiviación, volatilización y desnitrificación, además de los impactos ambientales negativos al tener compuestos que pueden afectar la salud de los suelos (Cisneros & Nonones Vásquez, 2024). Por otra parte, las bacterias ácido lácticas (BAL) y sus metabolitos se perfilan como agentes bioactivos capaces de promover el crecimiento vegetal, mejorar la salud del suelo y aumentar la resistencia de los cultivos frente a enfermedades. Sin embargo, su aplicación directa presenta limitaciones, pues son altamente sensibles a factores ambientales como cambios de pH, temperatura, competencia microbiana y estrés hídrico, lo que reduce su viabilidad y efectividad (Raman, et al., 2022)

En este contexto, los hidrogeles reforzados con nanocelulosa representan una alternativa prometedora, dado que mejoran la retención de agua en el suelo y permiten la liberación controlada de nutrientes (Guanha et al., 2017; Barón & Peña, 2018). Si bien existen estudios sobre hidrogeles cargados con fertilizantes para aplicaciones agrícolas, la literatura científica reporta de manera limitada la incorporación de microorganismos y sus metabolitos en este tipo de matrices poliméricas.

Por lo tanto, el problema central radica en el desconocimiento de cómo la incorporación individual de microorganismos, metabolitos y diferentes concentraciones de fertilizantes influye en las propiedades físicas, mecánicas y químicas de los hidrogeles reforzados con nanocelulosa, aspecto clave para evaluar su desempeño y viabilidad como sistemas

funcionales para aplicaciones agrícolas sostenibles.

Antecedentes

El uso de hidrogeles en la agricultura ha despertado gran interés debido a su capacidad para mejorar la eficiencia en el uso de agua y nutrientes, actuando como sistemas de liberación controlada. En particular, la incorporación de fertilizantes en matrices poliméricas ha sido ampliamente estudiada, con resultados que evidencian mejoras en la retención de nutrientes y reducciones significativas en pérdidas por lixiviación (Ghobashy, et al., 2024).

Un ejemplo es el estudio de Mansouri y colaboradores, quienes desarrollaron un hidrogel superabsorbente a base de ácido acrílico, almidón y zeolita, diseñado específicamente para la encapsulación de urea. Para su evaluación, midieron la capacidad de absorción de agua, la tasa de degradación y la liberación controlada de nitrógeno en condiciones de laboratorio. El hidrogel alcanzó una capacidad de hinchamiento de hasta 680 g de agua por gramo de hidrogel seco y liberó el 70% del fertilizante en un lapso de 15 días. En comparación con la urea sin encapsular, este sistema redujo de manera significativa las pérdidas por lixiviación, demostrando su potencial como portador de fertilizantes de liberación lenta (Mansouri et al., (2023).

De manera complementaria, Das y colaboradores diseñaron un hidrogel de alginato combinado con nanopartículas de sílice funcionalizadas, con el objetivo de mejorar la retención y disponibilidad de fósforo en el suelo. En sus ensayos, encapsularon fosfato en la matriz polimérica y evaluaron tanto la cinética de liberación como los efectos en plantas de maíz en fase de plántula. Los resultados mostraron que el sistema liberó fósforo de manera sostenida durante tres semanas, redujo en un 40% la lixiviación del nutriente y, en condiciones de cultivo, incrementó en un 25% la biomasa de las plántulas respecto al tratamiento con fertilización convencional (Das et al., 2022).

Por otra parte, el interés en tecnologías sostenibles ha resaltado el potencial de los microorganismos y sus metabolitos en la agricultura. En particular, las bacterias ácido

Antecedentes

lácticas (BAL) quienes actúan como bioestimulantes al promover el crecimiento vegetal, mejorar la disponibilidad de nutrientes y reforzar la resistencia de las plantas frente a condiciones de estrés. Hamid y colaboradores (2021) evaluaron cepas de *Lactobacillus plantarum* y *Lactobacillus brevis* en condiciones de estrés salino, observando que su aplicación incrementó el desarrollo radicular y estimuló mecanismos antioxidantes en las plantas, lo que permitió mejorar la tolerancia al estrés abiótico (Hamid et al., 2021).

Asimismo, Perez y colaboradores (2018) exploraron la encapsulación de *Lactobacillus casei* en perlas de alginato cálcico recubiertas con quitosano y almidón, con el fin de proteger la viabilidad de las bacterias y prolongar su actividad en el suelo. En ensayos de liberación, demostraron que los microorganismos permanecieron activos durante más tiempo y que su aplicación mejoró en un 22% la capacidad de retención de humedad del sustrato, además de aumentar en un 15% la tasa de germinación de semillas respecto al control (Perez et al., 2018).

Adicionalmente, diversos estudios han documentado el efecto antagónico de las BAL contra patógenos vegetales. Guimarães y colaboradores evaluaron metabolitos producidos por *L. plantarum* y encontraron que podían inhibir hasta en un 91% la producción de aflatoxinas por *Aspergillus flavus*. Este efecto se atribuyó a la acción de ácidos orgánicos como el feniláctico y el indol-láctico, conocidos por su actividad antimicrobiana (Guimarães et al., 2018). Otro estudio relevante es el de Jaffar y colaboradores (2023), quienes destacaron que *L. plantarum* no solo actúa como agente de biocontrol, sino también como biofertilizante, al demostrar su capacidad de solubilizar fósforo, fijar nitrógeno y producir fitohormonas que favorecen el desarrollo vegetal (Jaffar et al., 2023). De manera similar, Jaini y colaboradores investigaron el efecto de *Weissella cibaria* en condiciones de invernadero, observando que inhibió de manera efectiva el crecimiento de *Fusarium oxysporum* y promovió el crecimiento de plantas de papaya, mostrando un doble efecto de bioprotección y bioestimulación (Jaini et al., 2022).

En conjunto, la literatura revisada evidencia que tanto los hidrogeles con fertilizantes como

Antecedentes

las BAL y sus metabolitos pueden aportar significativamente a la sostenibilidad agrícola, ya sea mejorando la eficiencia en el uso de nutrientes o actuando como promotores del crecimiento vegetal y agentes de biocontrol. Sin embargo, a partir de la búsqueda bibliográfica realizada para este trabajo, se identificó que, aunque existen avances en el desarrollo de hidrogeles para la liberación controlada de fertilizantes y en el uso de BAL en suelos, no se han reportado estudios que evalúen la incorporación simultánea de BAL o sus metabolitos en matrices de hidrogeles para aplicaciones agrícolas. A continuación, en la tabla 1, se presentan los resultados relevantes de los antecedentes.

Tabla 2. Resultados relevantes reportados en los antecedentes de hidrogeles agrícolas y BAL

Autor	Hinchamiento	Liberación controlada	Propiedades del suelo	Viabilidad microbiana	Efecto agronómico
Mansouri et al., 2023	635–1156 g/g; hasta 27838% (pH 8)	16–96% (1–30 días)	—	—	↑ germinación, ↑ biomasa, ↓ estrés hídrico
Das et al., 2022	37–86 mL/g	36–90% (agua y suelo, 45 días)	↑ retención agua (57–67%); ↑ porosidad	—	Mejora estructura del suelo
Pérez et al., 2018	Incremento tras esterilización	Liberación prolongada (28 días)	—	10 ⁹ –10 ⁷ CFU/g (12 meses)	Potencial biofertilizante
Hamid et al., 2021	—	—	—	—	↑ tolerancia a estrés; ↑ crecimiento radicular
Jaffar et al., 2023	—	Solubilización P y fijación N	↑ retención humedad (Bokashi)	—	Biofertilización y control patógenos
Jaini et al., 2022	—	—	—	—	Solubilización fosfato; actividad antifúngica

6. Marco teórico

Los hidrogeles se caracterizan por ser polímeros superabsorbentes capaces de hincharse y retener grandes volúmenes de agua o soluciones acuosas. Esta propiedad les ha otorgado múltiples aplicaciones en el desarrollo de nuevos materiales. En la agricultura, su uso resulta especialmente atractivo debido a que mejoran la retención de agua en los suelos y facilitan el suministro hídrico a las plantas, lo que se traduce en una mayor calidad del suelo y un mejor crecimiento vegetal (Akhter et al., 2004).

6.1 Hidrogeles en la agricultura

Desde inicios de la década del 2000, diversos estudios han explorado a los hidrogeles como vehículos para la liberación controlada de nutrientes. Karadağ y colaboradores (2000) incorporaron en hidrogeles sales inorgánicas como nitrato de amonio, nitrato de potasio y sulfato de amonio, todos ellos utilizados como fertilizantes convencionales. Los autores demostraron que, gracias a su naturaleza superabsorbente, los hidrogeles pueden retener tanto agua como nutrientes y liberarlos gradualmente en el suelo, favoreciendo así un suministro más eficiente para el crecimiento óptimo de las plantas (Karadağ et al., 2000).

En la misma línea, Pedroza y colaboradores evaluaron el efecto de diferentes tipos y concentraciones de hidrogeles añadidos a suelos arenosos, con el propósito de determinar su influencia en el crecimiento vegetativo y en el tiempo de marchitez de plantas de maíz. Sus resultados mostraron incrementos significativos en la altura promedio de las plantas, el ancho foliar y el peso seco, además de una mejora en la producción de mazorcas. Los autores concluyeron que la adición de hidrogeles al suelo incrementa la capacidad de retención de humedad y prolonga la disponibilidad de agua, lo que retrasa la marchitez y favorece el rendimiento agrícola (Pedroza et al., 2017).

De manera complementaria, El-Rehim y colaboradores estudiaron el desempeño de hidrogeles en suelos de textura ligera, donde la pérdida de agua suele ser más marcada. Sus

ensayos demostraron que estos materiales pueden absorber y retener agua hasta mil veces su propio peso, reduciendo así la frecuencia de riego requerida. Los autores resaltaron que esta propiedad no solo mejora la eficiencia en el uso del agua, sino que también contribuye a mantener la humedad en la matriz del suelo durante periodos prolongados, lo que aporta en un mejor crecimiento y rendimiento de las plantas cultivadas (El- Rehim et al., 2004).

6.2 Diferentes sistemas de riego en la agricultura

La agricultura de riego constituye el principal sistema de producción agrícola en regiones con escasez de lluvias, además de ser una práctica empleada para aumentar la productividad de los cultivos. Esta técnica, utilizada desde la antigüedad, ha permitido el establecimiento de sistemas de cultivo en zonas áridas y semiáridas mediante la aplicación de agua por canales, tuberías, aspersores o goteros, ya sea de forma manual o automatizada (Howell et al., 2001).

Los sistemas de riego más comunes incluyen el riego por aspersión, el riego por goteo y el riego por gravedad. El riego por aspersión consiste en aplicar agua a los cultivos mediante chorros que simulan la lluvia, a través de tuberías conectadas a aspersores que utilizan presión para distribuir el agua de manera uniforme (González et al., 2012).

El riego por goteo aplica agua de manera localizada, gota a gota, mediante tuberías y emisores diseñados para liberar el recurso de forma gradual y controlada. Una ventaja de este sistema es la existencia de goteros autocompensantes, que mantienen un caudal constante independientemente de la presión del agua (Arenas et al., 2012).

Por su parte, el riego por gravedad utiliza la pendiente natural del terreno para distribuir el agua desde un punto elevado hacia los cultivos a través de canales, surcos o acequias. Este método resulta especialmente útil en zonas con recursos limitados de energía eléctrica, pues aprovecha la fuerza de la gravedad para conducir el agua y facilitar su infiltración en el suelo agrícola (Rivera & Gallo, 2018).

6.3 Pruebas de caracterización para los hidrogeles

Con el fin de conocer las propiedades físicas, fisicoquímicas y tecno funcionales de los hidrogeles que se elaboraron, se realizan pruebas de caracterización. En este sentido, se ejecuta a los hidrogeles análisis de capacidad y cinética de hinchamiento, resistencia máxima a la compresión, módulo elástico, análisis infrarrojo, análisis Termo Gravimétrico (TGA), Microscopía Electrónica de Barrido (SEM). Ahora bien, en la Tabla 1 se presenta un cuadro comparativo que resume las diferentes tecnologías y sus aplicaciones en la caracterización de los hidrogeles.

Cabe aclarar que, Las propiedades físicas son el comportamiento mecánico y estructural del material sin considerar su composición química; en torno a las propiedades fisicoquímicas, se entiende que es la combinación de aspectos físicos y químicos del material, los cuales evalúan la estructura y las interacciones moleculares, al igual que la manera en que estas afectan su estabilidad o comportamiento frente a estímulos externos como temperatura, reacciones químicas, tensión o compresión, radiación entre otros (Cengel, et al., 2011).

Conviene mencionar que, los hidrogeles tienen diferentes respuestas a distintos estímulos ambientales, ya que se pueden clasificar como, físicos (temperatura, luz, elasticidad, compresión etc.), químicos (pH y fuerza iónica), y biológicos (enzimas) (Bashir, et al., 2020). De este modo, los estímulos químicos y biológicos son internos, mientras que los estímulos físicos son externos, excepto la temperatura, que puede ser externa o interna.

En cuanto a las propiedades funcionales, se comprende que son el rendimiento del material en su aplicación final para determinar si cumple con la función para la que fue diseñado. Estas propiedades dependen de su comportamiento en un contexto específico, en este contexto, los hidrogeles serán usados para la aplicación en suelos agrícolas, puesto que su principal función es la retención de agua en largos periodos de tiempo; de esta manera dicha

propiedad determina la capacidad de mantener la humedad en la zona radicular durante períodos secos (Monar, 2024).

6.3.1 Prueba de capacidad y cinética de hinchamiento

Las pruebas de capacidad y cinética de hinchamiento, la cinética de hinchamiento se refiere a la velocidad a la que el hidrogel absorbe agua y aumenta su tamaño (González, et al., 2012). La prueba se realiza al sumergir el hidrogel en un líquido, generalmente agua, para medir el cambio en su tamaño a lo largo del tiempo.

6.3.2 Resistencia máxima a la compresión

La resistencia máxima a la compresión se hace para determinar la resistencia máxima de soportar esfuerzos de compresión sin deformarse ni romperse. A Esta práctica se aplica una carga axial gradual sobre una muestra de hidrogel hasta que se produce la fractura (Beltrán, et al., 2011).

6.3.3 Módulo elástico

Módulo elástico es un método usado para evaluar la capacidad que tienen los hidrogeles en deformarse y recuperar su forma original al ser sometidos a una fuerza, ya que es una medida de la rigidez del material y se calcula como el cociente entre el esfuerzo y la deformación (Barón, et al., 2007).

6.3.4 Análisis infrarrojo (FTIR)

El análisis infrarrojo es una técnica analítica usada para identificar y determinar los componentes químicos del hidrogel, en esta se mide la absorción por parte de los grupos

funcionales presentes en la muestra. Cada grupo funcional tiene una firma espectral única que se puede utilizar para identificarlo y cuantificarlo (Ghobashy, et al., 2023).

6.3.5 Análisis Termo Gravimétrico (TGA)

El análisis Termo Gravimétrico (TGA) consiste en medir la variación de la masa de una muestra de hidrogel al someterla a un cambio controlado de temperatura o a una temperatura constante. Esta prueba permite determinar la estabilidad térmica, el contenido de humedad, la composición y el grado de entrecruzamiento de los hidrogeles (Lan, et al., 2023).

6.3.6 Microscopía Electrónica de Barrido (SEM)

La Microscopía Electrónica de Barrido (SEM) es una técnica que permite observar la superficie y la morfología de los hidrogeles con una alta resolución y amplificación. Consiste en barrer la muestra con un haz de electrones que interactúan con los átomos del material, generando señales que se pueden captar y procesar para formar una imagen bidimensional (Qureshi, et al., 2020).

A continuación, en la tabla 1, se presenta un resumen de las pruebas de caracterización de hidrogeles.

Tabla 3. Cuadro comparativo de técnicas de caracterización de hidrogeles (Elaboración propia).

Técnica	Propósito	Procedimiento	Parámetros medidos	Fuente
Capacidad y cinética de hinchamiento	Medir absorción y expansión de agua	Sumergir hidrogel en líquido	Capacidad de absorción y cinética de hinchamiento	(González, et al., 2012)
Resistencia máxima a la compresión	Evaluar resistencia a la compresión	Aplicar carga axial gradual	Resistencia a la compresión	(Beltrán, et al., 2011)

Módulo elástico	Medir rigidez y recuperación de forma	Aplicar fuerza y medir deformación	Esfuerzo, deformación	(Barón, et al., 2007)
Análisis infrarrojo (IR)	Identificar componentes químicos	Medir absorción de grupos funcionales	Firmas espectrales de grupos funcionales	(Ghobashy, et al., 2023)

Análisis Termogravimétrico (TGA)	Evaluar estabilidad térmica	Calentar muestra y medir variación de masa	Estabilidad térmica, contenido de humedad	(Lan, et al., 2023).
Microscopía Electrónica de Barrido (SEM)	Observar superficie y morfología	Barrer muestra con haz de electrones	Imágenes bidimensionales de superficie	(Qureshi, et al., 2020)

7. Metodología

La metodología propuesta se estructura con el fin de dar respuesta a los objetivos planteados en esta investigación, orientada a la obtención y caracterización de hidrogeles reforzados con nanocelulosa y enriquecidos con fertilizantes, metabolitos y bacterias ácido lácticas (BAL) para su aplicación en sistemas agrícolas sostenibles. Se planteó un diseño experimental que permite evaluar de manera controlada la influencia de los factores seleccionados sobre variables de respuesta físicas y funcionales (capacidad de hinchamiento, retención de agua y resistencia a la compresión), químicas (FTIR y DSC) y estructural (SEM). Posteriormente, se describe el procedimiento de obtención de la nanocelulosa a partir de la cutícula de sábila y su caracterización, seguido de la síntesis de los hidrogeles base y su enriquecimiento con fertilizantes y metabolitos microbianos. Finalmente, se desarrolla la incorporación de BAL en la matriz polimérica y la evaluación de su viabilidad en el tiempo. Este conjunto de etapas metodológicas integra técnicas de síntesis, caracterización y análisis estadístico, que en conjunto permiten establecer el potencial de los materiales diseñados como sistemas inteligentes para mejorar la retención de agua, la liberación controlada de nutrientes y la funcionalidad biológica en suelos agrícolas. A continuación se presenta en la figura 1, un esquema sobre el desarrollo de la metodología.

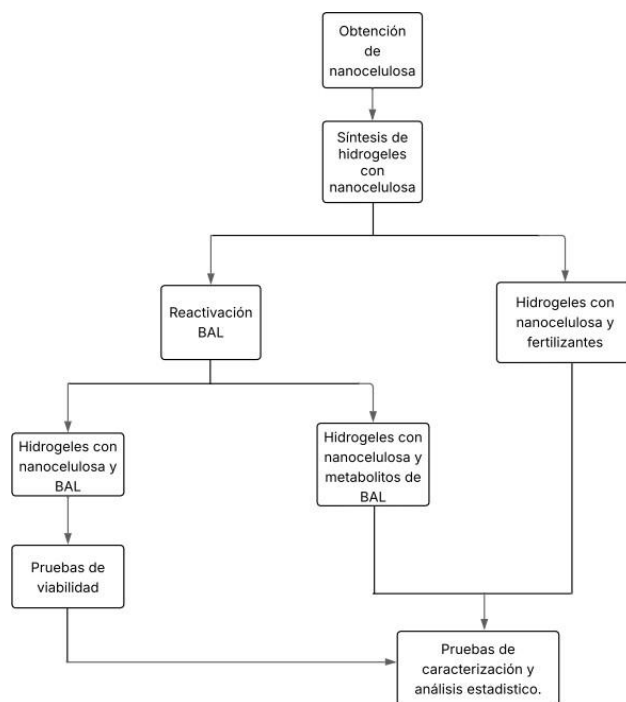


Figura 1. Esquema de la metodología (Elaboración propia).

El diseño experimental y análisis estadístico para el logro de los objetivos considera tres diseños unifactoriales completamente al azar. La Tabla 2 muestra los factores, los niveles, las variables respuesta y las pruebas de caracterización para los ensayos que se realizan.

Cada factor tiene tres niveles los cuales corresponden a tres especies de BAL, los metabolitos de las BAL y tres concentraciones diferentes de fertilizantes. A cada factor se le aplican análisis los cuales corresponden a las variables de respuesta propuestas.

Tabla 4. Diseño experimental

Factores	Niveles	Variables de respuesta
Especie de BAL	Hidrogel con <i>Lactobacillus plantarum</i> IBUN-090-03774	<ul style="list-style-type: none"> • Viabilidad de las bacterias (UFC/ml) • Capacidad de hinchamiento y cinética de hinchamiento (gAgua/gHidrogel) • Capacidad de retención de agua (%) • Fuerza máxima de compresión y módulo de elasticidad (Mpa)
	Hidrogel con <i>Weissella cibaria</i> IBUN-090-03684	
	Hidrogel con <i>Lactobacillus plantarum</i> IBUN-041-39	
Metabolitos de las BAL	Hidrogel con metabolito de <i>Lactobacillus plantarum</i>	<ul style="list-style-type: none"> • Capacidad de hinchamiento y cinética de hinchamiento (gAgua/gHidrogel) • Capacidad de retención de agua (%) • Fuerza máxima de compresión y módulo de elasticidad (Mpa)
	Hidrogel con metabolito de <i>Weissella cibaria</i>	
	Hidrogel con metabolito de <i>Lactobacillus plantarum</i>	
Fertilizante	Fertilizante 5% en peso del hidrogel	<ul style="list-style-type: none"> • Capacidad de hinchamiento y cinética de hinchamiento (gAgua/gHidrogel) • Capacidad de retención de agua (%) • Fuerza máxima de compresión y módulo de elasticidad (Mpa)
	Fertilizante 10% en peso del hidrogel	
	Fertilizante 15% en peso del hidrogel	

Los experimentos se hacen por triplicado y los análisis se repiten dos veces ($n = 2 \times 3$). Las variables de respuestas son sometidas al modelo estadístico análisis de varianza (ANOVA). Al presentarse diferencias estadísticas a un nivel de significancia del 5% ($p \leq 0,05$), se realiza el análisis de Tukey para determinar la influencia de los factores seleccionados.

7.1 Metodología para el objetivo 1.

Obtención de nanocelulosa de cutícula de sábila y caracterización física y química.

La obtención de nanofibras de celulosa se realizó de acuerdo con la metodología propuesta

por Guancha-Chalapud, Serna-Cock & Tirado (2022), para el caso la obtención de nanocelulosa se aplicó una adaptación para mejorar la eficacia del proceso.

7.1.1 Etapa 1. Pretratamiento de la materia prima

Las hojas de *Aloe vera* se recolectaron en una finca del municipio de Tesalia en el departamento del Huila sur occidente Colombiano. Se seleccionaron hojas que visualmente estuvieran en buen estado sanitario. Seguidamente, se lavaron con agua y jabón neutro para eliminar impurezas superficiales. Posteriormente, se sumergieron durante 15 min en una solución de hipoclorito de sodio (NaClO) a una concentración de 200 mg/L. Posteriormente, se procedió a la separación manual del gel de la cutícula. Finalmente, la cutícula se cortó en trozos de aproximadamente 1 cm³ y se llevaron a un horno de convección forzada (BINDER® FD 115) a 60 °C durante 24 h, con el fin de eliminar la humedad residual.

Posteriormente, las muestras se trituraron en un molino eléctrico (IKA® MF 10 basic) provisto de una malla de 38 µm, para obtener una fibra fina y homogénea. Finalmente, las fibras se envasaron al vacío en bolsas de polietileno y se almacenaron en un desecador para evitar la absorción de humedad.

7.1.2 Etapa 2. Obtención de nanofibras de celulosa de *Aloe vera*

La obtención de nanofibras de celulosa a partir de cutícula de sábila se desarrolla a través de un proceso secuencial de pretratamientos químicos y físicos. Inicialmente, la fibra seca se somete a un tratamiento con HCl 0.05 N en una proporción 1:20 (g/mL), a 70 °C durante 2 h, con el fin de eliminar aceites y pectinas presentes. Posteriormente, se ajusta el pH a condiciones básicas mediante un tratamiento con NH₃, seguido de lavados sucesivos con agua destilada hasta alcanzar un pH de 7.0, lo que permite remover trazas de amoníaco y preparar el material para las siguientes etapas.

Con el propósito de romper parcialmente la lignina y solubilizar la hemicelulosa, las fibras

se someten a hidrólisis básica con NaOH al 4% (p/v), en relación 1:25 (g/mL), a 90 °C y 600 rpm durante 4 h. Una vez completado este proceso, se lleva a cabo un blanqueamiento empleando NaClO₂ al 1.7% (p/v) combinado con un tampón de acetato (75 mL de CH₃COOH y 27 g de NaOH por litro), manteniendo la reacción por 6 h a 80 °C y 600 rpm; posteriormente, se duplica la cantidad de solución para completar el blanqueamiento. Las fibras obtenidas se lavan con agua caliente (70 °C) hasta pH neutro para eliminar las trazas de cloro y restos de ácidos. Finalmente, se secan en horno a 50 °C hasta alcanzar peso constante.

Para obtener las nanofibras de celulosa, el material blanqueado se somete a hidrólisis ácida con H₂SO₄ 6.5 M en una proporción 1:25 (g/mL), durante 24 horas a 50 °C y 400 rpm, con el objetivo de fragmentar la celulosa. Finalizada la reacción, la muestra se lava con abundante agua a 70 °C hasta alcanzar pH neutro para eliminar residuos sulfatados. Las fibras obtenidas se secan en horno de convección forzada a 60 °C durante 24 h. A continuación, el material seco se suspendió en agua destilada (1% p/v) y se sometieron a homogeneización mecánica con un ULTRA-TURRAX (IKA T25) a 10,000 rpm durante 15 minutos. La suspensión se trata luego con una sonda de ultrasonido (ULTRASONIC CELL CRUSHER SONIC-250WT-110) a 20 kHz y 550 W por 30 minutos, garantizando la obtención de una dispersión homogénea. Una vez completado este proceso, las nanofibras se secan nuevamente en horno de convección forzada a 60 °C durante 24 h.

Posteriormente, se realiza la caracterización morfológica y química de las nanofibras, siguiendo la metodología de la etapa 6. Para determinar el diámetro de las muestras, se analizaron 5 micrografías SEM representativas mediante un software de procesamiento de imágenes (Image J).

7.2 Metodología objetivo 2

Hidrogeles reforzados con nanocelulosa y adición de metabolitos microbianos y fertilizantes.

7.2.1 Etapa 3. Síntesis de hidrogeles con nanofibras de nanocelulosa de *Aloe vera*

La síntesis de hidrogeles reforzados con nanofibras de celulosa se lleva a cabo en un reactor de vidrio de 2 L con chaqueta térmica, acoplado a un condensador y alimentado con un flujo de nitrógeno para mantener una atmósfera inerte. La temperatura de reacción se regula a 70 °C mediante un baño termostático, mientras que un segundo baño provee agua fría al condensador. La entrada de nitrógeno se controla a través de una trampa y se introduce al reactor mediante una aguja conectada a un tapón de goma.

Previamente, se preparó una suspensión de nanofibras de celulosa al 3% (p/v) en lotes de 500 mL. Cada suspensión se homogeniza con un Ultraturrax durante 10 minutos a 900 rpm y posteriormente se somete con una sonda de ultrasonido por 10 min adicionales, con el fin de lograr una adecuada dispersión y evitar la aglomeración de fibras. Finalmente, se mezcla con 14 g de acrilamida y 22 g de acrilato de potasio.

La suspensión de nanofibras se combina con los monómeros en el reactor cerrado, bajo agitación durante 10 minutos. A continuación, se adiciona 0.3% de $K_2S_2O_8$ como iniciador y 0.085% de N,N-methylenebis(acrylamide) como agente reticulante, en proporciones relativas al peso total de monómeros. La mezcla se mantiene bajo una corriente de nitrógeno de 20 mL/min y se calienta a 70 °C durante 6 horas, permitiendo el desarrollo de la reacción de polimerización.

Finalizada la polimerización, el hidrogel se corta en cubos de entre 30-40 mm de lado y se lava con etanol en una relación 1:2 (g/mL). Posteriormente, se seca en horno de convección forzada a 70 °C hasta peso constante, se muele en un molino de cuchillas con malla de 1 mm y se almacena en bolsas herméticas dentro de un desecador.

Este hidrogel se toma como la muestra patrón para la comparación con los hidrogeles enriquecidos.

7.2.2 Etapa 4. Incorporación de fertilizantes a hidrogeles

Con el fin de obtener hidrogeles enriquecidos en nutrientes, en esta etapa se incorpora una mezcla de nitrógeno, fósforo y potasio (NPK) en proporción (20-30-10), que fue desarrollada en el laboratorio de Bioconversiones de la Universidad Nacional de Colombia, sede Palmira. Para ello, se adicionan 5, 10 y 15% de la mezcla de fertilizante en relación con el peso total de los monómeros. El fertilizante se diluye previamente en agua destilada y se incorpora a la formulación utilizada para la obtención de hidrogeles, antes de la adición del agente reticulante.

Una vez preparada la mezcla, se procede a la reacción de polimerización siguiendo el mismo protocolo descrito en la Etapa 3, lo que asegura la formación de hidrogeles con nanofibras de celulosa, enriquecidos con fertilizantes.

7.2.3 Etapa 5 Reactivación de las cepas microbianas

En la síntesis de hidrogeles con metabolitos microbianos se realiza en primer lugar la reactivación de cada una de las cepas con el propósito de obtener biomasa y metabolitos para su posterior incorporación en la matriz polimérica. Para ello, se diseñan biorreactores automatizados que permiten el control de las condiciones de fermentación. Estos biorreactores están constituidos por un sistema electrónico basado en una placa Arduino Mega, que sensa y regula variables críticas como la temperatura y el pH, y controla el funcionamiento de bombas peristálticas encargadas de la circulación de agua y la dosificación automática de ácido o base. El montaje incluye vasos precipitados de doble pared que permiten mantener la temperatura mediante flujo continuo de agua, así como un sistema de regulación y potencia que garantiza el adecuado funcionamiento de los actuadores mediante transistores TIP41C, resistencias y diodos. El programa implementado en Arduino mantiene la temperatura en 36 °C y el pH en 6, condiciones óptimas para el crecimiento de las bacterias ácido lácticas (BAL).

Las cepas se reactivan en medio MRS (De Man, Rogosa y Sharpe, 1960), preparado de acuerdo con las instrucciones del fabricante y enriquecido con 40 g/L de glucosa. El medio se ajusta a pH controlado y se esteriliza en autoclave a 121 °C durante 15 minutos. La reactivación se lleva a cabo en tres generaciones consecutivas. En la primera, se inoculan dos crioperlas (CRYOINSTANT) en 40 mL de medio MRS enriquecido. En la segunda, se transfiere un 10% v/v del cultivo anterior, y en la tercera, se ajusta el volumen de trabajo según el requerimiento experimental, manteniendo la misma proporción de inoculación, y se transfiere a los biorreactores para su fermentación controlada.

La biomasa activa se recupera en el momento de mayor concentración celular, de acuerdo con la cinética de crecimiento de cada cepa: *Weissella cibaria* (IBUN-090-03684) a las 8 horas, *Lactobacillus plantarum* (IBUN-090-03774) a las 12 horas y *Lactobacillus plantarum* (IBUN-041-39) a las 10 horas. Transcurrido el tiempo de fermentación, se recupera la biomasa por centrifugación a 100 RPM y se almacena en refrigeración para su posterior uso (Rosero et al., 2024).

Por otra parte, los metabolitos se obtienen a partir de un proceso fermentativo extendido, ajustando los tiempos de fermentación para maximizar su concentración: 20 horas para *W. cibaria* (IBUN-090-03684), 18 horas para *L. plantarum* (IBUN-041-39) y 14 horas para *L. plantarum* (IBUN-090-03774). Una vez alcanzados estos tiempos, el caldo se centrifuga a 6000 rpm durante 10 minutos a 4 °C y se filtra con filtros de 0.45 µm. La concentración de ácido láctico se determina por reflectometría con el equipo Reflectoquant Merck RQflex 20, obteniendo así los metabolitos de interés para su incorporación en los hidrogeles. La Tabla 3 resume las condiciones de crecimiento establecidas para cada cepa (Rosero et al., 2024).

Tabla 5. Condiciones de crecimiento para cada cepa.

Nombre de cepa	<i>Lactobacillus plantarum</i>	<i>Lactobacillus plantarum</i>	<i>Weissella cibaria</i>
Código IBUN	IBUN-090-03774	IBUN-041-39	IBUN-090-03684
Medio de cultivo	Man Rogosa y Sharpe (MRS) + 40% de glucosa	Man Rogosa y Sharpe (MRS) + 40% de glucosa	Man Rogosa y Sharpe (MRS) + 40% de glucosa
Temperatura de incubación	36°C	36°C	36°C
Tiempo para recuperar biomasa	12 horas	10 horas	8 horas
Tiempo para recuperar metabolitos	14 horas	8 horas	20 horas
pH	6.0	6.0	6.0
Tipo de Fermentación	Homofermentativa	Homofermentativa	Heterofermentativa
Metabolitos	Ácido láctico C ₃ H ₆ O	Ácido láctico C ₃ H ₆ O ₃	Ácido láctico C ₂ H ₆ O, CO ₂ , etanol C ₂ H ₆ O y ácido acético CH ₃ COOH.

7.2.4 Etapa 6. Incorporación de metabolitos microbianos a hidrogeles

La incorporación de metabolitos microbianos en la formulación de hidrogeles se realiza empleando los compuestos obtenidos a partir de la fermentación controlada de bacterias ácido lácticas (BAL), previamente recuperados según lo descrito en la etapa de reactivación 4. Los metabolitos crudos se adicionan directamente a la mezcla de monómeros en una proporción del 10 % en peso con respecto a la cantidad total de monómeros, asegurando su homogeneización antes de la incorporación del agente entrecruzante. Esta estrategia busca favorecer una adecuada distribución de los metabolitos en la matriz polimérica, lo que contribuye a la funcionalidad del material.

Posteriormente, la síntesis del hidrogel se lleva a cabo siguiendo las mismas condiciones de polimerización establecidas en la etapa de preparación de hidrogeles reforzados con nanocelulosa etapa 3. De esta manera, se obtienen hidrogeles con metabolitos microbianos incorporados en su estructura, lo que posibilita el desarrollo de sistemas con propiedades bioactivas y potencial aplicación en la agricultura sostenible.

7.2.5 Etapa 7. Caracterización física, fisicoquímica y funcional de los hidrogeles

Una vez obtenidos los hidrogeles reforzados con nanocelulosa (control), enriquecidos con fertilizantes, y enriquecidos con metabolitos, se realiza una serie de pruebas de caracterización orientadas a identificar las formulaciones con mejor desempeño físico, fisicoquímico y funcional.

7.2.5.1 Evaluación de las variables de respuesta

7.2.5.2 Cinética de hinchamiento

Se determina la cinética de hinchamiento siguiendo la metodología de (González, et al., 2012). Para ello, se pesan 0,2 g de hidrogel seco sobre un tamiz malla 400 y se sumergen en agua destilada por intervalos de 5, 10, 15, 30, 60, 90, 120, 180, 240, 300 y 360 minutos. Después de cada intervalo, se retira el exceso de agua con papel absorbente (10 s por cada lado) y se registra la masa del material hinchado. La capacidad de hinchamiento se calcula según la Ecuación 1:

$$Q_t = M_t - M_0 \quad \text{Ec.1}$$

- Q_t es la capacidad de hinchamiento en el tiempo t.
- M_t es la masa del polímero en el tiempo t.
- M_0 es la masa del hidrogel seco.

Para determinar la cinética de hinchamiento de la curva Q_t versus el tiempo, se utilizará el

modelo cinético ecuación 2 (Cortés *et al.* 2007).

$$\frac{dQ}{dt} = k * Q_n \quad \text{Ec.2}$$

El hinchamiento en hidrogeles base acrílica tiene un comportamiento de segundo orden, por lo tanto, la ecuación cinética se convierte en la ecuación (3):

$$1/Q = A + Bt \quad \text{Ec.3}$$

- $A=1/k_s Q_{eq}^2$, $B=1/Q_t$, k_s es la constante cinética de hinchamiento,
- Q_{eq} es la máxima capacidad de hinchamiento o hinchamiento en el equilibrio.
- Q_t el hinchamiento en el equilibrio.

7.2.5.3 Capacidad de retención de agua

La capacidad de retención de agua se evalúa según (Laredo, et al., 2023). Se hincha una muestra de hidrogel durante 24 h a temperatura ambiente, se coloca en una caja Petri previamente pesada y se registra su masa inicial. Luego, se seca en estufa de convección por 24 h y se mide su masa seca. El cálculo se realiza con la Ecuación 4:

$$Q_r = \frac{w_f - w_i}{w_f} * 100 \quad \text{Ec. 4}$$

Siendo w_f peso final del hidrogel seco y w_i peso inicial del hidrogel en su máxima hinchazón.

7.2.5.4 Resistencia máxima a la compresión y módulo elástico

La resistencia máxima a la compresión y el módulo elástico se determinan utilizando un texturómetro (Stable Micro Systems TA.XT Plus), disponible en el (Instituto de Biotecnología y Agroindustria) IBA de la Universidad Nacional Sede Manizales, siguiendo la metodología descrita por Aarstad et al. (2017). De acuerdo con lo anterior, los hidrogeles se hinchan previamente hasta alcanzar su máxima capacidad de hinchamiento y luego se cortan con un sacabocados cilíndrico de dimensiones 20×20 mm y un espesor de 0.8mm,

para preparar la muestra.

En torno a la evaluación de la resistencia a la compresión y el módulo elástico, se utiliza una celda de carga de 100 N junto con una placa de compresión circular de 10 cm de diámetro, a una velocidad de deformación de 1 mm/min. Finalmente, los valores se obtienen a partir del promedio de tres réplicas realizadas para cada ensayo.

7.2.5.5 Análisis infrarrojo (FTIR)

Se realiza espectroscopía infrarroja por transformada de Fourier (FTIR) con accesorio ATR de diamante en un espectroscopio Shimadzu. Los espectros se obtienen con resolución de 4 cm^{-1} , en el rango de 4000–400 cm^{-1} . Esta caracterización se realizó a las muestras hidrogel con metabolitos, hidrogel con fertilizantes y nanofibras de celulosa.

7.2.5.6 Análisis de calorimetría diferencial de barrido (DSC)

El análisis térmico se lleva a cabo en un equipo (DSC/TGA 2STAR SYSTEM Mettler Toledo) en el laboratorio de Biotecnología del Tecnoparque SENA, Nodo Cali. Se utilizan crisoles de alúmina con aproximadamente 8 mg de muestra. El ensayo se realiza bajo atmósfera de nitrógeno (20 mL/min), en un rango de temperatura de 0°C a 300 °C, con una velocidad de calentamiento de 10 °C/min.

7.3 Metodología objetivo 3.

Desarrollar la técnica para incorporar BAL en la matriz de hidrogel reforzados con nanocelulosa y evaluar su viabilidad.

7.3.1 Etapa 8. Incorporación de las BAL a los hidrogel con nanocelulosa

La incorporación de bacterias ácido lácticas (BAL) en hidrogel reforzados con nanocelulosa se orienta a desarrollar un sistema funcional capaz de mantener la viabilidad de los microorganismos dentro de la matriz polimérica. Para ello, inicialmente se cuantifica la

concentración de células viables mediante el método de diluciones seriadas decimales y siembra en superficie sobre agar MRS, incubando a 37 °C durante 48 horas en condiciones anaeróbicas. Este procedimiento permite establecer el número de unidades formadoras de colonia (UFC/mL) disponibles para su incorporación en los hidrogeles, garantizando una dosificación controlada de los inóculos.

La síntesis de los hidrogeles se lleva a cabo siguiendo el protocolo previamente establecido, a partir de la mezcla de acrilamida y ácido acrílico como monómeros, persulfato de amonio como iniciador y N,N'-metilenbisacrilamida (MBA) como agente entrecruzante. La reacción de polimerización térmica se desarrolla a 70 °C durante 6 horas, obteniéndose un hidrogel reticulado como base para los procesos de incorporación.

Posteriormente, se implementan diferentes protocolos de incorporación de BAL con el fin de evaluar su viabilidad en el material final. El primer método consiste en la adición directa durante la polimerización, donde se incorpora un 10 % en peso de BAL con respecto al total de monómeros, previo al inicio de la reacción. El segundo método corresponde a la inyección post-polimerización, en el que los hidrogeles ya formados se inoculan mediante una jeringa esterilizada cargada con la suspensión bacteriana, permitiendo la introducción localizada de las células en la red polimérica. El tercer método se basa en la inmersión en agua destilada estéril, colocando el hidrogel junto con el botón de biomasa previamente obtenido, y manteniendo el sistema en reposo durante 24 horas bajo condiciones estériles. Finalmente, el cuarto método repite el procedimiento de inmersión, pero empleando solución salina isotónica estéril como medio de incorporación, con el fin de mantener la homeostasis en el sistema.

7.3.2 Etapa 9. Medición de la viabilidad de las BAL incorporadas en los hidrogeles reforzados con nanocelulosa

Se evalúa la viabilidad semanalmente durante 30 días mediante siembra en placa por superficie. Para ello, se toma 1 g del hidrogel con BAL, se realiza dilución seriada en agua peptonada al 0,1 % p/v (1 mL de muestra en 9 mL de diluyente) y se agita en vórtex (Heidolph). Las placas se incuban a 36 °C durante 48 h. Se considera viable la muestra cuyo conteo se encuentra entre 30 y 300 unidades formadoras de colonia (UFC), y los resultados se expresan en UFC/mL. A continuación, se muestra un resumen de los objetivos 1, 2 y 3 con sus respectivas etapas en la tabla 4 (Rosero et al., 2024).

Tabla 6. Adaptación de la metodología Guancha-Chalapud, Serna-Cock & Tirado (2022) para obtener nanocelulosa.

Original	Adaptación
<p>Etapa 1. Pre-tratamiento de la materia prima <i>Secado de cutícula de sábila</i> Secado por liofilización</p>	<p>Secado por estufa de convección forzada.</p>

<p>Etapa 2. Obtención de nanofibras de celulosa de <i>Aloe vera</i> <i>Lavados para eliminar trazas de amoníaco</i> Al finalizar el proceso la fibra es lavada en una tela con abundante agua.</p> <p>Hidrólisis básica, blanqueamiento, hidrólisis ácida, dispersión de nanofibras Antes de realizar las fases mencionadas, la fibra se seca con el fin de conocer su porcentaje de humedad y poder hacer los cálculos respectivos para cada tratamiento.</p> <p><i>Blanqueamiento</i> Las muestras son tratadas con una solución acuosa de NaClO₂ (1,7% p v⁻¹) y una solución tampón de acetato (75 ml de CH₃COOH L agua⁻¹ + 27 g de NaOH) (relación 1:1). Luego de la reacción lavar con abundante agua.</p>	<p>Se usan filtros de café, debido a que es más fácil de manipular y lavar la fibra en él.</p> <p>Antes de su realización se coloca la fibra en una cámara de infrarrojo para conocer su porcentaje de humedad, esto se hace con el propósito de omitir el paso de secado por estufa de convección forzada y disminuir tiempos.</p> <p>La fibra fue tratada con el doble de solución, debido a que se identificó que la fibra no blanqueaba con el volumen inicial de reacción. Se reconoció que lavar la fibra con agua a temperatura ambiente no retiraba del todo las trazas de cloro; por ende, se optó por lavar la fibra con agua a 70°C. Esto ayudó a que la fibra tuviera un color blanco y no amarillo por trazas de cloro.</p>
---	--

10 Resultados y Discusión

10.1 Obtención de nanofibras de celulosa

A continuación, se presentan los resultados correspondientes al pretratamiento de la materia prima y la obtención de nanofibras de celulosa de *Aloe vera* y su caracterización. De acuerdo con la metodología descrita en las etapas 1- 2 - 3.

La obtención de fibra de cutícula *Aloe vera* presentó un rendimiento del 30% respecto al peso fresco inicial de la muestra.

El proceso de extracción permitió obtener un rendimiento final del 7.84% de nanofibras respecto a la fibra inicial. Tras sucesivas etapas de purificación química. Esta reducción progresiva de masa evidenció la eliminación eficiente de componentes no celulósicos: se conservó el 53.5% tras el tratamiento con HCl y NH₃, el 37.38% después de la hidrólisis alcalina, y solo el 16.13% tras el blanqueamiento. La nanocelulosa obtenida se dispersó

homogéneamente mediante técnicas mecánicas de ultraturax y ultrasonido, resultando en un material con morfología alargada y diámetros nanométricos, según lo evidenciado en la microscopía SEM Figura 2. Aunque en la literatura consultada, no se reporta el rendimiento de la extracción de nanofibras de cáscara de *Aloe vera*. El bajo rendimiento obtenido, se puede atribuir a que el tratamiento de hidrólisis ácida se hace a una alta concentración (6.5M). Probablemente, esto redujo el contenido final de nanofibras de celulosa.

10.1.1 Tamaño de las nanofibras de celulosa de *Aloe vera*

El diámetro promedio de las nanofibras obtenidas en este trabajo fue de $24 \pm 6,8$ nm, como se puede evidenciar en la Figura 3, valor que se encuentra dentro del rango reportado en la literatura para nanocelulosas extraídas de la cutícula de *Aloe vera* mediante métodos químicos secuenciales.

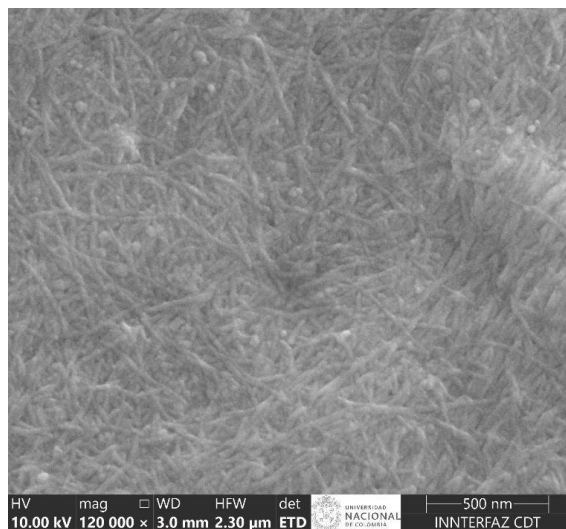


Figura 2. Análisis morfológico de las nanofibras de celulosa.

Aunque no se cuantificó la longitud de las fibras, en las micrografías se observaron estructuras de gran extensión, coherentes con lo descrito por Guancha y colaboradores, quienes reportaron un diámetro promedio de 31 ± 7 nm tras aplicar hidrólisis ácida combinada con ultrasonido, lo que favoreció la fragmentación controlada de las fibrillas. De manera similar, Cheng et al. (2014) obtuvieron nanofibras con diámetros inferiores a 20 nm

mediante un proceso intensivo de defibrilación mecánica con 25 pasadas en molino, alcanzando una separación profunda y eficiente de las fibras. No obstante, en ese mismo estudio también se registraron diámetros entre 20 y 100 nm, lo que sugiere que, de haberse empleado únicamente el tratamiento químico, los tamaños alcanzados hubieran sido comparables a los obtenidos en la presente investigación. En conjunto, estos resultados corroboran que la estrategia aplicada en este estudio es adecuada para la obtención de nanofibras de *Aloe vera* en la escala nanométrica, con características morfológicas similares a las reportadas en investigaciones previas Guancha et al. (2022).

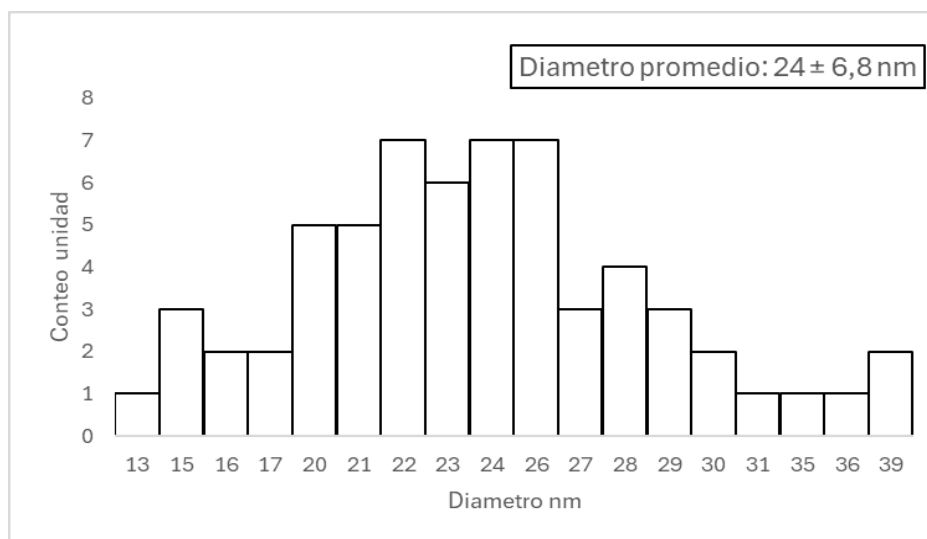


Figura 3. Distribución del diámetro de la nanofibra de celulosa.

10.1.2 Análisis infrarrojo FTIR de nanofibras de celulosa

En la Figura 4 se muestran los espectros FTIR de las muestras que paso por los diferentes tratamientos químicos, fibra nativa, fibra deslignificada, blanquead, hidrolizada y una muestra comercial de nanofibras de celulosa como referencia, donde se evidencian las bandas correspondientes a los grupos funcionales presentes con el objetivo de verificar la remoción de lignina y hemicelulosa.

Se observa una banda alrededor de 1720 cm^{-1} , atribuida a las vibraciones del grupo carbonilo (C=O) asociadas a los grupos éster (-COO- y -OCH₃) de la hemicelulosa, así como al grupo carboxilo (-COOH) presente en la lignina de la fibra nativa. La intensidad de esta señal disminuye tras los tratamientos de deslignificación y blanqueamiento, y desaparece completamente después de la hidrólisis ácida. Este comportamiento confirma la remoción eficiente de dichas fracciones, en concordancia con lo reportado en los protocolos de extracción de nanocelulosa (Habibi, et al., 2013). Adicionalmente, las bandas alrededor de 1609 , 1550 , 1500 y 1400 cm^{-1} , correspondientes a las vibraciones de estiramiento del grupo C=C en los anillos aromáticos de la lignina, mostraron una disminución significativa después de los tratamientos de deslignificación y blanqueamiento, y desaparecieron tras la etapa de hidrólisis ácida. Este comportamiento se atribuye a la eliminación progresiva de la lignina durante el proceso de extracción de fibras de celulosa (Dwivedi, E., & Singh, L. K. 2022). Finalmente, se observa que los espectros de la celulosa obtenida tras el tratamiento de hidrólisis ácida no presentan diferencias significativas con respecto a la celulosa comercial. En ambos casos se identifican las principales bandas alrededor de 3304 cm^{-1} , asociada al estiramiento del grupo hidroxilo (-OH); 2858 cm^{-1} , correspondiente a las vibraciones C-H de las unidades de glucosa; 1208 cm^{-1} , atribuida al grupo C-OH del anillo de glucosa; y 1000 cm^{-1} , relacionada con la vibración C-O-C del enlace β -1,4-glicosídico que une las unidades de D-glucosa en la estructura de la celulosa (Juárez Vidal, et al., 2022).

Resultados similares fueron reportados por Juárez Vidal y colaboradores, quienes encontraron que la reducción de las bandas asociadas a estructuras aromáticas y grupos carbonilo evidencia un proceso de extracción de nanocelulosa eficiente. Por otro lado, Guancha y colaboradores señalan que la presencia marcada de picos correspondientes a las vibraciones β -glucosídicas y C-O-C en las muestras tratadas es un indicador directo de la obtención de nanocelulosa con alta pureza (Juárez Vidal et al., 2022; Guancha et al., 2022). Asimismo, ambos estudios evidencian patrones coincidentes en la disminución de lignina después de tratamientos químicos como hidrólisis básica, blanqueamiento e hidrólisis ácida, los cuales fragmentan parcialmente la estructura de la celulosa y permiten la obtención de nanofibras. Estos hallazgos se corroboran con los resultados presentados en la Figura 3.

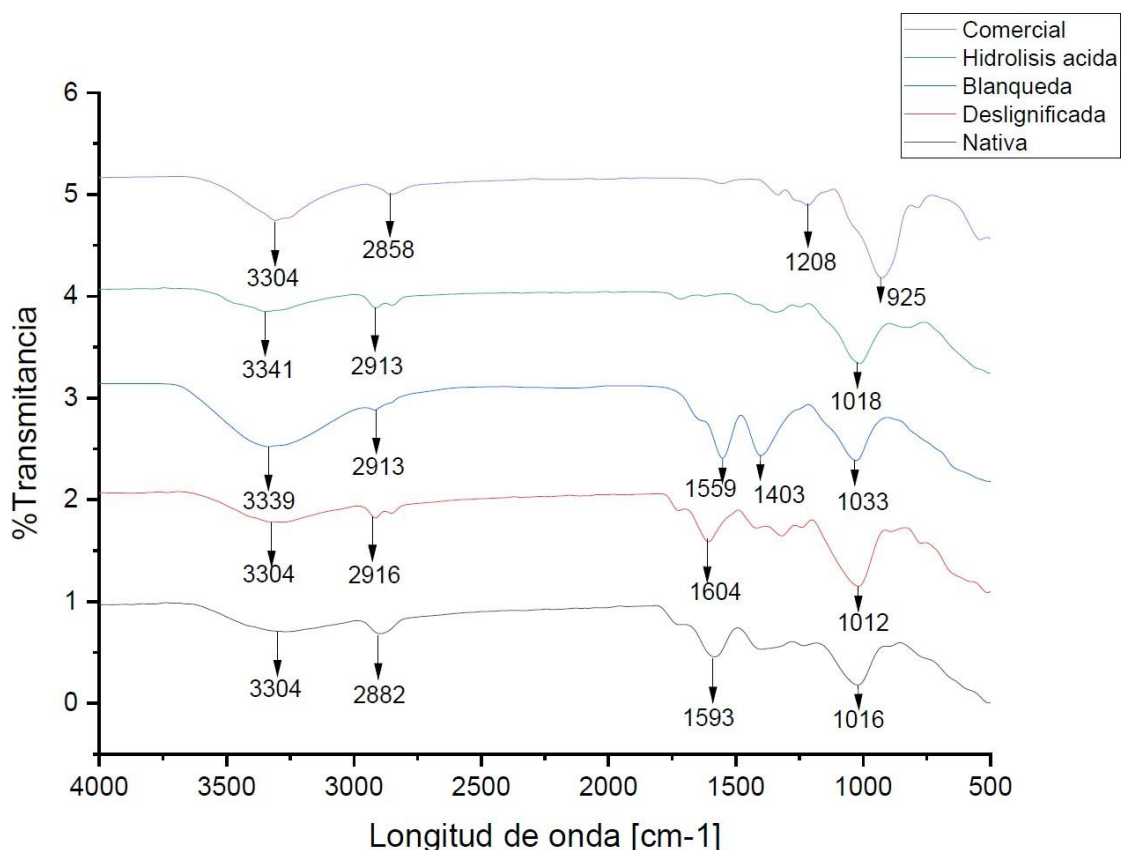


Figura 4. Análisis FTIR nanofibras de celulosa.

10.2. Síntesis de hidrogeles con nanofibra de nanocelulosa de *Aloe vera*

Las nanofibras de celulosa fueron sometidas a tratamientos físicos de ultraturrax y ultrasonido, previo a su incorporación a la formulación de hidrogel, lo cual es fundamental debido a que permite una dispersión homogénea de las nanofibras. En este contexto, resultados aportados por Guancha y colaboradores, identificaron que la dispersión y uniformidad de las nanofibras favorece la integridad estructural y funcional del hidrogel (Guancha, et al, 2022).

Finalmente, debido a que la aplicación de los hidrogeles se propone para suelos agrícolas, es necesario realizar un procesamiento post-síntesis, de trituración y tamizado, ello permitió obtener partículas de tamaño controlado entre 2.36 mm y 500 μm , facilitando su manipulación y potencial aplicación. Este rango es comparable con estudios como el de

Abdallah, A. M. quien identificó que el tamaño de los hidrogeles contribuye a una mejor funcionalidad en el suelo y sistemas de liberación controlada (Abdallah, A. M. 2019). Estos hidrogeles se presentan en la Figura 4. En anexo 1, se evidencia el montaje para la síntesis de hidrogeles.



Figura 5. Apariencia de los hidrogeles con nanocelulosa.

10.3 Incorporación de fertilizantes y metabolitos de las BAL a hidrogeles reforzados con nanocelulosa

Los resultados presentados a continuación corresponden a las etapas 4-7 descritas en la metodología.

10.3.1 Incorporación de fertilizantes

Cada suspensión de fertilizantes fue incorporada a la mezcla de reactivos para los hidrogeles, en esta etapa se obtuvieron 98 g de hidrogel con fertilizante, para las diferentes concentraciones (5%, 10% y 15%) respecto al peso de los monómeros.

10.3.2 Producción y recuperación de metabolitos

El control adecuado de los parámetros de temperatura y pH, para la obtención de la biomasa microbiana de los microorganismos seleccionados, se logró, mediante el control

automatizado de la fermentación. Algunos estudios demuestran que las fermentaciones con monitoreo automatizado presentan mejoras significativas en la producción de biomasa y metabolitos. Esto valida que controlar las principales variables en la fermentación con sistemas electrónicos, mejora el rendimiento de cultivo de BAL en volúmenes controlados (Pontius, et al., 2020).

Los valores de viabilidad cercanos a 10^9 UFC/mL reflejan una alta eficiencia fermentativa en línea con lo documentado por Zhou et al. (2019), quienes destacan el papel crucial del *Lactobacillus plantarum* en producir biomasa de alta calidad y ácido láctico como metabolito mayoritario. La recuperación y conservación posterior a -18 °C cumplen con recomendaciones para mantener la estabilidad bioquímica y funcional de los metabolitos. En trabajos paralelos a la investigación se diseñaron dos biorreactores y su entorno electrónico para el control de las variables de fermentación (temperatura y pH) (anexo 2).

10.3.3 Incorporación de metabolitos a los hidrogeles reforzados con nanocelulosa

Cada cultivo de las BAL empleadas en el estudio, se llevó a la máxima concentración de metabolitos en el tiempo descrito en la tabla 2. Luego de la separación de la biomasa mediante centrifugación el sobrenadante (metabolitos) se incorporan de forma individual en una reacción de polimerización, obteniéndose tres tipos de hidrogel, cada uno formulado con los metabolitos específicos de su respectiva cepa. Finalmente, se obtuvo un peso aproximado de 98 gramos por hidrogel en cada uno de los ensayos.

10.4 Incorporación de las BAL

En las pruebas de fermentación realizadas para obtener la biomasa microbiana a incorporar en los hidrogeles, los recuentos de Unidades Formadoras de Colonia por mililitro, para *Lactobacillus plantarum* (IBUN-090-03774), para *Weissella cibaria* (IBUN-090-03684) y UFC/mL y para *Lactobacillus plantarum* (IBUN-041-39), alcanzaron valores de 10^9 UFC/mL (Figura 6b). La incorporación directa de las BAL en la reacción de polimerización del hidrogel a 70 °C (primera metodología) resultó no ser satisfactoria, ya que la viabilidad

bacteriana no se mantuvo posterior al proceso de polimerización, probablemente por el efecto letal de la temperatura elevada durante el proceso (70 °C), reportes de algunos autores confirman esta sensibilidad térmica de las BAL durante procesos de gelificación que implican altas temperaturas (Karbowski, et al., 2022).

La segunda metodología, de inyección de BAL después de la polimerización, permitió la localización específica de las bacterias en las zonas inyectadas, evidenciando una incorporación localizada pero no homogénea en todo el hidrogel. Esto refleja que la administración posterior a la formación del hidrogel puede limitar la migración bacteriana en la matriz y, por ende, la distribución uniforme (Li, et al., 2025).

Con la tercera metodología, que consistió en la inmersión del hidrogel en agua estéril rica en BAL, se encontró que las bacterias no lograron incorporarse dentro de la matriz del hidrogel, sino que permanecieron en el medio acuoso. Esta situación puede atribuirse a la ausencia de un gradiente osmótico o diferencias de solutos favorables para permitir la migración e incorporación bacteriana en la red polimérica (França, et al., 2022).

Finalmente, la cuarta metodología, basada en la inmersión del hidrogel polimerizado en una solución salina rica en BAL, permitió una incorporación uniforme de las bacterias en toda la matriz del hidrogel. La diferencia en la concentración de solutos (osmolaridad) entre la solución salina y el hidrogel favoreció el ingreso y la distribución homogénea de las BAL en la red polimérica. Este hallazgo coincide con estudios que resaltan el papel de la composición iónica y las condiciones osmóticas en la incorporación eficiente y la viabilidad bacteriana en hidrogeles, ya que estas condiciones promueven un entorno adecuado tanto para la encapsulación como para la liberación controlada de microorganismos (Huang, 2020). Es importante subrayar que no se encontraron antecedentes en la literatura que describen una metodología equivalente a la empleada en este trabajo para la incorporación de BAL en hidrogeles. Los estudios con los que se estableció la comparación corresponden principalmente al ámbito farmacéutico, dado que hasta la fecha no se han reportado

hidrogeles con aplicaciones agrícolas que integren BAL en su formulación.

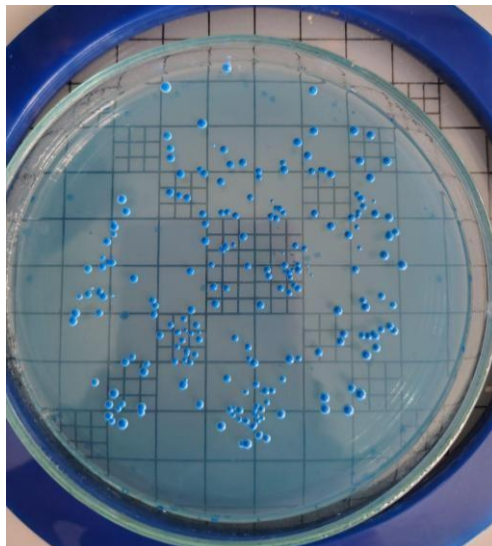


Figura 6. Colonias BAL en medio MRS.

10.5 Caracterización física, fisicoquímica y funcional de los hidrogeles

Los resultados presentados a continuación corresponden a la etapa 8 descrita en la metodología, donde se evalúan parámetros, como cinética de hinchamiento, capacidad de retención de agua, resistencia a la compresión, FTIR, SEM y DSC.

10.5.1 Cinética de hinchamiento

La prueba de cinética de hinchamiento en hidrogeles permite evaluar la velocidad y el mecanismo con que estos materiales absorben agua hasta alcanzar el equilibrio, lo cual es clave para su diseño en aplicaciones agrícolas (Iliasov et al., 2023).

10.5.1.1 Hidrogel con nanocelulosa y fertilizante

Luego de realizar el análisis ANOVA de los resultados obtenidos en los ensayos sobre la capacidad de hinchamiento en los hidrogeles y fertilizante, se encontraron diferencias

significativas, ya que el valor de p fue menor a 0,05. Por ello, se aplicó la prueba de Tukey para establecer las agrupaciones, lo que permitió identificar dos grupos: uno conformado exclusivamente por los hidrogeles con nanocelulosa y otro que reúne a los hidrogeles con nanocelulosa más la incorporación de fertilizantes al (5%, 10% y 15%). Esto indica que la adición de fertilizantes modifica la propiedad de hinchamiento de los hidrogeles, disminuyendo su capacidad a medida que aumenta la proporción de fertilizante en la matriz.

Estos resultados concuerdan con lo reportado en la literatura; por ejemplo, Winarti y colaboradores observaron que la capacidad de hinchamiento disminuye significativamente al incorporar fertilizantes, con reducciones más marcadas a mayores concentraciones (Winarti et al., 2021). De manera similar, Kratochvílová y colaboradores confirmaron esta tendencia al evidenciar una reducción progresiva del hinchamiento en hidrogeles con fertilizantes (Kratochvílová et al., 2023). Este comportamiento se explica porque la presencia de sales inorgánicas dentro de la red polimérica incrementa la fuerza iónica del sistema y promueve entrecruzamientos iónicos adicionales entre las cadenas, lo que limita la entrada de agua y reduce la capacidad de hinchamiento (Kareem et al., 2021). En la tabla 5, se reportan los datos de la cinética de hinchamiento obtenida para cada hidrogel con nanocelulosa y diferentes concentraciones de fertilizantes.

10.5.1.2 Hidrogel con nanocelulosa y metabolitos

En este caso el análisis ANOVA evidenció diferencias significativas en la capacidad de hinchamiento de los hidrogeles ($p < 0,05$), por lo cual se aplicó una prueba de Tukey que permitió establecer tres agrupaciones. La primera estuvo conformada por el hidrogel control (hidrogel con nanocelulosa) y aquel con nanocelulosa más el metabolito de *Lactobacillus plantarum* (IBUN-090-03774). La segunda agrupación correspondió al hidrogel con nanocelulosa y metabolito de *L. plantarum* (IBUN-041-39), mientras que la tercera incluyó al hidrogel con nanocelulosa y metabolito de *Weissella cibaria* (IBUN-090-03684). Estos resultados se pueden atribuir a que el hidrogel con mayor capacidad de hinchamiento fue el que contenía el metabolito de *L. plantarum* (IBUN-041-39), el cual, entre los tres metabolitos

evaluados, presentó la mayor concentración de ácido láctico, al revisar la producción de metabolitos para estas cepas se encuentra que artículos de la literatura *Weissella cibaria* IBUN 090–03684 produjo hasta 42.01 g/L de ácido láctico, *Lactobacillus plantarum* IBUN 090–03774: produjo hasta 30.95 g/L de ácido láctico y *Lactobacillus plantarum* IBUN 04139: produjo hasta 16.67 g/L de ácido láctico. En contraste, el hidrogel con *W. cibaria*, caracterizada como bacteria heterofermentadora que produce ácido láctico en menor proporción junto con otros metabolitos, mostró la menor capacidad de hinchamiento. Esto sugiere que los grupos funcionales de los metabolitos interactúan con la red polimérica del hidrogel, modulando sus propiedades de absorción de agua (Rosero et al., 2024).

Al contrastar estos hallazgos con la literatura, no se encontraron antecedentes que reporten la incorporación de metabolitos microbianos en hidrogeles para aplicaciones agrícolas. No obstante, en otras áreas de estudio se han descrito resultados relevantes sobre la incorporación de metabolitos en matrices poliméricas y su influencia en la capacidad de hinchamiento. Por ejemplo, Santos y colaboradores evidenciaron mediante FTIR que la incorporación de ácido láctico, metabolito principal de estas bacterias, genera interacciones entre los grupos carboxilo y la red polimérica, lo que induce modificaciones microestructurales y un incremento en la porosidad del material (Santos et al., 2019). De manera similar, Li y colaboradores adicionaron ácido láctico derivado de la fermentación de *L. plantarum* a un hidrogel de quitosano, observando alteraciones significativas en su comportamiento de hinchamiento (Li et al., 2025). Dichos autores sugieren que los grupos carboxílicos (–COOH) presentes en los metabolitos forman enlaces iónicos y puentes de hidrógeno con las cadenas poliméricas, aumentando la densidad de entrecruzamiento y modificando la capacidad de absorción de agua. En concordancia, los resultados obtenidos en este estudio indican que el metabolito de *L. plantarum* (IBUN-041-39), con mayor contenido de ácido láctico, confirmó al hidrogel una mayor capacidad de hinchamiento, mientras que la menor proporción de este ácido en *W. cibaria* se asoció con un hinchamiento reducido, reafirmando la relevancia de los grupos funcionales polares en la interacción con la red de nanocelulosa. En la tabla 6, se reportan los datos de la cinética de hinchamiento obtenida para cada hidrogel con nanocelulosa y metabolito microbiano de las BAL.

10.5.1.3 Hidrogel con nanocelulosa y BAL

En las muestras evaluadas en estos ensayos el análisis ANOVA evidenció diferencias significativas en la capacidad de hinchamiento de los hidrogeles ($p < 0,05$), lo que permitió aplicar la prueba de Tukey para establecer las agrupaciones. Se conformaron dos grupos: la primera agrupación (A), con menor capacidad de retención de agua, incluyó el hidrogel con nanocelulosa (control), el hidrogel con nanocelulosa y *Weissella cibaria* (IBUN 090-03684), y el hidrogel con nanocelulosa y *Lactobacillus plantarum* (IBUN-090-03774). La segunda agrupación estuvo conformada únicamente por los hidrogeles con BAL, destacando el hidrogel con nanocelulosa y *L. plantarum* (IBUN-041-39), que presentó la mayor capacidad de hinchamiento. Estos resultados sugieren que la incorporación de BAL, particularmente ciertas cepas de *L. plantarum*, inducen modificaciones en la matriz polimérica que favorecen la absorción de agua. Este comportamiento coincide con reportes en hidrogeles de aplicación farmacéutica, donde la espectroscopía FTIR ha confirmado la formación de nuevas uniones por puentes de hidrógeno entre el polímero y biopolímeros bacterianos, y la microscopía electrónica de barrido (SEM) ha revelado una estructura porosa densa que encapsula a las bacterias (Huang et al., 2025). Asimismo, otros estudios han identificado que las cadenas poliméricas se reorganizan alrededor de las bacterias y sus exopolisacáridos, generando redes con poros submicrométricos que facilitan la penetración y retención de agua, incrementando así el grado de hinchamiento. Además, ciertos métodos de fabricación potencian estos efectos; por ejemplo, los ciclos de congelación descongelación (*freeze-thaw*) empleados para incorporar *L. plantarum* en hidrogeles de PVA/guar producen redes físicamente reticuladas con distribuciones heterogéneas, lo que aumenta la porosidad y la capacidad de absorción de los hidrogeles. En la tabla 7, se reportan los datos de la cinética de hinchamiento obtenida para cada hidrogel con nanocelulosa y BAL.

A continuación, en las Figuras 8, 9 y 10, se encuentran las gráficas de cinética de hidrogeles con diferentes concentraciones de fertilizantes, metabolitos microbianos y BAL.

Resultados y Discusión

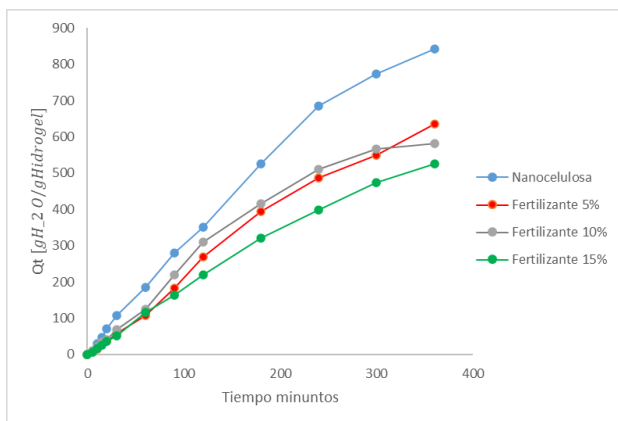


Figura 7 Cinética de hinchamiento hidrogel con nanocelulosa y fertilizantes

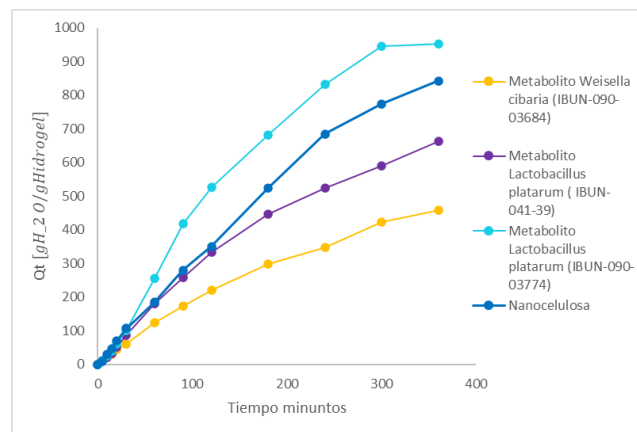


Figura 8 Cinética de hinchamiento hidrogel con nanocelulosa y metabolitos

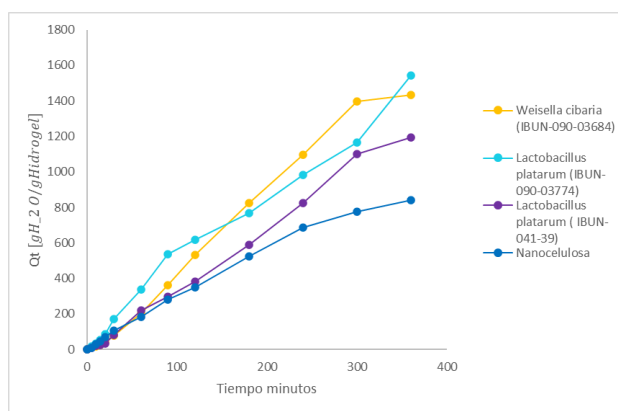


Figura 9 Cinética de hinchamiento de hidrogel con nanocelulosa y BAL

Tabla 7. Hinchamiento de los hidrogeles con nanocelulosa y fertilizantes

Tipo de hidrogel	Qt [gH ₂ O/gHidrogel]	Qeq [gH ₂ O/gHidrogel]	Ks [gH ₂ O/gHidrogel]	Kis [gH ₂ O/gHidrogel]
Nanocelulosa	921,93 ± 17,82 ^a	923,48	5,88E-08	25,75
Nanocelulosa+ Fertilizante 5%	577,35 ± 22,89 ^b	675,42	4,59E-04	13,94
Nanocelulosa + Fertilizante 10%	528,4 ± 26,68 ^b	674,58	1,34E-07	24,27
Nanocelulosa + Fertilizantes 15%	548,88 ± 25,52 ^b	565,07	2,69E-07	12,34

Media ± desviación estándar (n = 3), los valores con letras diferentes en la misma columna (a–c) son significativamente diferentes (p < 0,05) entre sí.

Tabla 8. Hinchamiento de los hidrogeles con nanocelulosa y metabolitos de BAL

Tipo de hidrogel	Qt [gH ₂ O/gHidrogel]	Qeq [gH ₂ O/gHidrogel]	Ks [gH ₂ O/gHidrogel]	Kis [gH ₂ O/gHidrogel]
Nano	921,93 ± 18,82 ^{ac}	923,48	5,88E-08	25,75
Nanocelulosa + Hidrogel con nanocelulosa y metabolito de <i>Weissella cibaria</i> (IBUN-090-03684)	417,13 ± 4 ^d	500,94	1,84E-07	24,13
Nanocelulosa + Hidrogel con nanocelulosa y metabolito de <i>Lactobacillus plantarum</i> (IBUN-041-39)	942,56 ± 3,62 ^c	1109,08	2,64E-08	36,23
Nanocelulosa + Hidrogel con nanocelulosa y metabolito de <i>Lactobacillus plantarum</i> (IBUN-041-39)	774,42 ± 49,87 ^e	730,52	6,20E-08	32,50

Media ± desviación estándar (n = 3), los valores con letras diferentes en la misma columna (d–e) son significativamente diferentes (p < 0,05) entre sí.

Tabla 9. Hinchamiento de los hidrogeles con nanocelulosa y BAL

Tipo de hidrogel	Qt [gH ₂ O/gHidrogel]	Qeq [gH ₂ O/gHidrogel]	Ks [gH ₂ O/gHidrogel]	Kis [gH ₂ O/gHidrogel]
Nanocelulosa	921,93 ± 17,82 ^a	923,481	5,87846E-08	25,749
Nanocelulosa y <i>Lactobacillus plantarum</i> (IBUN-041-39)	1230,23 ± 88,83 ^{ag}	730,52	6,20E-08	33,40
Nanocelulosa y <i>Weissella cibaria</i> (IBUN-090-03684)	1443,5 ± 79,16 ^{ag}	1466,37	2,71E-08	29,29
Nanocelulosa <i>Lactobacillus plantarum</i> (IBUN-090-03774)	1768,24 ± 193,21 ^g	1835,95	8,63E-09	36,11

Media ± desviación estándar (n = 3), los valores con letras diferentes en la misma columna (a–g) son significativamente diferentes (p < 0,05) entre sí.

10.5.2.1 Capacidad de retención de agua

La capacidad de retención de agua en hidrogeles es clave en agricultura porque mejora la humedad del suelo y reduce la frecuencia de riego, favoreciendo el crecimiento en condiciones de sequía (Abdelghafar, et al., 2024).

10.5.2.1 Hidrogel con nanocelulosa y fertilizante

Luego del análisis estadístico ANOVA se evidenciaron diferencias significativas ($p < 0,05$) en la capacidad de retención de agua de los hidrogeles con distintas concentraciones de fertilizante NPK. La prueba de Tukey reveló dos agrupaciones de tratamientos: un primer grupo que incluye al hidrogel control (nanocelulosa sin fertilizante) junto con los hidrogeles con 5% y 10% de NPK, y un segundo grupo conformado por los hidrogeles con 5% y 15% de NPK. El hecho de que el tratamiento con 5% aparezca en ambas agrupaciones sugiere un comportamiento intermedio, sin diferenciarse significativamente ni de los niveles menores (0% y 10%) ni del nivel más alto (15%). En cambio, el hidrogel con 15% de fertilizante mostró una capacidad de retención de agua significativamente menor que el control y que el de 10%, confirmando que, a mayor contenido de fertilizante en la matriz del hidrogel, su capacidad de retención hídrica disminuye sustancialmente. Este comportamiento concuerda con lo reportado en la literatura: por ejemplo, Winarti y colaboradores encontraron que al incorporar hasta 15% de fertilizante NPK en un hidrogel de nanocelulosa, el índice de hinchamiento disminuye conforme aumenta la concentración de fertilizante (Winarti, et al., 2021). La presencia de sales iónicas del fertilizante en la red polimérica altera la estructura del hidrogel y las interacciones polímero-agua, reduciendo el espacio disponible para la absorción de agua (Milampure, et al., 2024). En particular, los iones aportados por el NPK (por ejemplo, nitrato, amonio, potasio) pueden neutralizar cargas electrostáticas dentro del hidrogel y disminuir la presión osmótica, lo que dificulta la difusión de agua hacia el interior de la matriz polimérica y disminuye la capacidad de hinchamiento del hidrogel (pjoes.com). Estos mecanismos explican por qué a mayor concentración de fertilizante, menor es la retención de agua en el hidrogel, en línea con nuestros hallazgos (Tyliszczak, et al., 2009). En la tabla 8, se muestran los valores de la capacidad de hinchamiento para cada hidrogel con diferente concentración de fertilizantes. En tabla 8, se muestra lo valores de capacidad

de retención de agua para los hidrogeles con nanocelulosa y diferentes concentraciones de fertilizantes.

10.5.2.2 Hidrogel con nanocelulosa y metabolitos

La evaluación de la capacidad de retención de agua en los hidrogeles con nanocelulosa y metabolitos de BAL no mostró diferencias significativas entre los tratamientos, obteniéndose un valor de ANOVA $F = 0,45$. Los compuestos reticulantes como el ácido cítrico pueden aumentar el grado de hinchamiento mediante enlaces cruzados, pero el ácido láctico metabolito predominante en estos hidrogeles no modificó apreciablemente la red polimérica. En conjunto, los datos sugieren que la matriz de nanocelulosa domina la retención hídrica del hidrogel, de modo que los metabolitos microbianos pueden incorporarse sin comprometer esta propiedad (Omidian, et al., 2024). Además, hasta donde se sabe no existen hidrogeles agrícolas que incorporen metabolitos microbianos, lo que hace a este enfoque una estrategia novedosa para enriquecer fertilizantes sin perder eficiencia hídrica. En la tabla 9, se muestran los valores de la capacidad de hinchamiento para cada hidrogel con diferentes metabolitos microbianos de las BAL de fertilizantes. En tabla 9, se muestra lo valores de capacidad de retención de agua para los hidrogeles con nanocelulosa y diferentes metabolitos microbianos.

10.5.2.3 Hidrogel con nanocelulosa y BAL

Para garantizar la incorporación de las BAL en la matriz polimérica, estas se suspendieron previamente en agua peptonada, lo que ocasionó que moléculas propias de este medio como aminoácidos, péptidos y sales minerales también quedarán atrapadas dentro del hidrogel reforzado con nanocelulosa. Los resultados obtenidos mostraron que no existieron diferencias significativas en la capacidad de retención de agua tras el análisis ANOVA ($F = 0,45$). Cabe resaltar que, hasta el momento, no se han reportado en la literatura hidrogeles agrícolas con incorporación de BAL, lo que convierte este estudio en un antecedente novedoso. La presencia de residuos de agua peptonada dentro del hidrogel puede explicar el comportamiento observado, ya que los iones y compuestos disueltos incrementan la fuerza iónica del sistema, reduciendo la presión osmótica diferencial con el medio externo y, en consecuencia, limitando la capacidad de absorción de agua. Este fenómeno guarda cierta analogía con la homeostasis osmótica, en el sentido de que el hidrogel alcanza un equilibrio pasivo entre la absorción de agua y la concentración de solutos en su interior. Al comparar

estos hallazgos con estudios previos sobre la influencia de soluciones salinas en hidrogeles, se ha reportado que la retención de agua disminuye significativamente en presencia de sales, debido a que los cationes reducen la repulsión electrostática entre las cargas negativas de la red polimérica, disminuyendo así el gradiente osmótico que favorece el hinchamiento (Mahon et al., 2020). En la tabla 10, se muestran los valores de la capacidad de hinchamiento para cada hidrogel con diferentes BAL. En tabla 10, se muestra lo valores de capacidad de retención de agua para los hidrogeles con nanocelulosa y diferentes BAL.

Tabla 10. Capacidad de hinchamiento hidrogeles con nanocelulosa y fertilizantes

Tipo de hidrogel	%Qr
Nanocelulosa	46,22±3,76 ^a
Fertilizante 5%	33,16±11,24 ^a
Fertilizante 10%	43,51±6,89 ^{ab}
Fertilizante 15%	15,21±4,05 ^{ab}

Media ± desviación estándar (n = 3), los valores con letras diferentes en la misma columna (a–c) son significativamente diferentes (p < 0,05) entre sí.

Tabla 11. Capacidad de hinchamiento hidrogeles con nanocelulosa y metabolitos

Tipo de hidrogel	%Qr
Nanocelulosa	46,22 ± 3,76 ^a
Metabolito <i>Weissella cibaria</i> (IBUN-090-03684)	53,91 ± 6,08 ^a
Metabolito <i>Lactobacillus platarum</i> (IBUN-090-03774)	52,65 ± 3,56 ^a
Metabolito <i>Lactobacillus platarum</i> (IBUN-041-39)	44,87 ± 1,23 ^a

Media ± desviación estándar (n = 3), los valores con letras diferentes en la misma columna (a-c) son significativamente diferentes (p < 0,05) entre sí.

Tabla 12. Capacidad de hinchamiento hidrogeles con nanocelulosa y BAL

Tipo de hidrogel	%Qr
Nanocelulosa	46,22 ± 3,76 ^a
<i>Weissella cibaria</i> (IBUN-090-03684)	57,86 ± 0,71 ^a
<i>Lactobacillus platarum</i> (IBUN-090-03774)	43,09 ± 12,73 ^a
<i>Lactobacillus platarum</i> (IBUN-041-39)	54,54 ± 11,08 ^a

Media ± desviación estándar (n = 3), los valores con letras diferentes en la misma columna (a-c) son significativamente diferentes (p < 0,05) entre sí

10.5.3 Resistencia máxima a la compresión y módulo elástico

Determinar la resistencia máxima a la compresión de los hidrogeles es importante en agricultura porque estructura mecánica suficiente evita que se degraden o colapsen bajo el

Resultados y Discusión_____

peso del suelo y raíces, garantizando que mantengan su forma y funciones (retención de agua,

intercambio de gases) a profundidad. Esto impacta directamente en su efectividad al usarse en suelos compactados o sometidos a presión, asegurando que sobrevivan en condiciones reales de campo (Dorochesi, et al., 2023).

10.5.3.1 Hidrogel con nanocelulosa y fertilizantes

El análisis estadístico ANOVA mostró que no existen diferencias significativas en la resistencia máxima a la compresión al incorporar fertilizantes en concentraciones de 5 %, 10 % y 15 % respecto al peso de los monómeros ($F = 0,39$). Este resultado sugiere que la adición de fertilizantes en dichos rangos no compromete la estabilidad mecánica del hidrogel. De acuerdo con estudios recientes, la incorporación de porcentajes bajos de fertilizante —entre 7 % y 13 % tampoco genera variaciones notorias en la resistencia a la compresión, lo que se atribuye a una distribución uniforme del fertilizante dentro de la matriz polimérica. Resultados similares fueron reportados por Dissanayake y colaboradores, quienes evidenciaron que la inclusión de urea en hidrogeles a base de agar no modificó significativamente su resistencia compresiva, confirmando que la red del hidrogel mantiene su integridad estructural aun en presencia de agentes fertilizantes (Dissanayake, et al., 2024). En la tabla 11 se reportan los valores de resistencia máxima a la compresión para cada hidrogel con nanocelulosa y diferentes porcentajes de fertilizante.

10.5.3.2 Hidrogel con nanocelulosa y metabolitos

Los resultados del análisis de resistencia a la compresión evidenciaron diferencias significativas entre los hidrogeles formulados con nanocelulosa y metabolitos microbianos. El ANOVA confirmó esta diferencia con un valor de $p < 0,05$, lo que llevó a aplicar la prueba de Tukey para determinar las agrupaciones. Se identificaron tres grupos: el hidrogel con metabolitos de *Weissella cibaria* (IBUN-090-03684) mostró el mayor valor de resistencia a la compresión (0,229 MPa en promedio), conformando un grupo independiente. Este incremento notable en la rigidez mecánica sugiere una interacción sinérgica entre los exopolisacáridos u otros metabolitos de esta cepa y la red de nanocelulosa, lo que podría fortalecer los enlaces de hidrógeno y, en consecuencia, mejorar la integridad estructural del

Resultados y Discusión

material. Por su parte, los hidrogeles con metabolitos de *Lactiplantibacillus plantarum*

(IBUN-090-03774) y de la cepa BAL10 (IBUN-041-39) presentaron resistencias intermedias (0,165 MPa y 0,119 MPa, respectivamente), siendo estadísticamente diferentes entre sí, pero ambas inferiores a la registrada en el hidrogel con *W. cibaria*. Cabe destacar que el hidrogel control, elaborado únicamente con nanocelulosa, alcanzó un valor de resistencia (~0,167 MPa) sin diferencias significativas respecto al hidrogel con *L. plantarum* (IBUN-090-03774), lo que indica que los metabolitos de esta cepa no modificaron de manera sustancial la propiedad mecánica de la matriz base. Dado que hasta la fecha no se han reportado estudios sobre hidrogeles que incorporen metabolitos microbianos, estos hallazgos representan un aporte novedoso y abren nuevas perspectivas para el desarrollo de formulaciones avanzadas de hidrogeles agrícolas reforzados con nanocelulosa y metabolitos bacterianos. En la tabla 12 se reportan los valores de resistencia máxima a la compresión para cada hidrogel con nanocelulosa y metabolitos microbianos de las BAL.

10.5.3.3 Hidrogel con nanocelulosa y BAL

El análisis de la resistencia a la compresión de los hidrogeles con nanocelulosa y BAL mediante ANOVA reveló diferencias significativas ($p < 0,05$), por lo que se aplicó la prueba de Tukey para identificar las agrupaciones. La primera estuvo conformada por los hidrogeles con solo nanocelulosa, que registraron la menor resistencia a la compresión, lo cual indica que la ausencia de BAL y de sales residuales genera una red menos reforzada. La segunda agrupación incluyó los hidrogeles con nanocelulosa y aquellos con nanocelulosa más *Weissella cibaria* (IBUN-090-03684) y *Lactiplantibacillus plantarum* (IBUN-090-03774), que presentaron un comportamiento similar y mayor resistencia mecánica. Finalmente, la tercera agrupación unió los hidrogeles con nanocelulosa y *L. plantarum* (IBUN-090-03774) con los elaborados con nanocelulosa y *L. plantarum* (IBUN-041-39), que mostraron un patrón semejante entre sí, aunque sin alcanzar los valores más altos de resistencia.

Es importante señalar que, para incorporar las BAL, se empleó una solución salina de peptona, lo que implicó la presencia de sales residuales atrapadas en la matriz del hidrogel. Estas sales pudieron actuar como puntos rígidos o agentes de refuerzo iónico, modificando la estructura de la red y, en consecuencia, su comportamiento mecánico. Este resultado es coherente con reportes previos, donde se ha demostrado que la adición de sales puede reducir significativamente el módulo elástico bajo compresión, hasta en un 50 % al aumentar la concentración iónica (Sacco et al., 2024). De forma complementaria, otros estudios han evidenciado que en hidrogeles peptídicos el módulo elástico se incrementa de manera lineal con el logaritmo de la fuerza iónica, atribuible a la formación de una estructura fibrilar más

densa y rígida al aumentar el contenido iónico (Feng et al., 2012). En conjunto, estos hallazgos sugieren que las diferencias observadas no se deben únicamente a la incorporación de BAL, sino también a la interacción sinérgica entre los microorganismos y las sales residuales, lo que constituye un aporte novedoso dado que, hasta el momento, no se han reportado hidrogeles con BAL para aplicaciones agrícolas. En la tabla 13 se reportan los valores de resistencia máxima a la compresión para cada hidrogel con nanocelulosa y BAL.

Tabla 13. Resistencia a la máxima compresión de hidrogeles con nanocelulosa y fertilizantes

Tipo de hidrogel	Rc [MPa]
Hidrogel + Nanocelulosa	0,16 ± 0,02 ^a
Hidrogel + Nanocelulosa + Fertilizante 5%	0,18 ± 0,02 ^a
Hidrogel + Nanocelulosa + Fertilizante 10%	0,2 ± 0,02 ^a
Hidrogel + Nanocelulosa + Fertilizante 15%	0,16 ± 0,01 ^a

Media ± desviación estándar (n = 3), los valores con letras diferentes en la misma columna (a–c) son significativamente diferentes ($p < 0,05$) entre sí.

Resultados y Discusión

Resultados y Discusión

Tabla 14. Resistencia a la máxima compresión de hidrogeles con nanocelulosa y metabolitos de las BAL

Tipo de hidrogel	Rc [MPa]
Hidrogel + Nanocelulosa	0,16 ± 0,02 ^c
Metabolito <i>Weissella cibaria</i> (IBUN 090-03684)	0,23 ± 0,01 ^b
Metabolito <i>Lactobacillus platarum</i> (IBUN-090-03774)	0,017 ± 0,01 ^c
Metabolito <i>Lactobacillus platarum</i> (IBUN-041-39)	0,12 ± 0,01 ^d

Media ± desviación estándar (n = 3), los valores con letras diferentes en la misma columna (a–d) son significativamente diferentes (p < 0,05) entre sí.

Tabla 15. Resistencia a la máxima compresión de hidrogeles con nanocelulosa y BAL

Tipo de hidrogel	Rc [MPa]
Hidrogel + Nanocelulosa	0,16 ± 0,02 ^e
<i>Weissella cibaria</i> (IBUN-090-03684)	0,53 ± 0,06 ^f
<i>Lactobacillus platarum</i> (IBUN-090-03774)	0,39 ± 0,03 ^{fe}
<i>Lactobacillus platarum</i> (IBUN-041-39)	0,35 ± 0,02 ^g

Media ± desviación estándar (n = 3), los valores con letras diferentes en la misma columna (e–g) son significativamente diferentes (p < 0,05) entre sí.

A continuación, en las siguientes figuras 10 – 19 se presenta la gráfica del módulo elástico para cada hidrogel.

Resultados y Discusión

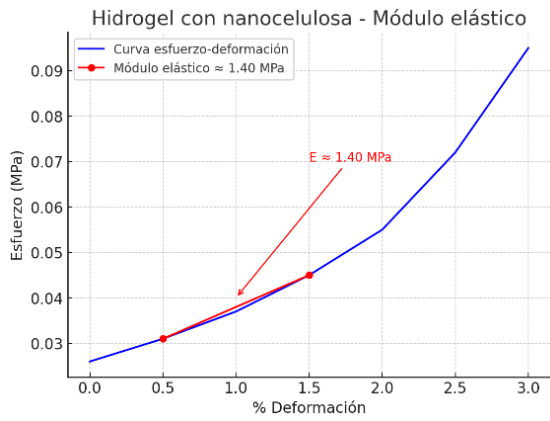


Fig.10 Hidrogel con nanocelulosa

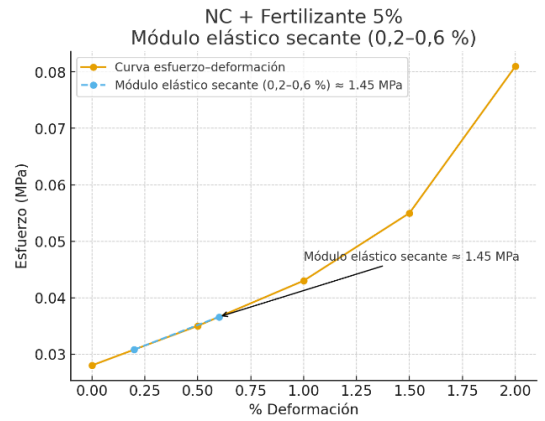


Fig 11. Hidrogel con nanocelulosa y fertilizante 5%

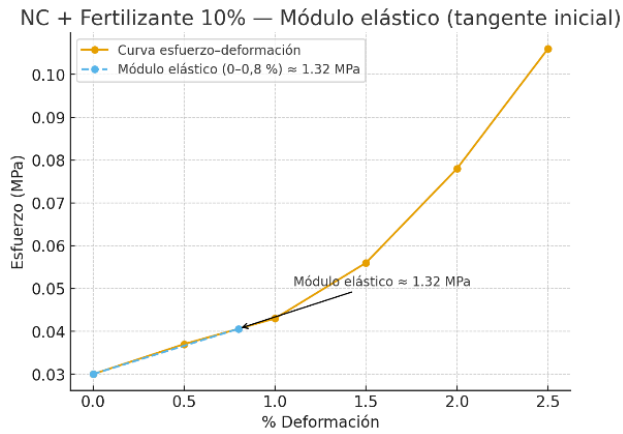


Fig.12. Hidrogel con nanocelulosa y fertilizante 10%

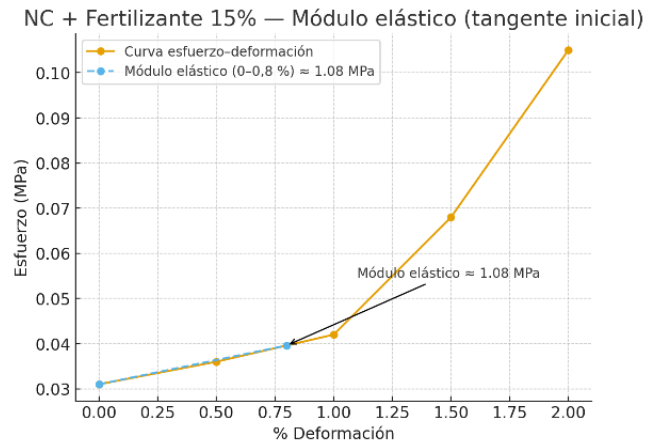


Fig 13. Hidrogel con nanocelulosa y fertilizante 15%

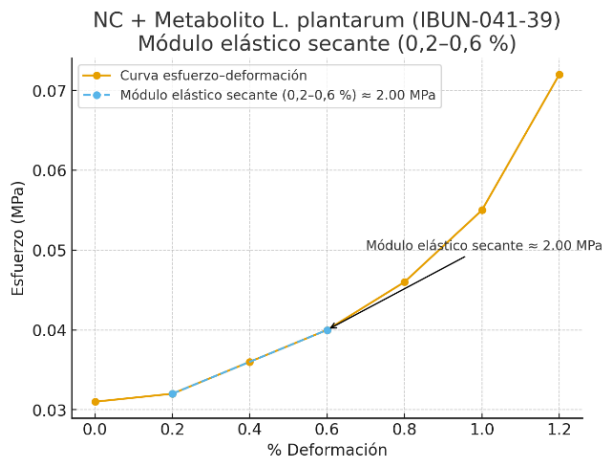


Fig 14. Hidrogel con naocelulosa y Metabolito *Lactobacillus platarum* (IBUN-041-39)

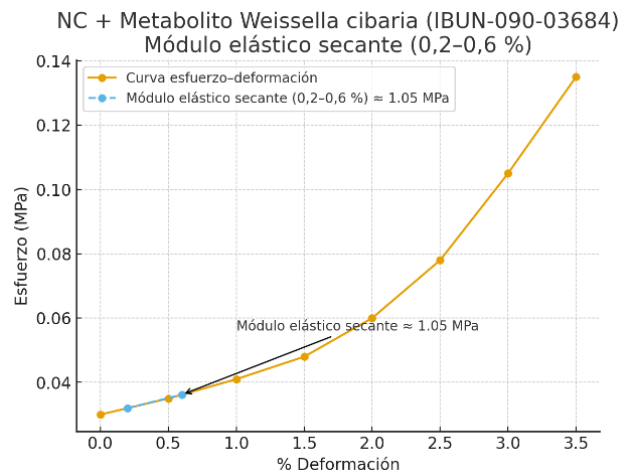


Figura 15. Hidrogel con nanocelulosa y metabolito de *Weissella cibaria* (IBUN-090-03684)

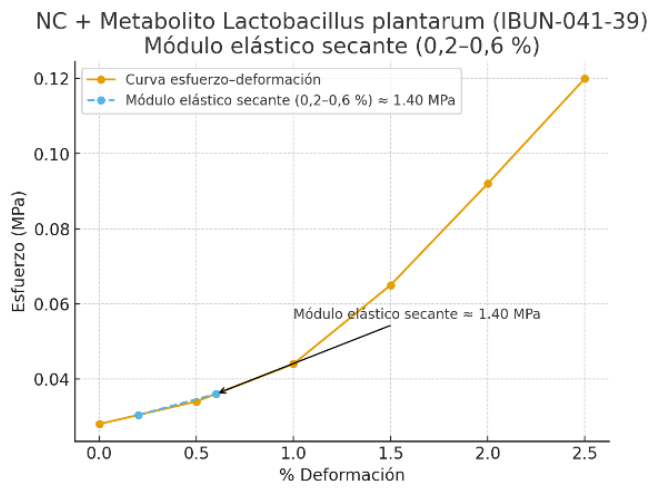


Figura 16. Hidrogel con nanocelulosa y metabolito de *Lactobacillus plantarum* (IBUN-041-39)

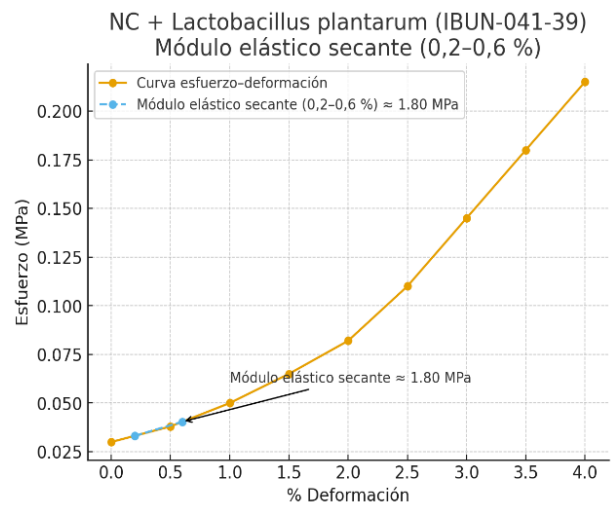


Figura 17. Hidrogel con nanocelulosa y *Lactobacillus plantarum* (IBUN-041-39)

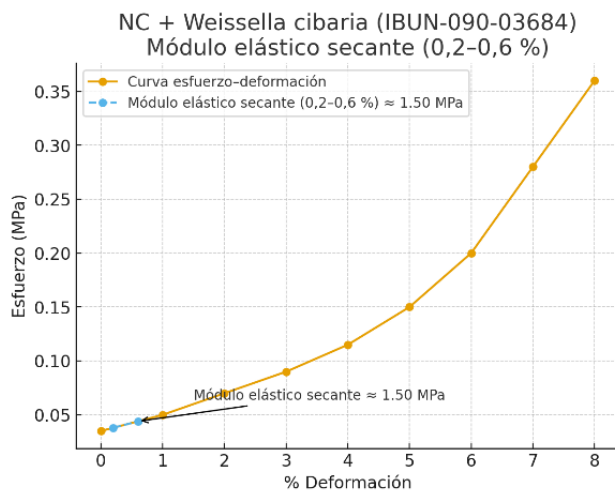


Figura 18. Hidrogel con nanocelulosa y *Weissella cibaria* (IBUN-090-03684)

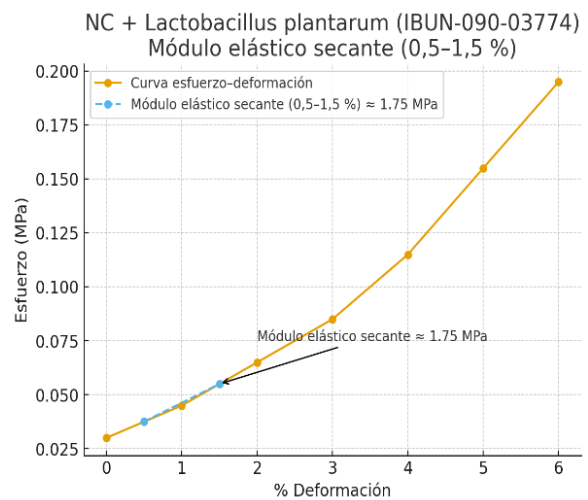


Figura 19. Hidrogel con nanocelulosa *Lactobacillus plantarum* (IBUN-090-03774)

10.5.4. Análisis SEM

10.5.4.1 Hidrogeles con nanocelulosa y fertilizantes

El análisis por microscopía electrónica de barrido (SEM) de los hidrogeles de nanocelulosa con cargas de fertilizante al 5%, 10% y 15%, figuras 20, 21 y 22 revela una correlación directa entre la concentración de fertilizante y la morfología superficial del material. Se observa una presencia significativa de estructuras cristalinas, atribuidas a la migración y posterior cristalización de las sales fertilizantes en la interfase durante el proceso de desecación. Estos hallazgos se alinean con lo reportado en la literatura, donde la incorporación de aditivos iónicos modifica la microestructura de la matriz polimérica. En particular, Winarti et al. (2021) determinaron que una concentración de fertilizante del 5% respecto a los monómeros es la más apropiada, ya que no altera significativamente la porosidad del hidrogel, preservando así su capacidad de absorción y retención de agua. Este resultado contrasta con los observados a mayores concentraciones (10% y 15%), donde la morfología evidencia una red polimérica más compacta y poros de menor tamaño, fenómeno consistentemente reportado por Bortolin y colaboradores y Wu y colaboradores. Dichos autores sugieren que esta densificación de la matriz, inducida por una mayor carga iónica, puede afectar negativamente las propiedades hidrodinámicas del hidrogel y modular la cinética de liberación de nutrientes (Bortolin et al. 2013) y (Wu et al. 2024).

10.5.4.2 Hidrogeles con nanocelulosa y metabolitos

El análisis de imágenes SEM de hidrogeles con nanocelulosa y metabolitos de las BAL, figuras 23, 24 y 25, se encontró diferencias significativas al comparar con la morfología de hidrogeles solo con nanocelulosa. La morfología de los hidrogeles con metabolitos y nanocelulosa es más densa de los hidrogeles con metabolitos solo con nanocelulosa pues en contraste estos hidrogeles tiene una morfología más lisa y poros más grandes. Esta modificación estructural de los hidrogeles con nanocelulosa y metabolitos se puede atribuir a la interacción de los ácidos láctico metabolito principal de las BAL, actuando posiblemente como agentes entrecruzantes adicionales o modificando la dinámica de formación de la red polimérica durante la gelificación. Si bien en la literatura no existen estudios recientes sobre hidrogeles de nanocelulosa y metabolitos, estos hallazgos pueden ser un inicio para estudiar

el comportamiento a nivel morfológico de metabolitos microbianos en la matriz de los hidrogeles.

10.5.4.3 Hidrogeles con nanocelulosa y BAL

Las imágenes SEM de los hidrogeles confirman con lo que se observó en los análisis de capacidad de retención de agua, donde se observa que las partículas de las sales quedaron en la matriz del hidrogel. En las figuras 26, 27 y 28, se ven los hidrogeles con las BAL y se observa la integración de las partículas de los fertilizantes. Por lo contrario, esta interacción no se observa en el hidrogel de solo nanocelulosa, pues en este se observa poros bien definidos. Lo que indica que la presencia de dichas sales modifica parcialmente la organización morfológica, actuando como puntos rígidos en la matriz, lo cual podría explicar

La similitud en la capacidad de hinchamiento encontrada en los análisis estadísticos, dado que la fuerza iónica generada por estos residuos contribuye a equilibrar la presión osmótica con el medio externo. Cabe resaltar que a la fecha no existen estudios científicos que hayan realizado hidrogeles con BA para uso agrícola.

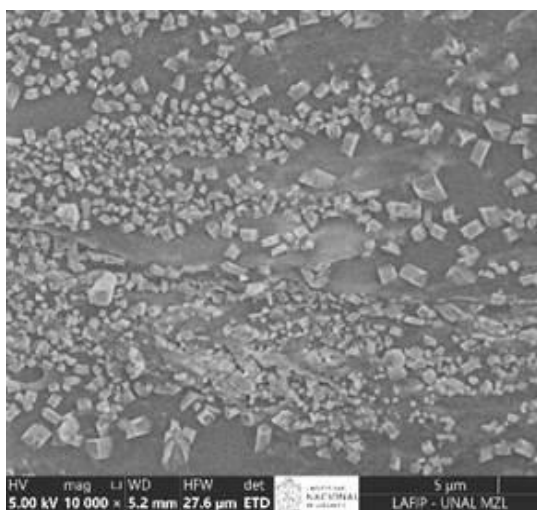


Figura 20 SEM Hidrogel con nanocelulosa y fertilizante 5%

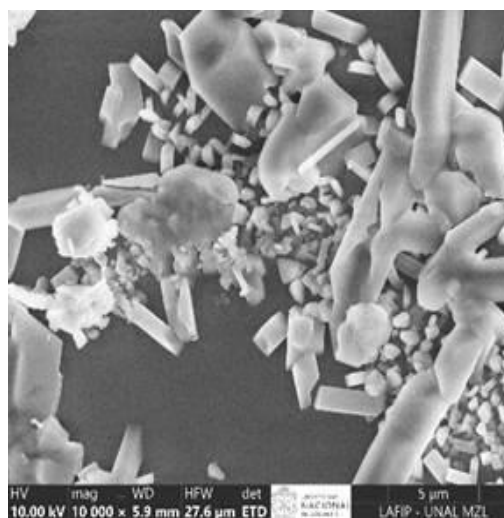


Figura 21 SEM Hidrogel con nanocelulosa y fertilizante 10%

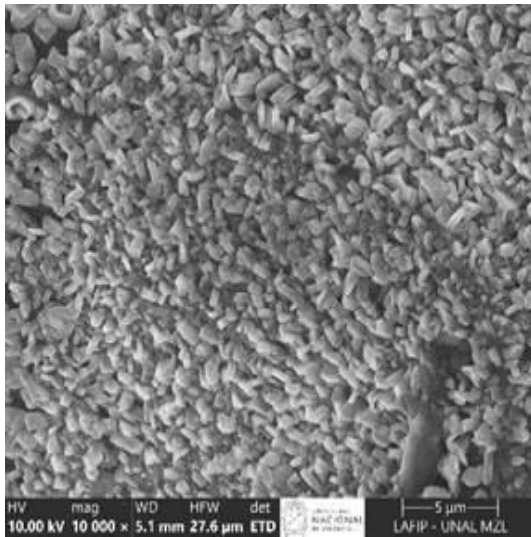


Figura 22 SEM Hidrogel con nanocelulosa y fertilizante 15%

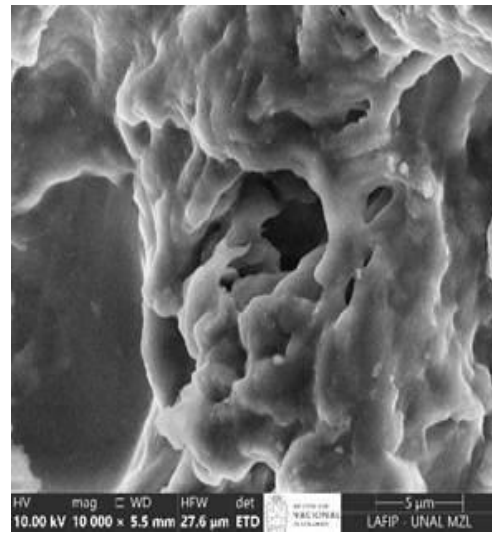


Figura 23 SEM Hidrogel con nanocelulosa y Metabolito *Lactobacillus plantarum* IBUN-090-03774

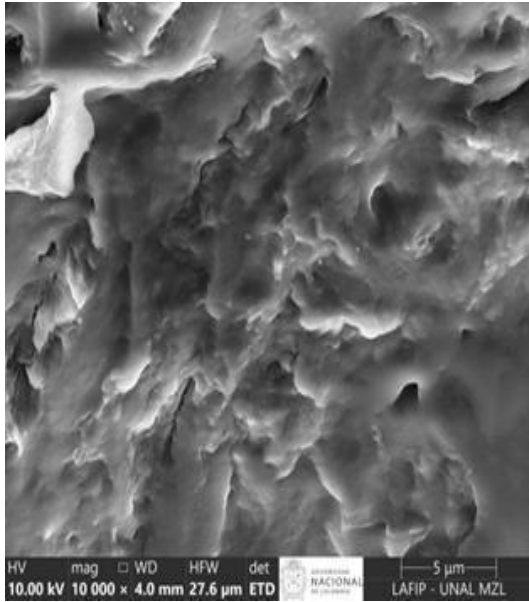


Figura 24 SEM Hidrogel con nanocelulosa y Metabolito *Lactobacillus plantarum* IBUN-IBUN-041-39

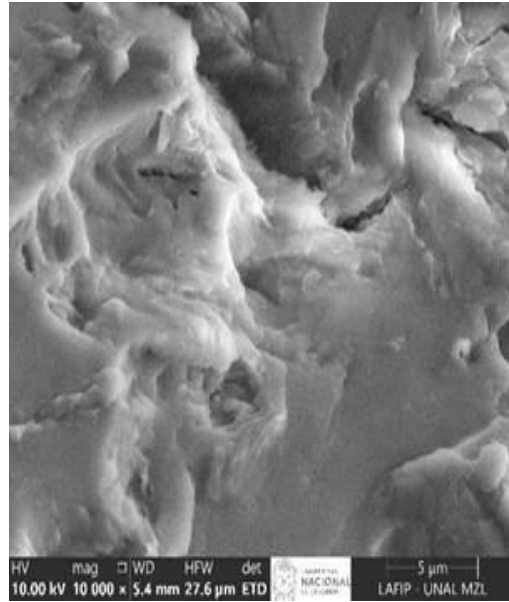


Figura 25 SEM Hidrogel con nanocelulosa y Metabolito *Weissella cibaria* IBUN-090-03684

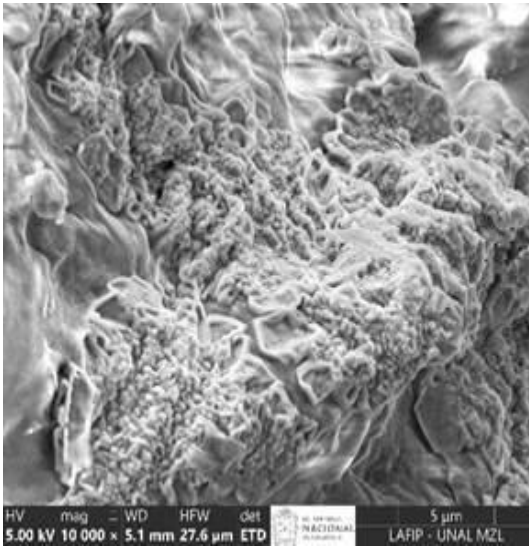


Figura 26 SEM Hidrogel con nanocelulosa y *Weissella cibaria* IBUN-090-03684

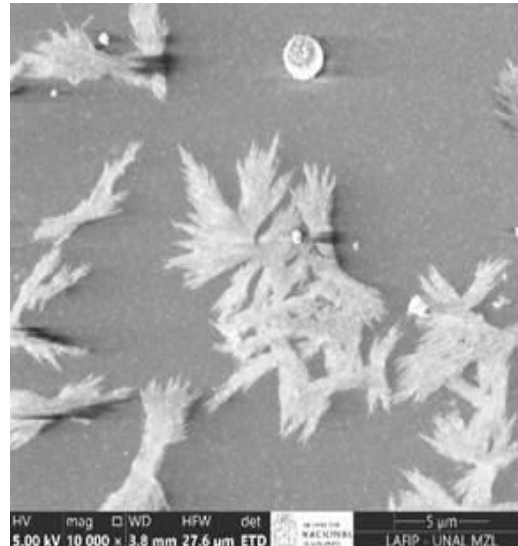


Figura 27 SEM Hidrogel con nanocelulosa y Metabolito *Lactobacillus plantarum* IBUN-090-03774

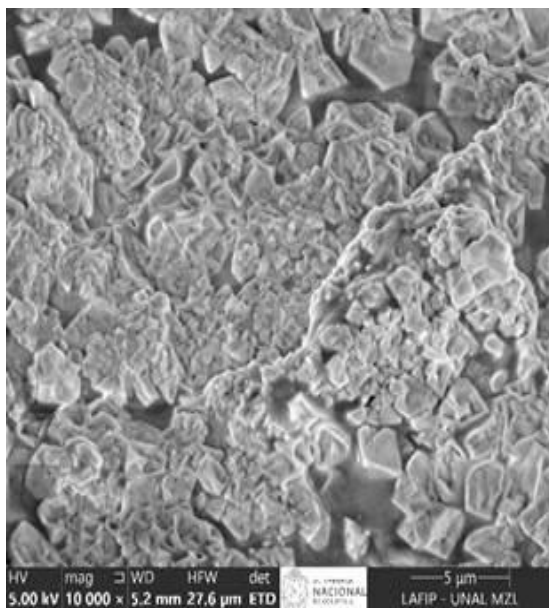


Figura 28 SEM Hidrogel con nanocelulosa y *Lactobacillus plantarum* IBUN- IBUN- 041-39

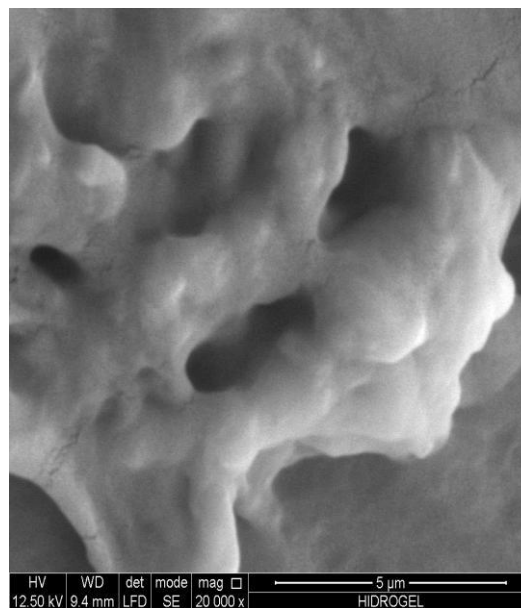


Figura 29 SEM Hidrogel con nanocelulosa

10.5.5 Análisis DSC

El análisis DSC permitió identificar un evento endotérmico principal en el rango de 170–200 °C para todas las formulaciones, el cual se intensificó notablemente cuando se incorporaron fertilizantes y metabolitos microbianos. En el hidrogel con nanocelulosa sin aditivos, figura 10a, esta transición se presentó más difusa y con menor área, mientras que, con fertilizantes, figura 31, 32 y 33, la señal se volvió más definida y de mayor entalpía, especialmente a una concentración del 15 %, donde se observó un pico agudo acompañado de una mayor estabilidad térmica en la región superior a los 210 °C. Este comportamiento puede atribuirse a la acción de los iones como puntos de interacción rígidos dentro de la red, lo que favorece reordenamientos cooperativos y una estructura más estable, en concordancia con lo reportado por França y colaboradores y Gómez y colaboradores, quienes encontraron que la presencia de nutrientes o sales en hidrogeles de nanocelulosa modifica la organización interna y desplaza las transiciones térmicas hacia temperaturas más altas (França et al. 2022) y (Gómez, et al. (2024).

Resultados y discusiones

En el caso de los hidrogeles con metabolitos de bacterias ácido-lácticas, figura 34, 35 y 36 el efecto más evidente se observó con *Weissella cibaria* (IBUN-090-03684), cuya curva presentó una señal endotérmica más amplia y de mayor área en comparación con la nanocelulosa sola. Esto sugiere que los exopolisacáridos producidos por esta cepa densifican la red polimérica y retienen una fracción mayor de agua estructuralmente ligada, fenómeno también descrito en estudios recientes sobre metabolitos microbianos caracterizados mediante DSC (Thivya et al., 2022). Por su parte, los hidrogeles con metabolitos de *Lactobacillus plantarum* mostraron un comportamiento intermedio, con señales más definidas que la nanocelulosa pura pero con micro-picos secundarios, lo que indica la presencia de dominios heterogéneos en la matriz.

Estos resultados confirman que tanto la incorporación de fertilizantes como de metabolitos microbianos no solo incrementa la energía requerida para romper enlaces de agua fuertemente asociada, sino que también aporta mayor cohesión a la red de nanocelulosa. En consecuencia, las transiciones térmicas observadas permiten inferir que los hidrogeles enriquecidos presentan mejor estabilidad térmica y mayor complejidad estructural, lo cual es clave para su aplicación agrícola, ya que garantiza mayor resistencia a condiciones de procesamiento y almacenamiento.

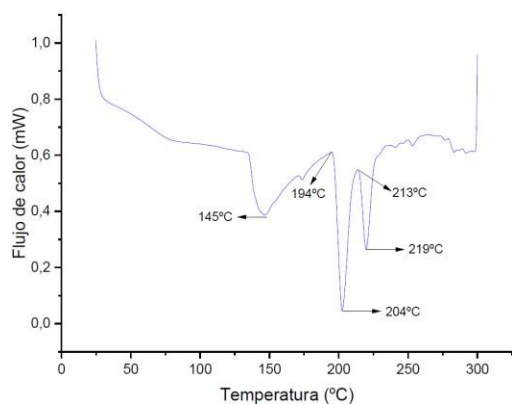


Figura 30 DSC Hidrogel con nanocelulosa

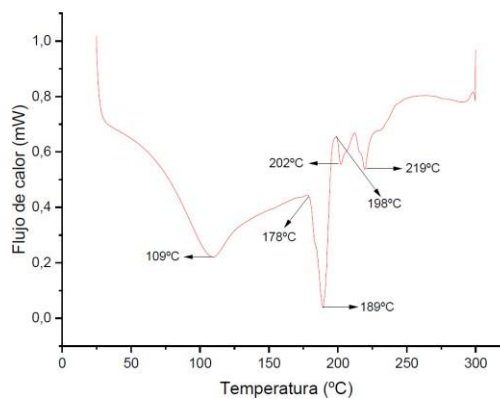


Figura 31 DSC Hidrogel con nanocelulosa y fertilizante 5%

Resultados y discusiones

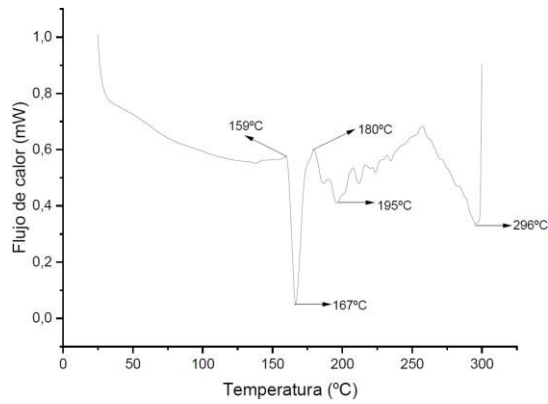


Figura 32 Hidrogel con nanocelulosa y fertilizante 10%

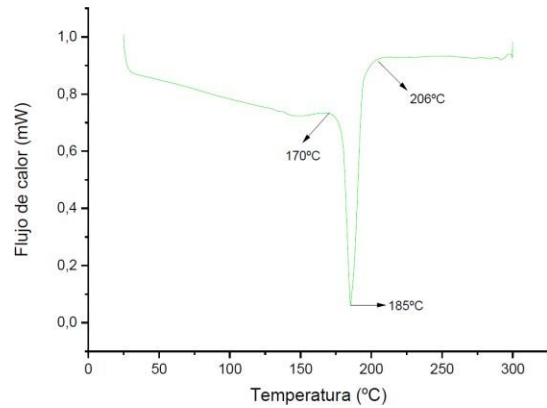


Figura 33 Hidrogel con nanocelulosa y fertilizante 15%

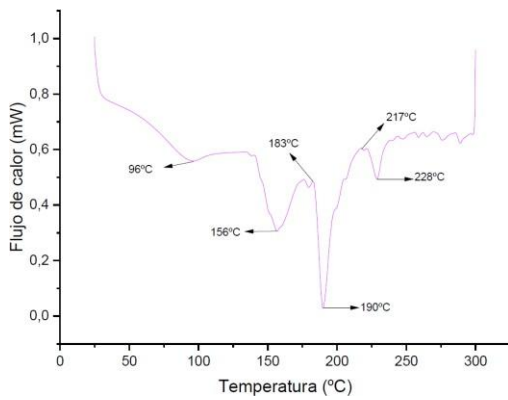


Figura 34 Hidrogel con naocelulosa y Metabolito *Lactobacillus platarum* (IBUN-041-39)

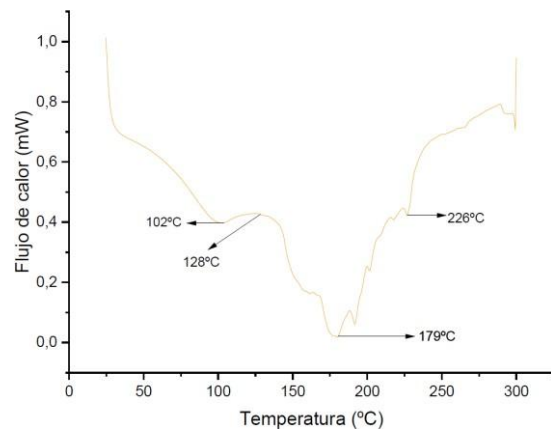


Figura 35 Hidrogel con nanocelulosa y metabolito de *Weissella cibaria* (IBUN-090-03684)

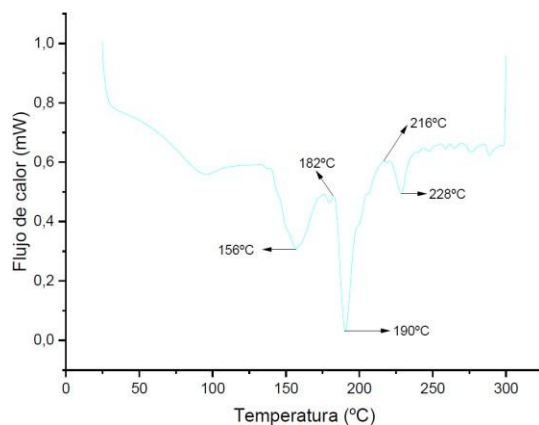


Figura 36 Hidrogel con nanocelulosa y Metabolito *Lactobacillus platarum* (IBUN-090-03774)

10.5.6 Análisis infrarrojo FTIR hidrogel

10.5.6.1 Hidrogel con nanocelulosa y fertilizantes

En estas bandas se evidencia que el hidrogel con nanocelulosa tiene mas interacción de los grupos funcionales con muchos picos entre 1700 a 1000 y a media de que se aumentaba la concentración de fertilizantes la interacción de los grupos funcionales disminuye. Para el hidrogel con nanocelulosa y fertilizante al 15% se ven muy pocos picos.

En estudios recientes se ha observado que la incorporación de fertilizante NPK en hidrogel polímeros modifica notablemente las bandas del FTIR correspondientes a grupos funcionales del gel. Por ejemplo, el estudio de Winarti y colaboradores prepararon un hidrogel a base de nanocelulosa (nanas de mazorca de maíz) cargado con 0, 5, 10 y 15% de NPK. En sus espectros FTIR la adición de NPK provoca desplazamientos y estiramientos en las bandas características de la celulosa: se observan cambios en la vibración de los enlaces C–O de la cadena de celulosa (alrededor de $1050\text{--}900\text{ cm}^{-1}$), C–H ($\sim 2800\text{ cm}^{-1}$) y O–H ($\sim 3100\text{ cm}^{-1}$) atribuibles a nueva formación de enlaces por interacción con el fertilizante (Winarti et al. 2021). Además, aparecen picos nuevos ligados al fertilizante mismo, como una banda cerca de 1365 cm^{-1} (deformación del NH_4^+ del fertilizante) y $\sim 1058\text{ cm}^{-1}$ (vibración alifática P–O–C del fosfato) que indican la presencia de NPK incorporado en la matriz (Winarti et al. 2021). Estos autores concluyen que los iones del NPK entran en enlaces por puentes de

hidrógeno o ion-dipolo con la celulosa, alterando las frecuencias de vibración originales. En su gráfico comparativo de 0–15% NPK se aprecia además cierta atenuación de algunas bandas del hidrogel base al aumentar el fertilizante.

Estos hallazgos concuerdan con otros reportes sobre hidrogeles reforzados con nutrientes. Chamorro y colaboradores estudiaron hidrogeles de almidón entrecruzado con ácido cítrico y observan un efecto claro de la sal de KCl (como fuente de K^+ en NPK) sobre el espectro FTIR (Chamorro, et al., 2024), en su caso, la banda del carbono–oxígeno de éster (~ 1710 – 1720 cm^{-1}) disminuye notablemente al pasar de 0.5% a 1.0% de KCl en el gel, señalando que el fertilizante reduce la eficacia del entrecruzamiento. En conjunto, estas investigaciones muestran un patrón consistente: hidrogeles con solo matriz polimérica (CNF o almidón) exhiben más bandas intensas de grupos funcionales, mientras que al agregar NPK (o sus sales) se observan nuevas bandas del fertilizante y, simultáneamente, varias bandas del gel base disminuyen en intensidad o incluso se funden con las nuevas. Este comportamiento coincide con el espectro señalado, donde el hidrogel de CNF puro presenta varias interacciones (bandas) claras, mientras que al cargar NPK al 5%, 10%, 15% las bandas originales se atenúan y reducen en número.

10.5.6.2 Hidrogeles con nanocelulosa y metabolitos de las BAL

En estudios se muestra la interacción de los grupos funcionales de los grupos funcionales de los metabolitoabolitos de las BAL los picos de carbonilo de los ácidos puros estaban a 1706 cm^{-1} (ác. acético) y 1721 cm^{-1} (ác. láctico), pero al incorporar estos ácidos al hidrogel dichas bandas se desplazaron hasta $\sim 1747\text{ cm}^{-1}$, indicando interacción entre el ácido y la matriz gelatinosa.

En los espectros actuales de los hidrogeles con nanocelulosa observamos picos principales en regiones similares: una banda ancha de O–H/N–H alrededor de 3240 – 3260 cm^{-1} (por ejemplo, Nanocelulosa $\sim 3256\text{ cm}^{-1}$; Metabolito *Weissella cibaria* (IBUN-090-03684) $\sim 3193\text{ cm}^{-1}$) y bandas de estiramiento C–H cerca de 2930 cm^{-1} (Nanocelulosa ~ 2935 ; Metabolito *Weissella cibaria* (IBUN-090-03684) $\sim 2939\text{ cm}^{-1}$). Es notable que la banda O–H/N–H se desplaza a menor frecuencia en presencia de metabolitos (especialmente en Metabolito

Weisella cibaria (IBUN-090-03684), lo cual sugiere un aumento de enlaces por puente de hidrógeno entre la nanocelulosa y componentes polares de los metabolitoabolitos (por ejemplo ácidos orgánicos), análogo a cómo Rodrigues interpretó los desplazamientos en la banda C=O por interacción matriz-ácido. En la región carbonílica ($\sim 1750\text{ cm}^{-1}$) todas las muestras muestran picos muy parecidos (Nanocelulosa ~ 1753 ; Metabolito *Lactobacillus plantarum* (IBUN-041-39) ~ 1751 ; Metabolito *Weisella cibaria* (IBUN-041-39) ~ 1754 ; Metabolito (IBUN-041-39) $\sim 1754\text{ cm}^{-1}$) con diferencias mínimas, lo que indica que no se formaron enlaces covalentes nuevos fuertes. A diferencia de Moreira et al., 2018 donde la adición de ácido provocó un corrimiento apreciable hasta 1747 cm^{-1} , aquí la banda de C=O permanece esencialmente en la misma posición, sugiriendo interacciones mucho más débiles en esa región. Finalmente, las bandas de amida I ($\sim 1660\text{ cm}^{-1}$) y II ($\sim 1544\text{ cm}^{-1}$) permanecen prácticamente inalteradas, con sólo un ligero desplazamiento en Metabolito *Weisella cibaria* (IBUN-041-39) (amide I = 1659 vs. Nanocelulosa = 1664 cm^{-1}), lo cual indica perturbaciones estructurales menores. En conjunto, estos resultados sugieren que los metabolitoabolitos interactúan principalmente mediante puentes de hidrógeno con la nanocelulosa (reflejado en el corrimiento de la banda O-H) sin alterar sustancialmente los grupos carbonilo del gel, coherente con las interacciones ácido-matriz descritas por Moreira et al. (2018).

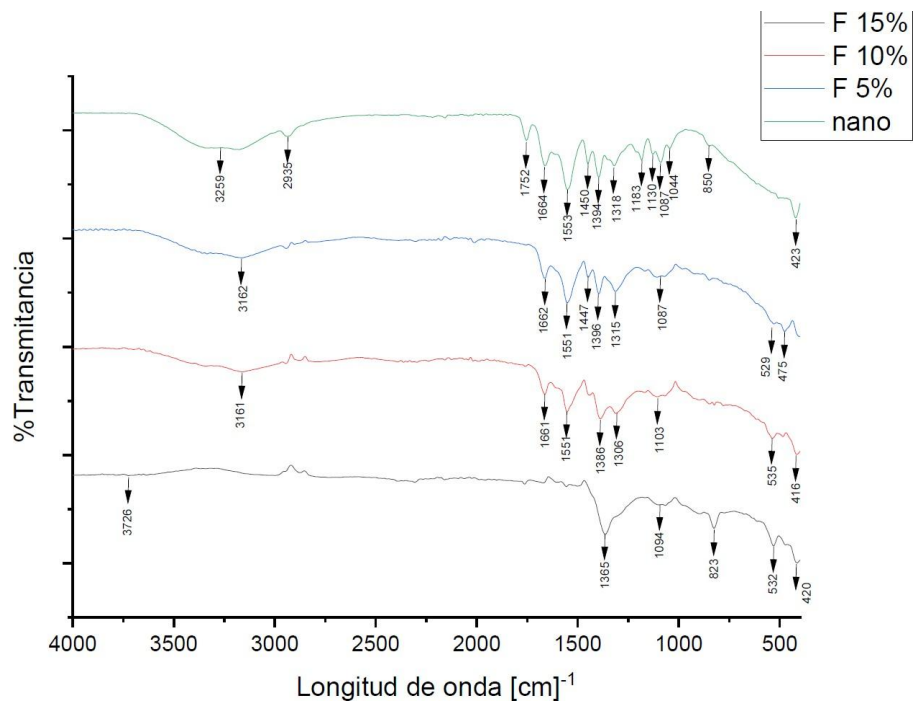


Figura 37 FTIR hidrogel con nanocelulosa y fertilizantes

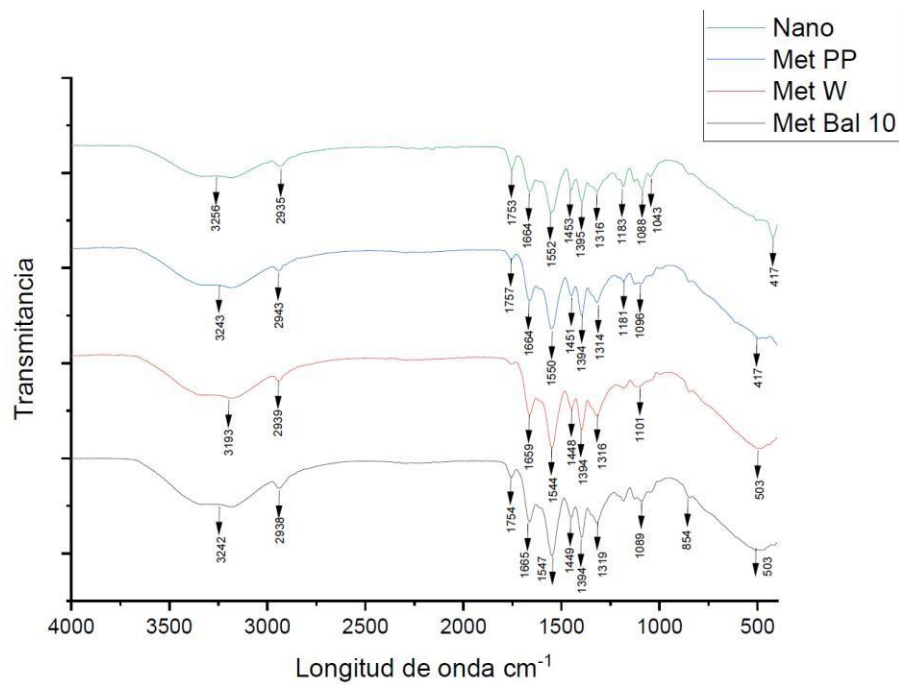


Figura 38 FTIR hidrogel con nanocelulosa y metabolitos

10.5.7 Medición de viabilidad de la incorporación de BAL en hidrogeles con nanocelulosa

La incorporación de BAL en los hidrogeles resultó exitosa, evidenciada por la alta viabilidad inicial registrada antes de su incorporación: para *L. plantarum* (IBUN-090-03774) fue de $1,93 \times 10^9$ UFC/g, para *L. plantarum* (IBUN-041-39) de $1,62 \times 10^9$ UFC/g y para *W. cibaria* (IBUN-090-03684) de $1,50 \times 10^9$ UFC/g. Las bacterias se integraron a los hidrogeles posteriormente a la polimerización, mediante inmersión en una solución salina. Tras una semana de almacenamiento, se observó una reducción significativa en la viabilidad: para *L. plantarum* (IBUN-090-03774) fue de $2,49 \times 10^6$ UFC/g, para *L. plantarum* (IBUN-041-39) de $4,17 \times 10^5$ UFC/g y para *W. cibaria* (IBUN-090-03684) de $7,13 \times 10^4$ UFC/g, lo que representa una disminución de 3 a 4 órdenes de magnitud.

Estos resultados son consistentes con lo reportado en la literatura, donde se documentan pérdidas graduales de viabilidad de probióticos encapsulados en matrices poliméricas conforme avanza el tiempo (Ilomuanya et al., 2024). De manera similar, Sun y Wicker (2021) informaron que *Lactobacillus casei* encapsulado en hidrogeles de pectina mantuvo su viabilidad durante dos semanas a 4 °C, con descensos notables hacia la cuarta semana. En contraste, formulaciones como el hidrogel “vivo” ProGel, a base de gelatina, han demostrado una mayor eficiencia, preservando hasta el 70% de las células de *L. plantarum* viables tras una semana de almacenamiento (Tao et al., 2024). En conjunto, estos hallazgos destacan que tanto la naturaleza de la matriz polimérica como el método de incorporación de las BAL son factores determinantes en su supervivencia. Aun así, los niveles de viabilidad obtenidos en este estudio ($\sim 10^6$ UFC/g después de una semana) resultan adecuados para aplicaciones agrícolas y se encuentran en el rango considerado funcional en investigaciones previas sobre encapsulación de BAL en hidrogeles. A continuación en la figura 12 se puede ver el crecimiento de las colonias de las BAL en medio MRS.

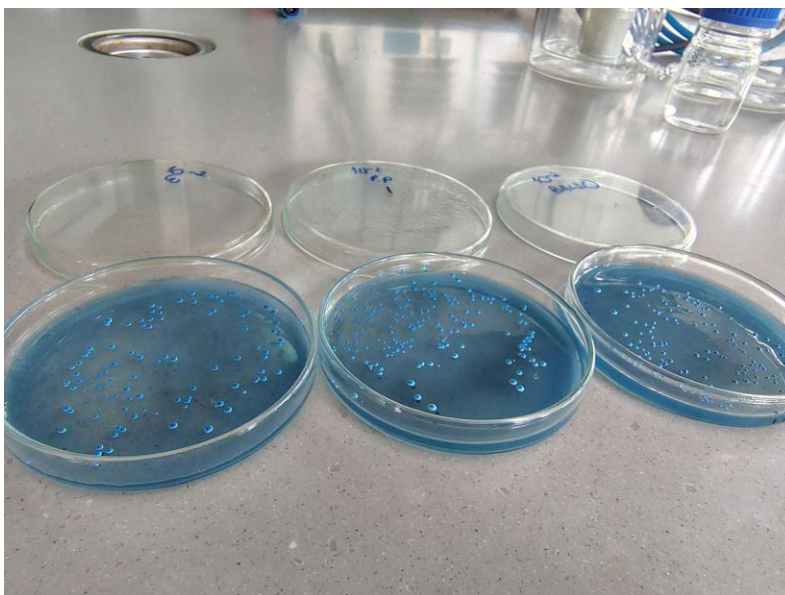


Figura 39 Viabilidad de las bacterias en la matriz de los hidrogeles

10. Conclusiones

- Se logró obtener nanofibras de celulosa a partir de la cutícula de *Aloe vera* con un rendimiento del 7,84% respecto a la fibra inicial, confirmándose mediante SEM la morfología nanométrica ($24 \pm 6,8$ nm) y mediante FTIR la presencia de grupos característicos de la celulosa. Estos resultados validan el potencial del residuo agroindustrial como fuente de nanocelulosa, aportando una alternativa sostenible y renovable para reforzar matrices poliméricas.
- La incorporación de fertilizante NPK en concentraciones del 5, 10 y 15% modificó de manera significativa las propiedades de los hidrogeles. A medida que aumentó la proporción de fertilizante, la capacidad de hinchamiento y la retención de agua disminuyeron, lo cual se atribuye a la ocupación de sitios activos de la red polimérica y a la interferencia con los grupos funcionales. En contraste, los hidrogeles presentaron mayor rigidez y resistencia a la compresión, sugiriendo un refuerzo estructural asociado a la interacción entre los iones del fertilizante y la matriz acrílica reforzada con nanocelulosa.
- Los hidrogeles con metabolitos de bacterias ácido lácticas mostraron comportamientos diferenciados según la cepa. Aunque no se observaron cambios significativos en la capacidad de retención de agua, los análisis de hinchamiento y propiedades mecánicas sugieren que la presencia de ácidos orgánicos (principalmente

Conclusiones

- ácido láctico) puede modificar la red polimérica y generar interacciones específicas con los grupos funcionales del hidrogel. Estos hallazgos constituyen un primer acercamiento a la incorporación de metabolitos microbianos en sistemas hidrogeles agrícolas, una estrategia aún no reportada en la literatura.
- La incorporación de *Lactobacillus plantarum* y *Weissella cibaria* fue viable mediante metodologías de inmersión post-polimerización, se conservó la viabilidad bacteriana durante 8 días de almacenamiento. Los hidrogeles con BAL presentaron una mayor capacidad de hinchamiento respecto al control, lo que sugiere que la presencia celular y los productos de excreción presentes en el botón celular incorporado pudieron inducir modificaciones en la estructura de la red. Este resultado confirma que los hidrogeles pueden actuar como matrices protectoras y funcionales para la inmovilización de microorganismos en aplicaciones agrícolas.
- En conjunto, los resultados demuestran que la incorporación de fertilizantes, metabolitos y bacterias ácido lácticas en hidrogeles reforzados con nanocelulosa permite modular de forma diferenciada las propiedades físicas, químicas y funcionales del material. Mientras los fertilizantes aumentan la resistencia mecánica pero reducen la capacidad de retención hídrica, las BAL favorecen el hinchamiento y abren la puerta a la biofuncionalidad agrícola. De este modo, se valida la hipótesis planteada y se sientan bases para el diseño de hidrogeles multifuncionales aplicables en agricultura sostenible.

11 Bibliografía

- Aarstad, O., Heggset, E. B., Pedersen, I. S., Bjørnøy, S. H., Syverud, K., & Strand, B. L. (2017). Mechanical properties of composite hydrogels of alginate and cellulose nanofibrils. *Polymers*, 9(8), 378. <https://doi.org/10.1016/j.iswcr.2019.05.001>
- Abdallah, A. M. (2019). The effect of hydrogel particle size on water retention properties and availability under water stress. *International Soil and Water Conservation Research*, 7(3), 275–285.
- Abdelghafar, R., Abdelfattah, A., & Mostafa, H. (2024). Effect of super absorbent hydrogel on hydro-physical properties of soil under deficit irrigation. *Scientific Reports*, 14(1), 7655. <https://doi.org/10.1038/s41598-024-57786-5>
- Akhter, J., Mahmood, K., Malik, K. A., Mardan, A., Ahmad, M., & Iqbal, M. M. (2004). Effects of hydrogel amendment on water storage of sandy loam and loam soils and seedling growth of barley, wheat and chickpea. *Plant, Soil and Environment*, 50(10), 463–469. <https://doi.org/10.17221/4059-PSE>
- Arenas-Bautista, M.C., Vélez-Sánchez, J.E., & Camacho-Tamayo, J.H. (2012). Evaluation of two drip irrigation systems on yield and fruit quality of pear (*Pyrus communis* L.) cv. Triunfo de Viena. *Acta Agronómica*, 61(1), 1–9. http://www.scielo.org.co/scielo.php?pid=S012028122012000100001&script=sci_arttext
- Barón Cortés, A., Barrera Ramírez, I. X., Boada Eslava, L. F., & Rodríguez Niño, G. (2007). Evaluation of hydrogels for agroforestry applications. *Ingeniería e Investigación*, 27(3), 35–44. http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S01205609200700030004
- Barón Esparza, M. A., & Peña Sánchez, P. C. (2018). *Diseño de un hidrogel para el encapsulamiento de un agroquímico* (Trabajo de grado de pregrado en Ingeniería Química). Universidad de los Andes, Bogotá, Colombia.
- Bashir, S., Omar, F. S., Hina, M., Numan, A., Iqbal, J., Ramesh, S., & Ramesh, K. (2020). Synthesis and characterization of hybrid poly(N,N-dimethylacrylamide) composite hydrogel electrolytes and their performance in supercapacitors.

Electrochimica Acta, 332, 135438. <https://doi.org/10.1016/j.electacta.2019.135438>

- Beltrán, G.G., & Sandí, A. M. (2011). Recommendations to obtain reliable compressive strength results of concrete cylinders. *Métodos y Materiales*, 1, 4–13. <https://doi.org/10.15517/mym.v1i1.8390>
- Bortolin, A., Aouada, F.A., Mattoso, L.H. C., & Ribeiro, C. (2013). Nanocomposite PAAm/methyl cellulose/montmorillonite hydrogel: Evidence of synergistic effects for slow release of fertilizers. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 61(31), 7431–7439. <https://doi.org/10.1021/jf401273n>
- Calicioglu, O., Flammini, A., Bracco, S., Bellù, L., & Sims, R. (2019). The future challenges of food and agriculture: An integrated analysis of trends and solutions. *Sustainability*, 11(1), 222. <https://doi.org/10.3390/su11010222>
- Chamorro, A. F., Palencia, M., & Arrieta, Á. A. (2024). Development of high-efficiency fertilizer by hydrogels obtained from cassava starch and citric acid for slow release of ammonium and potassium. *Gels*, 10(7), 434. <https://doi.org/10.3390/gels10070434>
- Cheng, M., Wang, H., Fan, J., Zhang, S., Wang, Y., Li, Y., & Zhang, F. (2021). Water productivity and seed cotton yield in response to deficit irrigation: A global meta-analysis. *Agricultural Water Management*, 255, 107027. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2021.107027>
- Cisneros Jayo, G. F., & Nonones Vásquez, N. D. (2024). Impact of the use of fertilizers on agricultural soils: A systematic review of the scientific literature. En 22nd LACCEI International Multi-Conference for Engineering, Education, and Technology: Sustainable Engineering for a Diverse, Equitable, and Inclusive Future at the Service of Education, Research, and Industry for a Society 5.0 (pp. 1-2). San José, Costa Rica. <https://doi.org/10.18687/LACCEI2024.1.1.391>
- Cun González, R., Puig Estrada, O., Morales Gómez, C., & Duarte Díaz, C. (2011). Evaluación de la uniformidad del riego por goteo en condiciones de casas de cultivo en explotación. *Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias*, 20(1), 36-39.
- Das, S.K., & Ghosh, G.K. (2022). Hydrogel–biochar composite for agricultural applications and controlled release fertilizer. *Energy*, 242, 122977. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2021.122977>

- Dissanayake, W., Najaf Zadeh, H., Nazmi, A. R., Stevens, C., Huber, T., & Abhayawardhana, P. L. (2024). Exploring the potential of 3D-printable agar–urea hydrogels for nitrogen delivery in agriculture. *Polysaccharides*, 5(1), 49–66. <https://doi.org/10.3390/polysaccharides5010004>
- Dorochesi, F., Barrientos-Sanhueza, C., Díaz-Barrera, Á., & Cuneo, I. F. (2023). Enhancing soil resilience: Bacterial alginate hydrogel vs. algal alginate. *Gels*, 9(12), 988. <https://doi.org/10.3390/gels9120988>
- Dwivedi, E., & Singh, L. K. (2022). Characterization of lignin from sugarcane bagasse by Raman spectroscopy and FTIR. *International Journal of Health Sciences*, 6(S1), 12260–12268. <https://doi.org/10.53730/ijhs.v6nS1.8065>
- El-Rehim, H.A., Hegazy, E.S.A., & El-Mohdy, H.A. (2004). Radiation synthesis of hydrogels to enhance sandy soils water retention and increase plant performance. *Journal of Applied Polymer Science*, 93(3), 1360–1371. <https://doi.org/10.1002/app.20571>
- Faraj, I. S., & Abid, M. B. (2020). Water movement through soil under drip irrigation using different hydraulic soil models. *Journal of Engineering*, 26(11), 43–61. <https://doi.org/10.31026/j.eng.2020.11.03>
- Feng, Y., Taraban, M., & Yu, Y. B. (2012). The effect of ionic strength on the mechanical, structural and transport properties of peptide hydrogels. *Soft Matter*, 8(46), 11723–11731. <https://doi.org/10.1039/C2SM26572A>
- França, D., Siqueira, G., Nyström, G., Clemens, F., Souza, C. F., & Faez, R. (2022). Charged-cellulose nanofibrils as a nutrient carrier in biodegradable polymers for enhanced efficiency fertilizers. *Carbohydrate Polymers*, 296, 119934. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2022.119934>
- Ghobashy, M. M., Amin, M. A., Mustafa, A. E., El-Diehy, M. A., El-Damhougy, B. K., & Nady, N. (2024). Synthesis and application of a multifunctional poly (vinyl pyrrolidone)-based superabsorbent hydrogel for controlled fertilizer release and enhanced water retention in drought-stressed *Pisum sativum* plants. *Scientific Reports*, 14(1), 27734. <https://doi.org/10.1038/s41598-024-76255-7>
- Ghobashy, M.M., Amin, M.A., Ismail, M.A., Nowwar, A.I., El-Diehy, M.A., & Gayed, H. M. (2023). Radiation cross-linked ultra-absorbent hydrogel to rationalize irrigation water and fertilizer for maize planting in drought conditions. *International*

Journal of Biological Macromolecules, 252, 126467.
<https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2023.126467>

- Gimpel, H., Graf-Drasch, V., Hawlitschek, F., & Neumeier, K. (2021). Smart and sustainable irrigation system design: A case study. *Journal of Cleaner Production*, 315, 128048. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.128048>
- Gómez-Maldonado, D., García, A., García-Astrain, C., & Retegi, A. (2024). Modifying soluble NPK release with hydrophobized nanocellulose-based hydrogels. *Environmental Science: Nano*, 11(1), 152–165. <https://doi.org/10.1039/D3EN00306J>
- Góngora-Duarte, A. F., & Trujillo-González, J. M. (2025). State of the art of agricultural water footprint in Colombia. *Ingeniería y Competitividad*, 27(2), e-30214581. <https://doi.org/10.25100/iyc.v27i2.14581>
- Guancha-Chalapud, M. A., Serna-Cock, L., & Tirado, D. F. (2022). Aloe vera rind valorization to improve swelling capacity of commercial acrylic hydrogels. *Fibers*, 10(9), 73. <https://doi.org/10.3390/fib10090073>
- Guimarães, A., Santiago, A., Teixeira, J. A., Venâncio, A., & Abrunhosa, L. (2018). Anti-aflatoxic effect of organic acids produced by *Lactobacillus plantarum*. *International Journal of Food Microbiology*, 264, 31–38. <https://doi.org/10.1016/j.ijfoodmicro.2017.10.025>
- Habibi, Y., Aouadi, S., Raquez, J.M., & Dubois, P. (2013). Effects of interfacial stereocomplexation in cellulose nanocrystal-filled polylactide nanocomposites. *Cellulose*, 20(6), 2877-2885. <https://doi.org/10.1007/s10570-013-0058-5>
- Hamid, B., Zaman, M., Farooq, S., Fatima, S., Sayyed, R.Z., Baba, Z.A., & Suriani, N. L. (2021). Bacterial plant biostimulants: A sustainable way toward improving crop productivity. *Sustainability*, 13(5), 2856. <https://doi.org/10.3390/su13052856>
- Hernández Hernández, H. (2017). Nanopartículas de cobre en hidrogeles de quitosán–PVA para la inducción de tolerancia a estrés salino, capacidad antioxidante y expresión génica en *Solanum lycopersicum* L. (Tesis doctoral). Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro, México.
- Howell, TA (2001). Enhancing Water Use Efficiency in Irrigated Agriculture. *Revista de Agronomía*, 93 (2), 281-289. <https://doi.org/10.2134/agronj2001.932281x>
- Huang, Y., Guan, Q., Wu, Y., Zheng, C., Zhong, L., Xie, W., Chen, J., Huang, J.,

- Wang, Q., & Zheng, Y. (2025). Microencapsulation of *Lactiplantibacillus plantarum* BXM2 in bamboo shoot-derived nanocellulose hydrogel. *Gels*, 11(6), 465. <https://doi.org/10.3390/gels11060465>
- Iliasov, L., Shibaev, A., Panova, I., Kushchev, P., Philippova, O., & Yaroslavov, A. (2023). Weakly cross-linked anionic copolymers: Swelling kinetics and water retention properties of hydrogels. *Polymers*, 15(15), 3244. <https://doi.org/10.3390/polym15153244>
 - Ilomuanya, M.O., Ogundemuren, D.A., Bassey, P.O.O., Oseni, B.A., Kola-Mustapha, A. T., Tsamos, D., Tsamis, A., Tsouknidas, A.E., & Amenaghawon, A.N. (2024). Enhanced viability of *Lactobacillus* spp. via encapsulation in hyaluronan/PVA hybrid electrospun composites for vaginal drug delivery. *Future Journal of Pharmaceutical Sciences*, 10(1), 105. <https://doi.org/10.1186/s43094-024-00675-5>
 - Jaffar, N.S., Jawan, R., & Chong, K.P.(2023). The potential of lactic acid bacteria in mediating the control of plant diseases and plant growth stimulation in crop production-A mini review. *Frontiers in Plant Science*, 13, 1047945. <https://doi.org/10.3389/fpls.2022.1047945>
 - Jaini, M. F. M., Roslan, N. F., Yusof, M. T., Saidi, N. B., Ramli, N., Zainudin, N. A. M., & Hashim, A. M. (2022). Investigating the potential of endophytic lactic acid bacteria isolated from papaya seeds as plant growth promoter and antifungal agent. *Pertanika Journal of Tropical Agricultural Science*, 45(1), 207–233. <https://doi.org/10.47836/pjtas.45.1.01>
 - Juárez Vidal, O., García Hernández, E., & Santamaría Juárez, C. (2022). Formulación de biopelículas a base de celulosa de cáscara de *Aloe vera* y carboximetilcelulosa. *Revista Ingeniantes*, 9(2, Vol. 2), 49–56. <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.22423.69288/1>
 - Karadağ, E., Saraydin, D., Çaldıran, Y., & Güven, O. (2000). Swelling studies of copolymeric acrylamide/crotonic acid hydrogels as carriers for agricultural uses. *Polymers for Advanced Technologies*, 11(2), 59-68. [https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1099-1581\(200002\)11:2<59::AID-PAT937>3.0.CO;2-Z](https://doi.org/10.1002/(SICI)1099-1581(200002)11:2<59::AID-PAT937>3.0.CO;2-Z)
 - Karbowski, M., Gałek, M., & Szydłowska, A. (2022). The influence of the degree of

thermal inactivation of probiotic lactic acid bacteria and their postbiotics on aggregation and adhesion inhibition of selected pathogens. *Pathogens*, *11*, 1260. <https://doi.org/10.3390/pathogens11111260>

- Kareem, S.A., Dere, I., Gungula, D.T., Andrew, F. P., Saddiq, A.M., Adebayo, E. F., Tame, V.T., Kefas, H.M., Joseph, J., & Patrick, D.O. (2021). Synthesis and Characterization of slow-release fertilizer hydrogel based on hydroxy propyl methyl cellulose, polyvinyl alcohol, glycerol and blended paper. *Gels*, *7*(4), 262. <https://doi.org/10.3390/gels7040262>
- Kratochvílová, R., Krácalík, M., Smilková, M., Sedláček, P., Pekař, M., Bradt, E., Smilek, J., Závodská, P., & Klučáková, M. (2023). Functional hydrogels for agricultural application. *Gels*, *9*(7), 590. <https://doi.org/10.3390/gels9070590>
- Lan, Y., Xie, Z., Wang, T., Lu, J., Li, P. y Jiang, J. (2023). Characterization of Cross-Linking in Guar Gum Hydrogels via the Analysis of Thermal Decomposition Behavior and Water Uptake Kinetics. *Sustainability*, *15* (12), 9778. <https://doi.org/10.3390/su15129778>
- Laredo-Alcalá, E.I., Salinas-Gutiérrez, A., Chávez-Martínez, M.L., Meléndez-Rentería, N.P., Barrera-Martínez, C.L., Salinas-Jasso, T.A., & De León-Zapata, M.Á. (2023). Efecto de hidrogeles biodegradables sobre la retención de humedad y la germinación de alfalfa. *Ecosistemas y Recursos Agropecuarios*, *10*(2). <https://doi.org/10.19136/era.a10n2.3133>
- Li, Y., Tang, X., Liu, Y., Chen, X., Wang, L., Su, Y., ... & Wu, P. (2025). Advanced wound healing with chitosan hydrogels incorporating metabolites from whale-derived *Lactiplantibacillus plantarum* HJ-S2. *Frontiers in Materials*, *12*, 1573222. <https://doi.org/10.3389/fmats.2025.1573222>
- Madramootoo, C.A., Jain, A., Oliva, C., Wang, Y., & Abbasi, N.A. (2023). Tomato growth and yield in soil amended with used paper-based hydrogels. *Scientia Horticulturae*, *310*, 111752. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2022.111752>
- Mahon, R., Balogun, Y., Oluyemi, G., & Njuguna, J. (2020). Swelling performance of sodium polyacrylate and poly (acrylamide-co-acrylic acid) potassium salt. *SN Applied Sciences*, *2*(1), 117. <https://doi.org/10.1007/s42452-019-1874-5>
- Mansouri, H., Ait Said, H., Noukrati, H., Oukarroum, A., Ben Youcef, H., &

- Perreault, F. (2023). Advances in controlled release fertilizers: Cost-effective coating techniques and smart stimuli-responsive hydrogels. *Advanced Sustainable Systems*, 7(9), 2300149. <https://doi.org/10.1002/adsu.202300149>
- Martínez Agut, M. P. (2015). *Objetivos de desarrollo sostenible (ODS, 2015-2030) y Agenda de Desarrollo post-2015 a partir de los objetivos de desarrollo del milenio (2000-2015)*. *Quaderns d'animació i educació social*, 21. https://quadernsanimacio.net/ANTERIORES/veintiuno/index_htm_files/desarrollo.sostenible.pdf
 - Milampure, C., Jawale, D., Shingate, S., Mahala, P., Kulshrestha, U., Ghosh, S. B., & Bandyopadhyay-Ghosh, S. (2024). Effect of salt addition towards enhancement of water retention capacity of hydrogel. *Materials Today: Proceedings*, 79, 05 072. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2024.05.072>
 - Monar Haro, C. A. (2024). *Uso de hidrogel para la retención del agua en suelos áridos* (Trabajo de titulación, Universidad Técnica de Babahoyo, Ecuador). <https://dspace.utb.edu.ec/server/api/core/bitstreams/a2e90b7c-94dd-421f-942e-d10abf3c81ff/content>
 - Moreira, T. F. M., de Oliveira, A., Vieira da Silva, T. B., Rodrigues dos Santos, A. D. R., Gonçalves, O. H., da Silva Gonzalez, R., & Droval, A. A. (2019). Hydrogels based on gelatin: Effect of lactic and acetic acids on microstructural modifications, water absorption mechanisms and antibacterial activity. *LWT — Food Science and Technology*, 103, 69–77. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2018.12.040>
 - Omidian, H., Akhzarmehr, A., & Chowdhury, SD (2024). Avances en hidrogeles superabsorbentes de celulosa: Soluciones sostenibles para diversas industrias. *Gels* 2024, 10, 174. <https://doi.org/10.3390/gels10030174>
 - Ordóñez, J. I. (2020). El agua y el sector rural en Colombia. *Revista de Ingeniería*, (49), 10-17. <https://doi.org/10.16924/revinge.49.3>
 - Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura (26 de febrero de 2024). *Water for prosperity and peace*. <https://www.unesco.org/reports/wwdr/en/2024/>
 - Pedroza-Sandoval, A., Yáñez-Chávez, L. G., Sánchez-Cohen, I., Samaniego-Gaxiola, J. A., & Trejo-Calzada, R. (2017). Hydrogel, biocompost and its effect on

photosynthetic activity and production of forage maize plants (*Zea mays* L.). *Acta Agronómica*, 66(1), 63-68. <https://doi.org/10.15446/acag.v66n1.50868>

- Perez, J.J., Francois, N. J., Maroniche, G. A., Borrajo, M. P., Pereyra, M. A., & Creus, C. M. (2018). A novel, green, low-cost chitosan-starch hydrogel as potential delivery system for plant growth-promoting bacteria. *Carbohydrate Polymers*, 202, 409-417. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2018.07.084>
- Pontius, K., Semenova, D., Silina, Y. E., Gernaey, K. V., & Junicke, H. (2020). Automated electrochemical glucose biosensor platform as an efficient tool toward on-line fermentation monitoring: novel application approaches and insights. *Frontiers in Bioengineering and Biotechnology*, 8, 436. <https://doi.org/10.3389/fbioe.2020.00436>
- Prz, S. (2011). *Termodinámica*. Cengel & Boles. 7ma edición. McGraw-Hill.
- Qureshi, N., Ordóñez Romero, C. L., Velázquez Benítez, A., Kolokoltsev, O., (2020). Introducción a la microscopía y nanoscopía a frecuencias GHz y THz. *Mundo Nano. Revista Interdisciplinaria en Nanociencias y Nanotecnología*, 13(24), 1e–13e. <https://doi.org/10.22201/ceiich.24485691e.2020.24.69620>
- Raman, J., Kim, J. S., Choi, K. R., Eun, H., Yang, D., Ko, Y. J., & Kim, S. J. (2022). Application of lactic acid bacteria (LAB) in sustainable agriculture: Advantages and limitations. *International Journal of Molecular Sciences*, 23(14), 7784. <https://doi.org/10.3390/ijms23147784>
- Ramírez, A., Benítez, J. L., Rojas de Astudillo, L., & Rojas de Gáscue, B. (2016). Materiales polímeros de tipo hidrogeles: Revisión sobre su caracterización mediante FTIR, DSC, MEB y MET. *Revista Latinoamericana de Metalurgia y Materiales*, 36(2), 108–130.
- Rivera Fernández, R. D., & Gallo, F. M. (2018). Absorción de agua de hidrogel de uso agrícola y su humedecimiento de tres tipos de suelo. *Revista de la Facultad de Ciencias Agrarias. Universidad Nacional de Cuyo*, 50(2), 15-21. <https://revistas.uncu.edu.ar/ojs3/index.php/RFCFA/article/view/2810>
- Rosero-Chasoy, G., Pabon, O., Valencia-Hernández, L., & Serna, L., (2024). Kinetic analysis of lactic acid fermentation by using an extended logistic model. *Process Biochemistry*, (144), 1-5. <https://doi.org/10.1016/j.procbio.2024.05.002>
- Sacco, P., Piazza, F., Marsich, E., Abrami, M., Grassi, M., & Donati, I. (2024). Ionic

strength impacts the physical properties of agarose hydrogels. *Gels*, 10(2), 94. <https://doi.org/10.3390/gels10020094>

- Serna-Cock, L., & Guancha-Chalapud, M. A. (2017). Natural fibers for hydrogels production and their applications in agriculture. *Acta Agronómica*, 66(4), 495-505. <https://doi.org/10.15446/acag.v66n4.56875>
- Shi, A. M. (2019). The effect of hydrogel particle size on water retention properties and availability under water stress. *International Soil and Water Conservation Research*, 7(3), 275-285. <https://doi.org/10.1016/j.iswcr.2019.05.001>
- Sun, Q., & Wicker, L. (2021). Hydrogel encapsulation of lactobacillus casei by block charge modified pectin and improved gastric and storage stability. *Foods*, 10(6), 1337. <https://doi.org/10.3390/foods10061337>
- Tao, S., Zhang, S., Wei, K., Maniura-Weber, K., Li, Z., & Ren, Q. (2024). An injectable living hydrogel with embedded probiotics as a novel strategy for combating multifaceted pathogen wound infections. *Advanced Healthcare Materials*, 13(27), e2400921. <https://doi.org/10.1002/adhm.202400921>
- Trivedi, J., & Chourasia, A. (2023). Sodium salt of partially carboxymethylated sodium alginate-graft-poly(acrylonitrile): II. Superabsorbency, salt sensitivity and swelling kinetics of hydrogel H-Na-PCMSA-g-PAN. *Gels*, 9(5), 407. <https://doi.org/10.3390/gels9050407>
- Tyliczszak, B., Polaczek, J., & Pielichowski, K. (2009). PAA-based hybrid organic-inorganic fertilizers with controlled release. *Polish Journal of Environmental Studies*, 18(3), 475-479.
- Vörösmarty, C. J., McIntyre, P. B., Gessner, M. O., Dudgeon, D., Prusevich, A., Green, P., Glidden, S., Bunn, S. E., Sullivan, C. A., Reidy Liermann, C., & Davies, P. M. (2010). Global threats to human water security and river biodiversity. *Nature*, 467(7315), 555–561. <https://doi.org/10.1038/nature09440>
- Winarti, C., Sasmitaloka, K. S., & Arif, A. B. (2021, febrero). Effect of NPK fertilizer incorporation on the characteristics of nanocellulose-based hydrogel. In *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science* (Vol. 648, No. 1, 012180). <https://doi.org/10.1088/1755-1315/648/1/012180>

- World Bank. (2024, septiembre 19). *Agriculture and food overview*. Recuperado el 5 de febrero de 2026, de <https://worldbank.org/en/topic/agriculture/overview>
- Wu, X., Sun, L., Qin, B., Wang, T., Wang, Y., Zhao, J., & Fu, Y. (2024). Novel antimicrobial polysaccharide hydrogel with fertilizer slow-release function for promoting *Sesamum indicum* L. seeds germination. *Polymer*, 311, 127491. <https://doi.org/10.1016/j.polymer.2024.127491>
- Yu, A. C., Chen, H., Chan, D., Agmon, G., Stapleton, L. M., Sevit, A. M., & Appel, E. A. (2016). Scalable manufacturing of biomimetic moldable hydrogels for industrial applications. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 113(50), 14255–14260. <https://doi.org/10.1073/pnas.1618156113>
- Zhang, Z., Abidi, N., Lucia, L., Chabi, S., Denny, C.T., Parajuli, P. y Rumi, S.S. (2023). Hidrogeles superabsorbentes de celulosa/nanocelulosa como plataforma sostenible para aplicaciones de materiales: una mini-revisión y perspectiva. *Carbohydrate Polymers*, 299, 120140. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2022.120140>
- Zhou, D., Jiang, Z., Pang, Q., Zhu, Y., Wang, Q. y Qi, Q. (2019). Edición genómica fluida asistida por CRISPR/Cas9 en *Lactobacillus plantarum* y su aplicación en la producción de N-acetilglucosamina. *Microbiología Aplicada y Ambiental*, 85 (21), e01367-19. <https://doi.org/10.1128/AEM.01367-19>

12. Declaración uso de IA

“Para el desarrollo de este trabajo de grado se emplearon herramientas de inteligencia artificial como apoyo en la mejora del estilo de escritura. Estas herramientas se utilizaron de manera complementaria al proceso investigativo, con el propósito de optimizar la claridad, coherencia y precisión en la redacción del documento, sin intervenir en la generación de resultados experimentales ni en el análisis científico, los cuales fueron realizados de manera independiente por la autora”.

13. Anexo 1. Evidencia fotográfica de los montajes de laboratorio realizados



Figura 40 Anexo 1. Montaje para la síntesis de hidrogeles

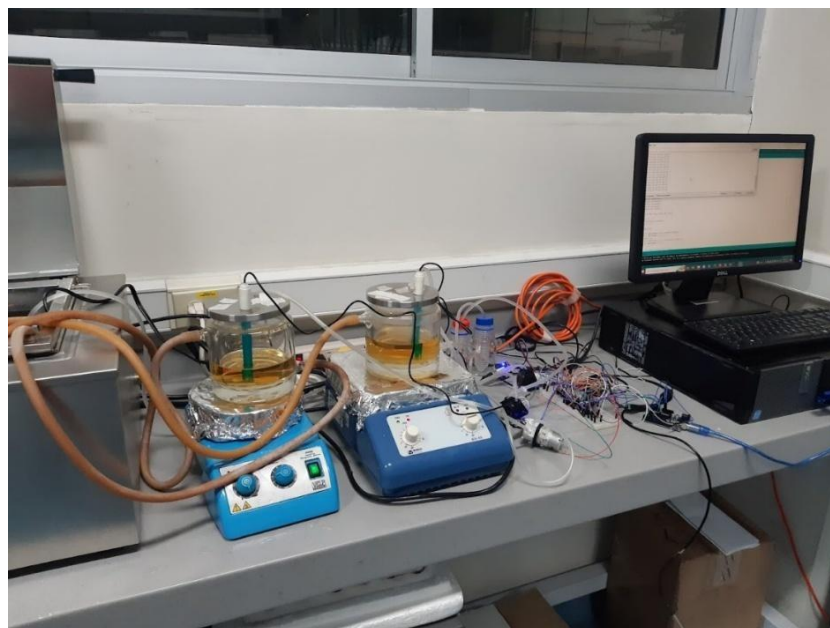


Figura 41 Anexo 1. Biorreactores y entorno electrónico para la fermentación de BAL

Anexo 2. Divulgación de resultados, en el evento Momentus Unal Palmira 2025

Viabilidad de bacterias ácido lácticas en hidrogeles reforzados con nanocelulosa obtenida de cutícula de sábila para aplicaciones agrícolas sostenibles

Luisa Fernanda Gil Henao - ~~Sneyder~~ Rodríguez-Barona - Liliana Serna Cock





Resumen

Se evaluó la incorporación de bacterias ácido láctico (BAL) en hidrogeles reforzados con nanocelulosa obtenida de cutícula de *Aloe vera*. Los hidrogeles se sintetizaron con acrilamida y acrilato de potasio, y se ensayaron tres metodologías de incorporación de BAL. Ninguna fue completamente efectiva, ya sea por pérdida de viabilidad, baja incorporación o distribución desigual. Los resultados evidencian la necesidad de desarrollar nuevas estrategias que garanticen la funcionalidad del sistema en aplicaciones agrícolas.

Objetivo general:

Evaluar la viabilidad de bacterias ácido lácticas incorporadas en hidrogeles reforzados con nanocelulosa.

Metodología



Conclusiones

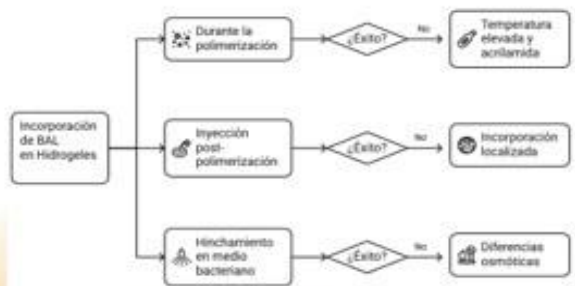
Las metodologías evaluadas para la incorporación de BAL en hidrogeles reforzados con nanocelulosa presentaron limitaciones que impidieron una integración efectiva y viable. Las condiciones de síntesis, la distribución no homogénea y los factores osmóticos afectaron negativamente el proceso. Estos resultados resaltan la necesidad de desarrollar estrategias alternativas que aseguren tanto la viabilidad bacteriana como su distribución uniforme dentro de la matriz polimérica, con miras a su aplicación en sistemas agrícolas sostenibles.

Bibliografía

- Rivero-Correa, G., Valero, D., Valencia-Hernández, L., & Serna, L. (2024). Kinetic analysis of lactic acid fermentation by using an extended logistic model. *Process Biochemistry*, (144), 1-5. <https://doi.org/10.1016/j.procbio.2024.05.002>
- Crunchu-Uribe, M., Serna-Cock, L., & Triado, B. (2022). Hydrogels are reinforced with Colombian figs celluloses to improve techno-functional properties for agricultural purposes. *Agrochimica*, 12(1), 117. <https://doi.org/10.33263/agrochim.12.117>

Resultados

Se evaluaron tres métodos para incorporar BAL en hidrogeles: la adición durante la polimerización no fue viable por la temperatura y la toxicidad de la acrilamida; la inyección post-polimerización logró una incorporación limitada y localizada; y el hinchamiento en un medio bacteriano no permitió la entrada de BAL debido a diferencias osmóticas. Estas limitaciones orientan la búsqueda de nuevas estrategias de incorporación eficiente y viable.



Anexo 3. Resultados diámetro de nanocelulosa obtenidos en el software Imagej

Resultados diámetro de nanofibras de cutícula de Aloe vera

Mediciones	Area	Promedio	Min	Max	Angulo	Diameteo [nm]
1	35.831	42.564.548	38.807.000	46.634.395	-26.565	30.354
2	24.314	37.124.226	32.125.000	41.148.555	26.565	20.236
3	35.831	38.711.248	36.303.629	41.840.234	-41.987	30.438
4	17.915	41.784.550	38.379.680	44.054.969	-153.435	15.177
5	31.992	36.924.047	32.382.000	40.188.375	-55.008	27.617
6	30.712	37.331.092	33.387.652	43.170.172	-149.036	26.384
7	28.153	37.318.032	31.170.428	41.462.668	-131.186	24.050
8	34.551	38.379.399	33.153.000	42.082.609	-38.660	28.973
9	29.432	37.000.520	32.110.133	40.349.000	-63.435	25.295
10	30.712	39.570.308	35.509.238	46.478.133	45.000	25.597
11	28.153	38.781.411	34.450.238	42.878.207	-48.814	24.050
12	40.949	38.607.188	32.896.000	42.112.699	-50.194	35.340
13	31.992	38.570.560	33.667.000	43.433.000	-90.000	27.149
14	33.271	36.556.281	30.840.000	42.818.258	-75.964	27.985
15	26.873	36.379.451	32.217.520	41.202.238	36.870	22.624
16	28.153	38.693.705	32.402.396	43.616.570	-131.186	24.050
17	35.831	35.023.930	28.199.492	38.667.043	36.027	30.773
18	30.712	38.833.761	32.382.000	45.450.621	-135.000	25.597
19	31.992	33.881.167	28.955.334	37.607.668	-131.634	27.243
20	28.153	36.760.086	28.013.000	41.266.855	-138.814	24.050
21	28.153	35.499.376	30.158.746	39.561.684	-138.814	24.050
22	31.992	39.489.763	32.896.000	43.497.250	48.366	27.243
23	25.593	40.135.925	35.901.691	43.049.992	-71.565	21.463
24	26.873	41.176.296	35.671.602	48.007.602	78.690	23.072
25	30.712	40.429.242	33.410.000	44.020.844	30.964	26.384
26	21.754	37.213.033	33.683.062	41.891.000	29.745	18.240
27	12.797	38.732.438	37.008.000	40.003.160	63.435	10.118
28	25.593	38.471.618	33.544.551	42.931.812	-147.995	21.344
29	29.432	38.035.538	35.553.082	42.662.000	-21.801	24.367
30	19.195	35.503.763	32.639.000	39.578.000	56.310	16.315
31	35.831	36.154.846	30.069.000	41.634.000	-131.987	30.438
32	25.593	35.887.594	33.813.652	37.727.031	-18.435	21.463
33	38.390	34.462.915	29.298.000	38.507.523	-105.945	32.942
34	29.432	31.822.473	28.705.414	35.323.695	-33.690	24.472
35	42.229	35.257.613	31.341.953	37.622.391	-111.801	36.551
36	35.831	32.897.536	29.184.482	36.270.137	-53.973	30.773
37	15.356	35.691.848	32.896.000	36.927.289	45.000	12.798
38	24.314	35.123.834	31.611.000	38.664.223	-40.601	20.859
39	31.992	34.694.143	30.326.000	37.950.332	-131.634	27.243

40	21.754	31.816.978	27.756.000	34.438.000	29.745	18.240
41	19.195	42.680.182	39.562.266	47.288.000	-135.000	15.998
42	56.305	42.649.765	37.265.000	46.339.086	-41.186	48.100
43	33.271	35.279.616	32.121.711	38.095.211	-45.000	28.796
44	37.110	34.207.586	28.784.000	39.828.445	-21.038	31.512
45	42.229	37.124.331	32.125.000	40.734.500	-29.745	36.481
46	31.992	41.395.847	37.779.000	43.475.832	-48.366	27.243
47	21.754	36.769.897	31.980.438	40.027.750	-150.255	18.240
48	28.153	33.582.446	31.097.000	35.682.789	29.055	23.293
49	38.390	32.536.638	29.298.000	36.332.039	-123.690	32.629
50	38.390	32.601.667	26.728.000	36.641.598	-74.055	32.942
51	23.034	34.729.385	29.555.000	37.265.000	54.462	19.462
52	23.034	34.572.082	31.611.000	38.141.824	-135.000	19.197
53	40.949	42.103.331	36.226.570	48.011.664	-148.392	34.535
54	26.873	41.771.066	38.293.000	46.260.000	-84.289	22.737
55	20.475	41.650.062	37.265.000	44.461.000	-156.801	17.230
56	33.271	39.169.868	32.639.000	43.540.734	-14.036	27.985
57	40.949	37.474.723	31.625.441	43.182.953	-50.194	35.340
58	31.992	42.858.177	38.935.500	47.288.000	-41.634	27.243
59	43.509	41.051.034	37.529.789	44.056.738	-57.265	37.655
60	26.873	41.532.179	38.036.000	44.399.320	-143.130	22.624
61	34.551	50.224.209	40.622.727	56.491.336	-51.340	28.973
62	24.314	43.849.811	35.723.000	49.943.668	-130.601	20.859
63	37.110	36.201.552	30.583.000	41.120.000	180.000	31.674
64	23.034	38.712.243	35.049.820	41.742.492	-45.000	19.197
65	17.915	36.992.141	32.382.000	41.405.895	18.435	14.309
66	42.229	35.839.544	32.382.000	38.621.277	-34.695	35.772
67	28.153	35.011.442	28.784.000	40.170.672	-119.055	23.293
68	19.195	37.808.721	34.952.000	40.606.000	-33.690	16.315
69	21.754	37.470.033	34.968.062	41.377.000	39.806	17.670
70	26.873	39.087.987	35.723.000	41.891.000	-156.038	22.282
71	34.551	37.166.154	34.121.691	41.377.000	-4.399	29.499
72	24.314	38.674.743	34.238.109	42.148.000	-12.529	20.859
73	51.187	40.559.846	33.872.297	45.528.539	-23.962	44.565
74	39.670	40.755.226	34.695.000	48.830.000	-90.000	33.937
75	34.551	38.646.649	30.345.770	45.152.922	-171.254	29.758
76	39.670	36.398.201	32.810.332	39.835.000	-47.726	33.634
77	24.314	38.928.236	31.868.000	43.889.891	-139.399	20.859
78	39.670	35.711.172	28.773.721	41.630.574	-156.801	34.461
79	26.873	34.605.417	31.611.000	38.138.801	-53.130	22.624
80	37.110	32.132.596	28.618.785	35.723.000	4.086	31.755
81	28.153	34.941.987	29.041.000	38.256.285	-138.814	24.050
82	26.873	37.113.247	32.525.920	42.137.719	-135.000	22.397
83	30.712	35.408.592	28.784.000	38.071.465	-142.125	25.796
84	25.593	34.733.586	28.270.000	38.196.180	-57.995	21.344

85	24.314	39.372.099	34.952.000	42.262.223	173.660	20.487
86	37.110	35.492.586	30.583.000	41.377.000	180.000	31.674
87	28.153	34.982.834	30.472.857	40.466.137	-119.055	23.293
88	40.949	35.893.528	31.868.000	40.574.711	-39.806	35.340
89	43.509	33.989.219	29.822.619	38.110.340	-10.620	36.830
90	34.551	34.978.078	25.186.000	41.008.988	-157.380	29.412
91	23.034	34.248.288	31.354.000	38.585.570	-110.556	19.330
92	42.229	32.565.076	25.957.000	37.126.461	-21.801	36.551
93	29.432	36.661.609	32.942.727	41.190.090	-79.695	25.295
94	39.670	37.322.811	33.708.121	41.202.238	-156.801	34.461
95	25.593	34.519.158	31.403.834	36.527.461	57.995	21.344
96	29.432	35.877.403	31.097.000	38.550.000	-26.565	25.295
97	30.712	37.127.857	29.546.256	43.141.992	-120.964	26.384
98	30.712	35.850.529	31.868.000	38.636.961	-135.000	25.597
99	35.831	37.839.360	28.518.539	45.489.000	-102.995	30.185
100	47.348	36.703.493	29.555.000	41.037.508	-38.157	40.282

Anexo 4. Imágenes SEM de nanofibras de cutícula de *Aloe vera*

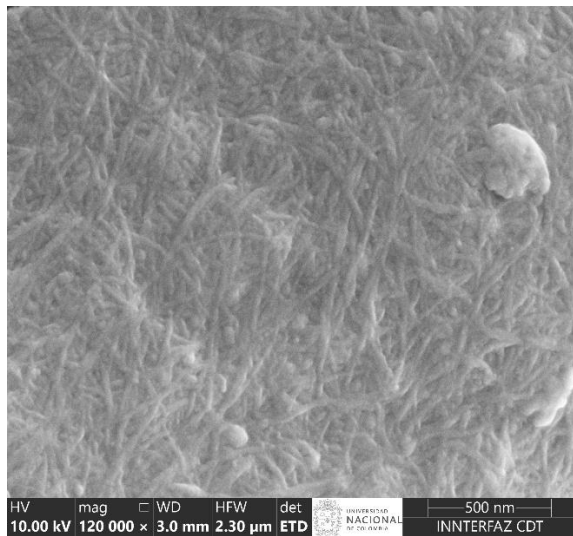


Imagen SEM nanofibras de celulosa

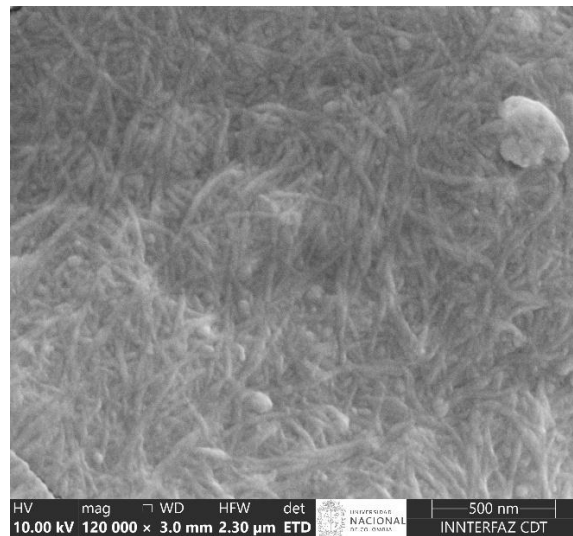


Imagen SEM nanofibras de celulosa

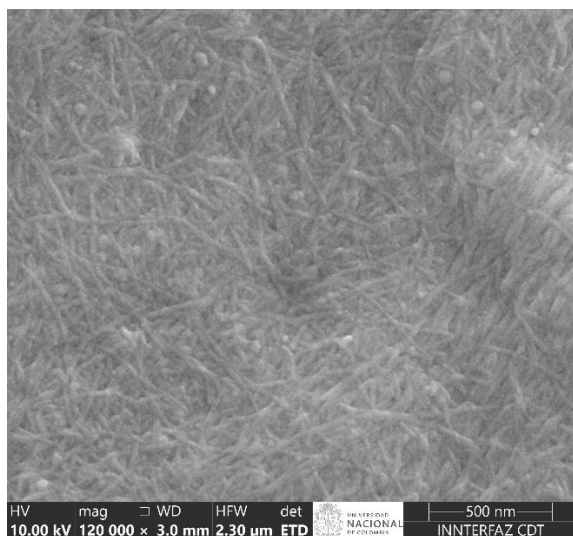


Imagen SEM nanofibras de celulosa

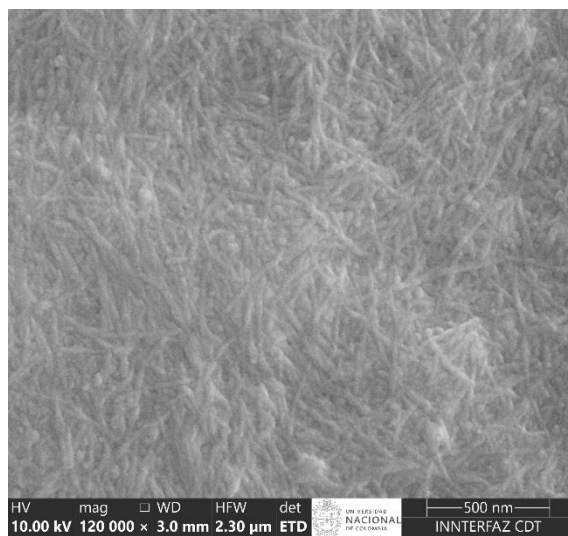


Imagen SEM nanofibras de celulosa

Anexo 5. Soporte de los datos experimentales

Capacidad de hinchamiento

Hidrogel con nanocelulosa

Hidrogel seoco[g]	0,0161	0,0167	0,0165	Qt1	Qt2	Qt3	1/Q1	1/Q2	1/Q3	
Tiempo [min]	Tiempo gastado	Masa1 [g]	Masa2 [g]	Masa3 [g]	[gH ₂ O/gHidrogel]	[gH ₂ O/gHidrogel]	[gH ₂ O/gHidrogel]			
0	0	0,0161	0,0167	0,0165	0,0000	0,0000	0,0000	43,1830	15,7400	18,3240
5	5	0,1654	0,1236	0,1231	9,2733	6,4012	6,4606	57,5460	25,9660	31,1405
10	5	0,6594	0,418	0,4648	39,9565	24,0299	27,1697	71,9090	36,1920	43,9570
15	5	0,9576	0,6465	0,7205	58,4783	37,7126	42,6667	86,2720	46,4180	56,7735
20	5	1,455	0,9483	1,1118	89,3727	55,7844	66,3818	100,6350	56,6440	69,5900
30	10	2,1925	1,368	1,7338	135,1801	80,9162	104,0788	129,3610	77,0960	95,2230
60	30	3,7039	2,3544	3,034	229,0559	139,9820	182,8788	215,5390	138,4520	172,1220
90	30	5,5425	3,6611	4,5855	343,2547	218,2275	276,9091	301,7170	199,8080	249,0210
120	30	6,8711	4,4141	6,0019	425,7764	263,3174	362,7515	387,8950	261,1640	325,9200
180	60	10,7128	6,9753	8,1381	664,3913	416,6826	492,2182	560,2510	383,8760	479,7180
240	60	13,5513	9,3182	10,835	840,6957	556,9760	655,6667	732,6070	506,5880	633,5160
300	60	14,3928	10,8045	12,9441	892,9627	645,9760	783,4909	904,9630	629,3000	787,3140
360	60	15,1622	11,4266	14,9178	940,7516	683,2275	903,1091	1077,3190	752,0120	941,1120

Hidrogel con nanocelulosa y *Weissella cibaria* IBUN-090-03684

Hidrogel seoco[g]		0,0161	0,0169	0,016	Qt1	Qt2	Qt3
Tiempo [min]	tiempo gastado	Masa1 [g]	Masa2 [g]	Masa3 [g]	[gH ₂ O/gHidrogel]	[gH ₂ O/gHidrogel]	[gH ₂ O/gHidrogel]
0	0	0,0161	0,0169	0,016	0,0000	0,0000	0,0000
5	5	0,2373	0,1845	0,1647	13,7391	9,9172	9,2938
10	5	0,4765	0,2233	0,1998	28,5963	12,2130	11,4875
15	5	0,5435	0,5181	0,2882	32,7578	29,6568	17,0125
20	5	0,9363	0,649	0,5516	57,1553	37,4024	33,4750
30	10	1,554	1,0884	1,12	95,5217	63,4024	69,0000
60	30	3,8837	2,9562	3,1805	240,2236	173,9231	197,7813
90	30	5,6825	5,4825	6,6026	351,9503	323,4083	411,6625
120	30	7,7738	8,1225	10,2562	481,8447	479,6213	640,0125
180	60	11,2174	12,6415	16,4575	695,7329	747,0178	1027,5938
240	60	14,5789	18,557	20,5483	904,5217	1097,0473	1283,2688
300	60	16,884	21,9842	29,5043	1047,6957	1299,8402	1843,0188
360	60	18,3927	22,309	29,5043	1141,4037	1319,0592	1843,0188

Hidrogel con nanocelulosa y *Lactobacillus platarum* (IBUN-041-39)

Hidrogel seoco[g]		0,016	0,0163	0,0168	Qt1	Qt2	Qt3
Tiempo [min]	Tiempo gastado	Masa1 [g]	Masa2 [g]	Masa3 [g]	[gH ₂ O/gHidrogel]	[gH ₂ O/gHidrogel]	[gH ₂ O/gHidrogel]
0	0	0,0160	0,0163	0,0168	0	0	0,0000
5	5	0,4161	0,178	0,3384	25,00625	9,920245399	19,1429
10	5	0,6744	0,4739	0,6242	41,15	28,07361963	36,1548
15	5	0,9306	0,7097	1,0834	57,1625	42,5398773	63,4881
20	5	1,1081	0,9937	2,0888	68,25625	59,96319018	123,3333
30	10	2,4287	1,7094	4,4233	150,79375	103,8711656	262,2917
60	30	4,8274	4,0137	7,8482	300,7125	245,2392638	466,1548
90	30	7,6729	13,0106	9,5678	478,55625	797,196319	568,5119
120	30	7,7321	6,91319	11,8114	482,25625	423,1220859	702,0595
180	60	12,2110	9,618	16,088	762,1875	589,0613497	956,6190
240	60	15,5962	13,5772	19,2391	973,7625	831,9570552	1144,1845
300	60	19,4024	16,8365	21,1083	1211,65	1031,91411	1255,4464
360	60	24,3786	22,2551	29,3014	1522,6625	1364,343558	1743,1310

Hidrogel con nanocelulosa y *Lactobacillus platarum* (IBUN-090-03774)

Hidrogel seoco[g]		0,016	0,0168	0,016	Qt1	Qt2	Qt3
Tiempo [min]	Tiempo gasta	Masa1 [g]	Masa2 [g]	Masa3 [g]	[gH ₂ O/gHidrogel]	[gH ₂ O/gHidrogel]	[gH ₂ O/gHidrogel]
0	0	0,016	0,0168	0,016	0,0000	0,0000	0,0000
5	5	0,1088	0,2322	0,1943	5,8000	12,8214	11,1438
10	5	0,2214	0,4019	0,4366	12,8375	22,9226	26,2875
15	5	0,3792	0,4644	0,409	22,7000	26,6429	24,5625
20	5	0,6706	0,3976	0,4984	40,9125	22,6667	30,1500
30	10	1,1215	2,5401	0,4975	69,0938	150,1964	30,0938
60	30	4,2769	6,118	0,4575	266,3063	363,1667	27,5938
90	30	5,5678	10,5679	0,467	346,9875	628,0417	28,1875
120	30	9,468	12,9864	0,5367	590,7500	772,0000	32,5438
180	60	11,6558	16,9978	0,5536	727,4875	1010,7738	33,6000
240	60	16,664	23,5378	0,553	1040,5000	1400,0595	33,5625
300	60	24,4027	29,3219	0,5939	1524,1688	1744,3512	36,1188
360	60	25,2165	32,9693	0,6822	1575,0313	1961,4583	41,6375

Hidrogel con nanocelulosa y metabolito de *Weissella cibaria* IBUN-090-03684

Hidrogel seoco[g]		0,0161	0,0164	0,016	Qt	Qt	Qt
Tiempo [min]	Tiempo gasta	Masa1 [g]	Masa2 [g]	Masa3 [g]	[gH ₂ O/gHidrogel]	[gH ₂ O/gHidrogel]	[gH ₂ O/gHidrogel]
0	0	0,0161	0,0164	0,016	0,0000	0,0000	0,0000
5	5	0,1868	0,2044	0,1715	10,6025	11,4634	9,7188
10	5	0,4009	0,3435	0,2975	23,9006	19,9451	17,5938
15	5	0,541	0,4945	0,4844	32,6025	29,1524	29,2750
20	5	0,8025	0,6908	0,6537	48,8447	41,1220	39,8563
30	10	1,1488	0,987	0,8666	70,3540	59,1829	53,1625
60	30	2,3349	1,9712	1,7428	144,0248	119,1951	107,9250
90	30	3,3073	2,3736	2,7247	204,4224	143,7317	169,2938
120	30	4,5403	3,1059	3,1045	281,0062	188,3841	193,0313
180	60	5,8602	4,3208	4,2694	362,9876	262,4634	265,8375
240	60	7,066	5,4016	4,4368	437,8820	328,3659	276,3000
300	60	7,9709	6,4453	6,1518	494,0870	392,0061	383,4875
360	60	8,6721	6,9229	6,6261	537,6398	421,1280	413,1313

Hidrogel con nanocelulosa y metabolito de *Lactobacillus platarum* (IBUN-041-39)

Hidrogel seoco[g]		0,0165	0,0169	0,0169	Qt1	Qt2	Qt3
Tiempo [min]	Tiempo gasta	Masa1 [g]	Masa2 [g]	Masa3 [g]	[gH ₂ O/gHidrogel]	[gH ₂ O/gHidrogel]	[gH ₂ O/gHidrogel]
0	0	0,0165	0,0169	0,0169	0,0000	0,0000	0,0000
5	5	0,2335	0,2068	0,1664	13,1515	11,2367	8,8462
10	5	0,5223	0,4473	0,3175	30,6545	25,4675	17,7870
15	5	0,8613	0,6878	0,5066	51,2000	39,6982	28,9763
20	5	1,2747	1,0443	0,8123	76,2545	60,7929	47,0651
30	10	2,0767	1,6624	1,3359	124,8606	97,3669	78,0473
60	30	4,7107	3,7011	4,5381	284,4970	218,0000	267,5266
90	30	7,7994	5,6133	7,6718	471,6909	331,1479	452,9527
120	30	9,1163	6,7018	10,746	551,5030	395,5562	634,8580
180	60	9,4085	10,6338	14,3527	569,2121	628,2189	848,2722
240	60	13,104	12,5455	16,2406	793,1818	741,3373	959,9822
300	60	14,7387	15,0028	17,9285	892,2545	886,7396	1059,8580
360	60	16,0477	16,0073	15,885	971,5879	946,1775	938,9408

Hidrogel con nanocelulosa y metabolito de *Lactobacillus platarum* (IBUN-090-03774)

Hidrogel seoco[g]		0,016	0,0165	0,0167	Qt1	Qt2	Qt3
Tiempo [min]	Tiempo gasta	Masa1 [g]	Masa2 [g]	Masa3 [g]	$[gH_2O/gHidrogel]$	$[gH_2O/gHidrogel]$	$[gH_2O/gHidrogel]$
0	0	0,016	0,0165	0,0167	0	0,0000	0,0000
5	5	0,19	0,1742	0,1692	10,875	9,5576	9,1317
10	5	0,3947	0,3139	0,3037	23,66875	18,0242	17,1856
15	5	0,6129	0,5447	0,5179	37,30625	32,0121	30,0120
20	5	0,878	0,8353	0,7828	53,875	49,6242	45,8743
30	10	1,398	1,5727	1,3255	86,375	94,3152	78,3713
60	30	2,8435	3,4592	2,6658	176,71875	208,6485	158,6287
90	30	4,2412	4,124	4,3529	264,075	248,9394	259,6527
120	30	5,586	5,0536	5,7937	348,125	305,2788	345,9281
180	60	7,4691	6,6394	7,854	465,81875	401,3879	469,2994
240	60	9,1094	7,4967	9,2347	568,3375	453,3455	551,9760
300	60	9,954	8,9422	10,211	621,125	540,9515	610,4371
360	60	10,8088	8,9562	12,9476	674,55	541,8000	774,3054

Hidrogel con nanocelulosa y fertilizantes 5%

Hidrogel seoco[g]		0,018	0,0177	0,0178	Qt	Qt	Qt
Tiempo [min]	tiempo gastad	Masa1 [g]	Masa2 [g]	Masa3 [g]	$[gH_2O/gHidrogel]$	$[gH_2O/gHidrogel]$	$[gH_2O/gHidrogel]$
0	0	0,018	0,0177	0,0178	0,0000	0,0000	0,0000
5	5	0,2027	0,1217	0,1545	10,2611	5,8757	7,6798
10	5	0,3438	0,2278	0,3164	18,1000	11,8701	16,7753
15	5	0,5404	0,4513	0,6162	29,0222	24,4972	33,6180
20	5	0,7458	0,5608	0,6319	40,4333	30,6836	34,5000
30	10	1,1625	0,9692	1,0146	63,5833	53,7571	56,0000
60	30	2,2314	1,9816	1,6109	122,9667	110,9548	89,5000
90	30	3,7468	3,468	2,6004	207,1556	194,9322	145,0899
120	30	5,0285	4,9924	4,4046	278,3611	281,0565	246,4494
180	60	7,0785	7,1599	6,88331	392,2500	403,5141	385,7028
240	60	8,42	9,8615	7,7544	466,7778	556,1469	434,6404
300	60	9,8128	11,5851	8,0556	544,1556	653,5254	451,5618
360	60	10,8224	13,3335	9,8872	600,2444	752,3051	554,4607

Hidrogel con nanocelulosa y fertilizantes 10%

Hidrogel seoco[g]		0,0162	0,0165	0,0165	Qt1	Qt2	Qt3
Tiempo [min]	Tiempo gasta	Masa1 [g]	Masa2 [g]	Masa3 [g]	[gH ₂ O/gHidrogel]	[gH ₂ O/gHidrogel]	[gH ₂ O/gHidrogel]
0	0	0,0162	0,0165	0,0165	0,0000	0,0000	0,0000
5	5	0,1237	0,214	0,1777	6,6358	11,9697	9,7697
10	5	0,2333	0,3692	0,4402	13,4012	21,3758	25,6788
15	5	0,4852	0,5789	0,6201	28,9506	34,0848	36,5818
20	5	0,6543	0,6622	0,7401	39,3889	39,1333	43,8545
30	10	0,9826	0,9998	1,4372	59,6543	59,5939	86,1030
60	30	1,9202	1,8641	2,4257	117,5309	111,9758	146,0121
90	30	2,7896	2,838	5,2025	171,1975	171,0000	314,3030
120	30	4,4701	3,723	7,1565	274,9321	224,6364	432,7273
180	60	5,4052	5,5197	9,5694	332,6543	333,5273	578,9636
240	60	6,8252	7,3464	11,0035	420,3086	444,2364	665,8788
300	60	7,5457	8,7474	11,6363	464,7840	529,1455	704,2303
360	60	8,1116	9,2084	11,3209	499,7160	557,0848	685,1152

Hidrogel con nanocelulosa y fertilizantes 15%

Hidrogel seoco[g]		0,0165	0,0167	0,0166	Qt1	Qt2	Qt3
Tiempo [min]	Tiempo gasta	Masa1 [g]	Masa2 [g]	Masa3 [g]	[gH ₂ O/gHidrogel]	[gH ₂ O/gHidrogel]	[gH ₂ O/gHidrogel]
0	0	0,0165	0,0167	0,0166	0,0000	0,0000	0,0000
5	5	0,1229	0,1492	0,1216	6,4485	7,9341	6,3253
10	5	0,3301	0,2931	0,283	19,0061	16,5509	16,0482
15	5	0,4484	0,4546	0,3693	26,1758	26,2216	21,2470
20	5	0,6312	0,6908	0,5462	37,2545	40,3653	31,9036
30	10	0,9493	0,9523	0,7321	56,5333	56,0240	43,1024
60	30	1,7912	1,9039	2,1807	107,5576	113,0060	130,3675
90	30	2,4482	2,7962	2,909	147,3758	166,4371	174,2410
120	30	3,3491	3,6838	3,9832	201,9758	219,5868	238,9518
180	60	4,7947	5,1067	6,1635	289,5879	304,7904	370,2952
240	60	6,0165	6,0263	7,8915	363,6364	359,8563	474,3916
300	60	7,0341	7,1651	9,4457	425,3091	428,0479	568,0181
360	60	7,865	8,7568	9,5518	475,6667	523,3593	574,4096

Promedio capacidad de hinchamiento en equilibrio y cinética de hinchamiento segundo orden

Hidrogel con nanocelulosa

Tiempo [min]	Promedio Q	Desviación S	t/Q	Pendiente	2,4937
0	0,0000	0,0000	#¡DIV/0!	Intercepto	25,749
5	7,3784	1,6413	0,67765689	R ²	0,9853
10	30,3854	8,4362	0,32910557		
15	46,2858	10,8456	0,32407323		
20	70,5130	17,1710	0,28363575		
30	106,7250	27,2286	0,28109621		
60	183,9722	44,5470	0,32613616		
90	279,4638	62,5527	0,32204533		
120	350,6151	81,9067	0,34225566		
180	524,4307	126,9572	0,34322933		
240	684,4461	144,0326	0,35064849		
300	774,1432	123,7584	0,38752519		
360	842,3627	139,0944	0,42736934		

Hidrogel con nanocelulosa y *Weissella cibaria* IBUN-090-03684

Tiempo [min]	Promedio Q	Desviación S	t/Q	Pendiente	4,4242
0	0,0000	0,0000	#¡DIV/0!	Intercepto	-23,318
5	10,9833	2,4068	0,4552	R ²	0,9895
10	17,4323	9,6751	0,5736		
15	26,4757	8,3407	0,5666		
20	42,6775	12,6909	0,4686		
30	75,9747	17,1580	0,3949		
60	203,9760	33,5816	0,2942		
90	362,3404	45,0352	0,2484		
120	533,8262	91,9668	0,2248		
180	823,4481	178,6452	0,2186		
240	1094,9459	189,3822	0,2192		
300	1396,8515	406,4395	0,2148		
360	1434,4939	364,7736	0,2510		

Hidrogel con nanocelulosa y *Lactobacillus platarum* (IBUN-041-39)

Tiempo [min]	Promedio Q	Desviación S	t/Q	Pendiente	4,0734
0	0	0	#iDIV/0!	Intercepto	37,614
5	18,0231	7,6051	0,2774	R ²	0,98
10	35,1261	6,5986	0,2847		
15	54,3968	10,7445	0,2758		
20	83,8509	34,4433	0,2385		
30	172,3189	81,3742	0,1741		
60	337,3688	114,9290	0,1778		
90	614,7548	164,2762	0,1464		
120	535,8126	146,9787	0,2240		
180	769,2893	183,8817	0,2340		
240	983,3014	156,3321	0,2441		
300	1166,3368	118,4552	0,2572		
360	1543,3790	190,2416	0,2333		

Hidrogel con nanocelulosa y metabolito de *Lactobacillus platarum* (IBUN-090-03774)

Tiempo [min]	Promedio Q	Desviación S	t/Q	Pendiente	1,9389
0	0,0000	0,0000	#iDIV/0!	Intercepto	32,5
5	9,8548	0,9088	0,5074	R ²	0,97
10	19,6262	3,5260	0,5095		
15	33,1101	3,7691	0,4530		
20	49,7912	4,0030	0,4017		
30	86,3538	7,9720	0,3474		
60	181,3320	25,3270	0,3309		
90	257,5557	7,7827	0,3494		
120	333,1106	24,1281	0,3602		
180	445,5020	38,2436	0,4040		
240	524,5530	62,2078	0,4575		
300	590,8379	43,5321	0,5078		
360	663,5518	116,6422	0,5425		

Hidrogel con nanocelulosa y metabolito de *Weissella cibaria* IBUN-090-03684

Tiempo [min]	Promedio Q	Desviación S	t/Q	Pendiente	1,3245
0	0,0000	0,0000	#iDIV/0!	Intercepto	24,133
5	10,5949	0,8724	0,4719	R^2	0,98
10	20,4798	3,1873	0,4883		
15	30,3433	1,9575	0,4943		
20	43,2743	4,8655	0,4622		
30	60,8998	8,7234	0,4926		
60	123,7150	18,4695	0,4850		
90	172,4826	30,4707	0,5218		
120	220,8072	52,1856	0,5435		
180	297,0962	57,0886	0,6059		
240	347,5159	82,4756	0,6906		
300	423,1935	61,5431	0,7089		
360	457,2997	69,6913	0,7872		

Hidrogel con nanocelulosa y metabolito de *Lactobacillus platarum* (IBUN-041-39)

Tiempo [min]	Promedio Q	Desviación S	t/Q	Pendiente	2,9814
0	0,0000	0,0000	#iDIV/0!	Intercepto	45,252
5	11,0781	2,1571	0,4513	R^2	0,95
10	24,6363	6,4739	0,4059		
15	39,9582	11,1141	0,3754		
20	61,3708	14,6033	0,3259		
30	100,0916	23,5253	0,2997		
60	256,6745	34,5512	0,2338		
90	418,5972	76,3106	0,2150		
120	527,3057	121,4721	0,2276		
180	681,9011	147,0713	0,2640		
240	831,5004	114,2482	0,2886		
300	946,2841	98,3966	0,3170		
360	952,2354	17,1459	0,3781		

Hidrogel con nanocelulosa y fertilizante al 5%

Tiempo [min]	Promedio Q	Desviación S	t/Q	Pendiente	1,8595
0	0,0000	0,0000	#¡DIV/0!	Intercepto	8,4903
5	7,9389	2,2042	0,6298	R²	0,99
10	15,5818	3,2820	0,6418		
15	29,0458	4,5604	0,5164		
20	35,2056	4,9130	0,5681		
30	57,7801	5,1493	0,5192		
60	107,8072	16,9539	0,5565		
90	182,3925	32,8781	0,4934		
120	268,6223	19,2495	0,4467		
180	393,8223	9,0092	0,4571		
240	485,8550	62,9596	0,4940		
300	549,7476	101,0979	0,5457		
360	635,6701	103,5704	0,5663		

Hidrogel con nanocelulosa y fertilizante al 10%

Tiempo [min]	Promedio Q	Desviación S	t/Q	Pendiente	1,8064
0	0,0000	0,0000	#¡DIV/0!	Intercepto	24,273
5	9,4584	2,6805	0,5286	R²	0,97
10	20,1519	6,2296	0,4962		
15	33,2058	3,8908	0,4517		
20	40,7923	2,6551	0,4903		
30	68,4504	15,2876	0,4383		
60	125,1729	18,2598	0,4793		
90	218,8335	82,6791	0,4113		
120	310,7652	108,5747	0,3861		
180	415,0484	141,9554	0,4337		
240	510,1413	135,4022	0,4705		
300	566,0532	123,9164	0,5300		
360	580,6387	94,9173	0,6200		

Hidrogel con nanocelulosa y fertilizante al 15%

Tiempo [min]	Promedio Q	Desviación S	t/Q	Pendiente	1,5354
0	0,0000	0	#¡DIV/0!	Intercepto	12,341
5	6,9026	0,8954	0,7244	R ²	0,99
10	17,2017	1,5827	0,5813		
15	24,5481	2,8589	0,6110		
20	36,5078	4,2800	0,5478		
30	51,8866	7,6116	0,5782		
60	116,9770	11,9122	0,5129		
90	162,6846	13,8201	0,5532		
120	220,1715	18,4950	0,5450		
180	321,5578	42,8868	0,5598		
240	399,2947	65,0632	0,6011		
300	473,7917	81,6139	0,6332		
360	524,4785	49,3810	0,6864		

Resultados capacidad de retención de agua de capacidad de retención de agua de los hidrogeles

Capacidad de retención de agua							
Nombre de muestra	# de muestra	Peso caja petri	Peso hidrogel hinchado	Caja petri + hidrogel seco	Hidrogel seco	X	S
Hidrogel + nanocelulosa	1	34,7641	15,825	34,7866	0,0225	0,0187	0,0041
	2	43,6278	15,4692	43,6471	0,0193		
	3	49,7452	15,919	49,7595	0,0143		
Hidrogel + nanocelulosa + fertilizante 5%	1	43,1457	10,6595	43,1625	0,0168	0,0192	0,0021
	2	47,1628	10,3919	47,183	0,0202		
	3	43,193	10,7095	43,2137	0,0207		
Hidrogel + nanocelulosa + fertilizante 10%	1	35,0654	10,0974	37,0798	2,0144	0,6817	1,1542
	2	47,8287	10,4105	47,8421	0,0134		
	3	44,4339	9,4215	44,4512	0,0173		
Hidrogel + nanocelulosa + fertilizante 15%	1	41,6208	10,001	41,6434	0,0226	0,0227	0,0011
	2	46,4598	10,3654	46,4814	0,0216		
	3	44,268	10,6738	44,2918	0,0238		
Hidrogel + nanocelulosa + metabolito W	1	42,9701	10,529	42,9939	0,0238	0,0205	0,0043
	2	37,1064	10,8244	37,1285	0,0221		
	3	46,8331	10,286	46,8487	0,0156		
Hidrogel + nanocelulosa + metabolito P.P	1	43,707	10,5592	43,7216	0,0146	0,0139	0,0029
	2	44,1318	10,4861	44,1425	0,0107		
	3	41,3663	10,3902	41,3827	0,0164		
Hidrogel + metabolito Bal 10	1	41,6972	10,5592	41,7075	0,0103	0,0094	0,0056
	2	51,2275	40,4861	51,2309	0,0034		
	3	44,5887	10,1037	44,6031	0,0144		
Hidrogel + PP	1	38,9418	10,2252	38,9503	0,0085	0,0053	0,0033
	2	45,0971	10,2778	45,1025	0,0054		
	3	50,5006	10,1789	50,5025	0,0019		
Hidrogel + W	1	44,3152	10,2975	44,3205	0,0053	0,0064	0,0010
	2	34,0415	10,4094	34,0483	0,0068		
	3	38,9286	10,1902	38,9358	0,0072		
Hidrogel + BAL	1	45,7874	10,4791	45,7935	0,0061	0,0060	0,0018
	2	32,5121	10,3101	32,5162	0,0041		
	3	34,3353	10,07	34,343	0,0077		

Resistencia a la compresión y modulo elástico

Hidrogeles con nanocelulosa, ensayo 1

Force	Distance	Time
N	mm	sec
8,1022	0,0000	0,0000
8,0062	0,0040	0,0050
7,8675	0,0090	0,0100
7,9254	0,0140	0,0150
8,0924	0,0190	0,0200
8,2419	0,0240	0,0250
8,3926	0,0290	0,0300
8,5235	0,0340	0,0350
8,6371	0,0390	0,0400
8,7517	0,0440	0,0450
8,8750	0,0490	0,0500
8,9874	0,0540	0,0550
9,0922	0,0590	0,0600
9,2035	0,0640	0,0650
9,3433	0,0690	0,0700
9,4764	0,0740	0,0750
9,5681	0,0790	0,0800
9,6696	0,0840	0,0850
9,8082	0,0890	0,0900
9,9414	0,0940	0,0950
10,0713	0,0990	0,1000
10,2034	0,1040	0,1050
10,3518	0,1090	0,1100
10,4904	0,1140	0,1150
10,6138	0,1190	0,1200
10,7360	0,1240	0,1250

Hidrogeles con nanocelulosa, ensayo 2

Force	Distance	Time
N	mm	sec
8,0215	0,0000	0,0000
7,9549	0,0040	0,0050
7,8763	0,0090	0,0100
7,8905	0,0140	0,0150
7,9745	0,0190	0,0200

8,0378	0,0240	0,0250
8,0651	0,0290	0,0300
8,0706	0,0340	0,0350
8,0837	0,0390	0,0400
8,1153	0,0440	0,0450
8,1819	0,0490	0,0500
8,2387	0,0540	0,0550
8,2889	0,0590	0,0600
8,3347	0,0640	0,0650
8,3816	0,0690	0,0700
8,4078	0,0740	0,0750
8,4384	0,0790	0,0800
8,4733	0,0840	0,0850
8,5443	0,0890	0,0900
8,6261	0,0940	0,0950
8,6829	0,0990	0,1000
8,7724	0,1040	0,1050
8,8401	0,1090	0,1100
8,8957	0,1140	0,1150
8,9656	0,1190	0,1200
9,0453	0,1240	0,1250

Hidrogeles con nanocelulosa, ensayo 3

Force	Distance	Time
N	mm	sec
8,0771	0,0000	0,0000
8,0182	0,0040	0,0050
7,9385	0,0090	0,0100
7,9461	0,0140	0,0150
8,0367	0,0190	0,0200
8,1306	0,0240	0,0250
8,2343	0,0290	0,0300
8,3303	0,0340	0,0350
8,4057	0,0390	0,0400
8,5017	0,0440	0,0450
8,6120	0,0490	0,0500
8,6971	0,0540	0,0550
8,7811	0,0590	0,0600
8,8652	0,0640	0,0650
8,9536	0,0690	0,0700
9,0289	0,0740	0,0750
9,1195	0,0790	0,0800
9,2210	0,0840	0,0850
9,3149	0,0890	0,0900

9,4295	0,0940	0,0950
9,5332	0,0990	0,1000
9,6511	0,1040	0,1050
9,7395	0,1090	0,1100
9,8574	0,1140	0,1150
9,9905	0,1190	0,1200
10,0942	0,1240	0,1250

Hidrogel con nanocelulosa y *Weissella cibaria* IBUN-090-03684, ensayo 1

Force	Distance	Time
N	mm	sec
8,8743	0,0000	0,0000
8,8622	0,0040	0,0050
8,8953	0,0090	0,0100
8,9263	0,0140	0,0150
8,9749	0,0190	0,0200
9,0456	0,0240	0,0250
9,0987	0,0290	0,0300
9,1672	0,0340	0,0350
9,2379	0,0390	0,0400
9,3119	0,0440	0,0450
9,3827	0,0490	0,0500
9,4611	0,0540	0,0550
9,5241	0,0590	0,0600
9,5838	0,0640	0,0650
9,6446	0,0690	0,0700
9,7220	0,0740	0,0750
9,7971	0,0790	0,0800
9,8789	0,0840	0,0850
9,9452	0,0890	0,0900
10,0447	0,0940	0,0950
10,1165	0,0990	0,1000
10,1673	0,1040	0,1050
10,2381	0,1090	0,1100
10,3221	0,1140	0,1150
10,4094	0,1190	0,1200
10,4845	0,1240	0,1250

Hidrogel con nanocelulosa y *Weissella cibaria* IBUN-090-03684, ensayo 2

Force	Distance	Time
N	mm	sec
8,8953	0,0000	0,0000
8,8832	0,0040	0,0050

8,8931	0,0090	0,0100
8,9484	0,0140	0,0150
8,9804	0,0190	0,0200
9,0732	0,0240	0,0250
9,1152	0,0290	0,0300
9,1440	0,0340	0,0350
9,2036	0,0390	0,0400
9,2545	0,0440	0,0450
9,3208	0,0490	0,0500
9,3727	0,0540	0,0550
9,4357	0,0590	0,0600
9,4921	0,0640	0,0650
9,5363	0,0690	0,0700
9,5916	0,0740	0,0750
9,6335	0,0790	0,0800
9,6822	0,0840	0,0850
9,7562	0,0890	0,0900
9,8170	0,0940	0,0950
9,8723	0,0990	0,1000
9,9485	0,1040	0,1050
10,0038	0,1090	0,1100
10,0557	0,1140	0,1150
10,1143	0,1190	0,1200
10,1662	0,1240	0,1250

Hidrogel con nanocelulosa y *Weissella cibaria* IBUN-090-03684, ensayo 3

Force	Distance	Time
N	mm	sec
8,9207	0,0000	0,0000
8,9274	0,0040	0,0050
8,9539	0,0090	0,0100
8,9771	0,0140	0,0150
9,0257	0,0190	0,0200
9,1086	0,0240	0,0250
9,1650	0,0290	0,0300
9,2335	0,0340	0,0350
9,3031	0,0390	0,0400
9,3727	0,0440	0,0450
9,4379	0,0490	0,0500
9,4877	0,0540	0,0550
9,5683	0,0590	0,0600
9,6181	0,0640	0,0650
9,6833	0,0690	0,0700

9,7595	0,0740	0,0750
9,8303	0,0790	0,0800
9,8988	0,0840	0,0850
9,9651	0,0890	0,0900
10,0502	0,0940	0,0950
10,1298	0,0990	0,1000
10,1961	0,1040	0,1050
10,2613	0,1090	0,1100
10,3320	0,1140	0,1150
10,4060	0,1190	0,1200
10,4757	0,1240	0,1250

Hidrogel con nanocelulosa y *Lactobacillus platarum* (IBUN-041-39), ensayo 1

Force	Distance	Time
N	mm	sec
8,9351	0,0000	0,0000
8,9019	0,0040	0,0050
8,8666	0,0090	0,0100
8,9373	0,0140	0,0150
9,0125	0,0190	0,0200
9,1219	0,0240	0,0250
9,2169	0,0290	0,0300
9,3153	0,0340	0,0350
9,4225	0,0390	0,0400
9,5076	0,0440	0,0450
9,5982	0,0490	0,0500
9,6789	0,0540	0,0550
9,7861	0,0590	0,0600
9,9043	0,0640	0,0650
9,9982	0,0690	0,0700
10,0911	0,0740	0,0750
10,1972	0,0790	0,0800
10,2911	0,0840	0,0850
10,3950	0,0890	0,0900
10,5166	0,0940	0,0950
10,6370	0,0990	0,1000
10,7497	0,1040	0,1050
10,8702	0,1090	0,1100
10,9940	0,1140	0,1150
11,1056	0,1190	0,1200
11,2216	0,1240	0,1250

Hidrogel con nanocelulosa y *Lactobacillus platarum* (IBUN-041-39), ensayo 2

Force	Distance	Time
N	mm	sec
8,9583	0,0000	0,0000
8,9163	0,0040	0,0050
8,8776	0,0090	0,0100
8,9329	0,0140	0,0150
9,0412	0,0190	0,0200
9,1716	0,0240	0,0250
9,2865	0,0290	0,0300
9,3948	0,0340	0,0350
9,4777	0,0390	0,0400
9,5650	0,0440	0,0450
9,6789	0,0490	0,0500
9,7938	0,0540	0,0550
9,9043	0,0590	0,0600
10,0336	0,0640	0,0650
10,1496	0,0690	0,0700
10,2767	0,0740	0,0750
10,3928	0,0790	0,0800
10,5055	0,0840	0,0850
10,6359	0,0890	0,0900
10,7619	0,0940	0,0950
10,9056	0,0990	0,1000
11,0581	0,1040	0,1050
11,1995	0,1090	0,1100
11,3310	0,1140	0,1150
11,4780	0,1190	0,1200
11,6383	0,1240	0,1250

Hidrogel con nanocelulosa y *Lactobacillus platarum* (IBUN-041-39), ensayo 3

Force	Distance	Time
N	mm	sec
9,0290	0,0000	0,0000
8,9926	0,0040	0,0050
8,9539	0,0090	0,0100
9,0412	0,0140	0,0150
9,1760	0,0190	0,0200
9,3119	0,0240	0,0250
9,4457	0,0290	0,0300
9,6004	0,0340	0,0350
9,7452	0,0390	0,0400
9,8933	0,0440	0,0450
10,0303	0,0490	0,0500
10,1773	0,0540	0,0550

10,3331	0,0590	0,0600
10,5022	0,0640	0,0650
10,6547	0,0690	0,0700
10,8105	0,0740	0,0750
10,9730	0,0790	0,0800
11,1410	0,0840	0,0850
11,3189	0,0890	0,0900
11,5079	0,0940	0,0950
11,7024	0,0990	0,1000
11,8947	0,1040	0,1050
12,0991	0,1090	0,1100
12,2881	0,1140	0,1150
12,4782	0,1190	0,1200
12,6882	0,1240	0,1250

Tabla 44. Hidrogel con nanocelulosa y *Lactobacillus platarum* (IBUN-090-03774), ensayo 1

Force	Distance	Time
N	mm	sec
8,9086	0,0000	0,0000
8,9019	0,0040	0,0050
8,9174	0,0090	0,0100
8,9461	0,0140	0,0150
9,0003	0,0190	0,0200
9,0710	0,0240	0,0250
9,1329	0,0290	0,0300
9,2081	0,0340	0,0350
9,2843	0,0390	0,0400
9,3606	0,0440	0,0450
9,4446	0,0490	0,0500
9,5153	0,0540	0,0550
9,5683	0,0590	0,0600
9,6512	0,0640	0,0650
9,7209	0,0690	0,0700
9,7938	0,0740	0,0750
9,8667	0,0790	0,0800
9,9507	0,0840	0,0850
10,0336	0,0890	0,0900
10,1132	0,0940	0,0950
10,1994	0,0990	0,1000
10,2878	0,1040	0,1050
10,3718	0,1090	0,1100
10,4502	0,1140	0,1150

10,5166	0,1190	0,1200
10,5994	0,1240	0,1250

Hidrogel con nanocelulosa y *Lactobacillus platarum* (IBUN-090-03774), ensayo 2

Force	Distance	Time
N	mm	sec
8,9605	0,0000	0,0000
8,9484	0,0040	0,0050
8,9484	0,0090	0,0100
8,9649	0,0140	0,0150
9,0113	0,0190	0,0200
9,0909	0,0240	0,0250
9,1473	0,0290	0,0300
9,2092	0,0340	0,0350
9,2633	0,0390	0,0400
9,3263	0,0440	0,0450
9,3915	0,0490	0,0500
9,4313	0,0540	0,0550
9,4932	0,0590	0,0600
9,5518	0,0640	0,0650
9,6103	0,0690	0,0700
9,6822	0,0740	0,0750
9,7485	0,0790	0,0800
9,8170	0,0840	0,0850
9,8855	0,0890	0,0900
9,9507	0,0940	0,0950
10,0159	0,0990	0,1000
10,0833	0,1040	0,1050
10,1463	0,1090	0,1100
10,2149	0,1140	0,1150
10,3011	0,1190	0,1200
10,3607	0,1240	0,1250

Hidrogel con nanocelulosa y *Lactobacillus platarum* (IBUN-090-03774), ensayo 3

Force	Distance	Time
N	mm	sec
8,8964	0,0000	0,0000
8,8588	0,0040	0,0050
8,8401	0,0090	0,0100
8,8611	0,0140	0,0150
8,9417	0,0190	0,0200

9,0556	0,0240	0,0250
9,1362	0,0290	0,0300
9,2224	0,0340	0,0350
9,3064	0,0390	0,0400
9,3904	0,0440	0,0450
9,4711	0,0490	0,0500
9,5584	0,0540	0,0550
9,6313	0,0590	0,0600
9,7087	0,0640	0,0650
9,8015	0,0690	0,0700
9,9065	0,0740	0,0750
9,9960	0,0790	0,0800
10,0922	0,0840	0,0850
10,1972	0,0890	0,0900
10,2834	0,0940	0,0950
10,3861	0,0990	0,1000
10,5320	0,1040	0,1050
10,6381	0,1090	0,1100
10,7265	0,1140	0,1150
10,8271	0,1190	0,1200
10,9177	0,1240	0,1250

Hidrogel con nanocelulosa y metabolito de *Weissella cibaria* IBUN-090-03684, ensayo 1

Force	Distance	Time
N	mm	sec
8,9451	0,0000	0,0000
8,9165	0,0040	0,0050
8,8824	0,0090	0,0100
8,9495	0,0140	0,0150
9,0628	0,0190	0,0200
9,1595	0,0240	0,0250
9,2585	0,0290	0,0300
9,3498	0,0340	0,0350
9,4301	0,0390	0,0400
9,4851	0,0440	0,0450
9,5478	0,0490	0,0500
9,5984	0,0540	0,0550
9,6039	0,0590	0,0600
9,5929	0,0640	0,0650
9,6083	0,0690	0,0700
9,6490	0,0740	0,0750
9,6875	0,0790	0,0800
9,7271	0,0840	0,0850
9,7733	0,0890	0,0900
9,8140	0,0940	0,0950

9,8524	0,0990	0,1000
9,8920	0,1040	0,1050
9,9096	0,1090	0,1100
9,9613	0,1140	0,1150
10,0075	0,1190	0,1200
10,0526	0,1240	0,1250

Hidrogel con nanocelulosa y metabolito de *Weissella cibaria* IBUN-090-03684, ensayo 2

Force	Distance	Time
N	mm	sec
8,9990	0,0000	0,0000
8,9495	0,0040	0,0050
8,8901	0,0090	0,0100
8,9528	0,0140	0,0150
9,0683	0,0190	0,0200
9,2090	0,0240	0,0250
9,3234	0,0290	0,0300
9,4037	0,0340	0,0350
9,4939	0,0390	0,0400
9,5962	0,0440	0,0450
9,7084	0,0490	0,0500
9,8260	0,0540	0,0550
9,9217	0,0590	0,0600
10,0240	0,0640	0,0650
10,1329	0,0690	0,0700
10,2033	0,0740	0,0750
10,2803	0,0790	0,0800
10,3947	0,0840	0,0850
10,4981	0,0890	0,0900
10,6212	0,0940	0,0950
10,7345	0,0990	0,1000
10,8577	0,1040	0,1050
10,9875	0,1090	0,1100
11,0986	0,1140	0,1150
11,2152	0,1190	0,1200
11,3405	0,1240	0,1250

Hidrogel con nanocelulosa y metabolito de *Weissella cibaria* IBUN-090-03684, ensayo 3

Force	Distance	Time
N	mm	sec
8,9154	0,0000	0,0000
8,8241	0,0040	0,0050
8,7064	0,0090	0,0100
8,6888	0,0140	0,0150
8,7548	0,0190	0,0200

8,8406	0,0240	0,0250
8,9308	0,0290	0,0300
9,0144	0,0340	0,0350
9,0892	0,0390	0,0400
9,1441	0,0440	0,0450
9,2046	0,0490	0,0500
9,2838	0,0540	0,0550
9,3608	0,0590	0,0600
9,4224	0,0640	0,0650
9,4851	0,0690	0,0700
9,5511	0,0740	0,0750
9,6314	0,0790	0,0800
9,6930	0,0840	0,0850
9,7447	0,0890	0,0900
9,7964	0,0940	0,0950
9,8590	0,0990	0,1000
9,9294	0,1040	0,1050
10,0020	0,1090	0,1100
10,0779	0,1140	0,1150
10,1626	0,1190	0,1200
10,2231	0,1240	0,1250

Hidrogel con nanocelulosa y *Lactobacillus platarum* (IBUN-041-39), ensayo 1

Force	Distance	Time
N	mm	sec
8,9066	0,0000	0,0000
8,6668	0,0040	0,0050
8,4160	0,0090	0,0100
8,5216	0,0140	0,0150
8,7889	0,0190	0,0200
9,0683	0,0240	0,0250
9,3102	0,0290	0,0300
9,4851	0,0340	0,0350
9,6589	0,0390	0,0400
9,8491	0,0440	0,0450
10,0372	0,0490	0,0500
10,2363	0,0540	0,0550
10,4222	0,0590	0,0600
10,6234	0,0640	0,0650
10,8027	0,0690	0,0700
10,9391	0,0740	0,0750
11,0898	0,0790	0,0800
11,2559	0,0840	0,0850
11,4538	0,0890	0,0900

11,6276	0,0940	0,0950
11,8069	0,0990	0,1000
12,0246	0,1040	0,1050
12,2292	0,1090	0,1100
12,4140	0,1140	0,1150
12,6153	0,1190	0,1200
12,8308	0,1240	0,1250

Hidrogel con nanocelulosa y *Lactobacillus platarum* (IBUN-041-39), ensayo 2

Force	Distance	Time
N	mm	sec
8,9286	0,0000	0,0000
8,8736	0,0040	0,0050
8,7944	0,0090	0,0100
8,8461	0,0140	0,0150
8,9957	0,0190	0,0200
9,1485	0,0240	0,0250
9,3311	0,0290	0,0300
9,4862	0,0340	0,0350
9,6358	0,0390	0,0400
9,8140	0,0440	0,0450
9,9833	0,0490	0,0500
10,1516	0,0540	0,0550
10,3056	0,0590	0,0600
10,4475	0,0640	0,0650
10,6146	0,0690	0,0700
10,7884	0,0740	0,0750
10,9633	0,0790	0,0800
11,1591	0,0840	0,0850
11,3416	0,0890	0,0900
11,5121	0,0940	0,0950
11,6826	0,0990	0,1000
11,8388	0,1040	0,1050
12,0180	0,1090	0,1100
12,2105	0,1140	0,1150
12,4206	0,1190	0,1200
12,6406	0,1240	0,1250

Hidrogel con nanocelulosa y *Lactobacillus platarum* (IBUN-041-39), ensayo 3

Force	Distance	Time
N	mm	sec
9,0375	0,0000	0,0000
8,9528	0,0040	0,0050

8,8549	0,0090	0,0100
8,9275	0,0140	0,0150
9,0990	0,0190	0,0200
9,2607	0,0240	0,0250
9,3949	0,0290	0,0300
9,5346	0,0340	0,0350
9,7029	0,0390	0,0400
9,8612	0,0440	0,0450
10,0185	0,0490	0,0500
10,1648	0,0540	0,0550
10,3375	0,0590	0,0600
10,5289	0,0640	0,0650
10,7092	0,0690	0,0700
10,8929	0,0740	0,0750
11,0755	0,0790	0,0800
11,2899	0,0840	0,0850
11,4868	0,0890	0,0900
11,6870	0,0940	0,0950
11,8839	0,0990	0,1000
12,0906	0,1040	0,1050
12,2941	0,1090	0,1100
12,5020	0,1140	0,1150
12,7187	0,1190	0,1200
12,9584	0,1240	0,1250

Hidrogel con nanocelulosa y *Lactobacillus platarum* (IBUN-090-03774), ensayo 1

Force	Distance	Time
N	mm	sec
8,9374	0,0000	0,0000
8,8725	0,0040	0,0050
8,8010	0,0090	0,0100
8,8648	0,0140	0,0150
9,0419	0,0190	0,0200
9,2079	0,0240	0,0250
9,3795	0,0290	0,0300
9,5434	0,0340	0,0350
9,7040	0,0390	0,0400
9,8447	0,0440	0,0450
9,9976	0,0490	0,0500
10,1571	0,0540	0,0550
10,3364	0,0590	0,0600
10,5025	0,0640	0,0650
10,6663	0,0690	0,0700

10,8390	0,0740	0,0750
11,0260	0,0790	0,0800
11,2163	0,0840	0,0850
11,4098	0,0890	0,0900
11,6045	0,0940	0,0950
11,8256	0,0990	0,1000
12,0334	0,1040	0,1050
12,2314	0,1090	0,1100
12,4151	0,1140	0,1150
12,6296	0,1190	0,1200
12,8209	0,1240	0,1250

Hidrogel con nanocelulosa y *Lactobacillus platarum* (IBUN-090-03774), ensayo 2

Force	Distance	Time
N	mm	sec
9,1298	0,0000	0,0000
9,0727	0,0040	0,0050
8,9913	0,0090	0,0100
9,0386	0,0140	0,0150
9,1826	0,0190	0,0200
9,3718	0,0240	0,0250
9,5599	0,0290	0,0300
9,7447	0,0340	0,0350
9,9558	0,0390	0,0400
10,1505	0,0440	0,0450
10,3364	0,0490	0,0500
10,5267	0,0540	0,0550
10,7147	0,0590	0,0600
10,9259	0,0640	0,0650
11,1459	0,0690	0,0700
11,3636	0,0740	0,0750
11,6133	0,0790	0,0800
11,8311	0,0840	0,0850
12,0466	0,0890	0,0900
12,2864	0,0940	0,0950
12,5163	0,0990	0,1000
12,7703	0,1040	0,1050
12,9980	0,1090	0,1100
13,2609	0,1140	0,1150
13,5391	0,1190	0,1200
13,8009	0,1240	0,1250

Hidrogel con nanocelulosa y *Lactobacillus platarum* (IBUN-090-03774), ensayo 3

Force	Distance	Time
--------------	-----------------	-------------

N	mm	sec
9,0870	0,0000	0,0000
9,0276	0,0040	0,0050
8,9803	0,0090	0,0100
9,0562	0,0140	0,0150
9,2343	0,0190	0,0200
9,4675	0,0240	0,0250
9,6831	0,0290	0,0300
9,8788	0,0340	0,0350
10,0735	0,0390	0,0400
10,2968	0,0440	0,0450
10,5333	0,0490	0,0500
10,7422	0,0540	0,0550
10,9699	0,0590	0,0600
11,2130	0,0640	0,0650
11,4219	0,0690	0,0700
11,6243	0,0740	0,0750
11,8322	0,0790	0,0800
12,0323	0,0840	0,0850
12,2754	0,0890	0,0900
12,4998	0,0940	0,0950
12,7472	0,0990	0,1000
13,0090	0,1040	0,1050
13,2873	0,1090	0,1100
13,5391	0,1140	0,1150
13,8163	0,1190	0,1200
14,0880	0,1240	0,1250

Hidrogel con nanocelulosa y fertilizante 5%, ensayo 1

Force	Distance	Time
N	mm	sec
8,8813	0,0000	0,0000
8,7570	0,0040	0,0050
8,6492	0,0090	0,0100
8,7691	0,0140	0,0150
8,9209	0,0190	0,0200
9,0320	0,0240	0,0250
9,1001	0,0290	0,0300
9,1617	0,0340	0,0350
9,2398	0,0390	0,0400
9,3091	0,0440	0,0450
9,3927	0,0490	0,0500
9,4532	0,0540	0,0550
9,5302	0,0590	0,0600

9,6006	0,0640	0,0650
9,6699	0,0690	0,0700
9,7392	0,0740	0,0750
9,7920	0,0790	0,0800
9,8535	0,0840	0,0850
9,9206	0,0890	0,0900
9,9888	0,0940	0,0950
10,0790	0,0990	0,1000
10,1824	0,1040	0,1050
10,2693	0,1090	0,1100
10,3342	0,1140	0,1150
10,4354	0,1190	0,1200

Hidrogel con nanocelulosa y fertilizante 5%, ensayo 2

Force	Distance	Time
N	mm	sec
8,9286	0,0000	0,0000
8,8571	0,0040	0,0050
8,7944	0,0090	0,0100
8,8714	0,0140	0,0150
9,0430	0,0190	0,0200
9,2013	0,0240	0,0250
9,3509	0,0290	0,0300
9,4708	0,0340	0,0350
9,5896	0,0390	0,0400
9,7161	0,0440	0,0450
9,8645	0,0490	0,0500
10,0218	0,0540	0,0550
10,1670	0,0590	0,0600
10,3067	0,0640	0,0650
10,4596	0,0690	0,0700
10,6025	0,0740	0,0750
10,7378	0,0790	0,0800
10,8973	0,0840	0,0850
11,0601	0,0890	0,0900
11,2273	0,0940	0,0950
11,3889	0,0990	0,1000
11,5572	0,1040	0,1050
11,7068	0,1090	0,1100
11,8487	0,1140	0,1150
11,9818	0,1190	0,1200
12,1280	0,1240	0,1250

Hidrogel con nanocelulosa y fertilizante 5%, ensayo 3

Force	Distance	Time
N	mm	sec
8,9770	0,0000	0,0000
8,8593	0,0040	0,0050
8,7284	0,0090	0,0100
8,7889	0,0140	0,0150
8,9385	0,0190	0,0200
9,0870	0,0240	0,0250
9,2618	0,0290	0,0300
9,4015	0,0340	0,0350
9,5302	0,0390	0,0400
9,6600	0,0440	0,0450
9,8184	0,0490	0,0500
9,9525	0,0540	0,0550
10,0548	0,0590	0,0600
10,1681	0,0640	0,0650
10,2737	0,0690	0,0700
10,3573	0,0740	0,0750
10,4761	0,0790	0,0800
10,6168	0,0840	0,0850
10,7708	0,0890	0,0900
10,8962	0,0940	0,0950
11,0612	0,0990	0,1000
11,2152	0,1040	0,1050
11,3735	0,1090	0,1100
11,5374	0,1140	0,1150
11,6837	0,1190	0,1200
11,8674	0,1240	0,1250

Hidrogel con nanocelulosa y fertilizante al 10%, ensayo 1

Force	Distance	Time
N	mm	sec
8,9825	0,0000	0,0000
8,9363	0,0040	0,0050
8,8714	0,0090	0,0100
8,9209	0,0140	0,0150
9,0430	0,0190	0,0200
9,1760	0,0240	0,0250
9,3168	0,0290	0,0300
9,4367	0,0340	0,0350
9,5390	0,0390	0,0400
9,6435	0,0440	0,0450
9,7557	0,0490	0,0500

9,8656	0,0540	0,0550
9,9877	0,0590	0,0600
10,1032	0,0640	0,0650
10,2099	0,0690	0,0700
10,2968	0,0740	0,0750
10,3694	0,0790	0,0800
10,4871	0,0840	0,0850
10,6179	0,0890	0,0900
10,7422	0,0940	0,0950
10,8445	0,0990	0,1000
10,9578	0,1040	0,1050
11,0843	0,1090	0,1100
11,2020	0,1140	0,1150
11,2998	0,1190	0,1200
11,4186	0,1240	0,1250

Hidrogel con nanocelulosa y fertilizante al 10%, ensayo 2

Force	Distance	Time
N	mm	sec
8,9880	0,0000	0,0000
8,9022	0,0040	0,0050
8,8219	0,0090	0,0100
8,8912	0,0140	0,0150
9,0397	0,0190	0,0200
9,2090	0,0240	0,0250
9,3828	0,0290	0,0300
9,5181	0,0340	0,0350
9,6600	0,0390	0,0400
9,8436	0,0440	0,0450
10,0152	0,0490	0,0500
10,1538	0,0540	0,0550
10,3188	0,0590	0,0600
10,5014	0,0640	0,0650
10,6520	0,0690	0,0700
10,7994	0,0740	0,0750
10,9611	0,0790	0,0800
11,1294	0,0840	0,0850
11,2833	0,0890	0,0900
11,4373	0,0940	0,0950
11,6089	0,0990	0,1000
11,7860	0,1040	0,1050
11,9334	0,1090	0,1100
12,0719	0,1140	0,1150
12,2149	0,1190	0,1200
12,3689	0,1240	0,1250

Hidrogel con nanocelulosa y fertilizante al 10%, ensayo 3

Force	Distance	Time
N	mm	sec
8,9715	0,0000	0,0000
8,9231	0,0040	0,0050
8,8428	0,0090	0,0100
8,8692	0,0140	0,0150
8,9869	0,0190	0,0200
9,0990	0,0240	0,0250
9,2112	0,0290	0,0300
9,3190	0,0340	0,0350
9,4268	0,0390	0,0400
9,5258	0,0440	0,0450
9,6380	0,0490	0,0500
9,7579	0,0540	0,0550
9,8513	0,0590	0,0600
9,9404	0,0640	0,0650
10,0185	0,0690	0,0700
10,1120	0,0740	0,0750
10,2209	0,0790	0,0800
10,3243	0,0840	0,0850
10,4552	0,0890	0,0900
10,5816	0,0940	0,0950
10,6861	0,0990	0,1000
10,7851	0,1040	0,1050
10,9050	0,1090	0,1100
11,0458	0,1140	0,1150
11,1767	0,1190	0,1200
11,2987	0,1240	0,1250

Hidrogel con nanocelulosa y fertilizante al 15%, ensayo 1

Force	Distance	Time
N	mm	sec
8,9605	0,0000	0,0000
8,8989	0,0040	0,0050
8,8120	0,0090	0,0100
8,8472	0,0140	0,0150
9,0078	0,0190	0,0200

9,1628	0,0240	0,0250
9,3256	0,0290	0,0300
9,4631	0,0340	0,0350
9,6138	0,0390	0,0400
9,7370	0,0440	0,0450
9,8601	0,0490	0,0500
9,9987	0,0540	0,0550
10,1307	0,0590	0,0600
10,2154	0,0640	0,0650
10,3331	0,0690	0,0700
10,4420	0,0740	0,0750
10,5201	0,0790	0,0800
10,6047	0,0840	0,0850
10,7059	0,0890	0,0900
10,8368	0,0940	0,0950
10,9908	0,0990	0,1000
11,1008	0,1040	0,1050
11,2339	0,1090	0,1100
11,3724	0,1140	0,1150
11,5110	0,1190	0,1200
11,6595	0,1240	0,1250

Hidrogel con nanocelulosa y fertilizante al 15%, ensayo 2

Force	Distance	Time
N	mm	sec
8,9880	0,0000	0,0000
8,9143	0,0040	0,0050
8,8197	0,0090	0,0100
8,8406	0,0140	0,0150
8,9539	0,0190	0,0200
9,0826	0,0240	0,0250
9,2178	0,0290	0,0300
9,3476	0,0340	0,0350
9,4972	0,0390	0,0400
9,6512	0,0440	0,0450
9,8184	0,0490	0,0500
9,9525	0,0540	0,0550
10,0757	0,0590	0,0600
10,2176	0,0640	0,0650
10,3837	0,0690	0,0700
10,5421	0,0740	0,0750
10,6916	0,0790	0,0800
10,8434	0,0840	0,0850
10,9897	0,0890	0,0900

11,1173	0,0940	0,0950
11,2383	0,0990	0,1000
11,3658	0,1040	0,1050
11,5132	0,1090	0,1100
11,6672	0,1140	0,1150
11,8146	0,1190	0,1200
11,9653	0,1240	0,1250

Hidrogel con nanocelulosa y fertilizante al 15%, ensayo 3

Force	Distance	Time
N	mm	sec
8,9605	0,0000	0,0000
8,8846	0,0040	0,0050
8,7779	0,0090	0,0100
8,7944	0,0140	0,0150
8,9187	0,0190	0,0200
9,0716	0,0240	0,0250
9,2046	0,0290	0,0300
9,3344	0,0340	0,0350
9,4752	0,0390	0,0400
9,6094	0,0440	0,0450
9,7634	0,0490	0,0500
9,9195	0,0540	0,0550
10,0438	0,0590	0,0600
10,2000	0,0640	0,0650
10,3694	0,0690	0,0700
10,5212	0,0740	0,0750
10,6806	0,0790	0,0800
10,8401	0,0840	0,0850
11,0436	0,0890	0,0900
11,2240	0,0940	0,0950
11,3878	0,0990	0,1000
11,5649	0,1040	0,1050
11,7475	0,1090	0,1100
11,9224	0,1140	0,1150
12,1203	0,1190	0,1200
12,3084	0,1240	0,1250

Anexo 6. Análisis estadístico en software Minitab ®

Modelo estadístico análisis ANOVA y prueba Tukey

Cinética de hinchamiento hidrogel con nanocelulosa y fertilizantes

Análisis de Varianza

Fuente	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p
Factor	3	208195	69398	59,00	0,001
Error	4	4705	1176		
Total	7	212900			

Resumen del modelo

S	R-cuadrado	R-cuadrado(ajustado)	R-cuadrado (pred)
34,2973	97,79%	96,13%	91,16%

Medias

Factor	N	Media	Desv.Est.	IC de 95%
H + N	2	921,9	26,6	(854,6; 989,3)
H +N + Fer 5%	2	577,4	32,4	(510,0; 644,7)
H + N + Fer 10%	2	528,4	40,6	(461,1; 595,7)
H +N + Fert 15%	2	548,9	36,1	(481,6; 616,2)

Comparaciones en parejas de Tukey

Agrupar información utilizando el método de Tukey y una confianza de 95%

Factor	N	Media	Agrupación
H + N	2	921,9	A
H +N + Fer 5%	2	577,4	B
H +N + Fert 15%	2	548,9	B
H + N + Fer 10%	2	528,4	B

Las medias que no comparten una letra son significativamente diferentes.

Análisis de Varianza

Fuente	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p
Factor	3	356173	118724	82,70	0,000
Error	4	5742	1436		
Total	7	361915			

Resumen del modelo

S	R-cuadrado	R-cuadrado(ajustado)	R-cuadrado (pred)
37,8887	98,41%	97,22%	93,65%

Medias

Factor	N	Media	Desv.Est.	IC de 95%
H + N	2	921,9	26,6	(847,5; 996,3)
H + N + Met IBUN-090- 03684	2	417,13	5,65	(342,74; 491,51)
H + N + Met IBUN-090-03774	2	724,4	70,5	(650,0; 798,8)
H + N + Met IBUN-041-39	2	942,56	5,12	(868,17; 1016,94)

Comparaciones en parejas de Tukey

Agrupar información utilizando el método de Tukey y una confianza de 95%

Factor	N	Media	Agrupación
H + N + Met IBUN-041-39	2	942,56	A
H + N	2	921,9	A
H + N + Met IBUN-090-03774	2	724,4	B
H + N + Met IBUN-090- 03684	2	417,13	C

Las medias que no comparten una letra son significativamente diferentes.

Cinética de hinchamiento hidrogeles con nanocelulosa y bacterias ácido lácticas

Análisis de Varianza

Fuente	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p
Factor	3	920406	306802	16,86	0,003
Error	6	109181	18197		
Total	9	1029587			

Resumen del modelo

S	R-cuadrado	R-cuadrado(ajustado)	R-cuadrado (pred)
134,896	89,40%	84,09%	61,32%

Medias

Factor	N	Media	Desv.Est.	IC de 95%
H + N	3	928,2	21,7	(737,6; 1118,8)
H + N + BAL IBUN-090- 03684	3	1200,6	102,6	(1010,1; 1391,2)
H + N + BAL IBUN-090-03774	2	1768	273	(1535; 2002)
H + N + BAL IBUN-041-39	2	1443,5	111,9	(1210,1; 1676,9)

Desv.Est. agrupada = 134,896

Comparaciones en parejas de Tukey

Agrupar información utilizando el método de Tukey y una confianza de 95%

<u>Factor</u>	<u>N</u>	<u>Media</u>	<u>Agrupación</u>
H + N + BAL IBUN-090-03774	2	1768	A
H + N + BAL IBUN-041-39	2	1443,5	A B
H + N + BAL IBUN-090- 03684	3	1200,6	B C
H + N	3	928,2	C

Las medias que no comparten una letra son significativamente diferentes.