

Universidad Católica de Santa María
Facultad de Ciencias e Ingenierías Físicas y
Formales
Escuela Profesional de Ingeniería Mecánica
Eléctrica y Mecatrónica



PROPIEDADES MECÁNICAS DEL ÁCIDO POLI LÁCTICO
OBTENIDO POR POLIMERIZACIÓN DEL ÁCIDO LÁCTICO
PROVENIENTE DE CEPAS ÁCIDO LÁCTICAS

Tesis presentada por el Bachiller:

Sánchez Márquez, Sergio Luis

para optar el Título Profesional de
Ingeniero Mecánico

Asesor:

**Dr. Fernández Barriga, Camilo
Grimaldo**

Arequipa- Perú

2023

UCSM-ERP

UNIVERSIDAD CATÓLICA DE SANTA MARÍA
INGENIERIA MECANICA, MECANICA-ELECTRICA Y MECATRONICA
TITULACIÓN CON TESIS
DICTAMEN APROBACIÓN DE BORRADOR

Arequipa, 26 de Junio del 2023

Dictamen: 006928-C-EPIMMEM-2023

Visto el borrador del expediente 006928, presentado por:

2015222331 - SANCHEZ MARQUEZ SERGIO LUIS

Titulado:

**PROPIEDADES MECÁNICAS DEL ÁCIDO POLI LÁCTICO OBTENIDO POR POLIMERIZACIÓN DEL
ÁCIDO LÁCTICO PROVENIENTE DE CEPAS ÁCIDO LÁCTICAS**

Nuestro dictamen es:

APROBADO

**29361846 - CHIRE RAMIREZ EMILIO
DICTAMINADOR**



**29277716 - CUADROS MACHUCA JUAN CARLOS
DICTAMINADOR**



**43209234 - ALMIRON BACA JONATHAN JOSEPH
DICTAMINADOR**



DEDICATORIA

*Mi tesis va dedicada a Dios por brindarme esta posibilidad.
A mi familia que siempre me ha apoyado a lo largo en mi vida.*

*Agradezco su amor, paciencia y comprensión
ya que sin eso no hubiera logrado esta meta.
A ellos dedico esta tesis con amor y cariño.*



AGRADECIMIENTOS

Agradezco a Dios quien me dio la fortaleza para superar los desafíos en la vida y brindarme una familia que me quiere y ayuda bastante en cada momento.

A la Mg. María Vargas y Dr. Jonathan Almirón por su amistad y asesoría ya que fue una gran ayuda para la culminación de la tesis.

Para la realización de la presente tesis se agradece al proyecto: “Síntesis y efectos de las cepas homofermentativas utilizadas en la obtención del ácido láctico y su repercusión en la polimerización del ácido poliláctico” con Resolución N° 26617-R-2019 del Vicerectorado de Investigación de la UCSM quien financió la presente tesis.

A mis amigos Claudia, Miguel, Mariela, Yanina, Dr. Gilberto, Ing. Kevin Dr. Ruly, Kiara, Alejandra, Fernando, Annie, Karina, Fátima, Leonardo, Melany y demás amigos de los laboratorios F407 y E 406 que hice a lo largo de este tiempo, ya que me ayudaron brindando parte de su conocimiento, gracias por todo.

RESUMEN

En la actualidad se tiene un problema medioambiental de contaminación el cual es generado principalmente por los desperdicios siendo en su mayoría desechos plásticos, por lo que, para reducir esta contaminación es necesario su reemplazo considerando que su uso está ligado a diversas industrias como también a necesidades diarias. Es por esto que se busca nuevas alternativas de reemplazo siendo una de éstas los bioplásticos, y una de sus fuentes de materia prima es el ácido poli láctico. Por otro lado, el lactosuero que es un residuo de la fabricación de queso en la industria de los productos lácteos, mayormente se vuelve un desecho y no se reutiliza ocasionando una alta contaminación del suelo y agua, es así, en el presente trabajo se usó como fuente de materia prima para obtener ácido láctico utilizando cepas ácido lácticas y por el proceso de polimerización por adición se obtuvo ácido poliláctico y determinó las propiedades idóneas. Para ello se realizaron pruebas de las que se determinó las condiciones operativas óptimas de la polimerización del ácido poliláctico (PLA) a partir del ácido láctico (AL) seleccionado previamente, de las muestras totales 2 fueron las más resaltantes ya que se ubican más cerca al rango del grupo carboxilo el cual es representativo en el PLA, utilizando en ambas como catalizador Octoato de estaño ($\text{Sn}(\text{Oct})_2$) al 6%, temperatura de polimerización de la muestra 1 y 4 fueron de 95 °C y 85 °C respectivamente, también el tiempo de polimerización para la muestra 1 fue de 25 min y la muestra 4 fue de 20 min. Se caracterizó las muestras utilizando FTIR de lo cual se observaron ciertas similitudes con las muestras de sus espectros dentro de los rangos establecidos, en los resultados utilizando SEM se observó unas diferencias al momento de realizar la mezcla con plastificante, así como también se sometió a pruebas de tracción. Por consiguiente, se logró obtener PLA a base de AL obtenido por fermentación, realizando su caracterización.

Palabras Clave: Polimerización, ácido láctico, ácido poliláctico.

ABSTRACT

Nowadays there is an environmental problem of pollution which is generated mainly by waste, being mostly plastic waste, therefore, to reduce this contamination, its replacement is necessary considering that its use is linked to various industries as well as needs. daily. That is why new replacement alternatives are being sought, one of these being bioplastics, and one of its sources of raw material is polylactic acid. On the other hand, whey which is a residue of cheese manufacturing in the dairy industry, mostly becomes a waste and is not reused causing high contamination of soil and water, it is so, in the present work was used as a source of raw material to obtain lactic acid using lactic acid strains and by the process of polymerization by addition polylactic acid was obtained with ideal properties. For this, tests were carried out from which the optimal operating conditions for the polymerization of polylactic acid (PLA) were developed from the previously selected lactic acid (AL), of the total samples 2 were the most outstanding since they are located closest to the range of the carboxyl group which is representative in PLA, using 6% tin octoate ($\text{Sn}(\text{Oct})_2$) as catalyst in both, polymerization temperature of sample 1 and 4 were 95 °C and 85 °C respectively , also the polymerization time for sample 1 was 25 min and sample 4 was 20 min. The samples were characterized using FTIR, of which certain similarities were observed with the samples of their spectra within the established ranges, in the results using SEM some differences were shown at the time of mixing with plasticizer, as well as tests. traction. Consequently, PLA will be obtained based on AL obtained by fermentation, carrying out its characterization.

Keywords: Polymerization, lactic acid, polylactic acid.

ÍNDICE

DEDICATORIA.....	ii
AGRADECIMIENTOS	iii
RESUMEN.....	iv
ABSTRACT	v
INTRODUCCIÓN	1
CAPITULO I.....	3
1. GENERALIDADES	4
1.1. Descripción del problema	4
1.2. Hipótesis	5
1.2.1. Variables independientes.....	5
1.2.1.1. Indicadores.	5
1.2.2. Variables dependientes.	5
1.2.2.1. Indicadores.	5
1.3. Objetivos.....	5
1.3.1. Objetivo general.	5
1.3.2. Objetivos específicos.	6
1.4. Alcance	6
1.5. Justificación.....	6
CAPITULO II	8
2. MARCO TEÓRICO	9
2.1. Ácido láctico	9
2.2. Tipo de ácido láctico	12
2.3. Caracterización	14
2.4. Fermentación	15
2.5. Polimerización.....	21
2.6. Ácido poliláctico.....	27
2.7. Aplicaciones del ácido poliláctico	29
2.8. Secado	32
2.9. Extrusión	33
2.10. Degradación del PLA	35
CAPITULO III.....	37
3. METODOLOGÍA EXPERIMENTAL	38
3.1. Ubicación del área de investigación	38
3.2. Metodología	39
3.2.1. Obtención y purificación del Ácido láctico.	39
3.2.2. Caracterización de ácido láctico.	43

3.2.3.	Polimerización del Ácido Láctico a Ácido Poliláctico.....	43
3.2.3.1.	Polimerización	43
3.2.3.2.	Recristalización	46
3.2.3.3.	Fabricación de probetas de PLA.	47
3.2.4.	Caracterización del Ácido Poli láctico	53
3.2.4.1.	Caracterización química y térmica.....	53
3.2.4.2.	Caracterización Mecánica	54
CAPITULO IV	56
4.	RESULTADOS Y DISCUSIÓN	57
4.1.	Obtención y purificación del ácido láctico	57
4.1.1.	Rendimiento en la purificación de ácido láctico.....	57
4.2.	Caracterización del ácido láctico.....	58
4.2.1.	Características por espectroscopía Infrarroja por Transformada de Fourier (FTIR).....	58
4.3.	Polimerización del Ácido Láctico a Ácido Poliláctico	61
4.3.1.	Rendimiento en la polimerización para obtener Ácido poliláctico.....	62
4.4.	Caracterización del Ácido Poliláctico	62
4.4.1.	Caracterización por espectroscopía Infrarroja por Transformada de Fourier (FTIR) del PLA	62
4.4.2.	Caracterización por Microscopía electrónica de barrido.....	70
4.4.3.	Caracterización mecánica	72
CONCLUSIONES	74
RECOMENDACIONES	75
REFERENCIAS	76

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Diagrama esquemático de isómeros ópticos de L (+) y D (-) ácido láctico.	13
Figura 2. Síntesis de ácido poli láctico (PLA) a partir de ácidos L- y D-lácticos.	21
Figura 3. Preparación del ácido poli láctico.	24
Figura 4. Fibras de carbón, vidrio y boro.	30
Figura 5. Fibras naturales usadas para refuerzo.	31
Figura 6. Aplicaciones biomédicas representativas del PLA.	31
Figura 7. Extrusora de tronillo.	33
Figura 8. Tornillo de alimentación espiral para extrusión.	34
Figura 9. Flujograma del procedimiento propuesto.	38
Figura 10. Ácido Láctico obtenido del proceso de fermentación.	40
Figura 11. Ácido Láctico purificado.	41
Figura 12. Separación del Ácido láctico en pera de decantación.	42
Figura 13. Separación de ácido láctico con el éter utilizando el rotavapor.	42
Figura 14. Muestra de ácido láctico.	44
Figura 15. Polimerización del ácido láctico con catalizador.	44
Figura 16. Finalización de la etapa de polimerización.	45
Figura 17. Muestra obtenida al finalizar la polimerización.	46
Figura 18. PLA obtenido disuelto en cloroformo.	46
Figura 19. Proceso de recristalización.	47
Figura 20. Esquema de la maquina inyectora de plástico.	48
Figura 21. Cámara de inyección.	48
Figura 22. Abastecimiento de PLA a la cámara de inyección.	49
Figura 23. Molde de inyección.	49
Figura 24. Fijación del molde a la base.	50
Figura 25. Encendido de compresora.	50
Figura 26. Tablero de control.	51
Figura 27. Fijación de la cámara de inyección.	52
Figura 28. Probeta recién inyectada en molde.	52
Figura 29. Probeta sin rebordes.	53
Figura 30. Máquina de tracción para polímeros.	54
Figura 31. Prueba de tracción para el PLA.	54
Figura 32. Probeta de PLA sometida a tracción.	55

Figura 33. Muestra 1 de AL (Levadura_ Cepas libres_ Lactosuero_ Proteinizado).	59
Figura 34. Muestra 2 de AL(Lactobacilo_ Cepas libres_ Lactosuero Desproteinizado).....	59
Figura 35. Muestra 3 de AL (Lactosuero desproteinizado_ Levadura en Perlas de Alginato al 2.5% y 4% Cl ₂ Ca)	60
Figura 36. Muestra 4 de AL (Lactosuero desproteinizado_ Lactobacilo en Perlas de Alginato al 3% y 5% Cl ₂ Ca)	61
Figura 37. PLA obtenido luego de la recristalización	62
Figura 38. Muestra de espectro del PLA comercial.....	63
Figura 39. Muestra 1 de PLA (6% Sn(Oct) ₂ _ 95°C_ 25min)	64
Figura 40. Muestra 4 de PLA (6% Sn(Oct) ₂ _ 97°C_ 20min)	64
Figura 41. Muestra 2 de PLA (4% Sn(Oct) ₂ _ 80°C_ 20min)	65
Figura 42. Muestra 3 de PLA (4% Sn(Oct) ₂ _ 85°C_ 15min)	65
Figura 43. Muestra 5 de PLA (1% Sn(Oct) ₂ _ 94°C_ 20min)	66
Figura 44. Muestra 5 de PLA (1% Sn(Oct) ₂ _ 94°C_ 20min_ 10% PEG)	66
Figura 45. Muestra 6.a de PLA (5% Sn(Oct) ₂ _ 98°C_ 31min)	67
Figura 46. Muestra 6.b de PLA (5% Sn(Oct) ₂ _ 98°C_ 31min)- recristalización.	67
Figura 47. Muestra 7.a de PLA (5% Sn(Oct) ₂ _ 98°C_ 31min)	68
Figura 48. Muestra 7.b de PLA (5% Sn(Oct) ₂ _ 98°C_ 31min)-recristalización.	68
Figura 49. Muestra 7.b de PLA (5% Sn(Oct) ₂ _ 98°C_ 31min-1% PEG)-	69
Figura 50. Muestra 8 de PLA (6% Sn(Oct) ₂ _ 95°C_ 35min)	69
Figura 51. Muestra 8 de PLA visto por SEM (a), (b) y (c) aumento x200, (d) y (e) aumento x20.....	70
Figura 52. Muestra 7 de PLA/PEG visto por SEM (a) y (b) aumento x100, (c) y (d) aumento x20.....	71
Figura 53. Muestra del PLA comercial.....	72
Figura 54. Gráfica esfuerzo vs deformación del PLA	73

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Propiedades térmicas del ácido láctico.	14
Tabla 2. Producción de ácido láctico usando diferentes sustratos y microorganismos	20
Tabla 3. Resumen de estudios sobre variables de polimerización de PLA y peso molecular.	26
Tabla 4. Propiedades del PLA comparado con otros plásticos	28
Tabla 5. Tabla comparativa de ventajas y desventajas del PLA	29
Tabla 6. Polímeros biodegradables comerciales y sus diferentes procesamientos	35
Tabla 7. Identificación de las muestras con su codificación.....	39
Tabla 8. Condiciones de temperatura y tiempo para las muestras	41
Tabla 9. Características del Equipo de FTIR	43
Tabla 10. Condiciones de Polimerización.....	45
Tabla 11. Descripción de equipos FTIR y SEM.	53
Tabla 12. Tabla de rendimiento del Ácido láctico.....	57
Tabla 13. Resultado de la prueba de tracción	73

INTRODUCCIÓN

Los plásticos son muy utilizados alrededor del mundo, siendo estos casi indispensables para algunas aplicaciones y a su vez generando una contaminación ambiental ubicándose en mayor medida en el mar como es el gran parche de basura del pacífico. En general, los investigadores estimaron que el gran parche de basura del pacífico es de 1,6 millones de km², más del doble del tamaño de Texas y cada año aumenta exponencialmente (Schoell, 2019). También en 2017, se reportó por el Ministerio del Ambiente (MINAM) que *Algalita Marine Research and Education*, descubrió una isla de plástico, frente a las costas de Chile y Perú estimaron que tiene una superficie aproximada de 2.6 millones de kilómetros cuadrados, casi dos veces la superficie de Perú (MINAM, 2018). El desafío comúnmente más identificado es la contaminación de los residuos plásticos y el uso generalizado de materiales compuestos en productos y envases de plástico. Esto implica que, después de usar plástico reciclado en la fase de producción como materia prima junto a materiales compuestos, lo vuelve técnicamente y económicamente difícil de reciclar cuando este llegue a ser desechado (Johansen et al., 2022).

La degradación de los plásticos genera una preocupación cada vez mayor sobre los efectos potenciales de los micro plásticos en la salud humana, ya que se han detectado micro plásticos en muestras de alimentos y aire. Con todas las graves consecuencias, los métodos para ayudar en la degradación del plástico y las alternativas a los plásticos convencionales han llamado la atención de los investigadores ya que el uso de materiales plásticos es inevitable para las necesidades de la vida diaria (Chia et al., 2020).

Es debido a estos factores que se busca utilizar otras opciones como es el uso de bioplástico, los cuales han sido una alternativa para el remplazo de los plásticos entre ellos uno es el ácido poliláctico (PLA), el cual es un polímero termoplástico, de alta resistencia y alto módulo que

puede fabricarse a partir de recursos renovables (Garlotta, 2001). El cual nos brinda varios beneficios debidos a sus propiedades que posee.

A su vez también podemos ver que se ha incrementado su uso con diversas aplicaciones. Los polímeros basados en PLA se han estudiado ampliamente en la literatura. y son actualmente una realidad consolidada en el campo de la biomedicina, gracias a sus interesantes propiedades (Casalini et al., 2019). Las cualidades de fácil accesibilidad, baja densidad, bajo precio, fuerte aislamiento térmico y acústico, respeto por el medio ambiente, reciclabilidad, la renovabilidad y unas propiedades mecánicas adecuadas contribuyen a la popularidad de elección de biocompuestos basados en PLA (Ashothaman et al., 2021).

Sin embargo, algunas de sus propiedades necesitan mejorarse por lo cual se siguen investigando métodos de producción, también alternativas para aumentar las propiedades cuando se utiliza en compuestos con fibras y así poder reemplazar los usados tradicionalmente.

En el Perú, en promedio, se usan al año aproximadamente 30 kilos de plástico por ciudadano (MINAM, 2018). Esto es muy importante a tener en cuenta ya que no se tiene una cultura de reciclaje muy arraigada en la sociedad.

En la presente tesis se propone la obtención de ácido láctico a partir de cepas Ácido lácticas para posteriormente transformarlo a ácido poli láctico, mediante polimerización por adición, con propiedades idóneas para su utilización y usando como materia prima el lactosuero dándole así un valor agregado a este residuo.



1. GENERALIDADES

1.1. Descripción del problema

El reporte de la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura OCDE (2021) informa que la producción a nivel mundial de leche aumentó 1.4% en el año 2020 siendo alrededor de 861 Mt. Estudios anteriores afirman que de 100 kg de leche utilizados para la producción de queso se obtendría aproximadamente 10 kg del producto, teniendo 90 kg de suero de leche como subproducto. El lactosuero obtenido del procesamiento es contaminante del medioambiente; sin tener en cuenta sus múltiples aplicaciones, así como propiedades nutritivas (Asas et al., 2021).

Según el ministerio de Desarrollo Agrario y Riego (2021) se menciona en la nota de prensa del 1 de junio del 2021, informa que hace 3 años el Perú tuvo una producción de 2,138,028 toneladas de leche de ganado vacuno, esta actividad ha involucrado a 452,218 familias las cuales son productores de leche dividiéndose en grandes y medianos productores (14.1%) y el resto clasificados como pequeños productores (85.9%). el ministerio de Desarrollo Agrario y Riego (MIDAGRI) clasificó las cuencas productoras de leche en 5, las ubicaciones son en la región de Cajamarca en primer lugar con un porcentaje del 17.12%, en segundo lugar, Lima con una producción del 16.94%, Arequipa en tercer lugar con un porcentaje de 16.77%, La Libertad ocupa el cuarto lugar con 7.37% y finalmente Puno con 6.16%.

Siendo nuestra ciudad la tercera en producción de leche y teniendo en cuenta que según el Ministerio de Desarrollo Agrario y Riego reportó que del 100% de la producción nacional de leche, el 43% se destina a la producción de quesos y derivados lácteos (MIDAGRI, 2020).

Otra situación es que al año se suman cerca de 3 mil millones de bolsas plásticas, casi 6 mil bolsas por cada minuto (MINAM, 2018), siendo el plástico un contaminador del ambiente y se buscan soluciones alternativas como los bioplásticos para reducir el impacto en la salud y ambiental.

Por lo tanto, el problema a resolver es como crear un bioplástico el cual pueda satisfacer las necesidades del mercado mediante el aprovechamiento del suero de leche que se produce como desecho en la fabricación de queso.

1.2. Hipótesis

Es posible obtener ácido poli láctico que tenga propiedades mecánicas idóneas para su uso comercial a través del proceso de polimerización del ácido láctico proveniente de cepas ácido lácticas.

1.2.1. Variables independientes.

Proceso de polimerización.

1.2.1.1. Indicadores.

- Tipo de ácido láctico
- Concentración del catalizador
- Temperatura de reacción

1.2.2. Variables dependientes.

Propiedades Morfológicas del Ácido Poli láctico.

1.2.2.1. Indicadores.

- Espectro de Infrarrojo obtenido por Espectroscopía Infrarroja (FTIR).
- Morfología del PLA vista mediante Microscopia Electrónica de barrido (SEM).

1.3. Objetivos

1.3.1. Objetivo general.

Determinar las propiedades del ácido poliláctico (PLA) obtenido mediante polimerización por adición a partir del ácido láctico.

1.3.2. Objetivos específicos.

- Determinar las condiciones operativas óptimas de la polimerización del ácido poliláctico (PLA) obtenido del lactosuero.
- Evaluar el PLA obtenido utilizando espectroscopía de infrarrojos por transformada de Fourier (FTIR).
- Caracterizar morfológicamente el ácido poliláctico mediante Microscopía Electrónica de barrido (SEM).

1.4. Alcance

El alcance de la presente investigación es la utilización de residuos lácteos (lactosuero) provenientes de la industria quesera para obtener ácido láctico del cual por polimerización por adición se obtendrá ácido poli láctico con propiedades mecánicas idóneas para su utilización

1.5. Justificación

Los motivos que condujeron a la realización de esta investigación se describirán desde tres enfoques.

1.5.1. Social

Desde el punto de vista social si se consigue los resultados esperados este proyecto permitirá que se replique la tecnología propuesta y dará un valor agregado a un residuo del proceso de la fabricación de queso (lactosuero), el cual se desecha y a su vez, ayudar de esta forma a las comunidades productoras de leche quienes podrían generar más ingresos.

1.5.2. Económica

Desde el punto de visto económico, este proyecto contribuye no solo a que se pueda crear industrias dedicadas a la fabricación de este bioplástico a un bajo costo, sino que se

obtendría un procedimiento de bajo costo y aprovechamiento de los residuos de lactosuero y así repercutir de manera positiva en la economía.

1.6. Ambiental

Desde el punto de vista ambiental, en este proyecto se propone un proceso atractivo en términos de su impacto ambiental, menor comparado a los plásticos comunes, esto ya que al conseguirse residuos biodegradables su degradación será más rápida que los residuos plásticos comunes, además de que contribuirá a que ya no se generen más “islas de plásticos”, por lo tanto, los impactos ambientales generados en la fauna y flora marina, suelos y agua podrían ser mitigados. Asimismo, al reutilizar el lactosuero como materia prima se contribuye a una disminución de la contaminación de suelos y agua debido a la alta carga orgánica que contienen estos residuos.



2. MARCO TEÓRICO

2.1. Ácido láctico

El ácido láctico fue descubierto en 1780 por C.W. Scheele en la leche agria, y en 1881 Fermi obtuvo ácido láctico por fermentación, dando como resultado su producción industrial. El interés por el ácido láctico está relacionado con muchos aspectos, entre los que se encuentra su valor añadido relativamente alto. Además de estar reconocido como inocuo por la Administración de Drogas y Alimentos de los Estados Unidos, tiene un mercado con un gran potencial de crecimiento (Castillo Martinez et al., 2013a).

Se puede definir al ácido láctico (LA) como un ácido orgánico, el cual tiene un papel esencial en aplicaciones industriales. Los métodos de fermentación convencionales han sido bien estudiados desde finales del siglo XVIII, pero no pueden alcanzar las expectativas de los consumidores en cuanto a calidad y cantidad (Eş et al., 2018). Otros investigadores lo definen como un monómero que comprende el ácido poli láctico, y su existencia es muy común. Juega un papel vital en los organismos, además de ser una sustancia importante para mantener el crecimiento y desarrollo de los organismos vivos (G. Li et al., 2020). Otra definición para el ácido láctico es la de una biomolécula que ofrece varias aplicaciones industriales y biomédicas, algunas con productos de alto valor (Ahmad et al., 2020) llegando a un consenso entre autores de que es una sustancia muy valiosa debido a su uso en diversas aplicaciones.

El ácido láctico puede ser producido alternativamente por fermentación o síntesis química y puede emplear una gran variedad de diferentes materiales de desecho como sustratos (Castillo Martinez et al., 2013a).

Li et al., (2020) menciona que los métodos de síntesis química también se han aplicado para la producción industrial de ácido láctico. En la cual se menciona tres tipos:

El método del lactonitrilo es descrito como el siguiente, el lactonitrilo se hidroliza con ácido sulfúrico para obtener AL crudo. El AL crudo se agrega al etanol para la esterificación y el ácido láctico refinado se obtiene por destilación, concentración y descomposición.

El método del acrilonitrilo es como el método anterior, pero con acrilonitrilo reemplazando al lactonitrilo, hidrolizado con ácido sulfúrico. Entonces el producto hidrolizado se hace reaccionar con metanol; el éster crudo se envía a la torre de destilación, y el éster refinado se calienta y se aspira para obtener el producto.

El método del ácido propiónico: Usando ácido propiónico como materia prima, el ácido láctico crudo se obtiene mediante cloración e hidrólisis; luego, el producto se obtiene por esterificación, rectificación e hidrólisis.

Sin embargo, en la actualidad la producción del ácido láctico utiliza carbohidratos en una fermentación microbiana, el aspecto químico y económico es más rentable a comparación del método químico (Inkinen et al., 2011). En la investigación de Castillo Martinez et al., (2013) mencionan algunas de estas razones, una de estas es que plantea un menor impacto ambiental, el consumo de varios sustratos rentables, además se requiere trabajar con temperaturas comparativamente más bajas y baja utilización de energía con la posibilidad de producción pura de AL. Tomando como recurso renovable plantas como el trigo, la paja y el maíz se puede iniciar la producción de ácido láctico (G. Li et al., 2020).

Komesu et al., (2017) menciona que los materiales ricos en almidón, como el trigo, el maíz, la mandioca, la patata, el arroz, el centeno y la cebada son materias primas potenciales para producción de ácido láctico. Esto es debido a una ventaja y es que los materiales ricos en almidón pueden evitar la represión de la glucosa, lo que ocurre cuando una alta concentración de glucosa en el medio inhibiría el crecimiento de las bacterias del ácido láctico.

Aproximadamente el 90% del ácido láctico comercialmente disponible se produce por fermentación sumergida de maíz.

Otras fuentes de carbohidratos para la producción de ácido láctico incluyen desechos de cocina, desechos de harina de pescado y lodos de papel. Mediante el uso de desechos de cocina, las preocupaciones sobre la gestión de desechos en ciudades superpobladas podrían aliviarse automáticamente.

Además, algunas partes de los carbohidratos de los desechos volverán al ciclo de producción de ácido láctico y, como resultado, disminuirán una gran cantidad del consumo de maíz (Jamshidian et al., 2010a).

En la investigación de Ahmad et al., (2020) se menciona que se han utilizado varias materias primas para la producción de LA. Los principales desafíos para la producción económica de LA son el sustrato de las materias primas y los procesos de fermentación que comprenden aproximadamente entre el 40 % y el 70 % de los costos de producción.

Se pueden utilizar como materia prima los productos de desecho de industrias alimentarias, industrias agrícolas, caña de azúcar y biomasas, medioambiental y económicamente hablando es una ventaja (Komesu et al., 2017).

Es necesario tener en cuenta el costo de las materias primas, que es uno de los principales factores en la producción económica de ácido láctico. Dado que el costo de los sustratos no se puede reducir ampliando el proceso, actualmente se está realizando una amplia investigación para encontrar nuevos sustratos para la producción de AL.

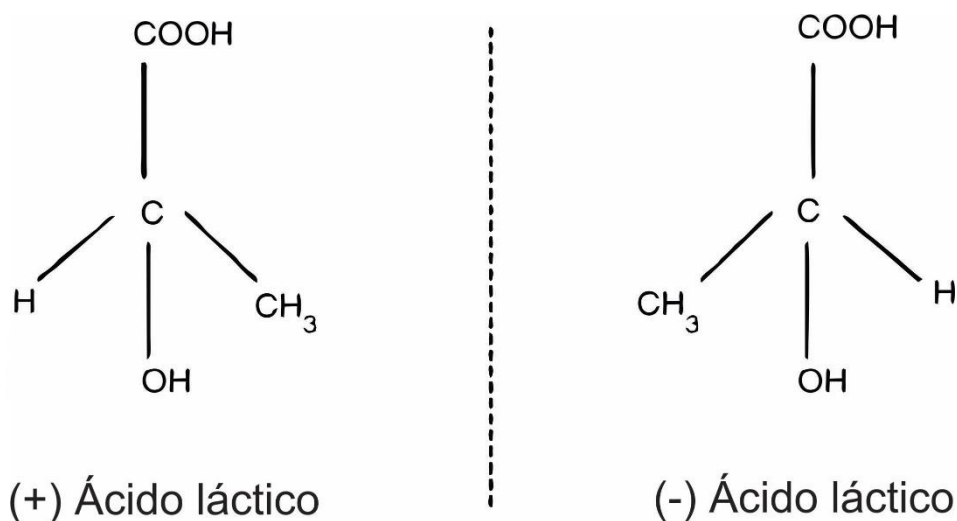
2.2. Tipo de ácido láctico

El ácido láctico tiene propiedades físicas y químicas, algunas de las cuales dependen del arreglo de sus átomos de carbono quirales, ya que esto afecta la existencia de enantiómeros en las formas dextro (D) y levo (L) (Alomoto Masabanda & Ormaza Velásquez, 2020).

En la Figura 1 se observan ambos isómeros del AL (L (+) y D (-)), los dos isómeros poseen las mismas propiedades del tipo físico (punto de fusión, solubilidad, constante de disociación, densidad, etc.) y a su vez poseen propiedades químicas con mucha similitud, exceptuando en casos de reacciones en las que están presentes otros compuestos ópticamente activos. Un resultado de estas reacciones es el aumento de la dificultad al momento de separar los compuestos utilizando técnicas tradicionales (cromatografía, destilación y cristalización fraccionada) (Komesu et al., 2017).

El comportamiento químico del ácido láctico está determinado por sus propiedades físico-químicas, entre las que se encuentran: carácter ácido en medios acuosos; reactividad bifuncional asociada a la presencia de un grupo carboxilo y un grupo hidroxilo, lo que le confiere una gran versatilidad de reacción; y actividad óptica asimétrica de C2 (Castillo Martínez et al., 2013).

Figura 1. Diagrama esquemático de isómeros ópticos de L (+) y D (-) ácido láctico.



Nota. Comparación de los dos isómeros de ácido láctico. Fuente: Adaptada de (Singhvi et al., 2019).

También se menciona en Komesu et al., (2017) Cuando se trabaja con sustancias ópticamente activas, se debe elegir una técnica de separación adecuada. Los isómeros puros se consideran de un mayor valor en comparación de las mezclas racémicas porque se utilizan para aplicaciones industriales específicas, a continuación, se menciona un ejemplo: el ácido L (+)-láctico se utiliza en la síntesis de ácido L (+)-poliláctico, un polímero termoestable y semicristalino biodegradable. Otra forma de aplicación es para la obtención de ácido poliláctico D (-), donde se utiliza el isómero D (-) del ácido láctico.

Se sabe que los isómeros se comportan de manera diferente en los tejidos vivos al utilizar LA en medicina. El ácido L (+)-láctico se encuentra en los organismos vivos con más frecuencia que el ácido D (-)-láctico. En el cuerpo humano, sólo se produce ácido L (+)-láctico durante la contracción muscular. Para aplicaciones en alimentos y en medicina, se prefiere el ácido L(+)-láctico porque la conversión metabólica del ácido L(+)-láctico en el cuerpo es más rápida que la del ácido D(-)-láctico. Diferentes métodos de producción dan como resultado

diferentes cantidades de isómeros. En la producción de ácido láctico por síntesis química sólo se obtiene una mezcla racémica, donde las concentraciones de los isómeros son iguales, mientras que la fermentación permite producir un isómero en mayor cantidad. (Komesu et al., 2017, pp. 4365-4366)

2.3. Caracterización

El ácido láctico posee un rango de variación de color, desde el amarillo hasta ser incoloro y también inodoro. Se considera al ácido hidroxilo carboxílico como el más simple. El ácido láctico es tanto un alcohol como un ácido, y posee un carbono asimétrico que le da actividad óptica. (Komesu et al., 2017)

Las soluciones comerciales de ácido láctico son típicamente soluciones acuosas al 80-90% de ácido láctico L-, D- o racémico. El contenido de agua de una solución de ácido láctico generalmente se determina mediante la titulación de Karl Fischer. (Inkinen et al., 2011).

A continuación, en la Tabla 1 se muestran las propiedades térmicas del ácido láctico.

Tabla 1. *Propiedades térmicas del ácido láctico.*

Propiedades	Valores
Densidad a 20 °C (g/L)	1.249
Punto de fusión (°C)	52.8 (D); 53.0 (L); 16.8 (DL)
Punto de ebullición (°C)	82.0 (DL) a 0.5 mmHg; 122.0 (DL) a 15 mmHg; 103.0 (D) a 15 mmHg;
Capacidad Calorífica (J/mol °C) a 20 °C	190 (DL)
Calor de solución (kJ/mol) a 25 °C	7.79 (L)
Calor de fusión (kJ/mol)	16.86 (L); 11,33 (DL)

Fuente: Extraído y modificado de Komesu et al (2017).

2.4. Fermentación

La fermentación se puede definir como un proceso de fermentación caracterizado por la biodegradación de un sustrato (glucosa) por una población de microorganismos (biomasa) en metabolitos como etanol, ácido cítrico y, en nuestro caso, ácido láctico. Se pueden utilizar una gran variedad de microorganismos y materias primas para preparar ácido. El uso de sustratos puros, como la sacarosa proveniente de la caña de azúcar y la remolacha azucarera, genera productos de fermentación de alta pureza que reducen los costos de purificación (Komesu et al., 2017).

La fermentación del ácido láctico se puede definir como un proceso comparativamente rápido y caracterizado con un rendimiento alto que produce selectivamente uno de los dos estereoisómeros del ácido láctico o su mezcla racémica. Iniciando el proceso después de incorporar los nutrientes, donde la solución de azúcar se inocula con microorganismos seleccionados y se fermentará. Con condiciones de fermentación controladas siendo las más favorables para el proceso (temperatura, pH, aireación, mezcla), estas pueden cambiar en función del microorganismo (Castillo Martínez et al., 2013a).

Aplicando diferentes métodos de producción obtenemos distintas cantidades de isómeros. Cuando el ácido láctico se produce por síntesis química, solo se obtiene una mezcla racémica en la que los isómeros están en concentraciones iguales, mientras que una gran cantidad de un isómero se obtiene en el proceso de fermentación. (Komesu et al., 2017).

Es por esto que, aunque el ácido láctico puede ser producido por procesos químicos, casi el 90% del LA total se produce por fermentación bacteriana en todo el mundo y el resto

parte se produce sintéticamente por hidrólisis de lacto nitrilo. La ruta de síntesis por lo general produce DL-AL, mientras que una L (+)- o D (-) AL ópticamente pura se puede lograr por medio de la fermentación microbiana dependiendo de la cepa seleccionada (Singhvi et al., 2019).

En la Tabla 2 se ve una comparación de la producción de ácido láctico usando diferentes sustratos y microorganismos.

Como se mencionó anteriormente los principales desafíos para la producción económica de ácido láctico son el sustrato de las materias primas y los procesos de fermentación que comprenden aproximadamente entre el 40 % y el 70 % de los costos de producción por esto se requiere una investigación de nuevos métodos con una mayor eficiencia en la producción. Actualmente, su producción depende del azúcar que compite con los recursos alimentarios, incluidos los azúcares refinados (glucosa) o los almidones. El uso de sustratos no alimentarios de bajo coste, junto con biomasa lignocelulósica, residuos alimentarios o microalgas, ha sido fuertemente propuesta para su producción económica (Ahmad et al., 2020).

La biomasa de lignocelulosa también es una fuente prometedora para la producción de ácido láctico porque representa la fuente mundial de biomasa más abundante. Se puede utilizar para obtener soluciones de azúcar que se pueden aprovechar para la producción de ácido láctico a través de los siguientes pasos:

- Pretratamiento para descomponer la estructura lignocelulósica.
- Hidrólisis enzimática para despolimerizar la lignocelulosa en azúcares fermentativos.
- Fermentación de azúcar a ácido láctico.

Aunque el costo de la lignocelulosa es bajo, el paso de pretratamiento hace que todo el proceso sea ineficiente en términos de costos. Esto ocurre debido a las siguientes razones:

- Costo adicional de enzimas y productos químicos.
- Compuestos inhibidores generados durante la hidrólisis química como, por ejemplo: furfural, 5-hidroximetilfurfural y algunos ácidos orgánicos que inhiben a los microorganismos utilizados en la fermentación
- Producción de azúcares mixtos como las pentosas, que no pueden ser fermentados por la mayoría de las cepas productoras.

Para superar estos desafíos, la conversión directa de azúcares poliméricos es de gran interés. Además, el pretratamiento hidrotérmico es uno de los métodos más simples y prometedores. En este proceso, solo se utiliza agua caliente como medio de reacción, lo que reduce los costos de operación y mantenimiento.

Recientemente, se ha informado que la fabricación de queso produce grandes volúmenes de suero como subproducto. Varios estudios han informado recientemente sobre la producción de ácido láctico usando suero. El suero es una materia prima potente y adecuada para la producción de ácido láctico porque contiene lactosa, proteínas, grasas, vitaminas solubles en agua, sales minerales y otros nutrientes esenciales para el crecimiento microbiano. (Komesu et al., 2017^a, p. 4371)

Sobre los organismos necesarios para la realización de la fermentación Castillo Martínez et al., (2013) nos habla sobre el *Lactobacillus* el cual es el género más grande y diverso de bacterias del ácido láctico, que incluye especies con muy diferentes propiedades bioquímicas y fisiológicas junto con especial resistencia contra ambiente ácido. Porque de su alta tasa de crecimiento y productividad, los microorganismos pertenecientes a este género se emplean en importantes producciones industriales.

Komesu et al., (2017) plantea que los microorganismos utilizados en la fermentación se pueden dividir en dos grupos: bacterias y hongos. La elección de qué tipo de microorganismo

usar depende principalmente del carbohidrato que se va a fermentar, ya que el metabolismo de un microorganismo difiere con las diferentes fuentes de carbono.

2.4.1. Fermentación por Hongos

Los hongos y las bacterias son los microorganismos más utilizados para producir ácido láctico. La principal ventaja de la utilización de hongos como agentes fermentadores es debido a su capacidad de liberación de amilasas extracelulares capaces de hidrolizar materiales amiláceos, debido a eso no es requerido de una etapa previa de hidrólisis, y a la característica de una separación fácil de la biomasa por la formación de micelio. Estos hongos, que suelen pertenecer al género *Rhizopus* y que producen especialmente el isómero L(p), han sido empleados con almidones de maíz, arroz, patata, trigo y piña, e hidrolizados de mazorcas de maíz, madera de pino y papel de desecho (Castillo Martinez et al., 2013).

2.4.2. Fermentación por Bacterias

En la fermentación por bacterias las bacterias del ácido láctico se nombran en función de la capacidad que tiene para producir ácido láctico como el principal (ya veces el único) producto de la fermentación del azúcar. Muchas bacterias del ácido láctico también codifican las enzimas necesarias para la respiración aeróbica, pero ninguna sintetiza hemo (algunas bacterias del ácido láctico también carecen de menaquinonas). Por lo tanto, la cadena de respiración no es funcional a menos que se agregue hemo (y para algunas bacterias hemo y menaquinonas) al medio de cultivo. La mayoría de las bacterias del ácido láctico son catalasas negativas, inmóviles, no forman esporas y tienen una temperatura de crecimiento óptima entre 20 y 45 °C, Además, ellos tienen alta tolerancia a condiciones ácidas ($\text{pH} < 5$), lo que les confiere una ventaja competitiva frente a otras bacterias (Castillo Martinez et al., 2013).

Komesu et al., (2017) realiza otro tipo de clasificación para las bacterias del ácido láctico (BAL), clasificandolas en dos grupos según el producto final de la fermentación: Homo

fermentativas y hetero fermentativas. Dividiéndose en dos tipos de BAL hetero fermentativas en obligatorias y facultativas.

2.4.3. *Homo fermentativas*

Las BAL homo fermentativas convierten la glucosa casi exclusivamente en ácido láctico

2.4.4. *Hetero fermentativas*

LAB hetero fermentativas catabolizan la glucosa en etanol, CO₂ y ácido láctico. Las BAL homo fermentativas normalmente metabolizan la glucosa por la vía de Embden-Meyerhof-Parnas (glucólisis). La glucólisis solo da como resultado ácido láctico como producto final del metabolismo de la glucosa.

2.4.5. *Hetero fermentativas obligatorias*

Las BAL hetero fermentativas obligatorias fermentan el azúcar por la vía del 6 fosfogluconato/fosfocetolasa.

2.4.6. *Hetero fermentativas facultativa*

Las BAL hetero fermentativas facultativas utilizan ambas vías para la fermentación

2.4.7. *Purificación del ácido láctico.*

La purificación del ácido láctico es uno de los pasos más costosos del proceso de producción. Se debe prestar gran atención a la adición de residuos de bajo costo u otros nutrientes al medio, porque la eliminación de impurezas puede aumentar significativamente los costos de los pasos de purificación. Los métodos para reducir las impurezas en el producto final incluyen extracción, separación por membrana, intercambio iónico, electrodiálisis y destilación con reacción química (Castillo Martínez et al., 2013).

Tabla 2. Producción de ácido láctico usando diferentes sustratos y microorganismos

Sustrato	Microorganismo	Proceso de Fermentación	Ácido Láctico		
			Concentración (g/L)	Producción (g/g)	Productividad (g/L/h)
Fibras de alfalfa	<i>Lb. plantarum</i>	Batch	46.4	0.46	0.64
Pulpa de manzana	<i>Lb. rhamnosus</i> ATCC 9595 (CECT288)	Batch	32.5	0.88	5.41
Bagazo de yuca	<i>Lb. delbrueckii</i> NCIM 2025	Batch	81.9	0.94	1.36
Celobiosa	<i>E. mundtii</i> QU 25	Batch	119	0.83	1.12
Celobiosa	<i>Lb. delbrueckii</i> mutant Uc-3	Batch	90	0.90	2.25
Celobiosa	<i>B. coagulans</i> 3601	Fed batch	80	0.80	0.30
Lactosuero	<i>Lb. casei</i> NRRL B-441	Batch	96	0.93	2.20
Rastrojo de maíz	<i>B. coagulans</i> LA204	Fed batch	97.59	0.68	1.63
Melaza de mazorca de maíz	<i>Bacillus</i> sp. strain	Fed batch	74.7	0.50	0.38
Glucosa	<i>Lb. lactis</i> BME5-18M	Fed batch	210.0	0.97	2.20
Glicerol	<i>E. coli</i> AC-521	Batch	56.8	0.88	0.94
Hidrolizados lignocelulósicos	<i>Bacillus</i> sp. NL01	Fed batch	75.0	0.75	1.04
Lodos de papel	<i>L. rhamnosus</i> ATCC 7469	Batch	73.0	0.97	2.90
Bagazo de caña de azúcar	<i>Le. lactis</i> 10-1	Batch	10.9	0.39	0.17
Hidrolizado de salvado de arroz blanco	<i>Lb. Rhamnosus</i> LA-04-1	Batch	82.0	0.81	3.73
Hidrolizado de madera	<i>E. faecalis</i> RKY1	Batch	93.0	0.93	1.70

Fuente: Adaptado de Komesu et al., (2017).

2.5. Polimerización

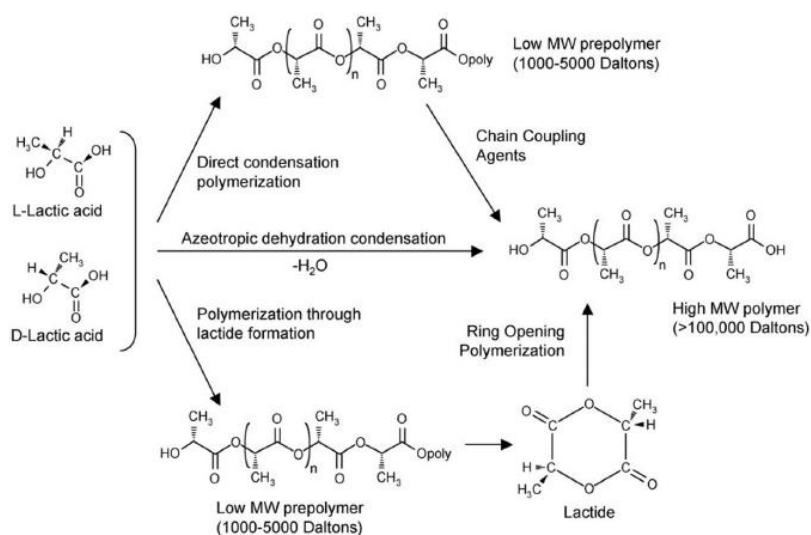
La eficiencia de la fermentación del ácido láctico depende principalmente de las cepas productoras de LA, los sustratos de fermentación y las formas de operación. El ácido láctico es producido por una amplia gama de especies microbianas, incluidas bacterias, hongos, levaduras, cianobacterias y algas.

El ácido láctico se produce mediante un proceso de hetero fermentación u homofermentación según el tipo de bacteria del ácido láctico (LAB) utilizada (Singhvi et al., 2019).

A su vez podemos obtener PLA mediante policondensación directa de ácido láctico y también mediante polimerización de apertura de anillo de lactida, un dímero cíclico de ácido láctico.

En la Figura 2 como se ve a continuación se muestra las etapas por las que pasa la síntesis de ácido poli láctico.

Figura 2. Síntesis de ácido poli láctico (PLA) a partir de ácidos L- y D-lácticos.



Fuente : G. Li et al., (2020).

Según el libro de Tecnologías de fabricación para biomateriales escrito por Wang (2019) podemos definir los siguientes tipos de polimerización:

2.5.1. Polimerización por condensación

El poliéster y el nailon es producido mayormente mediante polimerización o policondensación por crecimiento gradual. La polimerización tiene lugar entre los grupos funcionales de las moléculas. Las moléculas pequeñas, como el agua, se eliminan mediante reacciones químicas en la polimerización por crecimiento en etapas (Wang et al., 2019).

2.5.2. Polimerización por adición

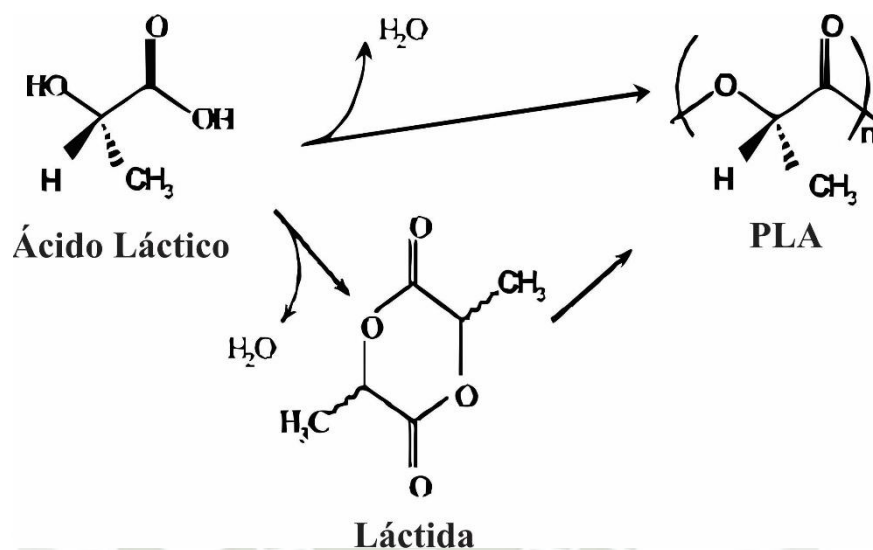
La polimerización por adición, o polimerización por reacción en cadena, requiere que los monómeros tengan al menos un doble enlace. Además, en la polimerización, no se elimina ninguna molécula y no se genera ningún subproducto. El peso molecular del polímero formado es exactamente igual a la suma de todos los monómeros incluidos en la polimerización. Una reacción en cadena une los monómeros reorganizando los enlaces con cada monómero (Wang et al., 2019).

En otra investigación se informaron tres métodos para la síntesis de polímero PLA ($M_w > 10,000$): (a) polimerización por condensación directa; (b) condensación por deshidratación azeotrópica; y (c) polimerización de apertura de anillo de láctica. Aunque el costo del método de polimerización por condensación es bajo, no puede sintetizar directamente el polímero PLA. Más bien, parte del costo corresponde al agente de acoplamiento y acelerador de esterificación utilizados en el proceso de síntesis (G. Li et al., 2020).

2.5.3. Síntesis de ácido poli láctico a partir de ácido láctico por polimerización por condensación

Como se muestra en la Figura 3, hay dos formas principales de crear ácido poliláctico a partir de monómeros de ácido láctico. El primer tipo es el uso de solventes para prevenir agua de condensación utilizando solventes a temperaturas altas y altas. La policondensación del ácido láctico se suele realizar destilando el agua de condensación con o sin catalizador aumentando progresivamente el vacío y la temperatura. Aunque los poliésteres de alto peso molecular con buenas propiedades mecánicas no están fácilmente disponibles, las propiedades de los oligómeros de ácido láctico que se pueden usar como productos intermedios en la síntesis de poliuretano se pueden controlar usando y modificando varios catalizadores y agentes de funcionalización. Factor de agregación. Este método fue usado por Carothers y todavía lo utiliza Mitsui Toatsu Chemicals Inc. Para fabricar un polímero de peso molecular bajo a intermedio.

La adición de catalizadores ácidos, como el ácido bórico o sulfúrico, acelera los procesos de esterificación y transesterificación, pero también cataliza reacciones secundarias a temperaturas superiores a 120°C. Por lo tanto, la policondensación de ácido DL-láctico acuoso nunca sobrepasó el peso molecular por encima de 300, en comparación del peso molecular de hasta 6500 reportado para la L-lactida pura. Cuando el precondensado obtenido por deshidratación a 120°C se calienta a 180°C en presencia de un catalizador de transesterificación libre de ácido., como PbO(Oxido Plumboso), puede resultar un rendimiento moderado de PLA de peso molecular relativamente alto (Mehta et al., 2005).

Figura 3. Preparación del ácido poli láctico.

Fuente: Adaptado de Mehta et al., (2005).

Sin embargo, incluso los precondensados de bajo peso molecular pueden ser de interés para la preparación de colas o lacas biodegradables, ya que los grupos terminales $-OH$ y $-COOH$ permiten la reticulación con aditivos polivalentes inorgánicos u orgánicos adecuados.

Cuando se utiliza un disolvente azeotrópico adecuado, el peso molecular medio del oligómero obtenido en un único proceso de policondensación es decenas de miles inferior al del PLA obtenido mediante policondensación con ácido láctico. Los polímeros se pueden usar tal cual o combinados con isocianatos, epóxidos o peróxidos para producir polímeros con un rango de pesos moleculares (Mehta et al., 2005).

2.5.4. Síntesis de ácido poli láctico a partir de ácido láctico por polimerización de apertura de anillo de láctica.

El agua se elimina en condiciones suaves, sin disolvente, para producir un dímero intermedio cíclico, denominado láctica. Este monómero se purifica fácilmente por destilación

al vacío realizada por calentamiento, de nuevo sin necesidad de disolvente. Al controlar la pureza del dímero, es posible producir una amplia gama de pesos moleculares.

El PLA se ha producido comercialmente en todo el mundo desde la última década. El catalizador actualmente utilizado industrialmente es el octoato de estaño (en Francia se ha utilizado zinc metálico). La polimerización por apertura de anillo de láctica se puede llevar a cabo en fusión, a granel o en solución y mediante mecanismos catiónicos, aniónicos y de inserción de coordinación, según el catalizador. La elección del sistema iniciador, el co-iniciador como agente de control de la cadena, la concentración del catalizador, la proporción de monómero a iniciador y la temperatura y el tiempo de polimerización afectan significativamente las propiedades del polímero. Estas propiedades, como el peso molecular, grado de cristalinidad y contenido de monómero residual, afectan a su vez las propiedades físico-mecánicas y el rango de temperatura de uso de la poliláctida y sus copolímeros. El papel de la racemización y el grado de transesterificación en el proceso de polimerización y copolimerización también son decisivos para la pureza del enantiómero y microestructura de la cadena del polímero resultante. Muchos métodos actuales de polimerización de PLA emplean octoato de estaño como catalizador. Se ha demostrado que es muy efectivo, causa un bajo grado de Racemización a alta temperatura, tiene baja toxicidad y es aceptado por la Administración de Drogas y Alimentos de los Estados Unidos.(Mehta et al., 2005)

A continuación, se presenta en la tabla 3 un resumen de los polímeros obtenidos con relación del catalizador utilizado, el uso de solvente y tiempos de reacción

Tabla 3. Resumen de estudios sobre variables de polimerización de PLA y peso molecular.

N°	Polímero	Catalizador	Solventes	Temperatura de Reacción, °C	Tiempo de Reacción	Peso Molecular
1	D,L PLA	Al	Tolueno	70-100	Mas de 100 hrs.	$M_n > 90,000$
	L-PLA	Isopropoxide		70-100	Mas de 100 hrs.	$M_n > 90,000$
2	L-PLA	Octoato de estaño	Glycerol	130	6 hrs	$DP_n = 43-178$
3	D-L PLA	Octoato de estaño	Alcoholes	200	60-75 min.	$M_w < 350,000$
4	L-PLA	Octoato de estaño	Alcoholes, Acido carboxílico	130	2-72 hr	$M_n < 250,000$
5	D-L PLA	Octoato de estaño	No solvente	130		
	L-PLA		No solvente	130	72 hrs	$M_v = 20,000-680,00$
6	L-PLA	Octoato de estaño y trietilamina	No solvente	180-185	7 min.	$M_n = 91,000$
7	L-PLA	Octoato de estaño y compuesto de titanio y zirconio	Tolueno	180-235	15-180 min	$M_n = 40,000-100,00$
8	L-PLA	Itrio tris (2,6-di-tert butyl phenolate) en tolueno	2-Propanol, butanol, etanol	22	2-5 min	$M_n < 25,000$
9	D-L PLA	Butil litio, butyl magnesio en (en hexano)	THF		30 min	$M_n < 45,000$
10	D-L PLA	Lactato de Zinc	Sin solvente	140	96 hrs.	$M_n = 212,000$
11	D-L PLA	Butil magnesio, reactivo de Grignard	Éter	0-25	4-8 dias	$M_n < 300,000$

Fuente: Modificado de Mehta et al., (2005).

2.6. Ácido poliláctico

En 1932, Carothers (DuPont) sintetizó productos de ácido poli láctico de bajo peso molecular. Sin embargo, debido al alto costo de la síntesis y la pobre estabilidad del producto, esta síntesis no se consideró un éxito. En 1954, DuPont produjo un ácido poli láctico de mayor peso molecular y solicitó una patente con la intención de ingresar al mercado comercial. La investigación sobre polímeros atrajo una atención significativa de la sociedad. Con los avances en medicina y salud pública, el ácido poli láctico comenzó a usarse en suturas quirúrgicas e implantes óseos en la década de 1960 (G. Li et al., 2020).

El ácido poliláctico (PLA), o poliláctida, es un ácido semicristalino poliéster compostable producido industrialmente a partir de fuentes renovables que se fermentan para formar ácido láctico y posteriormente polimerizado para producir productos con alto peso molecular. Este polímero presenta alta resistencia a la tracción y módulo, pero la fragilidad inherente se manifiesta como un bajo alargamiento a la rotura ($\sim 3\%$) y una resistencia al impacto que limita su adopción para piezas de plástico flexibles (Valerio et al., 2016). La mayoría de autores definen al ácido poli láctico (PLA) como un compuesto biodegradable, renovable y muy prometedor y polímero biocompatible. (VanWouwe et al., 2016)

El ácido poliláctico (PLA) pertenece a la familia de poliésteres alifáticos comúnmente hechos de α -hidroxiácidos, que incluyen ácido poliglicólico o ácido polimandélico, y se consideran biodegradables y compostables. El ácido poli láctico es un polímero termoplástico de alta resistencia y alto módulo que se puede fabricar a partir de recursos renovables (Garlotta, 2001).

El ácido poli láctico no se ve afectado fácilmente por la hinchazón y disolución del solvente durante el procesamiento industrial. La temperatura de procesamiento es generalmente de 170 °C a 230 °C (G. Li et al., 2020).

Los homopolímeros del ácido poli láctico tienen una temperatura de fusión y transición vítrea de aproximadamente 55°C y 175°C, respectivamente. Requieren temperaturas de procesamiento superiores a 185–190°C.

En la Tabla 4 se ve una comparación entre propiedades de diferentes plásticos con el ácido poli láctico.

Tabla 4. *Propiedades del PLA comparado con otros plásticos*

	PLA	PP	PET	Nylon	Celofán
Densidad, g/cc	1.25	0.9	1.4	1.2	1.45
Fuerza de Tensión (psi)	15950	27550.00	29725.00	36250.00	13050.00
Módulo de Tensión (psi)	478500	348000.00	551000.00	264625.00	594500.00
Alargamiento a la rotura %	160	110.00	140.00	125.00	23.00

Fuente: Adaptado de Mehta et al., (2005)

Uno de los puntos más positivos de la producción de PLA en comparación con otros polímeros basados en hidrocarburos es la disminución de las emisiones de CO₂. Se cree que el dióxido de carbono es el contribuyente más importante al cambio climático global y su calentamiento (Jamshidian et al., 2010b).

El PLA posee tantas ventajas que lo vuelven un candidato óptimo para ser utilizado en reemplazo de los plásticos convencionales, pero también existen limitantes que frenan el desarrollo, las cuales se pueden resumir en la Tabla 5.

Tabla 5. *Tabla comparativa de ventajas y desventajas del PLA*

VENTAJAS	DESVENTAJAS
Eco amigable: el PLA se produce a partir de fuentes renovables (maíz, trigo, arroz). Además, es biodegradable, reciclable y compostable. Su producción consume CO ₂ .	Mala rugosidad: el PLA es un material muy frágil, cuyo alargamiento a la rotura es <10%. Esto puede representar un límite para aquellas aplicaciones que necesitan deformación plástica a altos niveles de tensión.
Biocompatibilidad: principal producto de degradación del PLA, el ácido láctico, no es tóxico y es metabolizado por el propio organismo.	Tasa de degradación lenta: el PLA se degrada naturalmente a través de la hidrólisis, cuya tasa depende de muchos factores, como la cristalinidad y el peso molecular. La degradación lenta de PLA conduce a una larga vida útil de los dispositivos in vivo y puede plantear problemas para la eliminación de productos básicos.
Procesabilidad: PLA tiene una mejor procesabilidad térmica que otros biopolímeros. Se puede procesar mediante moldeo por inyección, película extrusión, moldeo por soplado, termoformado, hilado de fibras y formación de películas.	Hidrofobia: el PLA es un material relativamente hidrofóbico (el valor del ángulo de contacto estático con el agua es de aproximadamente 80°). Esto da como resultado una baja afinidad celular y puede conducir a una respuesta inflamatoria tras el contacto directo con los fluidos biológicos.
Ahorro de energía: el PLA requiere entre un 25 y un 55 % menos de energía que los polímeros a base de petróleo.	Falta de grupos de cadena lateral reactivos: el PLA es químicamente inerte, lo que hace que la funcionalización de la superficie y la modificación en masa sean tareas desafiantes.

Fuente: Adaptado de Casalini et al., (2019).

2.7. Aplicaciones del ácido poliláctico

Entre las diversas aplicaciones del PLA tenemos las siguientes: hilo para sutura, implantes, cápsulas para la liberación lenta de fármacos, prótesis, producción de envases y empaques para alimentos. Su utilización en implantes es destinada para fijación ósea y obtener un reemplazo paulatino por el nuevo tejido (Estupiñán et al., 2007).

En las últimas dos décadas, se está utilizando los polímeros con fibras como refuerzo, como es el PLA con las fibras sintéticas como se muestra en la Figura 4 como las fibras de carbono, las fibras de vidrio y las fibras de boro las cuales han obtenido prestigio por su utilización. Los productos de alta rigidez y resistencia se preparan con compuestos reforzados con fibras sintéticas como se puede observar en la Figura 4, que se utilizan ampliamente en los sectores aeroespacial y del automóvil (Ashothaman et al., 2021).

Figura 4. *Fibras de carbón, vidrio y boro.*



Fuente: Ashothaman et al., (2021).

Actualmente se están utilizando compuestos de polímeros a base de fibras naturales. para reducir las emisiones de gases de efecto invernadero en la construcción y construcción, embalaje, transporte, militar, equipo deportivo, e industrias médicas.(Ashothaman et al., 2021) Algunos tipos de estas fibras se muestran en la Figura 5.

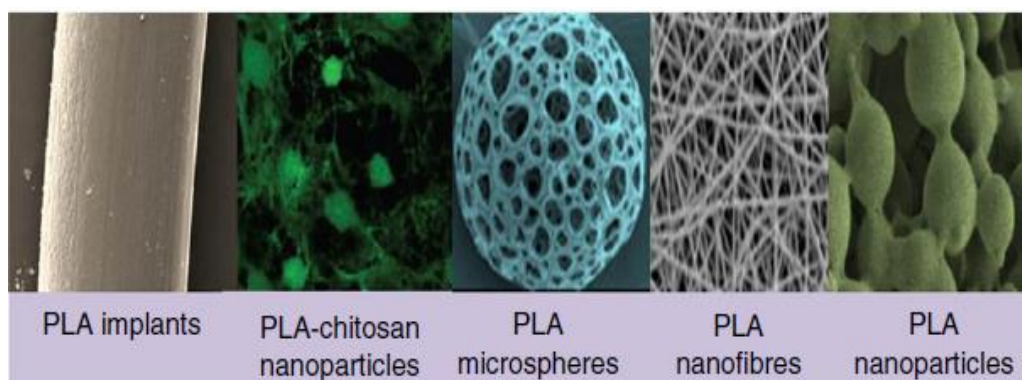
Figura 5. *Fibras naturales usadas para refuerzo.*



Fuente: Ashothaman et al., (2021).

En la parte medica la buena biocompatibilidad es un factor para el uso de PLA en el campo de la biomedicina. El producto de ácido láctico intermedio puede ser metabolizado por el cuerpo humano y no es tóxico e inofensivo como se observa en la Figura 6. Su degradación se puede utilizar para la liberación de fármacos. Al controlar la tasa de metabolismo del transportador en el cuerpo, es posible asegurar la concentración efectiva del fármaco mientras se reducen los efectos secundarios, lo que le brinda ventajas obvias para su uso tanto en la administración de fármacos como en material para implantes. (G. Li et al., 2020)

Figura 6. *Aplicaciones biomédicas representativas del PLA.*



Fuente: Singhvi et al., (2019).

En la comercialización del ácido poliláctico, el precio es el principal problema a resolver. Para resolver el problema del precio del PLA, es necesario comenzar con la producción de materias primas, mejorar la eficiencia de producción de ácido láctico y obtener ácido láctico de alta calidad a bajo costo. Los materiales económicos y los microorganismos de alto rendimiento requieren mejoras adicionales en el proceso de producción de ácido láctico. Se puede ver que la optimización del proceso de producción de ácido láctico también es un desafío para la producción en masa de ácido poliláctico. (G. Li et al., 2020).

Para llevar a cabo estas aplicaciones hay que tomar en cuenta algunos pasos importantes en su fabricación los cuales se detallan a continuación.

2.8. Secado

Debido a que el PLA es sensible a las condiciones de alta temperatura y humedad relativa, debe secarse a menos del 0,01 % (p/p) para reducir el riesgo de degradación molecular. Este valor se expresa como 0,025% p/p o menos. Para mantener este nivel de humedad, los compuestos de PLA generalmente se empaquetan en un revestimiento de lámina de barrera contra la humedad con un contenido de humedad inferior al 0,04 % p/p, por lo que el proceso de secado es fundamental. Las condiciones de secado dependen de la temperatura, el tiempo, el flujo de aire y el punto de rocío.

Los gránulos amorfos deben secarse a temperaturas por debajo de 43 a 55 °C para evitar que los gránulos de resina se peguen, se unan y obstruyan el secador. Para los tipos cristalinos, los rangos de temperatura y tiempo recomendados son de 80 a 100 °C y de 4 a 2 horas, respectivamente (Jamshidian et al., 2010).

2.9. Extrusión

El primer paso para convertir resinas plásticas en películas, láminas, envases, etc. es la conversión de gránulos de un estado sólido a un estado líquido o fundido en una extrusora. La extrusión es una forma común de fundir termoplásticos y es el primer paso en el recubrimiento por extrusión, la extrusión de película fundida, la extrusión de película soplada y otros procesos de polímeros.

Las extrusoras de tornillo se usan comúnmente en la industria de polímeros, como se muestra en la Figura 7. Consisten en un cilindro de metal calentado eléctricamente, un tanque para alimentar la resina, un motor para girar el tornillo (que se muestra en la Figura 8) y un molde a través del cual se alimenta la resina. el polímero fundido fluye. quedarse en cama. Por lo tanto, la combinación de energía térmica del calentador y el calor de fricción de la fricción entre el plástico y el tornillo y el cilindro proporciona suficiente calor para derretir los gránulos (Jamshidian et al., 2010).

Figura 7. *Extrusora de tronillo.*



Fuente: Extrusoras Perú.

Figura 8. *Tornillo de alimentación espiral para extrusión.*



Fuente: *(Plastic Extrusion Screws – R&B Plastics Machinery, s/f).*

La relación L/D (es decir, la relación entre la longitud del vuelo del tornillo y su diámetro exterior) determina el desplazamiento de la masa fundida y el tiempo de residencia. Un tornillo de alta relación proporciona un mayor calentamiento por cizallamiento, una mejor mezcla y un mayor tiempo de residencia de la masa fundida en la extrusora. Otro parámetro importante del tornillo es el grado de compresión, que es la relación entre la profundidad de vuelo en la dirección de avance y la profundidad de vuelo en la parte de medición. Cuanto mayor sea la relación de compresión del tornillo, más calor de cizallamiento proporciona. Las condiciones de extrusión recomendadas para los gránulos de PLA incluyen un tornillo de uso general con una relación de aspecto de 24:1 a 30:1, una relación de compresión de 2,5:1 a 3:1, una temperatura de fusión de 200 a 220 °C y barriles lisos. (Jamshidian et al., 2010).

En la Tabla 6 podemos observar las diferentes posibilidades de procesamiento de polímeros biodegradables comerciales.

Tabla 6. *Polímeros biodegradables comerciales y sus diferentes procesamientos*

	Injection molding	Extru- sion	Extrusion blow molding	Cast film extrusion	Blow mold- ing	Fiber spinn- ing	Thermo- forming
Starch	×	×	×	×			
Cellulose	×	×			×		
PHB	×	×	×	×	×		×
PHB-PHV	×	×	×	×	×	×	×
PLA	×	×		×	×	×	×
PBS	×	×					
PCL	×	×	×		×	×	×
PBST	×	×		×			×
PBAT		×	×	×			
PTMAT		×	×	×		×	
PVA	×	×		×		×	×
PP,PE + additives	×	×	×	×	×	×	×
Starch + PVA	×	×		×	×	×	
Starch + cellulose acetate	×	×	×		×		×

PHB = Poly(3-hydroxybutyrate); PHV = Poly(hydroxyl valerate); PBS = Poly(butylenes succinate); PCL = Poly(ϵ -caprolactone); PBST = Poly(butylene succinate terephthalate); PBAT = Poly(butylene adipate terephthalate); PTMAT = Poly(tetramethylene adipate terephthalate); PVA = Poly(vinyl alcohol).

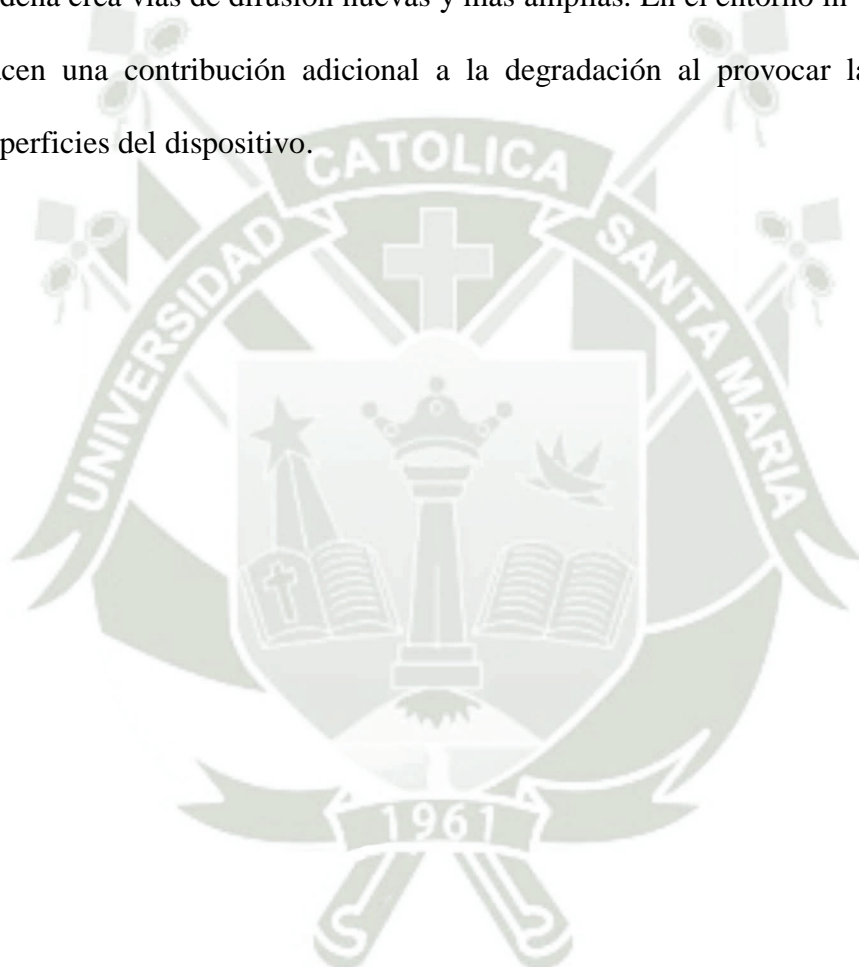
Fuente: Jamshidian et al., (2010).

2.10. Degradación del PLA

En la investigación realizada por Casalini et al., (2019) nos menciona que los principales fenómenos detrás de la degradación del PLA se pueden resumir de la siguiente manera:

El agua penetra en la matriz polimérica desde el entorno circundante a través de la difusión. PLA es hidrofóbico y la disolución del polímero está ausente; el hinchamiento volumétrico es insignificante.

Al dispersar el agua, rompe los enlaces éster y provoca la escisión de la cadena. Los pequeños oligómeros resultantes se difunden desde la matriz; si su concentración en el núcleo es mayor debido a la resistencia a la transferencia de masa, la degradación local ocurre más rápidamente debido a la autocatálisis. La difusividad de cada compuesto aumenta con la disminución del peso molecular porque la escisión de la cadena crea vías de difusión nuevas y más amplias. En el entorno in vivo, las enzimas hacen una contribución adicional a la degradación al provocar la erosión de las superficies del dispositivo.



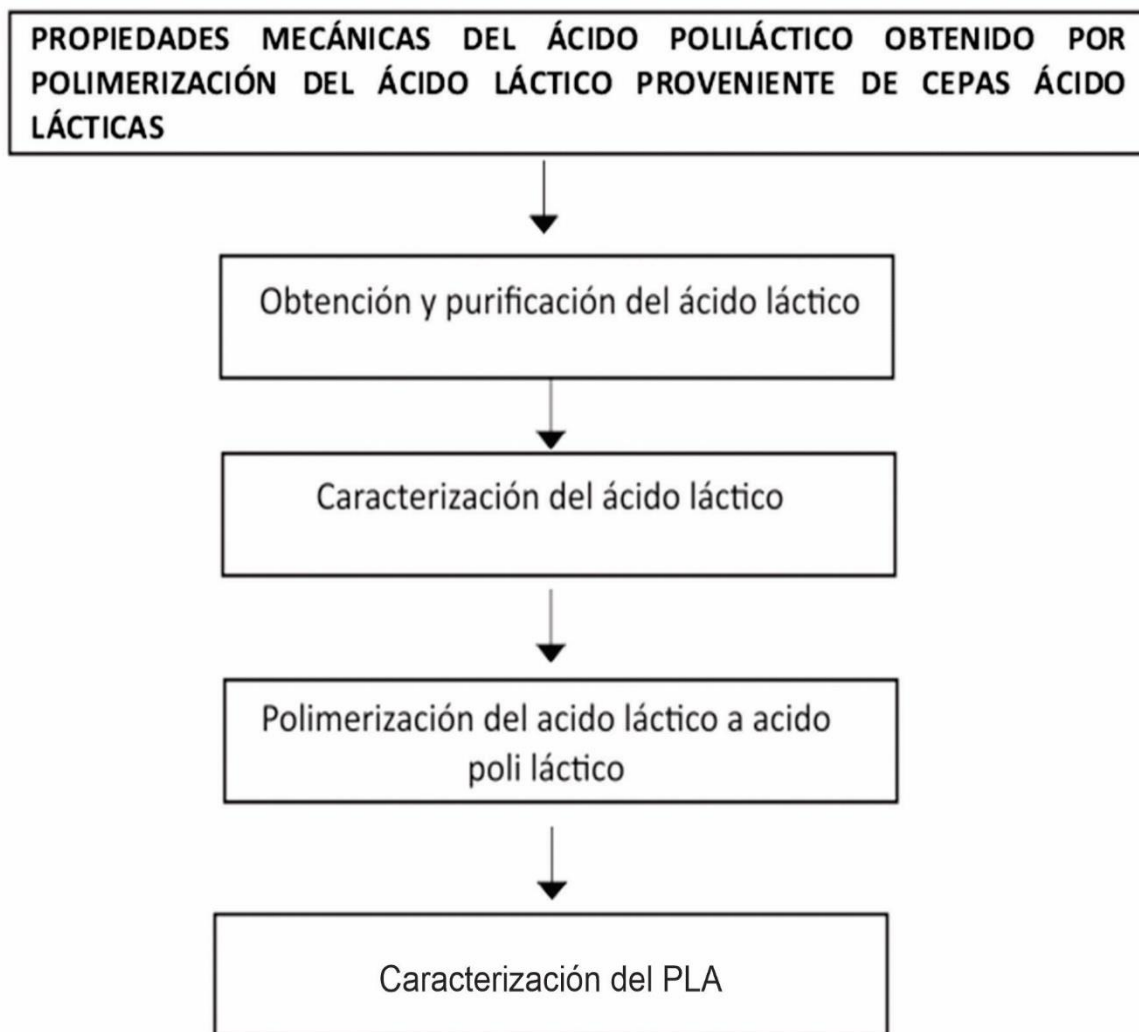


CAPITULO III

3. METODOLOGÍA EXPERIMENTAL

A continuación, en la Figura 9, se muestra el flujograma de la metodología propuesta para la presente tesis.

Figura 9. *Flujograma del procedimiento propuesto.*



Fuente: Elaboración propia.

3.1. Ubicación del área de investigación

Se ubica en el laboratorio de investigación de ciencia de los materiales (F-406) de la Universidad Católica de Santa María.

3.2. Metodología

3.2.1. Obtención y purificación del Ácido láctico.

El proceso de producción de ácido láctico inició con la obtención del lactosuero, el cual fue obtenido del sector quesero de la ciudad. Para lo cual se consideró trabajar con suero desproteinizado y sin desproteinizar, para obtener el lactosuero desproteinizado se colocó previamente en el autoclave a una temperatura de 121°C por 15 min. Una vez completado el tiempo necesario se retiró del autoclave para dejarlo enfriar, cuando estuvo a temperatura ambiente se filtró con una gasa y posteriormente se centrifugó en tubos tipo falcon de 15ml por un tiempo de 10 minutos, terminado la centrifugación el sobrenadante se filtró al vacío con papel filtro del tipo lento. Finalmente se almacenó en el refrigerador y en la Tabla 7 se observa el rótulo usado en el siguiente proceso.

Tabla 7. *Identificación de las muestras con su codificación*

Muestra	Nombre	Codificación
Muestra 1	Levadura_ Cepas libres_ Lactosuero_ Proteinizado	Le_LP_CL
Muestra 2	Lactobacilo_ Cepas libres_ Lactosuero Desproteinizado	Lb_Ld_CL
Muestra 3	Lactosuero desproteinizado_ Levadura en Perlas de Alginato al 2.5% y 4% Cl ₂ Ca	Le_Ld_Pe_4%
Muestra 4	Lactosuero desproteinizado Lactobacilo en Perlas de Alginato al 3% y 5% Cl ₂ Ca	Lb_Ld_Pe_5%

Fuente: Elaboración propia.

La muestra 1 y muestra 3 se fermentaron utilizando levadura, con parámetros distintos, en la muestra 1 se sembraron las cepas de levadura en el lactosuero proteinizado directamente e inició la fermentación, para la muestra 2 se realizó el encapsulamiento de la levadura en perlas de alginato al 2.5% y cloruro de calcio al 4%. Una vez encapsuladas se agregaron al lactosuero desproteinizado.

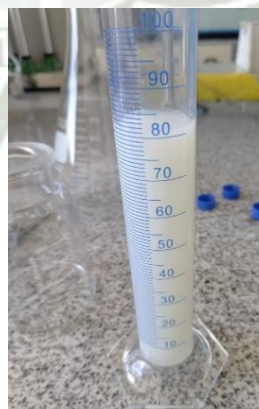
Las muestras 2 y 4 utilizaron lactobacillus para la fermentación, en la muestra 2 se realizó el sembrado en lactosuero desproteinizado directamente para iniciar la fermentación, en el caso de la muestra 4 se realizó el encapsulamiento del lactobacillus en perlas de alginato al 3% y cloruro de calcio al 5%.

Las muestras que utilizaron cepas libres necesitaron agregar los siguientes suplementos junto con el lactosuero proteinizado o desproteinizado:

- Extracto de levadura al 0.5% P/V
- Fosfato de amonio 0.9676% P/V
- Carbonato de calcio 5g por 1L

En los 4 casos las muestras fueron fermentadas teniendo en cuenta las siguientes condiciones: tiempo de 7 días, una agitación constante de 120 rpm y una temperatura de 32 °C. Una vez terminado la fermentación se obtendrá una muestra como se observa en la Figura 10, luego se recolectó en un recipiente, en el caso de las muestras en que se utilizaron perlas de alginato, estas fueron retiradas antes de su envasado para luego ser almacenadas en el refrigerador.

Figura 10. *Ácido Láctico obtenido del proceso de fermentación.*



Fuente: Elaboración propia.

La purificación del ácido láctico se realizó en 5 etapas, la primera fue utilizando filtración al vacío con papel Watman 42, en la segunda etapa de purificación se realizó la

microfiltración utilizando una membrana de celulosa de 47 mm, como tercera etapa se utilizó el rotavapor con parámetros de tiempo y temperatura específicos para las muestras que son los mostrados a continuación en la Tabla 8.

Tabla 8. *Condiciones de temperatura y tiempo para las muestras*

Muestra	Tiempo (hr)	Temperatura (°C)
Muestra 1	5	40
Muestra 2	1	40
Muestra 3	5	40
Muestra 4	5	40

Fuente: Elaboración propia.

Transcurrido el tiempo señalado se obtuvo un color más transparente y amarillento/ámbar como se observa en la Figura 11.

Figura 11. *Ácido Láctico purificado.*

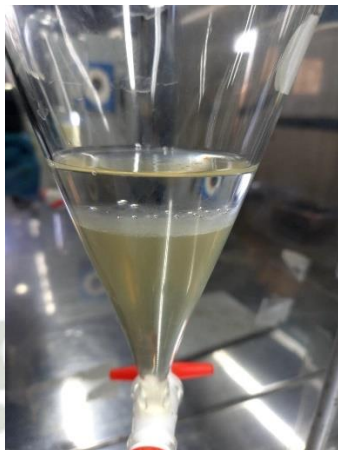


Fuente: Elaboración propia.

Finalizando el proceso de filtrado, la cuarta etapa de purificación se trabajó dentro de una campana extractora, ya que se utilizó como solvente el éter dietílico, junto con el ácido láctico en proporciones 1:1 se depositó en una pera de decantación de 1000 mL para proceder a agitarla a fin de mezclar el ácido láctico con el éter dietílico, luego se dejó en reposo y esperó a que se diferencien 2 fases como se observa en la Figura 12. De las 2 fases, la fase de abajo

contiene impurezas, estas fueron drenadas para obtener así solamente el ácido láctico que fue capturado por el éter dietílico en la fase de arriba.

Figura 12. Separación del Ácido láctico en pera de decantación.



Fuente: Elaboración propia.

Como quinta etapa de purificación, se separó el ácido láctico del éter dietílico utilizando el rotavapor a una temperatura de 40 °C para producir la evaporación del éter dietílico, y poder reutilizarlo para más procesos posteriores y evitar su desperdicio, es así como se obtuvo solamente ácido láctico el cual se aprecia en la Figura 13, una vez acabado el procedimiento se depositó en un frasco para su almacenamiento y posterior procesamiento.

Figura 13. Separación de ácido láctico con el éter utilizando el rotavapor.



Fuente: Elaboración propia.

3.2.2. Caracterización de ácido láctico.

La caracterización del ácido láctico previamente obtenido será por el método de Espectroscopía infrarroja por transformada de Fourier (FTIR) a realizarse en el Laboratorio de Investigación y Servicios – LABINVSERV(UNSA), la Tabla 9 muestra las características del equipo:

Tabla 9. *Características del Equipo de FTIR*

Equipo (FTIR)	
Marca	Marc Perkin Elmer
Modelo	Frontier FT-IR/NIR

Fuente: Elaboración propia.

3.2.3. Polimerización del Ácido Láctico a Ácido Poliláctico

Para la realización de la etapa de polimerización se han seguido los siguientes procedimientos que se mencionan a continuación.

3.2.3.1. Polimerización

Se armó el equipo del rotavapor y acondicionó una bañera en aceite para realizar el procedimiento.

Se tomó la muestra de ácido láctico, visto en la Figura 14, con mayor producción previamente purificada y a continuación, se introdujo la muestra al balón del rotavapor para iniciar con el proceso de polimerización.

Figura 14. *Muestra de ácido láctico.*



Fuente: Elaboración propia.

Se encendió el rotavapor para comenzar el precalentamiento, se procedió a precalentar el ácido láctico, previamente medido con una pipeta, a baño maría en aceite y una vez llegado a los 80 °C, la temperatura fue controlada usando un sensor de temperatura dentro del balón, el proceso en marcha se puede observar en la Figura 15.

Figura 15. *Polimerización del ácido láctico con catalizador.*



Fuente: Elaboración propia.

El ácido láctico una vez que se precalentó se procedió a añadir el catalizador. Para cada prueba la cantidad de catalizador de octoato de estaño varió también como las condiciones de temperatura y tiempo de reacción establecidos en la Tabla 10:

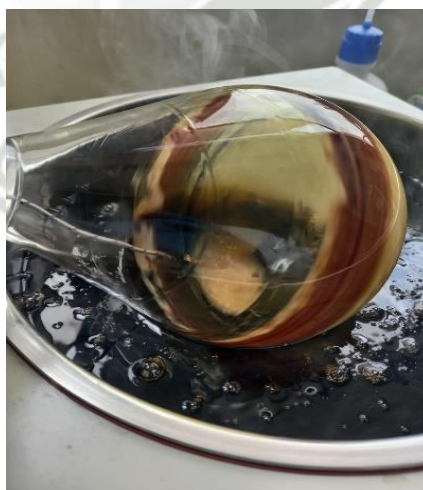
Tabla 10. *Condiciones de Polimerización*

	Cantidad de AL (mL)	Catalizador	Temperatura (°C)	Tiempo (min)
Prueba 1	30	6%	95	25
Prueba 2	39	4%	80	20
Prueba 3	40	4%	85	15
Prueba 4	60	6%	97	20
Prueba 5	80	1%	94	25
Prueba 6.a	73	5%	98	31
Prueba 6.b	73	5%	98	31
Prueba 7.a	23	6%	84	120
Prueba 7.b	23	6%	98	37
Prueba 8	15	6%	95	35

Fuente: Elaboración propia.

Finalizando el tiempo se verificó que terminara la reacción por completo y la evaporación para evitar la degradación del PLA, al final del proceso se visualizó un cambio de color a un tono más oscuro, en la Figura 16 se aprecia lo descrito anteriormente.

Figura 16. *Finalización de la etapa de polimerización.*



Fuente: Elaboración propia.

3.2.3.2. Recristalización

Una vez acabado el proceso se procedió a realizar la recolección del PLA formado por polimerización en un vaso beaker de 250 ml como se ve en la Figura 17. La muestra puede presentar un color marrón oscuro el cual cambiará al realizar la recristalización.

Figura 17. Muestra obtenida al finalizar la polimerización.



Fuente: Elaboración propia.

Una vez que se añadió el PLA al beaker se agregó cloroformo para disolver la masa y que esté uniforme, para lograrlo se dejó en el hotplate girando con una pastilla magnética por 24 horas sin crear vórtices lo que se observa en la Figura 18, se recomienda trabajar bajo una campana extractoras de gases.

Figura 18. PLA obtenido disuelto en cloroformo.



Fuente: Elaboración propia.

Cuando transcurrió el tiempo se observó una mezcla uniforme, se retiró la pastilla magnética y se agregó alcohol etílico al 96% en una proporción de 1:10 con respecto a la cantidad usada de cloroformo. Se mezcló con una bagueta de vidrio y en la Figura 19 se puede observar el proceso de cómo se aclaraba y decantaba por gravedad el PLA.

Figura 19. *Proceso de recristalización.*



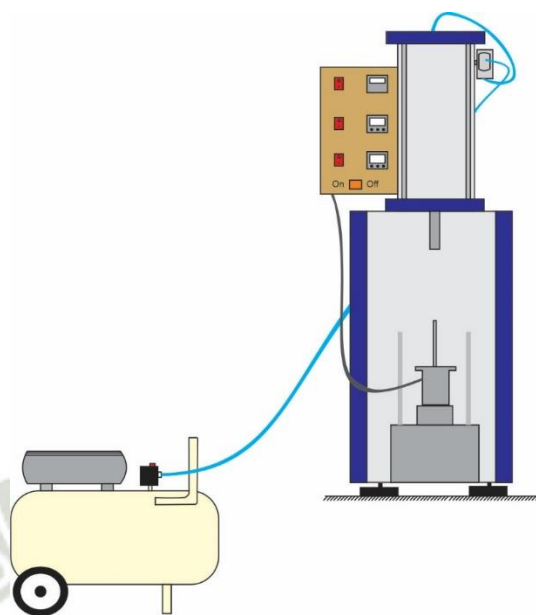
Fuente: Elaboración propia.

Para recuperar el PLA obtenido se realizó una microfiltración al vacío con membranas de 47 mm, para luego retirar la humedad remanente en una estufa a 55°C por 2 horas. La muestra se recolectó y guardó en un desecador hasta su utilización.

3.2.3.3. Fabricación de probetas de PLA.

Para poder fabricar las probetas de PLA fue necesario la utilización de una maquina inyectora de plástico como se muestra en la Figura 20 siguiendo los pasos descritos a continuación:

Figura 20. Esquema de la maquina inyectora de plástico.



Fuente: Elaboración propia.

Se inició desmontando la cámara de inyección vista en la Figura 21, para así poder colocar el material dentro de ella, para realizar esto se utilizó una base estable y resistente al calor.

Figura 21. Cámara de inyección.



Fuente: Elaboración propia.

Con ayuda de un embudo se ingresó el PLA dentro de la cámara y así poder iniciar el procedimiento como se ve en la Figura 22.

Figura 22. *Abastecimiento de PLA a la cámara de inyección.*



Fuente: Elaboración propia.

A continuación, se toma el molde en el que se inyectará el plástico, se limpia si hubo una inyección previa, se alinearon ambas partes para poder colocarlas a la base, como se puede ver en la Figura 23.

Figura 23. *Molde de inyección.*



Fuente: Elaboración propia.

El molde se sujetó a la base observada en la Figura 24, se hizo encajar a presión evitando que se mueva y prevenir fugas de material que conllevaría a un desperdicio del mismo.

Figura 24. *Fijación del molde a la base.*



Fuente: Elaboración propia.

Antes de iniciar con el inicio del calentamiento, se verificó que esté la resistencia conectada en el molde, también se encendió la compresora como la Figura 25, para asegurar tener la presión necesaria al momento de iniciar la inyección.

Figura 25. *Encendido de compresora.*



Fuente: Elaboración propia.

Como siguiente paso se inició el encendido del tablero de control como se observa en la Figura 26, con el switch naranjado, luego se activó el switch rojo de la cámara de inyección en la que se encuentra el material a inyectar, a continuación, se ingresó la

temperatura de 190 °C para iniciar el calentamiento. Luego el switch rojo de la temperatura del molde se prendió y se estableció la temperatura a 90 °C.

Figura 26. *Tablero de control.*



Fuente: Elaboración propia.

Una vez llegado a la temperatura se verificó que el material este totalmente fundido, para poder iniciar la inyección accionando el switch rojo del tiempo de inyección, el cual esta con un tiempo de inyección por defecto de 10 segundos. También se verificó que encaje la cámara de inyección y este alineada igual como se ve en la Figura 27. Se utilizaron en todos los procesos que siguen a continuación guantes resistentes al calor debido a las temperaturas que se trabajan.

Figura 27. Fijación de la cámara de inyección.



Fuente: Elaboración propia.

Después de realizar la inyección se retiró la cámara de inyección y se colocó sobre el soporte, de la base se retiró el molde para proceder a abrirlo como se ve en la Figura 28.

Figura 28. Probeta recién inyectada en molde.



Fuente: Elaboración propia.

El molde se abrió y se pudo observar la probeta formada, con un poco de exceso de material el cual se retiró antes de ser almacenada, tal como se observa en la Figura 29.

Figura 29. *Probeta sin rebordes.*



Fuente: Elaboración propia.

3.2.4. Caracterización del Ácido Poli láctico

3.2.4.1. Caracterización química y térmica

La caracterización del PLA previamente obtenido será por Espectroscopía infrarroja por transformada de Fourier (FTIR) y por Microscopía electrónica de barrido (SEM).

Los equipos utilizados para la caracterización poseen las siguientes características descritas en la Tabla 11:

Tabla 11. *Descripción de equipos FTIR y SEM.*

Equipo (FTIR)	
Marca	Marc Perkin Elmer
Modelo	Frontier FT-IR/NIR
Equipo (SEM)	
Modelo	EVO 10MA CARL ZEISS

Fuente: Elaboración propia.

3.2.4.2. Caracterización Mecánica

La caracterización del PLA será por tracción en la máquina de tracción de polímeros como se ve en la Figura 30 utilizando probetas previamente fabricadas en la máquina de inyección.

Figura 30. *Máquina de tracción para polímeros.*



Fuente: Elaboración propia.

La probeta fue colocada en la máquina de tracción de la forma correcta como se ve en la Figura 31 para iniciar la prueba.

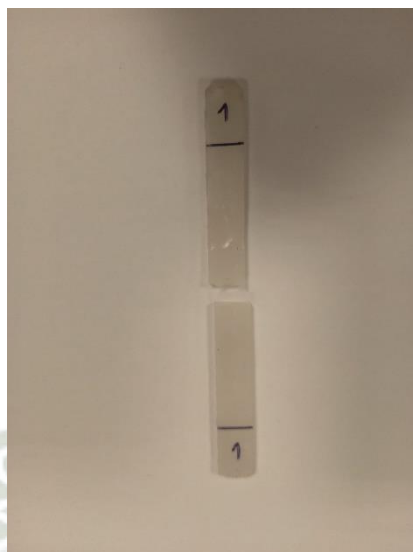
Figura 31. *Prueba de tracción para el PLA.*



Fuente: Elaboración propia.

A continuación, en la Figura 32 se muestra la probeta previamente rotulada y después de estar sometido a tracción finalizando el ensayo.

Figura 32. *Probeta de PLA sometida a tracción.*



Fuente: Elaboración propia.





4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1. Obtención y purificación del ácido láctico

Para la obtención de ácido láctico se realizó el procedimiento descrito previamente y analizó la cantidad producida por cada uno de las 4 muestras realizadas.

4.1.1. Rendimiento en la purificación de ácido láctico

De las cuatro muestras se realizó una comparación entre ellas observada en la Tabla 13, teniendo en cuenta el color y la producción obtenida luego de la purificación. Se debe tener en cuenta que el paso de purificación utilizando el rotavapor sin presión de vacío no fue eficiente ya que no se observó una evaporación del agua relevante para el proceso, a esto tuvo que ser complementado con el uso del solvente llamado éter dietílico el cual es un reactivo controlado por lo que se tuvo una limitada cantidad.

Tabla 12. *Tabla de rendimiento del Ácido láctico.*

Muestra	Nombre	Volumen Inicial(mL)	Ácido láctico (mL)	Color de muestra	Rendimiento (%)
1	Levadura_Cepas libres_Lactosuero_Proteinizado	90	3.5	Blanco	3.89
2	Lactobacilo_Cepas libres_Lactosuero Desproteínizado	13	2.2	Amarillento	16.92
3	Lactosuero desproteínizado_Levadura en Perlas de Alginato al 2.5% y 4%Cl ₂ Ca	32	2.7	Amarillento	8.44
4	Lactosuero desproteínizado Lactobacilo en Perlas de Alginato al 3% y 5%Cl ₂ Ca	39	2.0	Transparente	6.15

Fuente: Elaboración propia.

De acuerdo a los resultados se observa las variaciones de color usando levadura o lactobacillus, así como la cantidad de producción del ácido láctico, también el método de

purificación aplicado se presume que tuvo un impacto en el ácido láctico obtenido y la cantidad recuperada.

4.2. Caracterización del ácido láctico

Para la caracterización del ácido láctico se realizó utilizando la técnica de espectroscopía infrarroja por transformada de Fourier (FTIR).

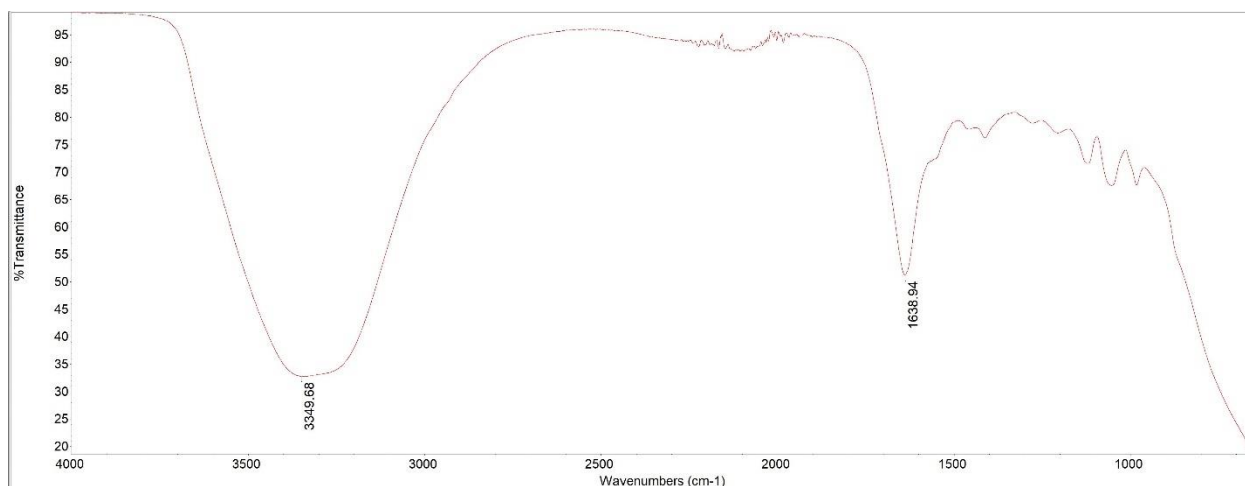
4.2.1. Características por espectroscopía Infrarroja por Transformada de Fourier (FTIR)

Para la interpretación del FTIR se debe tomar en consideración que la región de 2500 cm^{-1} a 2000 cm^{-1} es muy poco frecuente que aparezcan bandas y si se da el caso de que las tenga, estas bandas serán muy débiles y no son relevantes en su mayoría.

Para cada muestra se realizó el análisis de FTIR como se muestran a continuación:

En la región de grupos funcionales, en la Figura 33 se observa el espectro de la muestra 1 presenta una banda amplia al inicio con un pico en la posición 3349.68 cm^{-1} correspondiente al grupo OH, siendo intensa y nos indica humedad, también presenta un pico en la posición de 1638.94 cm^{-1} , es la región en la que se encuentra el grupo carbonilo (C=O).

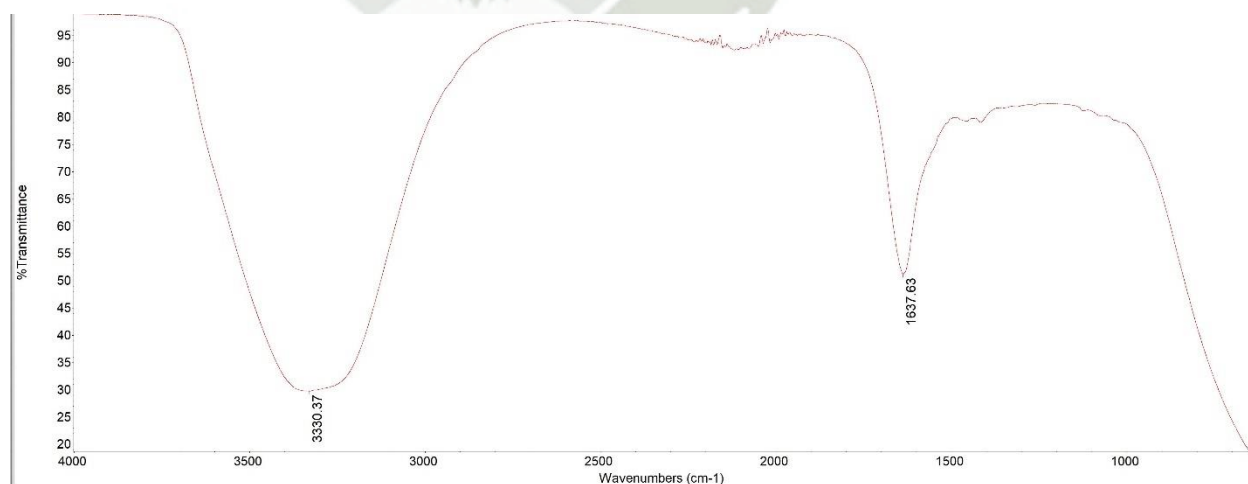
Figura 33. Muestra 1 de AL (Levadura_Cepas libres_Lactosuero_Proteinizado).



Fuente: LABINVSERV.

La muestra número 2 de la Figura 34 se identifica en la región de grupos funcionales que se presenta una banda en la posición 3330.37 cm^{-1} muy similar a la de la muestra número 1 pero un poco más amplia lo que también indica humedad y también la intensidad aumentó un poco, en la región de dobles enlaces el pico se encuentra en la posición de 1637.63 cm^{-1} con relación a la primera figura en intensidad son iguales.

Figura 34. Muestra 2 de AL (Lactobacilo_Cepas libres_Lactosuero Desproteinizado).

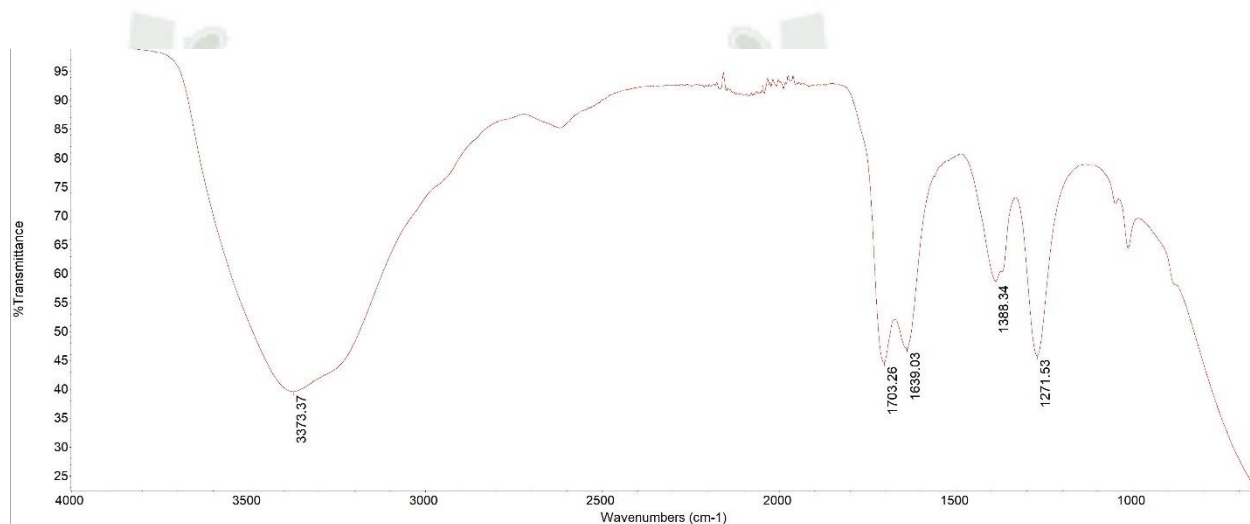


Fuente: LABINVSERV.

Para la muestra número 3 se observa en la Figura 35 que se mantiene la intensidad de la banda de O-H con un pico de 3373.37 cm^{-1} y aparece un nuevo pico en la posición de 2624.5

cm^{-1} , en la posición de 1703.26 cm^{-1} aparece un pico del grupo carbonilo y a continuación otro más en la posición de 1639.03 cm^{-1} desde la región de 1500 cm^{-1} a 600 cm^{-1} inicia la región de huella digital la cual es compleja ya que posee varias vibraciones de varios tipos de enlaces es por eso que no se analizará.

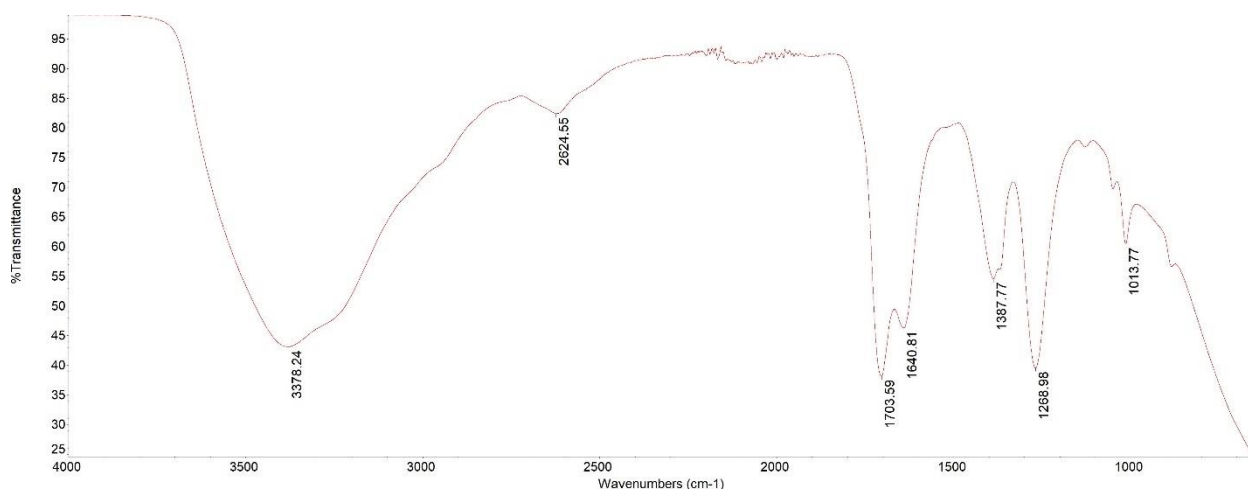
Figura 35. Muestra 3 de AL (Lactosuero desproteinizado_Levadura en Perlas de Alginato al 2.5% y 4%Cl2Ca)



Fuente: LABINVSERV.

Para la Figura 36 perteneciente a la muestra 4 en la parte de la banda de los enlaces O-H se ve disminuida su intensidad con respecto a las otras muestras y su amplitud también se reduce un poco, también aparece un pico adicional en la posición de 2624.55 cm^{-1} que comparándola es ligeramente mayor en intensidad que la muestra 3. En la región de dobles enlaces aparece en la posición 17073.59 cm^{-1} muy similar a la muestra numero 3 pero con un poco de menor intensidad, también se encuentra junto a otro pico en la posición 1640.81 cm^{-1} .

Figura 36. Muestra 4 de AL (*Lactosuero desproteínizado_Lactobacilo en Perlas de Alginato al 3% y 5%Cl₂Ca*)



Fuente: LABINVSERV.

Se puede asumir que, de las 4 muestras, la muestra 1 y 2 son similares entre sí, así como la muestra 3 y 4 debido al método de fermentación, con el método de cepas libres para la muestra 1 y 2 y el uso de perlas para la muestra 3 y 4, ya que poseen una similitud en los espectros.

También los espectros nos indican que en el método de purificación no se logró obtener una purificación completa, esto tuvo una influencia en los resultados ya que los picos del grupo carbonilo son de poca intensidad, cabe resaltar que para la muestra 1 y 2 poseen una menor pureza que las muestras 3 y 4 que su pureza es un poco mayor.

4.3. Polimerización del Ácido Láctico a Ácido Poliláctico

Para la realización de este procedimiento se utilizó las condiciones de la muestra 2 debido a que su producción fue mayor con relación a las otras muestras, ya que se necesita cantidades considerables para realizar las pruebas de polimerización.

4.3.1. Rendimiento en la polimerización para obtener Ácido poliláctico

Para el proceso de polimerización se usó el ácido láctico obtenido previamente. La pureza del ácido láctico utilizado fue un gran factor que influyó en la polimerización, así como el tiempo, y la cantidad de catalizador. A fin de compensar el factor de la pureza se hizo un tratamiento llamado recristalización para poder obtener una mayor pureza. Para algunas muestras también se probó el de añadir un plastificante, en este caso se utilizó Polietilenglicol (PEG). En la figura 37 se observa el PLA obtenido después de finalizar el proceso.

Figura 37. PLA obtenido luego de la recristalización



Fuente: Elaboración propia.

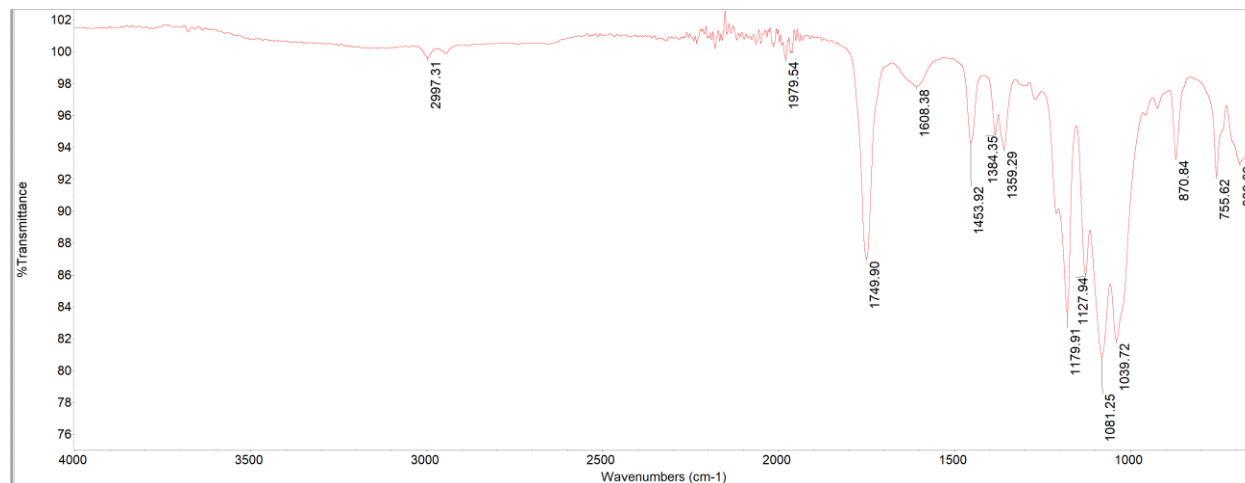
4.4. Caracterización del Ácido Poliláctico

4.4.1. Caracterización por espectroscopía Infrarroja por Transformada de Fourier (FTIR) del PLA

Se realizaron 8 muestras con variaciones de concentración de reactivo, temperatura de reacción y recristalización, así como también a una muestra de PLA comercial. A todas se les realizó el análisis por FTIR. Alomoto y Ormaza (2020) señala que en el rango de 3300 cm^{-1} - 2500 cm^{-1} una característica para identificar que la polimerización está en proceso es el aumento del valor numérico de transmitancia del pico. Es así como en el PLA comercial que se observa en la Figura 38, la muestra posee unos picos en la posición de 2997.31 cm^{-1} , dentro

del rango mencionado, no se observa grandes bandas de O-H y se origina un pico agudo e intenso del grupo carbonilo en 1749.90 cm^{-1} .

Figura 38. Muestra de espectro del PLA comercial

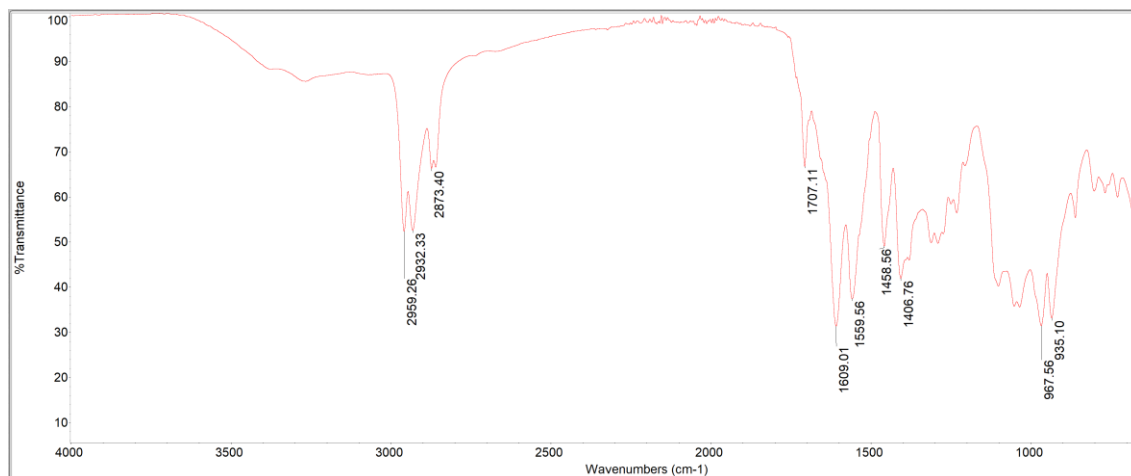


Fuente: LABINVSERV.

El espectro de la Figura 39 corresponde a la muestra 1 y la Figura 40 a la muestra 4, ambas poseen una banda pequeña de poca intensidad ubicadas entre 3500cm^{-1} a 3000 cm^{-1} . Mofokeng et al., (2012) describe una ubicación de interés en el PLA que es característica del grupo O-H en el rango de 3600cm^{-1} a 3000 cm^{-1} . Coincidiendo con la ubicación de ambas bandas, también se muestra la aparición de los 2 picos en la posición de 2959.26 cm^{-1} para la muestra 4 en 2959.54 cm^{-1} relacionado al CH_3 siendo un estiramiento asimétrico y 2932.33 cm^{-1} de la muestra 1 y 2932.66 cm^{-1} para la muestra 4 relacionado al CH_2 también asimétrico, justo como la muestra del PLA comercial pero estos son menos intensos, en 1707.11 cm^{-1} de la muestra 2 y de la muestra 4 la posición 1707.44 cm^{-1} relacionado con el grupo carbonilo $\text{C}=\text{O}$, los picos de 1609.01 cm^{-1} y 1556.56 cm^{-1} representan bandas de estiramiento del grupo carbonilo siendo muy intensas. Alomoto & Ormaza (2020) también menciona que el grupo carbonilo es el más característico grupo funcional en el PLA y lo sitúa entre 1750 cm^{-1} – 1715 cm^{-1} indicando que mientras más cercano sea el valor a 1750 cm^{-1} , existirá una mayor formación de polímero, sin embargo, Mofokeng et al. (2012) nos plantea una región de interés más amplia para el PLA, ubicada entre 1780 cm^{-1} – 1680 cm^{-1} . Por consiguiente, la muestra 4

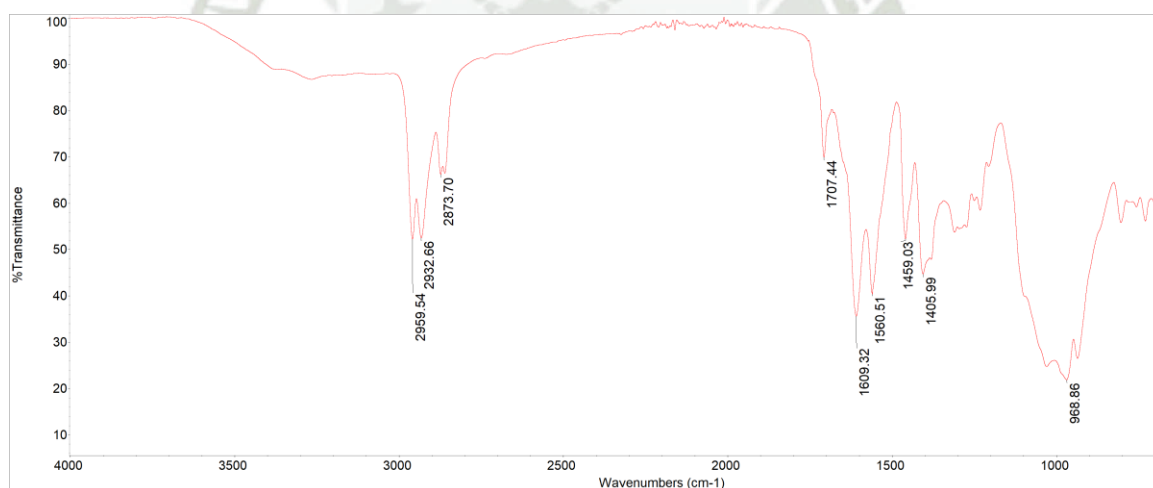
es la que posee un ligera pero mayor producción a comparación de la muestra 1. Para la región de 1500 cm^{-1} hacia atrás es donde se encuentra la huella digital que caracteriza al material.

Figura 39. Muestra 1 de PLA (6% Sn(Oct)₂ _95°C_25min)



Fuente: LABINVSERV.

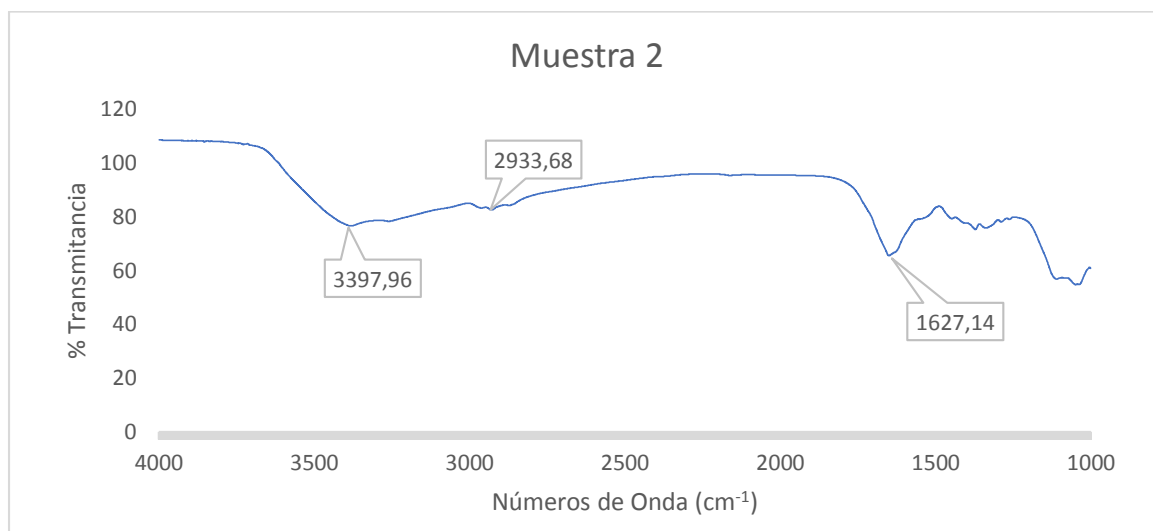
Figura 40. Muestra 4 de PLA (6% Sn(Oct)₂ _97°C_20min)



Fuente: LABINVSERV.

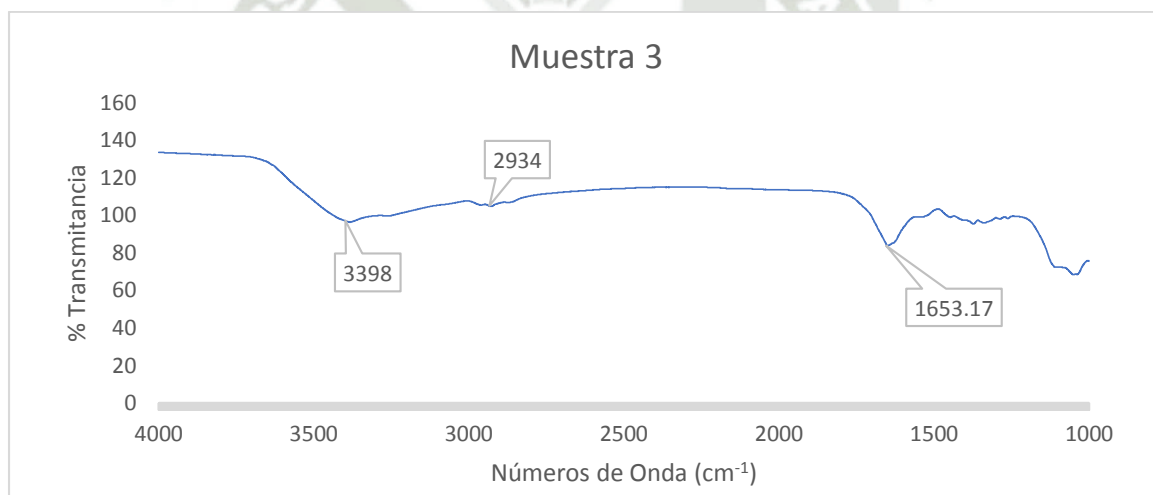
En la Figura 41 perteneciente a la muestra 2 y la Figura 42 de la muestra 3 se observa una banda en el pico de 3397.96 cm^{-1} y 3398 cm^{-1} respectivamente siendo el grupo O-H causante del ensanchamiento de las bandas, se pueden notar que la posición de los 2 picos que existían en la muestra del PLA comercial fueron opacados por la humedad. La banda del grupo carbonilo se encuentra en 1627.14 cm^{-1} siendo significativamente más amplia que la muestra 1 y también es más intensa que el pico 1653.17 cm^{-1} de la muestra 3.

Figura 41. Muestra 2 de PLA (4% Sn(Oct)₂_80°C_20min)



Fuente: LABINVSERV.

Figura 42. Muestra 3 de PLA (4% Sn(Oct)₂_85°C_15min)

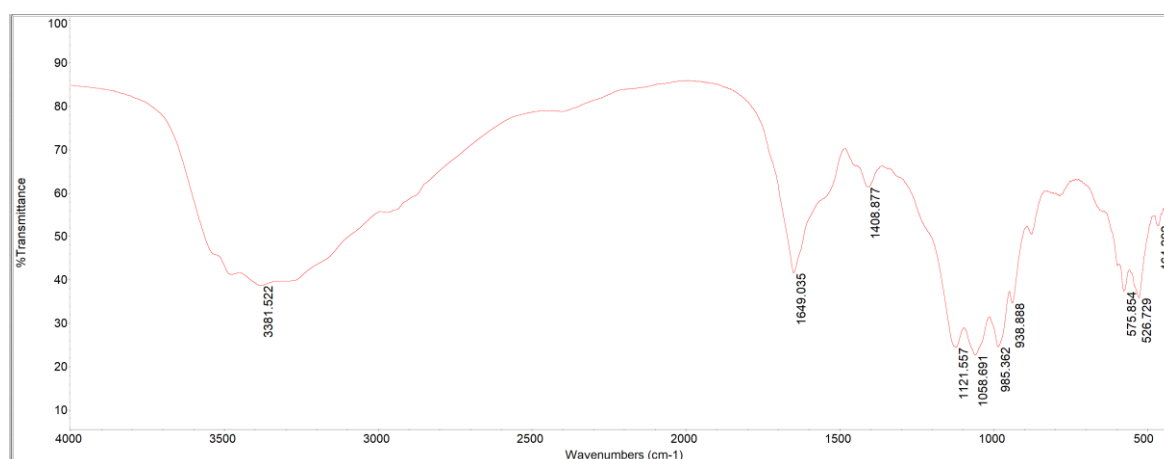


Fuente: LABINVSERV.

En la Figura 43 se observa la muestra 5 la cual posee una banda ancha con un pico en 3361.52 cm⁻¹ estando relacionado con el grupo oxidrilo, en 1649.03 cm⁻¹ se ubica un pico del grupo carboxilo el cual es de intensidad media, la huella digital también posee cierta similitud al PLA comercial.

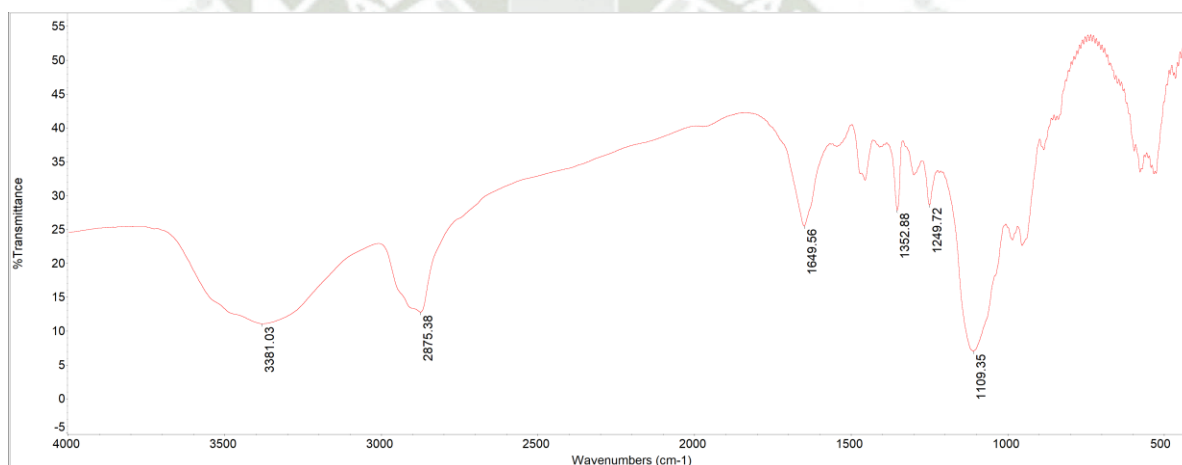
Cuando se agregó PEG a la muestra 5 cambió su espectro (Figura 44), al estar desfasada indica un exceso de lo que podría ser PEG y no hubo una mezcla homogénea, a continuación, también apareció un pico en 2875.38 cm⁻¹. En la zona de la huella digital desaparecieron picos y se suavizaron aumentado también su intensidad, con lo que se mejoró el espectro.

Figura 43. Muestra 5 de PLA (1% Sn(Oct)₂_94°C_20min)



Fuente: LABINVSERV.

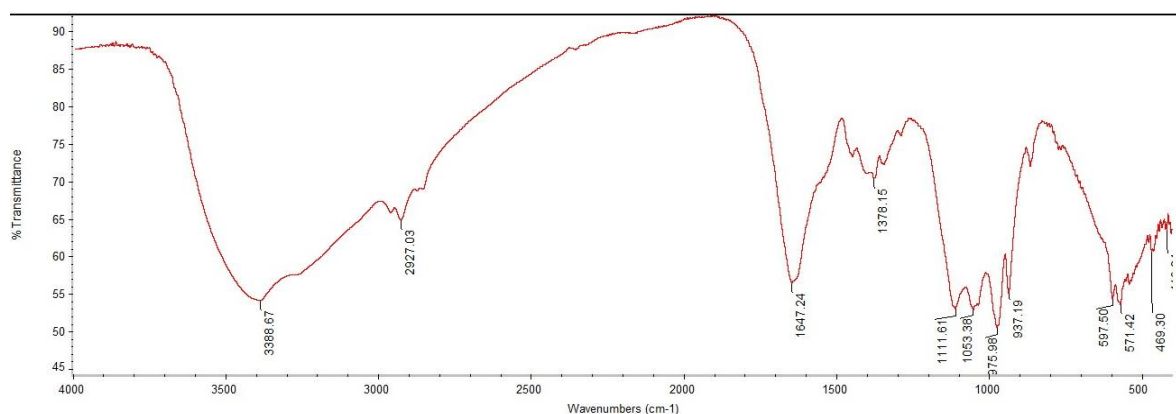
Figura 44. Muestra 5 de PLA (1% Sn(Oct)₂_94°C_20min_ 10%PEG)



Fuente: LABINVSERV.

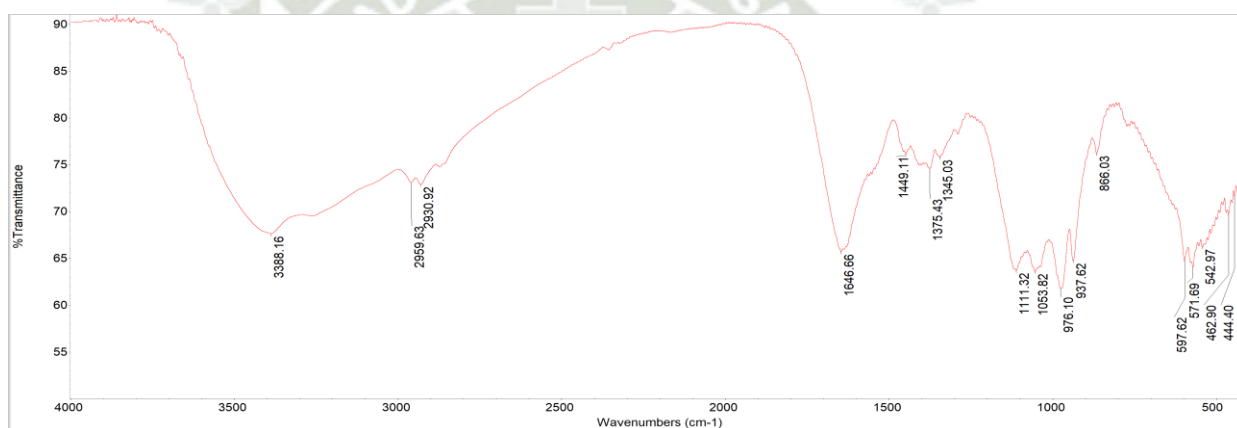
En la muestra 6.a vista en la Figura 45 y 6.b de la Figura 46, se realizó el mismo procedimiento siendo una variante la utilización de la técnica de recristalización (metanol y cloroformo) para la muestra 6.b, se puede observar que hubo una reducción de la banda del grupo hidroxilo, así como también los 2 picos que están a lado de la banda en 2927.03 cm^{-1} de estar irregulares se uniformizaron ligeramente en la muestra 6.b así también en 1647.24 cm^{-1} y 1646.66 cm^{-1} respectivamente se mantuvieron uniformes de manera intensa similar a la de la muestra del PLA comercial pero siendo un poco más ancha la banda. Hay que destacar que la huella digital es similar.

Figura 45. Muestra 6.a de PLA (5% Sn(Oct)₂_98°C_31min)



Fuente: LABINVSERV.

Figura 46. Muestra 6.b de PLA (5% Sn(Oct)₂_98°C_31min)- recristalización.

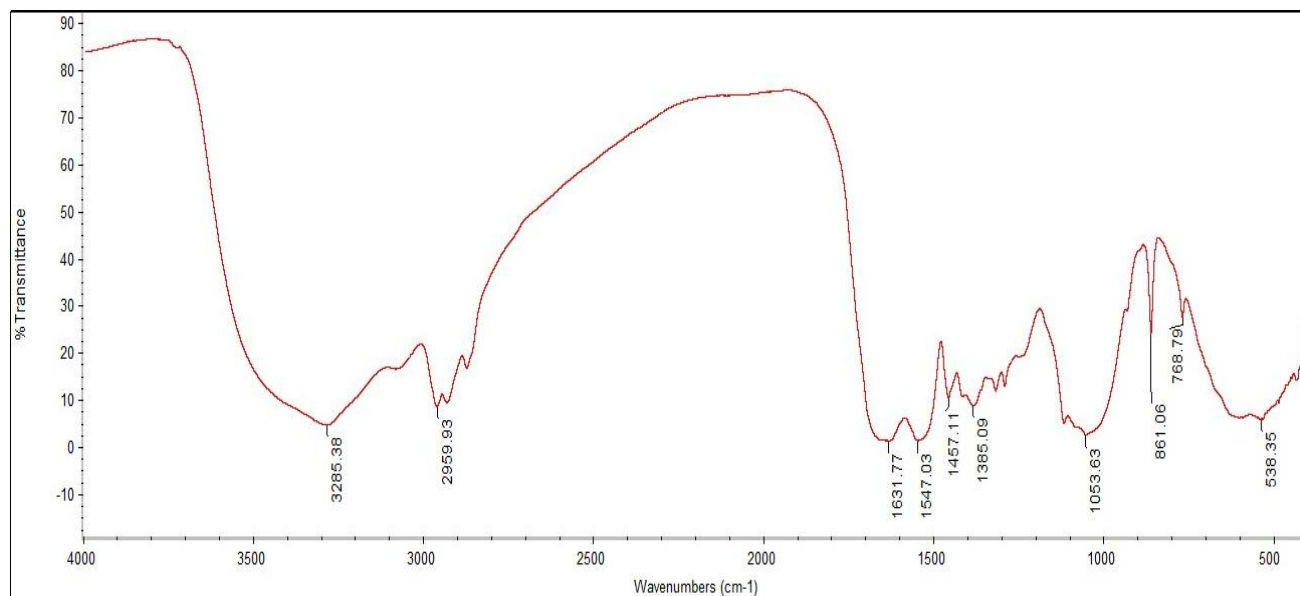


Fuente: LABINVSERV.

La muestra 7.a sin el uso de la técnica de purificación vista en la Figura 47 y la 7.b se usó la técnica de recristalización (metanol y cloroformo) en la muestra 7.a se observa una banda ancha con un pico de 3285.38 cm^{-1} el cual disminuye de intensidad en la muestra 7.b manteniéndose el mismo pico con una ligera variación. Los 2 picos relacionados a CH₂ y CH₃ ubicados en 2959.93 cm^{-1} se redujeron de intensidad, en la posición del grupo carbonilo en 1631.7 cm^{-1} se mantiene el mismo pico, pero hay una variación con el ancho de la banda, la muestra 7.b vista en la Figura 48 tiene más reducido el ancho y más nítidos los picos. La huella digital se mantiene similar con ligeras variaciones de intensidad manteniendo el patrón. En la Figura 49, la muestra de 7.b, añadiendo PEG se notan unos cambios ligeros, la banda en 3285.38 cm^{-1} se

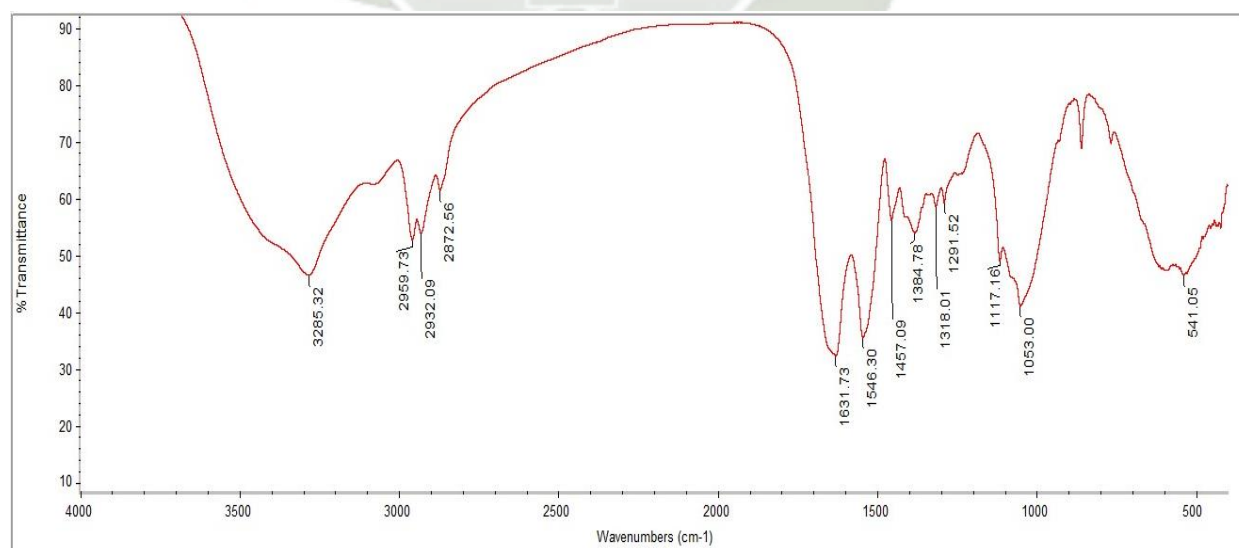
recorre a 3281.04 cm^{-1} se aumenta ligeramente la intensidad del mismo y el pico en 1631.7 cm^{-1} reduce ligeramente su intensidad.

Figura 47. Muestra 7.a de PLA (5% Sn(Oct)₂_98°C_31min)



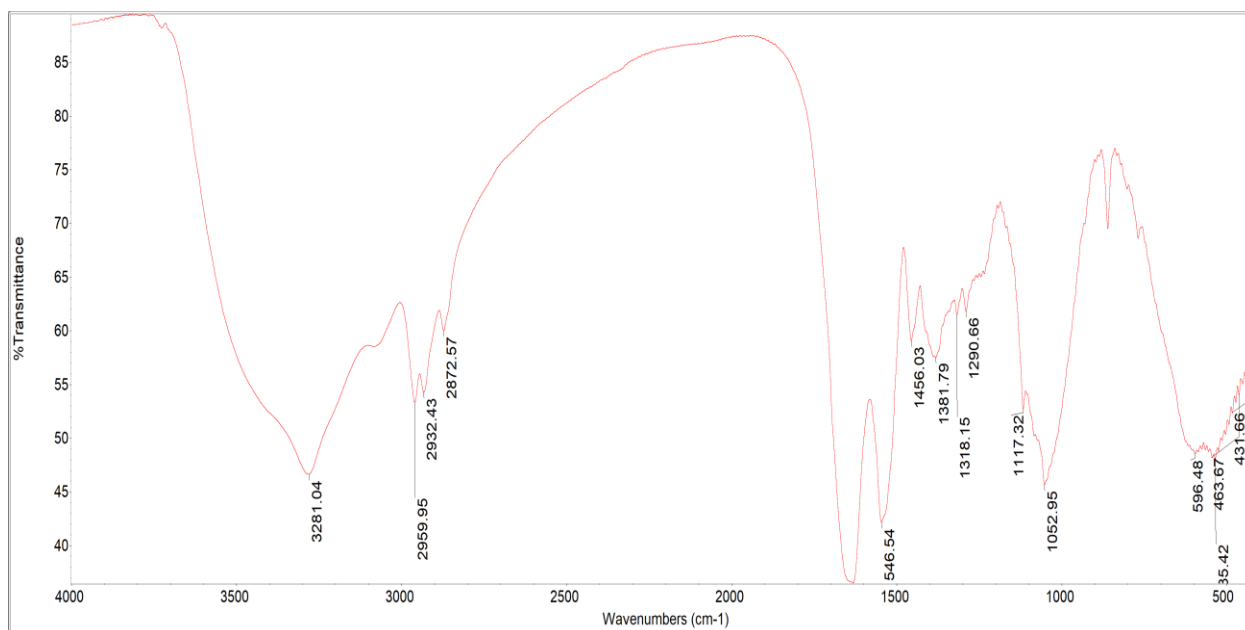
Fuente: LABINVSERV.

Figura 48. Muestra 7.b de PLA (5% Sn(Oct)₂_98°C_31min)-recristalización.



Fuente: LABINVSERV.

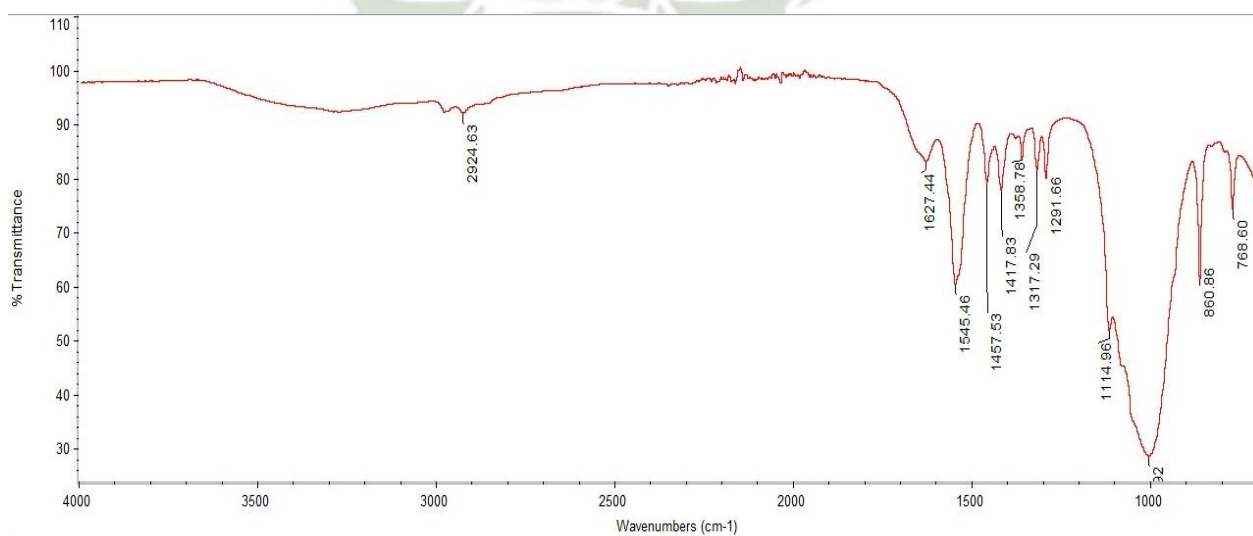
Figura 49. Muestra 7.b de PLA (5% Sn(Oct)₂_98°C_31min-1%PEG)-



Fuente: LABINVSERV.

La muestra 8 de la Figura 50 fue obtenida utilizando la recristalización, pero se cambió el metanol por etanol. La muestra presenta similitud con el PLA comercial desde el rango de 3500 cm⁻¹ a 2500 cm⁻¹, los picos relacionados al CH₂ y CH₃ son similares en intensidad, el grupo C=O de 1627.44 cm⁻¹ se muestra con poca intensidad puede ser debido al método de purificación del ácido láctico usado como base.

Figura 50. Muestra 8 de PLA (6% Sn(Oct)₂_95°C_35min).

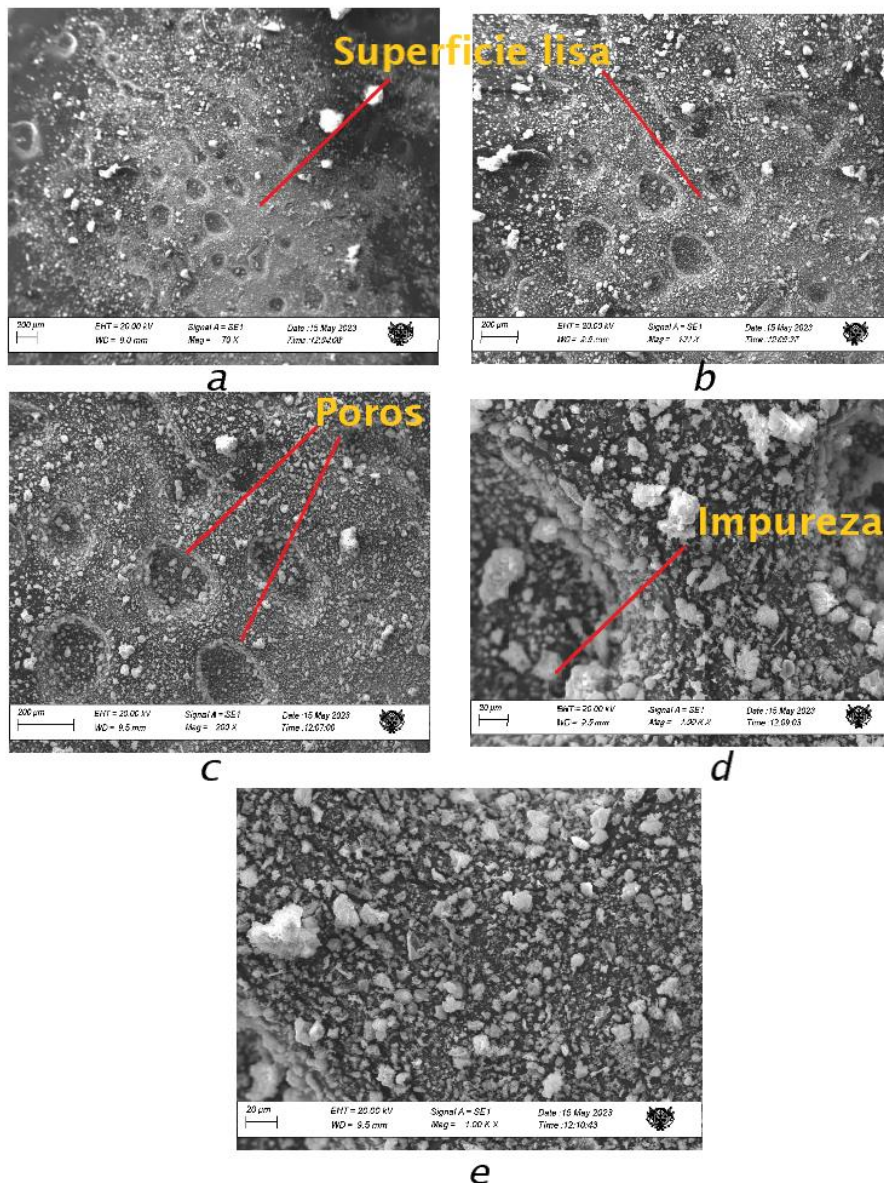


Fuente: LABINVSERV.

4.4.2. Caracterización por Microscopía electrónica de barrido

Para la Figura 51 de la muestra 8 la Figura a, b y c se caracterizan por una superficie en su mayoría lisa como menciona (Gregor-Svetec et al., 2021) el cual describe al PLA con poca rugosidad y lisa propia. de los materiales frágiles, como se ve el PLA comercial en la Figura 53. Sin embargo, la imagen d y e muestran también signos de porosidad en la cual al pasar a la vista de 20 micras se observan aun impurezas que pueden haber permanecido aun después de la recristalización.

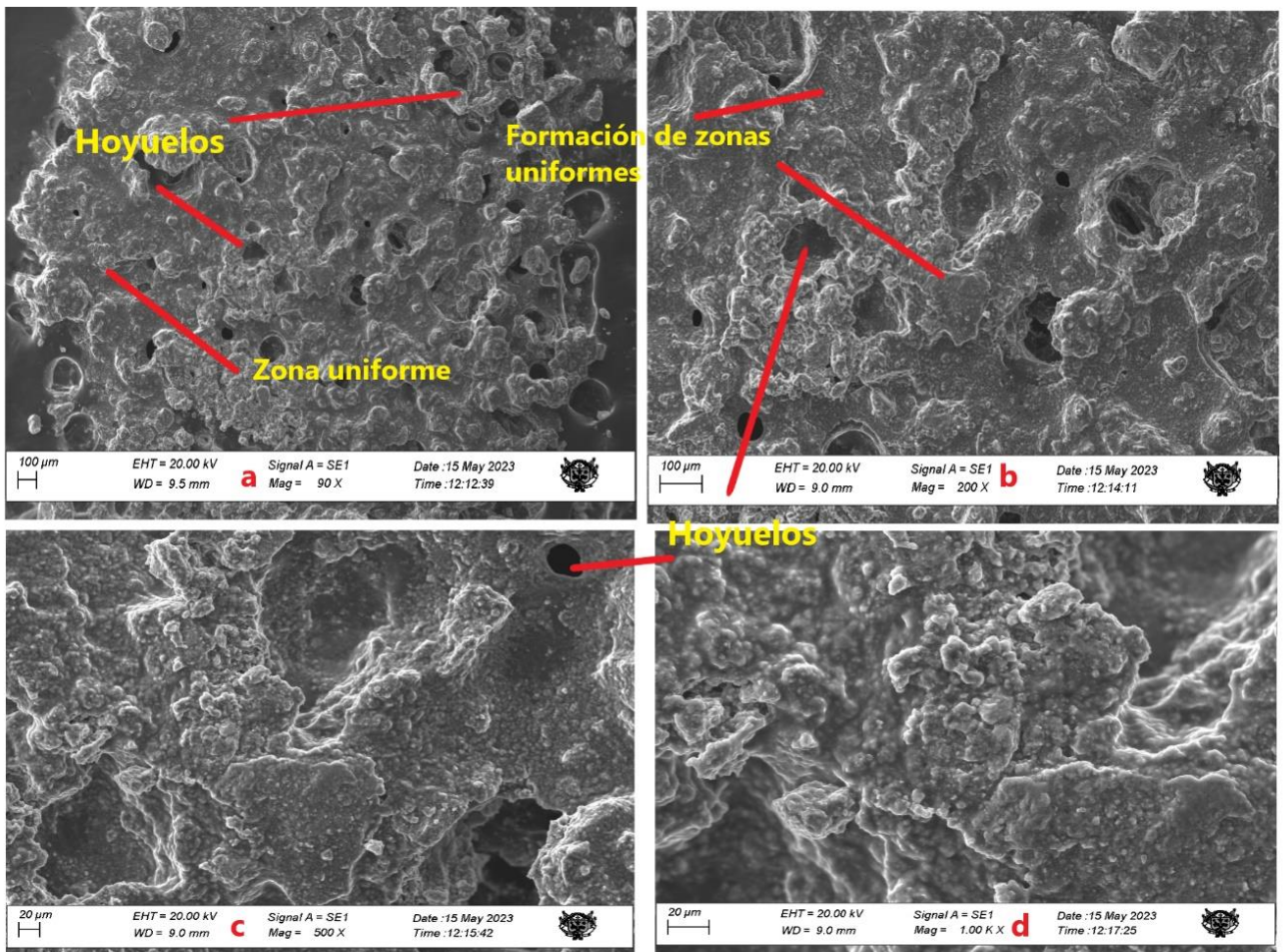
Figura 51. Muestra 8 de PLA visto por SEM (a), (b) y (c) aumento x200, (d) y (e) aumento x20



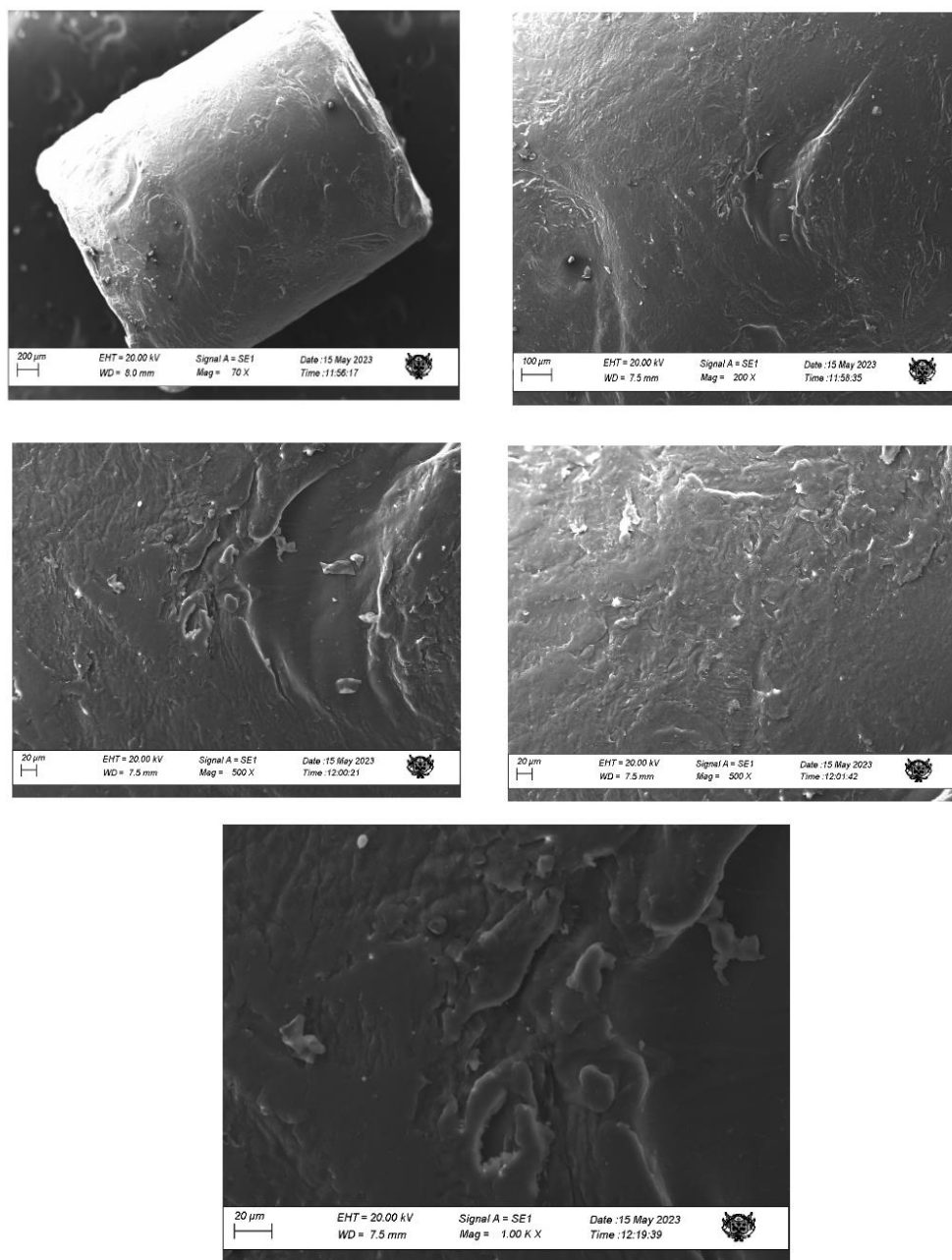
Fuente: Vicerrectorado de Investigación (UCSM).

En la Figura 52 se encuentra la muestra 7 perteneciente a PLA/PEG, al añadir el plastificante se trató de formar capas estratificadas en a, b y d, pero estas no se formaron por completo, así como también se formaron hoyos en partes de la superficie como se ve en la Figura a y c, así como aglomeraciones de material plastificante. D. Li et al., (2018) menciona que en la mezcla de PLA con PEG, mostró una fase dispersa de PEG y hoyuelos que demostró una unión deficiente o dispersión desigual, siendo un indicador que influye en la ductilidad de los materiales.

Figura 52. Muestra 7 de PLA/PEG visto por SEM (a) y (b) aumento x100, (c) y (d) aumento x20



Fuente: Vicerrectorado de Investigación (UCSM).

Figura 53. *Muestra del PLA comercial*

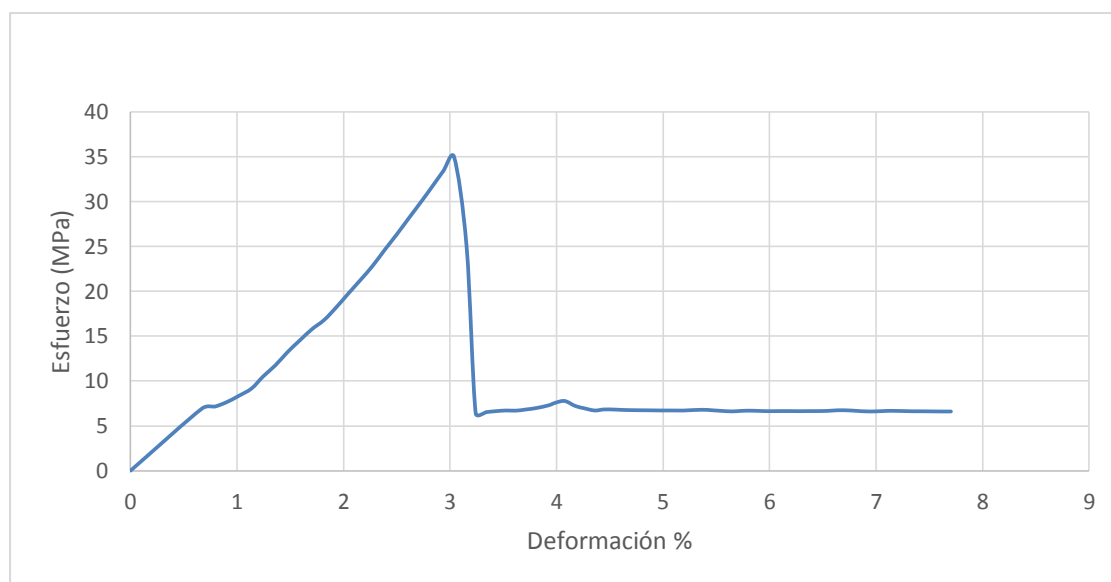
Fuente: Vicerrectorado de Investigación (UCSM).

4.4.3. Caracterización mecánica

Para las siguientes pruebas se utilizó una maquina inyectora utilizando el PLA virgen en pellet para dar forma de probetas al PLA, fueron rotuladas para su identificación. Las probetas obtenidas se colocaron en la máquina de ensayo de tracción para plásticos para obtener la gráfica esfuerzo deformación que se observa en la Figura

54 de lo cual se obtiene un esfuerzo máximo (σ_{max}) con un valor de 34.98 MPa también se calculó la elongación de 2.43% indicando poca fluencia antes de la rotura ambos valores se encuentran en la Tabla 13.

Figura 54. Gráfica esfuerzo vs deformación del PLA



La deformación la hallamos con la siguiente formula:

$$\% \epsilon = \frac{\Delta L}{L} \cdot 100$$

Reemplazando:

$$\% \epsilon = \frac{71.70 - 70}{70} \cdot 100\%$$

$$\% \epsilon = 2.43\%$$

Tabla 13. Resultado de la prueba de tracción

σ_{max}	34.98 MPa
$\% \epsilon$	2.43

Fuente: Elaboración propia.

CONCLUSIONES

- Se determinó las propiedades del ácido poliláctico (PLA) obtenido mediante polimerización por adición a partir del ácido láctico producido con cepas libres de *Lactobacillus* en suero desproteínizado, a su vez se determinó las condiciones de operación para la producción de PLA ensayados, resaltando la muestra 1 de PLA que corresponde a las condiciones de temperatura de 95 °C, octoato de estaño a una concentración de 6% por un tiempo de 25 minutos, y la muestra 4 con las condiciones de temperatura a 97 °C, octoato de estaño al 6% por un tiempo de 20 minutos, debido a que ambas poseen la mayor similitud al PLA comercial.
- Se caracterizó químicamente el ácido poliláctico mediante el uso de la técnica de FTIR resaltando que la muestra 1 y 4 obtuvieron la mayor formación de polímero siendo la primera muestra la que posee mayor intensidad de ambas y una ligera diferencia respecto a la cuarta muestra. Así como también el uso de SEM que mostró superficies lisas como el PLA comercial pero pequeños poros también, al utilizar plastificante indica uniformidad en capas para los lugares en los que hubo una mezcla homogénea, también hoyos y grumos relacionado a la mezcla desigual de PEG.
- Se caracterizó las propiedades mecánicas del ácido poliláctico (PLA) esto fue posible mediante el uso de probetas fabricadas a partir del PLA comercial, previamente con la máquina de inyección, el ensayo de tracción realizado en la máquina de tracción de polímeros de lo cual se obtuvo la curva de esfuerzo deformación obteniendo el esfuerzo máximo, el material exhibió poca fluencia antes de su rotura correspondiendo al PLA común.

RECOMENDACIONES

- Se recomienda realizar la investigación en una escala más grande debido a que hubo limitantes en el proceso de obtención del PLA como son la cantidad de ácido láctico obtenido en cada fermentación ya que se necesitaba realizar varias rondas de fermentación para poder realizar el proceso de polimerización, a esto también se suma el tiempo de fermentación y purificación necesario para la obtener ácido láctico es por eso que se utiliza el proceso con mayor producción de ácido láctico pero con una pureza menor.
- Al realizar el proceso a mayor escala se tendrá mayor producción de ácido láctico permitiendo ensayar con varias condiciones para la polimerización, así como mejorar la producción del PLA obteniendo una mayor pureza.
- Se sugiere buscar otros reactivos que reemplacen parcialmente o en su totalidad los reactivos controlados ya que fueron otra causa de limitante debido a que al ser controlados su adquisición era restringida y limitada, pero era fundamental para el proceso de purificación del ácido láctico (éter dietílico) y del ácido poliláctico (cloroformo) a fin de obtener una mayor pureza. En el caso del éter dietílico era muy volátil y no se podía recuperar toda la cantidad utilizada en el proceso habiendo pérdidas por su evaporación.
- Al utilizar el octoato de estaño para la polimerización del ácido láctico a PLA y cuando se realizó la mezcla el PLA con PEG hubo dificultad al medir con precisión las cantidades de PEG por las cantidades de muestra para trabajar, se utilizó micropipetas y pipetas, pero no pudieron absorber correctamente debido a su viscosidad, afectando la precisión.
- Se observó que la humedad posee una gran influencia al momento de analizar el FTIR por que puede ocultar algunos picos característicos al momento de realizar el análisis del gráfico por lo que surge la necesidad de utilizar métodos para eliminarla.

REFERENCIAS

- Ahmad, A., Banat, F., & Taher, H. (2020). A review on the lactic acid fermentation from low-cost renewable materials: Recent developments and challenges. En *Environmental Technology and Innovation* (Vol. 20). Elsevier B.V. <https://doi.org/10.1016/j.eti.2020.101138>
- Alomoto Masabanda, Y. P., & Ormaza Velásquez, E. D. (2020). *UNIVERSIDAD CENTRAL DE ECUADOR FACULTAD DE INGENIERÍA QUÍMICA CARRERA DE INGENIERÍA QUÍMICA*.
- Alomoto, Y. P., & Ormaza, E. D. (2020). *Obtención de ácido poliláctico (PLA) a partir del ácido láctico mediante el uso del catalizador de octoato de estaño*.
- Asas, C., Llanos, C., Matavaca, J., & Verdezoto, D. (2021). El lactosuero: impacto ambiental, usos y aplicaciones vía mecanismos de la biotecnología. *Agroindustrial Science*, 11(1), 105–116. <https://doi.org/10.17268/agroind.sci.2021.01.13>
- Ashothaman, A., Sudha, J., & Senthilkumar, N. (2021). A comprehensive review on biodegradable polylactic acid polymer matrix composite material reinforced with synthetic and natural fibers. *Materials Today: Proceedings*. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.07.047>
- Casalini, T., Rossi, F., Castrovinci, A., & Perale, G. (2019). A Perspective on Polylactic Acid-Based Polymers Use for Nanoparticles Synthesis and Applications. En *Frontiers in Bioengineering and Biotechnology* (Vol. 7). Frontiers Media S.A. <https://doi.org/10.3389/fbioe.2019.00259>
- Castillo Martinez, F. A., Balciunas, E. M., Salgado, J. M., Domínguez González, J. M., Converti, A., & Oliveira, R. P. de S. (2013). Lactic acid properties, applications and production: A review. En *Trends in Food Science and Technology* (Vol. 30, Número 1, pp. 70–83). <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2012.11.007>

<https://doi.org/10.1016/j.tifs.2012.11.007>

Chia, W. Y., Ying Tang, D. Y., Khoo, K. S., Kay Lup, A. N., & Chew, K. W. (2020). Nature's fight against plastic pollution: Algae for plastic biodegradation and bioplastics production. En *Environmental Science and Ecotechnology* (Vol. 4). Elsevier B.V. <https://doi.org/10.1016/j.esse.2020.100065>

Donald Garlotta. (2001). *A Literature Review of Poly(Lactic Acid)*. <https://doi.org/10.1023/A:1020200822435>

Eş, I., Mousavi Khaneghah, A., Barba, F. J., Saraiva, J. A., Sant'Ana, A. S., & Hashemi, S. M. B. (2018). Recent advancements in lactic acid production - a review. En *Food Research International* (Vol. 107, pp. 763–770). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2018.01.001>

Estupiñán, H. A., Carolina Parada, D., Laverde, D., Peña B, D. Y., & Vázquez, C. (2007). Obtención de ácido poli l-láctico mediante policondensación con catalizador de cinc metálico. *Scientia et Technica Año XIII*, 36.

Extrusoras Peru | camtradingsac.com. (s/f). Recuperado el 5 de junio de 2022, de <https://www.camtradingsac.com/extrusoras.html>

Gregor-Svetec, D., Leskovšek, M., Leskovar, B., Stanković Elesini, U., & Vrabič-Brodnjak, U. (2021). Analysis of pla composite filaments reinforced with lignin and polymerised-lignin-treated nfc. *Polymers*, 13(13). <https://doi.org/10.3390/polym13132174>

Inkinen, S., Hakkarainen, M., Albertsson, A. C., & Södergård, A. (2011). From lactic acid to poly(lactic acid) (PLA): Characterization and analysis of PLA and Its precursors. En *Biomacromolecules* (Vol. 12, Número 3, pp. 523–532). <https://doi.org/10.1021/bm101302t>

Jamshidian, M., Tehrany, E. A., Imran, M., Jacquot, M., & Desobry, S. (2010). Poly-Lactic Acid: Production, applications, nanocomposites, and release studies. *Comprehensive*

Reviews in Food Science and Food Safety, 9(5), 552–571. <https://doi.org/10.1111/j.1541-4337.2010.00126.x>

Johansen, M. R., Christensen, T. B., Ramos, T. M., & Syberg, K. (2022). A review of the plastic value chain from a circular economy perspective. En *Journal of Environmental Management* (Vol. 302). Academic Press. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.113975>

Komesu, A., Allan Rocha de Oliveira, J., Helena da Silva Martins, L., Regina Wolf Maciel, M., & Maciel Filho, R. (2017). Lactic acid manufacture. En *BioResources* (Vol. 12, Número 2).

Li, D., Jiang, Y., Lv, S., Liu, X., Gu, J., Chen, Q., & Zhang, Y. (2018). Preparation of plasticized poly (lactic acid) and its influence on the properties of composite materials. *PLoS ONE*, 13(3). <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0193520>

Li, G., Zhao, M., Xu, F., Yang, B., Li, X., Meng, X., Teng, L., Sun, F., & Li, Y. (2020). Synthesis and Biological Application of Polylactic Acid. En *Molecules (Basel, Switzerland)* (Vol. 25, Número 21). NLM (Medline). <https://doi.org/10.3390/molecules25215023>

Mehta, R., Kumar, V., Bhunia, H., & Upadhyay, S. N. (2005). Synthesis of poly(lactic acid): A review. En *Journal of Macromolecular Science - Polymer Reviews* (Vol. 45, Número 4, pp. 325–349). <https://doi.org/10.1080/15321790500304148>

MIDAGRI. (2020). *Producción de derivados lácteos aumentó 25% en el primer semestre del 2020 - Gobierno del Perú*. <https://www.gob.pe/institucion/midagri/noticias/297468-produccion-de-derivados-lacteos-aumento-25-en-el-primer-semester-del-2020>

MIDAGRI. (2021). *MIDAGRI: En el Perú existen más de 2 millones de productores de leche - Gobierno del Perú*. <https://www.gob.pe/institucion/midagri/noticias/498220-midagri-en-el-peru-existen-mas-de-2-millones-de-productores-de-leche>

- MINAM. (2018). *Cifras del mundo y el Perú*. Recuperado el 10 de abril de 2022, de <https://www.minam.gob.pe/menos-plastico-mas-vida/cifras-del-mundo-y-el-peru/>
- Mofokeng, J. P., Luyt, A. S., Tábi, T., & Kovács, J. (2012). Comparison of injection moulded, natural fibre-reinforced composites with PP and PLA as matrices. *Journal of Thermoplastic Composite Materials*, 25(8), 927–948. <https://doi.org/10.1177/0892705711423291>
- OCDE. (2021). *OCDE-FAO Perspectivas Agrícolas 2021-2030*. <https://doi.org/10.1787/47a9fa44-es>
- Plastic Extrusion Screws – R&B Plastics Machinery*. (s/f). Recuperado el 5 de junio de 2022, de <https://www.rbplasticsmachinery.com/extruders-screws/plastic-extrusion-screws/>
- Schoell, M. (2019). *Garbage Island: The Great Pacific Garbage Patch*. <https://environment-review.yale.edu/garbage-island-great-pacific-garbage-patch>
- Singhvi, M. S., Zinjarde, S. S., & Gokhale, D. V. (2019). Polylactic acid: synthesis and biomedical applications. En *Journal of Applied Microbiology* (Vol. 127, Número 6, pp. 1612–1626). Blackwell Publishing Ltd. <https://doi.org/10.1111/jam.14290>
- Valerio, O., Pin, J. M., Misra, M., & Mohanty, A. K. (2016). Synthesis of glycerol-based biopolyesters as toughness enhancers for polylactic acid bioplastic through reactive extrusion. *ACS Omega*, 1(6), 1284–1295. <https://doi.org/10.1021/acsomega.6b00325>
- VanWouwe, P., Dusselie, M., Vanleeuw, E., & Sels, B. (2016). *Lactide Synthesis and Chirality Control for Polylactic acid Production Pieter Van Wouwe, Michiel Dusselier, Evelien Vanleeuw, and Bert Sels* [a]*. www.chemsuschem.org
- Wang, M., Guo, L., & Sun, H. (2019). Manufacture of biomaterials. En *Encyclopedia of Biomedical Engineering* (Vols. 1–3, pp. 116–134). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-801238-3.11027-X>

PROPIEDADES MECÁNICAS DEL ÁCIDO POLILÁCTICO OBTENIDO POR POLIMERIZACIÓN DEL ÁCIDO LÁCTICO PROVENIENTE DE CEPAS ÁCIDO LÁCTICAS

INFORME DE ORIGINALIDAD

7%

INDICE DE SIMILITUD

6%

FUENTES DE INTERNET

3%

PUBLICACIONES

3%

TRABAJOS DEL
ESTUDIANTE

FUENTES PRIMARIAS

1	repositorio.unal.edu.co Fuente de Internet	1%
2	Submitted to Universidad Politécnica de Madrid Trabajo del estudiante	1%
3	repositorio.ucsm.edu.pe Fuente de Internet	1%
4	Submitted to University of Bradford Trabajo del estudiante	1%
5	repositorio.utn.edu.ec Fuente de Internet	1%
6	caelum.ucv.ve Fuente de Internet	1%
7	www.dspace.uce.edu.ec Fuente de Internet	1%
8	rinfi.fi.mdp.edu.ar Fuente de Internet	1%



Excluir citas

Apagado

Excluir coincidencias < 1%

Excluir bibliografía

Apagado