

UNIVERSIDAD DEL VALLE DE
GUATEMALA

Facultad de Ingeniería



**“Extracción de pectina para el aprovechamiento de residuos de
cáscara de manzana utilizando soluciones ácidas”**

Trabajo de graduación en modalidad de tesis presentado por

Paula Fernanda Eggenberger Vásquez

para optar al grado académico de Licenciada en Ingeniería

Química

Guatemala

2023

UNIVERSIDAD DEL VALLE DE
GUATEMALA

Facultad de Ingeniería



“Extracción de pectina para el aprovechamiento de residuos de cáscara de manzana utilizando soluciones ácidas”

Trabajo de graduación en modalidad de tesis presentado por

Paula Fernanda Eggenberger Vásquez

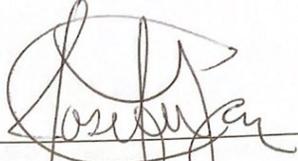
para optar al grado académico de Licenciada en Ingeniería

Química

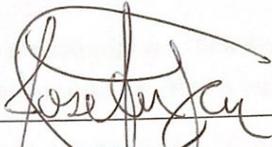
Guatemala

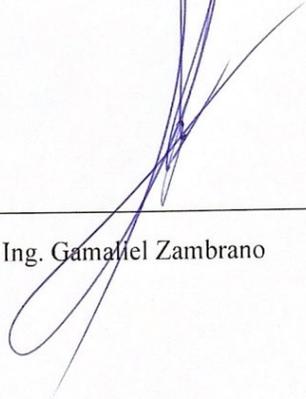
2023

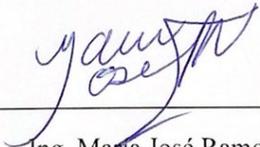
Vo. Bo.

(f) 
Ing. Andrés Lam

Terna examinadora

(f) 
Ing. Andrés Lam

(f) 
Ing. Gamaliel Zambrano

(f) 
Ing. María José Ramos

Fecha de aprobación: Guatemala, 14 de diciembre de 2,023

PREFACIO

Luego de estos cinco años en la carrera de Ingeniería Química, quiero agradecerle a Dios en primer lugar por permitirme llegar hasta aquí y poner en mi camino a las personas correctas para cumplir con mi meta.

Quiero agradecer especialmente a mi abuela Yoly, ya que, si no fuera por ella, no me habría sido posible estudiar en esta universidad. También a mis papás y hermana, por ser un apoyo incondicional en todo momento y estar para mí cuando más los necesité.

También agradezco especialmente a mis compañeros; Jose, María Reneé, Lissa y Ana Elisa por hacer de estos cinco años inolvidables y estar en los momentos más difíciles que se me presentaron.

Finalmente, quiero agradecer a los ingenieros; Jose Andrés Lam y Gamaliel Zambrano por brindarme apoyo en este trabajo y la carrera. También una especial mención a Vero y Melissa por brindarme su ayuda y colaboración en todo momento.

ÍNDICE

I.	INTRODUCCIÓN	1
II.	OBJETIVOS	2
A.	GENERAL.....	2
B.	ESPECÍFICOS.....	2
III.	JUSTIFICACIÓN	3
IV.	MARCO TEÓRICO	4
A.	INDUSTRIA DE LA MANZANA.....	4
B.	MANEJO DE RESIDUOS ORGÁNICOS SÓLIDOS.....	5
C.	ECONOMÍA CIRCULAR.....	6
D.	LA PECTINA, SU COMPOSICIÓN Y ESTRUCTURA	7
E.	APLICACIONES Y RECURSOS DE LA PECTINA	10
F.	PRODUCTOS E INDUSTRIAS QUE UTILIZAN PECTINA.....	12
G.	PECTINA EN LA CÁSCARA DE MANZANA.....	15
H.	EXTRACCIÓN DE LA PECTINA DE LA CÁSCARA DE MANZANA	15
I.	CARACTERIZACIÓN DE LA PECTINA.....	17
J.	ESTANDARIZACIÓN DE PECTINA EN LA INDUSTRIA	19
K.	REACCIONES INVOLUCRADAS EN LA EXTRACCIÓN Y CARACTERIZACIÓN DE LA PECTINA	19
L.	TIPOS DE HIDRÓLISIS	20
M.	ANÁLISIS COSTO BENEFICIO	20
N.	ESTADÍSTICA DESCRIPTIVA.....	21
V.	ANTECEDENTES	22
VI.	METODOLOGÍA.....	23
a)	Adecuación y tratamiento cáscara de manzana	23
b)	Hidrólisis ácida.....	23
c)	Purificación	25
d)	Rendimiento	25
e)	Caracterización.....	25
VII.	RESULTADOS	27
VIII.	ANÁLISIS DE RESULTADOS.....	28
IX.	CONCLUSIONES	33
X.	RECOMENDACIONES.....	34
XI.	REFERENCIAS.....	35

XII.	ANEXOS	38
A.	BALANCES DE MASA Y ENERGÍA	38
B.	CÁLCULOS DE MUESTRA	43
C.	DATOS ORIGINALES	45
D.	DATOS CALCULADOS	50
E.	ANÁLISIS DE ERROR	53
F.	IMÁGENES DE EXPERIMENTACIÓN	55
XIII.	GLOSARIO	59

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Equipo y cristalería para adecuación de cáscara de manzana.....	23
Tabla 2. Equipo y cristalería para las hidrólisis ácidas.....	23
Tabla 3. Reactivos para hidrólisis ácida.	24
Tabla 4. Cristalería y reactivo para purificación.	25
Tabla 5. Cristalería y equipo para caracterización de pectina.	25
Tabla 6. Reactivos para caracterización de pectina.	25
Tabla 7. Rendimiento de extracción de pectina.....	27
Tabla 8. Caracterización de pectina.....	27
Tabla 9. Análisis costo – beneficio para cada ácido.....	27
Tabla 10. Tiempo y masa de cáscara de manzana durante el secado.	45
Tabla 11. Datos recolectados en el tratamiento y secado de cáscara de manzana.	45
Tabla 12. Datos recolectados extracción de pectina con ácido clorhídrico.	45
Tabla 13. Datos recolectados extracción de pectina con ácido sulfúrico.	45
Tabla 14. Datos recolectados extracción de pectina con ácido fosfórico.	46
Tabla 15. Datos recolectados en la precipitación y secado de pectina con ácido clorhídrico.....	46
Tabla 16. Datos recolectados en la precipitación y secado de pectina con ácido sulfúrico.	46
Tabla 17. Datos recolectados en la precipitación y secado de pectina con ácido fosfórico.....	46
Tabla 18. Datos recolectados en la caracterización de la pectina extraída con ácido clorhídrico.	47
Tabla 19. Datos recolectados para la caracterización del contenido de cenizas en la extracción de ácido clorhídrico.	47
Tabla 20. Datos recolectados en la caracterización de la pectina extraída con ácido sulfúrico.	47
Tabla 21. Datos recolectados para la caracterización del contenido de cenizas en la extracción de ácido sulfúrico.....	47
Tabla 22. Datos recolectados en la caracterización de la pectina extraída con ácido fosfórico.....	48
Tabla 23. Datos recolectados para la caracterización del contenido de cenizas en la extracción de ácido fosfórico.	48
Tabla 24. Costos iniciales de equipo y cristalería para análisis costo – beneficio.....	48
Tabla 25. Costos de reactivos para análisis costo – beneficio ácido clorhídrico.	49

Tabla 26. Costos de reactivos para análisis costo – beneficio ácido sulfúrico.	49
Tabla 27. Costos de reactivos para análisis costo – beneficio ácido fosfórico.	49
Tabla 28. Consumo de energía eléctrica por equipo.....	49
Tabla 29. Disminución del porcentaje de humedad y peso de agua del secado de cáscara de manzana.	50
Tabla 30. Datos calculados rendimiento y caracterización de pectina extraída con ácido clorhídrico ...	50
Tabla 31. Datos calculados del rendimiento y caracterización de pectina extraída con ácido sulfúrico.	51
Tabla 32. Datos calculados del rendimiento y caracterización de pectina extraída con ácido fosfórico.	51
Tabla 33. Análisis estadístico para la extracción de pectina con ácido clorhídrico.	51
Tabla 34. Análisis estadístico para la extracción de pectina con ácido sulfúrico.	52
Tabla 35. Análisis estadístico para la extracción de pectina con ácido fosfórico.	52
Tabla 36. Razón B/C para análisis costo – beneficio a escala laboratorio para cada ácido.	52

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Balance de Masa y Energía del tratamiento de residuos de cascara de manzana.....	38
Figura 2. Balance de Masa y Energía extracción de pectina con ácido clorhídrico.....	39
Figura 3. Balance de Masa y Energía extracción de pectina con ácido sulfúrico.....	40
Figura 4. Balance de Masa y Energía extracción de pectina con ácido fosfórico.....	41
Figura 5. Balance de Masa y Energía calcinación pectina en Mufla.	42
Figura 6. Curva de secado de manzana.	50

LISTA DE ILUSTRACIONES

Ilustración 1. Estructura química básica de la pectina.....	7
Ilustración 2. Ácido galacturónico	8
Ilustración 3. Ácido galacturónico metoxilado.....	8
Ilustración 4. Pectina de alto metoxilo.	9
Ilustración 5. Pectina de bajo metoxilo.	9
Ilustración 6. Hoja de especificación de pectina para aplicación en alimentos.	13
Ilustración 7. Hoja de especificación de pectina para aplicación en alimentos.	14
Ilustración 8. Hoja de especificación de pectina grado USP	14
Ilustración 9. Cáscara de manzana seca y triturada.	55
Ilustración 10. Solución filtrada después de extracción.	56
Ilustración 11. Desechos de cáscara de manzana luego de la filtración.	56
Ilustración 12. Pectina precipitada.	57
Ilustración 13. Pectina seca y triturada.	57
Ilustración 14. Ficha técnica pectina extraída con los 3 ácidos.	58

RESUMEN

En este estudio se muestra el análisis experimental y costo – beneficio del proceso de extracción de pectina de residuos de cáscara de manzana verde a escala laboratorio, en donde se emplearon ácido clorhídrico al 0.5 M, ácido sulfúrico al 0.05 M y ácido fosfórico al 1.0 M. La pectina es un polisacárido complejo y considerado una fibra soluble que se encuentra presente en muchas frutas y plantas, siendo una de las principales, la manzana, que contiene alrededor de un 14% de pectina (Robledo, V. & Castro, L., 2019). Para la extracción, primero se llevó a cabo un tratamiento de los residuos de cáscara, en donde se separó manualmente la cáscara y cáscara con fruto y después la cáscara deshidrató disminuyendo su humedad de un 52.63% hasta un 0.1800%. Luego, se realizaron extracciones con las tres soluciones mencionadas, las condiciones de hidrólisis fueron las mismas para las 3, siendo estas una temperatura de 75°C, pH de 2.5 a 3.0, un tiempo de 75 minutos y agitación periódica. Los rendimientos obtenidos para el ácido clorhídrico, sulfúrico y fosfórico fueron de $8.667\% \pm 1.739\%$, $9.666\% \pm 1.740\%$ y $8.333\% \pm 1.738\%$ respectivamente, en donde se determinó que el ácido sulfúrico tiene mejor capacidad de extracción. Por otro lado, para la caracterización de la pectina extraída con ácido clorhídrico, sulfúrico y fosfórico, se obtuvieron valores para el peso equivalente de 1222.0 ± 533.6 mg/meq, 634.9 ± 275.6 mg/meq y 429.6 ± 186.26 mg/meq, para el porcentaje de metoxilo valores de $8.0858\% \pm 3.501\%$, $7.156\% \pm 3.150\%$ y $7.750\% \pm 3.357\%$, para la alcalinidad valores de $7.107\% \pm 6.41\%$, $7.156\% \pm 3.150\%$ y $4.999\% \pm 3.713\%$, para el porcentaje de AUA valores de $7.107\% \pm 6.41\%$, $4.349\% \pm 2.659\%$ y $48.11\% \pm 20.87\%$ y por último para el grado de esterificación valores de $96.90\% \pm 24.30\%$, $93.30\% \pm 23.39\%$ y $91.46\% \pm 22.94\%$ respectivamente. Los valores obtenidos, indican que la pectina extraída de residuos de cáscara de manzana posee una buena capacidad de gelificación y es útil para la estabilización y espesamiento de productos. Además, los valores obtenidos con el ácido clorhídrico muestran que esta pectina es de mejor calidad.

En cuanto al análisis costo beneficio, se colocaron los costos aproximados de cada reactivo y el resto necesarios para la extracción y los costos de consumo energético asociados, estos se tomaron como costos operativos por corrida. Para el beneficio se utilizó un precio de mercado para obtener un precio de venta para la pectina por corrida y, de esta forma se calculó la razón costo beneficio (B/C). El valor obtenido para la razón B/C, fue de 0.004920 para el HCl 0.5 M, 0.005600 para el H₂SO₄ 0.05 M y de 0.004560 para el H₃PO₄ 1.00 M, lo que indicó que al ser menor a 1, la extracción a escala laboratorio no es viable económicamente, puesto que los costos superan a los beneficios. Debido a esto, es recomendable realizar un análisis a mayor escala o a escala industrial para analizar el impacto del consumo energético por los equipos y el precio de venta al aumentar la producción. En base a los costos de reactivos, la razón B/C, rendimiento y propiedades de la pectina extraída con HCl 0.5 M, se determinó que este ácido es la opción más viable para la extracción de pectina de residuos de cáscara de manzana verde.

I. INTRODUCCIÓN

Hoy en día la sostenibilidad y aprovechamiento de recursos es muy importante, la industria de alimentos en especial se encuentra frente a estos desafíos en los que se deben buscar formas de utilizar los subproductos y residuos que se generan en los procesos de producción. Entre los subproductos de las industrias, se encuentra la cáscara de manzana, que usualmente se desecha, sin embargo, esta puede tener un valor significativo al contener pectina.

Esta sustancia es un polisacárido que se encuentra presente en las paredes celulares de plantas y posee propiedades gelificantes y espesantes, lo cual la hace un ingrediente que es muy utilizado en la industria de alimentos, en productos como mermeladas, panadería, confitería, lácteos, frutas preparadas, bebidas no alcohólicas y salsas. Asimismo, también tiene aplicaciones en la industria farmacéutica para la formulación de tabletas, suspensiones orales y recubrimiento de cápsulas. Además, se utiliza en cosméticos para mejorar consistencia y textura de cremas o lociones. Debido a su amplia gama de aplicaciones, su demanda ha aumentado a través de los años y posee un precio de venta promedio de Q22.00 por onza.

La extracción de pectina a partir de residuos de cáscara de manzana conlleva una serie de pasos que permiten obtener este componente. La cáscara se recolecta después de que la manzana verde es utilizada por una panadería local. Para llevar a cabo la extracción, se pueden solucionar ácidos y así esta puede precipitarse y purificarse.

La extracción a partir de residuos ofrece beneficios ambientales y económicos, ya que se puede reducir la cantidad de desechos generados aprovechando el subproducto para poder obtener materia prima que pueda utilizar en otro proceso, algo conocido como la economía circular. En el caso de la panadería, puede utilizarse para espesar las mermeladas que utilizan en la elaboración de postres.

Asimismo, la extracción de pectina de la cáscara de manzana verde es una alternativa sostenible en comparación a la extracción de fuentes convencionales. En este trabajo se llevará a cabo el proceso de extracción de pectina solución ácida para poder determinar qué ácido (ácido clorhídrico, sulfúrico y fosfórico), tiene un mayor rendimiento, llevando a cabo un análisis costo beneficio y evaluando su viabilidad.

II. OBJETIVOS

A. GENERAL

Comparar el rendimiento de extracción de pectina para el aprovechamiento de residuos de cáscara de manzana verde, empleando soluciones de ácido clorhídrico, sulfúrico y fosfórico.

B. ESPECÍFICOS

- Extraer pectina y determinar el rendimiento con cada una de las soluciones ácidas, en base a la cantidad de materia prima utilizada y pectina extraída, para seleccionar la solución más adecuada a escala laboratorio.
- Caracterizar la pectina obtenida en cada extracción mediante el cálculo de peso equivalente, contenido de metoxilo, alcalinidad de ceniza, ácido anhidrouónico y el grado de esterificación para determinar su calidad y capacidad de gelificación.
- Realizar un análisis costo-beneficio a escala laboratorio de las tres soluciones utilizadas en cada extracción, tomando en cuenta los costos del ácido, energía consumida por equipo, costos de equipo y material, para determinar la viabilidad del método.

III. JUSTIFICACIÓN

El sector alimenticio produce el mayor volumen de residuos y muchos de ellos no suelen aprovecharse, estos pueden usarse como nutrientes después de un ciclo de compostaje o como alimento para ganado, sin embargo, tiene un beneficio económico bajo (Kumar, S., Ozukum, R., Mathad, G., 2020). En el procesamiento de frutas se generan muchos residuos sólidos, que pueden llegar a ser hasta un 50% de la materia prima, estos suelen ser, cáscara, frutos verdes, frutos de desecho, frutas dañadas, etc. Por ello, es importante encontrar formas eficientes para maximizar la utilidad y beneficios de estos productos (Virk and Sogi, 2004).

Actualmente, la manzana se considera como una de las frutas con mayor consumo y permite la obtención de la pectina que puede tener un uso muy relevante en las industrias, tales como; procesamiento de mermeladas, jaleas, ketchups, jarabes, yogures, formulaciones médicas para la estabilización de suspensiones, etc. (Virk and Sogi, 2004). Es uno de los productos más importantes que pueden obtenerse de los residuos que la manzana genera (Kumar, S., Ozukum, R., Mathad, G., 2020).

En este trabajo de graduación, se propone la extracción de pectina a partir de residuos de cáscara de manzana provenientes de pastelerías, mediante hidrólisis ácida. De esta manera, se busca determinar el rendimiento de las soluciones ácidas a emplear y con ello, la viabilidad del método a escala laboratorio para así darle aprovechar los residuos, dándoles un valor económico y al mismo tiempo reduciendo su impacto en el ambiente.

IV. MARCO TEÓRICO

A. INDUSTRIA DE LA MANZANA

1. Mundialmente

Según un estudio realizado por el Servicio Agrícola Exterior del Departamento de Agricultura de Estados Unidos, para el año del 2022 y 2023, se predecía que la producción mundial de manzanas alcance los 78.4 millones de toneladas métricas, que, en comparación a otros años, tendría una disminución de 4.3 millones de toneladas métricas. Por otro lado, se estima que las exportaciones mundiales de manzana disminuyan 5.5 millones de toneladas métricas, lo que representa una disminución de 1.0 millón de toneladas métricas ya que habrá reducciones en envíos de China, Irán y Moldavia (Roy, 2023).

Las manzanas son de las frutas más consumidas en Estados Unidos. En el año 2019, el consumo promedio por persona en Estados Unidos aumentó alrededor de 26.3 lb, entre los factores que impactaron el aumento, se encuentran las nuevas variedades de la manzana, aumento de ingresos y producción de esta en el país (Lending Acres, 2023).

China es el primer productor de manzana a nivel mundial, seguidamente se encuentra Estados Unidos, Polonia, Italia y Francia. Estados Unidos cultiva alrededor de 200 variedades de manzanas y tiene más de 5,000 productores de manzanas que cultivan aproximadamente 240 millones de bushels cada año y cultivan en aproximadamente 322 mil acres de tierra. Los principales estados productores son: Washington, Nueva York, Michigan, Pensilvania, California, Virginia, Carolina del Norte, Oregón, Ohio e Idaho (Lending Acres, 2023).

En el año 2021 a 2022, Estado Unidos exportó más de 38.5 millones de bushels de manzanas frescas y solamente importó 6.3 millones de bushels. Estas exportaciones tuvieron un valor de aproximadamente 730 millones de dólares. En comparación al período del año 2020 a 2021, hubo una disminución de exportaciones y un aumento de importaciones de casi 20%, esto debido a que en el año del 2021 al 2022, importó fruta más cara y exportó manzanas a menor precio. Según un análisis del Departamento de Agricultura de US Apple, la producción total de manzanas tendría que aumentar más de 10.7 mil millones de lb o 255 millones de bushels para el año 2023 (Lending Acres, 2023).

En China, se estima que el cultivo de manzanas es de 1.9 a 2.1 millones de hectáreas y la cosecha oscila entre 21 a 24 millones de toneladas. En el año 2021, alrededor de 4.3 millones de toneladas de manzana fueron producidas en la provincia de Shanxi (Sociedad Internacional de Ciencias Hortícolas, 2023). Se prevé que la producción de manzanas de China alcance casi 41 millones de toneladas métricas,

que equivale a casi 5 millones de disminución, esto puede provocar una caída del 20% en exportaciones, mientras que se espera un aumento en importaciones del 13% (Roy, 2023).

2. En Guatemala

En Guatemala, las zonas productoras más importantes se ubican en Quetzaltenango (8%), Quiché (51%), San Marcos (17%) y Huehuetenango (9%). En una escala menor, también se tiene producción en Sololá, Guatemala, Sacatepéquez y Chimaltenango que suman alrededor del 15% (Agrinotas, 2023).

La manzana que se cultiva a nivel nacional es la criolla y su temporada es entre junio, julio y agosto. La producción es de alrededor de 550 mil quintales y se importa casi 350 mil, obteniendo un volumen total de 900 mil quintales anuales. Según estadísticas del MAGA y Banguat, se espera un crecimiento del 7.3% de la producción en el país y de crecimiento anual en volumen en cuanto a las importaciones (Calvo, 2023).

Se ha visto que la manzana tiene un futuro prometedor, puesto que existen muchas asociaciones que se encuentran trabajando por la calidad, el buen manejo y mercados. Algunas de estas son Anapde y Anapderch que apoya los productores en temas técnicos y de mercado, concentrándose en el manejo en frío luego de la cosecha (Agrinotas, 2023).

B. MANEJO DE RESIDUOS ORGÁNICOS SÓLIDOS

La producción de zumos y sidras, generan alrededor del 30% de residuos de manzana, que se destina a animales o se desecha, a pesar de tener una fuente de fibra alimentaria con distintos beneficios para la salud (Universidad Complutense de Madrid, 2020).

Un residuo orgánico es cualquier material que es biodegradable y proviene de un animal o planta. Los materiales biodegradables pueden degradarse en dióxido de carbono, metano o moléculas orgánicas simples. Cuando los residuos orgánicos se vierten en vertederos, pasan por una descomposición anaeróbica y producen metano, cuando este es liberado a la atmósfera, es bastante contaminante para la atmósfera. Al reciclar los productos orgánicos, estas emisiones se reducen y se puede controlar los recursos naturales (Britannica, 2023).

Uno de los métodos para tratamiento de residuos orgánicos, es el compostaje, el cual es un proceso que permite que una porción orgánica de residuos se descomponga en condiciones controladas. En este proceso, los microbios metabolizan material de desecho orgánico y reducen su volumen, obteniendo algo que se le llama compost, este es muy parecido a la tierra y se utiliza como un acondicionador de suelo (Britannica, 2023).

Este proceso ofrece un método de procesamiento y reciclaje en una sola operación. Los pasos que forman parte de este proceso son: clasificación y separación, reducción de tamaño y digestión de los desechos (Britannica, 2023).

Los microorganismos requieren de nutrientes básicos, oxígeno y agua para que se pueda dar la descomposición y, además, depende de varios factores como lo son; la población de microorganismos, proporción de carbono a nitrógeno, nivel de oxígeno, temperatura, humedad, superficie, pH y tiempo. Los residuos que se utilizan para el compostaje suelen ser de plantas, tierras, sustratos vegetales, madera sin tratar y restos de papel sin recubrimiento (Center for Agriculture, Food, and the environment, 2023).

C. ECONOMÍA CIRCULAR

La economía circular se basa en la relación responsable entre ciclos económicos y ecológicos, en donde se preserva el capital natural mediante la mejora de la eficiencia productiva. Con ella se busca la reducción de uso de materiales y recursos y darles un valor a los residuos, para que puedan ser nuevos insumos en la misma industria o en otra (Cortés, 2020).

Posee un enfoque económico sostenible, en donde se tiene como objetivo la reducción de generación de residuos y también promueve un ciclo continuo de reutilización, reparación, reciclaje y renovación de productos y materiales (Cortés, 2020).

Existen tres principios de la economía circular según la fundación Ellen Macarthur, los cuales son:

- Preservar y mejorar el capital natural.
- Optimizar el uso de los recursos.
- Fomentar eficacia en el sistema.

(Cortés, 2020)

Algunas de las ventajas de la economía circular son:

- Nuevas oportunidades de crecimiento económico.
- Eficiencia económica y reducción de costos al disminuir la utilización de recursos naturales, materias primas y energía.
- Mayor colaboración social y económica.
- Reducción de la huella ecológica.

(Cortés, 2020)

Por otro lado, también existen ciertas amenazas por parte de la economía circular:

- Concentración de la propiedad y de la riqueza debido a los nuevos servicios que se asocian con la economía circular.
- Reducción de intercambios empresariales.

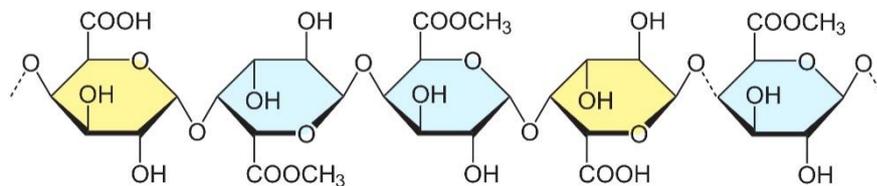
- Posible retracción de la economía.

(Cortés, 2020)

En el caso de los residuos de cáscara de manzana, para ser aprovechada, es necesario realizar un análisis y evaluar ciertas características para determinar si puede ser útil, tales como su humedad, contenido de fibra dietética (relevante para aplicaciones en alimentos o productos de salud), contenido bacteriano y fúngico (asegurar que no haya exceso de microorganismos que causen la degradación o sean un riesgo para la salud), contenido de nutrientes y azúcares naturales (dependiendo del uso que se le va a dar) (Center for Agriculture, Food, and the environment, 2023).

D. LA PECTINA, SU COMPOSICIÓN Y ESTRUCTURA

Ilustración 1. Estructura química básica de la pectina.



(SILVA TEAM, 2023)

1. Composición

Las pectinas son polisacáridos complejos que se encuentran presente en la pared celular de las plantas y se considera una fibra soluble. Se considera como una de las macromoléculas más complejas de la naturaleza porque puede estar compuesta por hasta 17 monosacáridos que poseen más de 20 vínculos diferentes. Asimismo, las pectinas cuentan con unidades repetidas de éster metílico y ácido galacturónico, los cuales forman tejidos esqueléticos de plantas químicamente estables y físicamente fuertes cuando son combinadas con proteínas y otros polisacáridos (Venkatanagaraju, E., Bharathi, N., Sindhuja, R., Chowdhury, R., Sreelekha, Y., 2020).

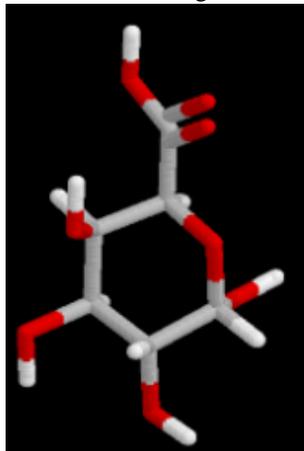
Esta macromolécula imparte fuerza y flexibilidad a la pared celular, igualmente que otras funciones biológicas, como la regulación de la movilidad del agua y los fluidos de las plantas y también tiene influencia en la textura de las frutas y verduras (Venkatanagaraju, E., Bharathi, N., Sindhuja, R., Chowdhury, R., Sreelekha, Y., 2020).

La pectina es muy rica en ácido galacturónico, el cual forma la columna vertebral de otros tres dominios que están junto con la pectina, los cuales son: homogalacturonano (HGA) y ramnogalacturonano – I (RG-I) y ramnogalacturonano – II (RG-II). Casi el 70% de la pectina se encuentra compuesta por ácido galacturónico. Entre el 60% y el 65% de la pectina total lo ocupa el HGA que tiene importancia en propiedades físicas de la pectina. Por otro lado, el RG-I, conforma entre el 20% y 35% y el RG-II constituye aproximadamente el 10% (Venkatanagaraju, E., Bharathi, N., Sindhuja, R., Chowdhury, R., Sreelekha, Y., 2020).

2. Estructura de la pectina

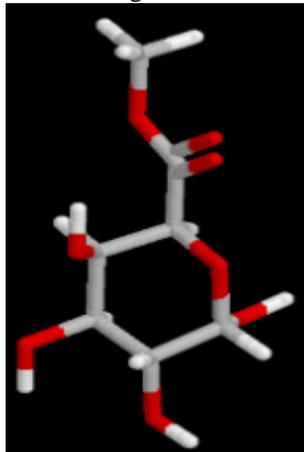
Las pectinas están formadas por largas cadenas de ácido galacturónico, este puede encontrarse con el grupo carboxilo libre o metoxilado (esterificado por metanol). Estas unidades metoxiladas, se encuentran unidas por los enlaces α 1-4 (Calvo, 2023).

Ilustración 2. Ácido galacturónico



(Calvo, 2023).

Ilustración 3. Ácido galacturónico metoxilado.



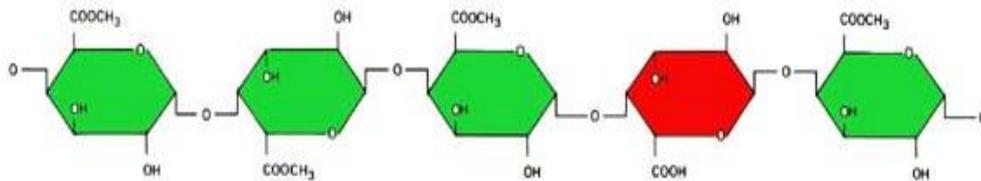
(Calvo, 2023).

La estructura de la pectina rige gran parte de las propiedades fisicoquímicas y aplicaciones. Los grupos carboxílicos o hidroxilos pueden estar esterificados con metilo y/o esterificados con O-acetilo. La esterificación del O-acetilo ocurre en la posición O-3 y en algunos casos en la posición O-2. Además de estas variables, es importante la composición de los azúcares neutros, grado de ramificación y polimerización, que pueden modificar la estructura (Robledo, V. & Castro, L., 2019).

El proceso de gelificación se ve afectado por el grado de esterificación, por lo que, depende del porcentaje de grupos carboxilo esterificados (DM), se pueden dar dos procesos distintos de gelificación. En el caso de pectinas altamente metoxiladas, con un DM > 50%, son pectinas formadas por presencia

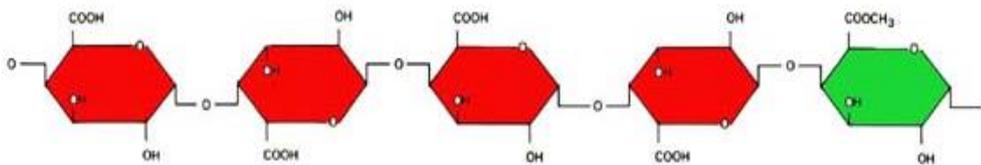
de cosolutos como la sacarosa, a una concentración mayor del 55% y un pH debajo de 3.5. Para las pectinas poco metoxiladas (DM < 50%), son geles formados en la presencia de cationes divalentes. El proceso de gelificación es posible debido a la formación de zonas de unión entre las regiones de HGA de distintas cadenas de pectina a través de puentes de calcio entre grupos carboxilo disociados (Robledo, V. & Castro, L., 2019).

Ilustración 4. Pectina de alto metoxilo.



(Calvo, 2023).

Ilustración 5. Pectina de bajo metoxilo.



(Calvo, 2023).

3. Propiedades de la pectina

a. Coloidal

La pectina puede precipitar como un gel sólido cuando se trata con un agente deshidratante, por ejemplo, el alcohol. Además, son muy sensibles a la deshidratación y pueden ser afectadas por otros coloides hidrófilos, por ello, son insolubles en la mayoría de bio-coloides. La carga negativa de la pectina va a depender del número de grupos carboxilo libres y estos son los que se encargan de su precipitación. Asimismo, la solubilidad de la pectina va a disminuir a medida que lo hace la temperatura cuando se precipita con el etanol (Venkatanagaraju, E., Bharathi, N., Sindhuja, R., Chowdhury, R., Sreelekha, Y., 2020).

b. Solubilidad

Las pectinas pueden ser solubles o no solubles en agua. Los principales factores que afectan esta propiedad son el pH, temperatura y naturaleza y concentración del soluto. La pectina va a ser estable a un pH de 4. La solubilidad de la pectina va a depender también de su composición, en este caso, su catión monovalente es soluble en agua, pero los di o trivalentes no lo son (Venkatanagaraju, E., Bharathi, N., Sindhuja, R., Chowdhury, R., Sreelekha, Y., 2020).

c. Gelación

La pectina tiene la capacidad para formar gel en presencia de ácido, calcio o azúcar. Los enlaces de hidrógeno e interacciones hidrofóbicas entre las cadenas de polímeros la estabilizan (Venkatanagaraju, E., Bharathi, N., Sindhuja, R., Chowdhury, R., Sreelekha, Y., 2020).

Por otro lado, es importante la fuerza de gelificación de la pectina, la cual es la capacidad para que pueda formar un gel firme y estable. Hay ciertos factores que pueden afectar la fuerza de gelificación, los cuales son:

- Concentración de pectina: entre mayor sea la cantidad de pectina, mayor es la fuerza de gelificación, sin embargo, existe un punto óptimo y si se excede este, se formará un gel demasiado rígido.
- Concentración de azúcar: la presencia de azúcar ayuda a estabilizar la estructura de gel.
- Temperatura y pH: la pectina va a tener un mejor comportamiento de gelificación en presencia de un medio ácido. Algunas pectinas van a gelificar mejor a un pH específico. Por otro lado, también puede haber un tiempo óptimo de cocción para gelificar.

(Robledo, V. & Castro, L., 2019)

E. APLICACIONES Y RECURSOS DE LA PECTINA

La pectina es un ingrediente alimenticio muy valorado y comúnmente utilizado como un agente gelificante y estabilizador. Es uno de los polisacáridos más importantes, ya que tiene una creciente demanda en el mercado global, en donde alcanza una capacidad de producción total de alrededor de 45 a 50 millones de toneladas por año. Han sido de gran interés como dieta rica en fibra que tiene un beneficio en la salud al reducir el colesterol y niveles de glucosa. Asimismo, también han mostrado resultados prometedores como transportadoras de fármacos para administración oral y se utilizan en distintas aplicaciones biomédicas. La pectina ha ganado gran prioridad en el mercado mundial de biopolímeros, teniendo un gran potencial para futuras aplicaciones (Venkatanagaraju, E., Bharathi, N., Sindhuja, R., Chowdhury, R., Sreelekha, Y., 2020).

Por otro lado, una de las mayores aplicaciones de la pectina, se encuentra en el mercado de alimentos, como un aditivo. Los aditivos alimenticios que se usan en el procesamiento de alimentos para mezclar dos líquidos inmiscibles para producir cierto producto, se llaman emulsionantes alimentarios, los cuales actúan como agentes tensioactivos en el borde de capas inmiscibles y así pueden reducir la cristalización de un aceite y previenen la separación del agua. Los emulsionantes se pueden utilizar en distintos productos como helados, cremas para untar bajas en grasas, yogures, margarina, aderezos, etc (Thiraviam, V. & Mahejbin, K., 2020).

Existen dos tipos de emulsión: aceite en agua y agua en aceite. Por ejemplo, la leche, mayonesa, aderezos y bebidas son emulsiones de aceite en agua. Por otro lado, las mantequillas o margarinas son

emulsiones de agua en aceite. Las emulsiones son importantes ya que pueden reducir grasas o encapsular bioactivos. Los emulsionantes más utilizados en alimentos son tensioactivos de bajo peso molecular (lectininas, derivados de mono y diglicéridos) y emulsionantes macromoleculares como proteínas y polímeros de origen vegetal como polisacáridos de soja, almidón modificado, pectina y entre otros (Thiraviam, V. & Mahejbin, K., 2020).

La pectina es un hidrocoloide natural con amplias funciones. Entre sus funciones, se encuentra la capacidad gelificante, utilizado como potenciador de viscosidad. En el proceso de emulsificación, sus moléculas son adsorbidas en finas gotas de aceite desde la interfaz aceite/agua y protege a las gotas para que no puedan fusionarse con gotas adyacentes. La calidad del emulsionante se define por su capacidad para proporcionar estabilidad a largo plazo. Asimismo, la emulsificación o propiedades tensioactivas de la pectina son principalmente por la alta hidrofobicidad de las proteínas residuales presentes en la pectina y también por la naturaleza hidrofóbica del acetilo, metilo y ésteres, por otro lado, la capacidad de estabilización de la emulsión se atribuye a los carbohidratos y características conformacionales (Thiraviam, V. & Mahejbin, K., 2020).

Las pectinas de alto (HM) y bajo metoxilo (LM) poseen distintas propiedades fisicoquímicas y con ello varias aplicaciones. En el caso de pectina con un alto contenido de metoxilo, puede utilizarse como gelificante, emulsificante, estabilizador y espesante. La pectina con bajo contenido de metoxilo, se utiliza como un sustituto de grasa, en helados, yogurt, glaseado para pasteles, productos cárnicos y productos bajos en calorías (Robledo, V. & Castro, L., 2019).

1. Recursos convencionales de la pectina

La pectina comercial es extraída comúnmente de la cáscara de los cítricos, con un porcentaje de alrededor del 85%, seguido del orujo de manzana con un 14% y con un porcentaje de 0.5%, de la industria azucarera. Para los cítricos, la pectina representa alrededor de un 13.4% hasta un 29.1% del peso seco. La extracción de pectina realizada con enzimas para los cítricos no tiene un efecto significativo al comparar con los rendimientos mediante la extracción con ácidos. Por otro lado, la pulpa y orujo de manzana contienen entre un 4.2% hasta un 19% de pectina. La pectina de la manzana tiene propiedades de un gel más elástico y viscoso, mientras que la de los cítricos es un gel más elástico y quebradizo (Robledo, V. & Castro, L., 2019).

La pectina también puede encontrarse en otras fuentes, tales como:

- Frutas del bosque: en fresas, frambuesas, arándanos y moras contienen pectina, pero en menor cantidad que otras fuentes (Sharma, B., Naresh, N., Dhurdhoya, S., 2006).
- Otras frutas: las peras, ciruelas y guayabas también contienen pectina y la cantidad es variable (Sharma, B., Naresh, N., Dhurdhoya, S., 2006).
- Vegetales: las zanahorias, guisantes y espárragos también contienen un contenido bajo de pectina (Sharma, B., Naresh, N., Dhurdhoya, S., 2006).

La cantidad de pectina va a variar dependiendo de la madurez de la fruta, generalmente, en el ámbito industrial de la producción de mermeladas, se realizan extracciones comerciales de cítricos y manzanas (Sharma, B., Naresh, N., Dhurdhoya, S., 2006).

F. PRODUCTOS E INDUSTRIAS QUE UTILIZAN PECTINA

La pectina se utiliza mayormente en la industria de alimentos en producción de mermeladas, dulces, productos horneados y lácteos. Asimismo, tiene aplicaciones en cosméticos y productos médicos.

1. Alimentos

- Mermeladas y frutas para untar: se utiliza pectina como agente gelificante, para proporcionar consistencia gelatinosa.
- Productos de panadería: la pectina se utiliza para rellenos de frutas, preparaciones de frutas estables para hornear o glaseado con el fin de brindar un producto estable y lograr una consistencia suave, bombeable y pastosa. La pectina de manzana garantiza que no se produzcan cambios no deseados en la estructura del gel cuando esta se somete a tensiones mecánicas.
- Confitería: se utiliza en gomas de confitería y jaleas para confitería. La pectina garantiza una textura elástica y realza el sabor de la fruta.
- Productos lácteos: la pectina se utiliza en el yogur y postres lácteos, ya que mejora su textura. Asimismo, al agregar frutas a los lácteos, la pectina también ayuda a que la fruta se distribuya uniformemente.
- Alternativas lácteas de origen vegetal: se utiliza la pectina para producir productos vegetales contemporáneos que den una sensación equilibrada, estabiliza proteína en bebidas acidificadas y da un aspecto atractivo con brillo superficial.
- Preparaciones de frutas: la pectina es un ingrediente vegetal para texturizar y estabilizar cualquier tipo de aplicación de la fruta, con ella se consigue la textura deseada.
- Bebidas: se utiliza la pectina para estabilizar y obtener una sensación deseada en bebidas sin alcohol porque pueden estabilizar la turbidez y aumentan la viscosidad de la bebida.
- Salsas, aderezos: la pectina optimiza las características de flujo de las salsas.
(Herbstreith & Fox, 2023)

2. Otros productos

- Productos dietéticos y farmacéuticos: la pectina también posee propiedades beneficiosas para la salud. En el caso de la industria farmacéutica, se utiliza en la formulación de tabletas para mejorar la cohesión de los ingredientes, suspensiones orales para que mejore la viscosidad y estabilidad de la suspensión y recubrimiento de cápsulas blandas.
- Cosméticos: la pectina ayuda a mejorar la textura y consistencia de productos como cremas, lociones y geles, también estabiliza emulsiones para mantener los ingredientes mezclados

uniformemente, ayuda a retener humedad y proporcionar sensación suave en la piel y controla la liberación de ingredientes activos.

- Complementos alimenticios: la pectina de la manzana también tiene la capacidad de frenar el aumento de niveles de azúcar en la sangre y estabilizar niveles de colesterol y puede regular la digestión.

(Herbstreith & Fox, 2023)

3. Hojas de especificación de pectina

a. Alimentos

Ilustración 6. Hoja de especificación de pectina para aplicación en alimentos.

pectinal
el sabor de verdad

**PECTINAL SPR DE RL.
P350
PECTINA GELADO MEDIO**

DESCRIPCION.
P-350 es una pectina de gelado medio de alto metoxilo, extraída de cascara de cítricos estandarizada con dextrosa.

PAIS DE ORIGEN: MEXICO

ESPECIFICACIONES.

GRADO SAG	150 +/- 5
% DE	67 - 71
PH	3.0 - 4.0
TIEMPO DE GELADO	160 - 180 SEGS.
HUMEDAD	MAX 12

APLICACIONES.
Mermeladas y jaleas.
Rango PH 2.5 - 3.5
Solidos solubles < 60%

PORCENTAJE DE APLICACIÓN
Mermeladas y jaleas. 0.4 - 1.0 %
Se recomienda disolver la pectina en agua y después aplicarla al sistema final.

Insurgentes 915-4 CP. 28110, Plaza Caxitlán, Tepeyac · Tecomán, Colima, Mexico
Tel. +52 (313) 336.62.33

(Pectinal, 2023)

Ilustración 7. Hoja de especificación de pectina para aplicación en alimentos.



INFORMACION NUTRICIONAL DEPENDE DE LA ESTANDARIZACION.

Cantidad por porción	100 gr
Contenido Energético	550-650 kcal
Proteína	<0.5%
Carbohidratos	15 - 25 %
Grasa	< 0.5 %
Fibra	75 - 85 %

EMPAQUE Y ALMACENAMIENTO.

Caja de Cartón con bolsa interior de 25 kgs.
 Almacenar bajo condiciones frescas y secas.
 Vida útil después de fecha de empaqueo: 24 meses

Insurgentes 915-4 CP. 28110, Plaza Caxitlán, Tepeyac - Tecomán, Colima, Mexico
Tel. +52 (313) 336.62.33

(Pectinal, 2023)

b. Farmacéutica

Ilustración 8. Hoja de especificación de pectina grado USP



Specification for Pectin, Citrus, USP (PE100)

Item Number	PE100
Item	Pectin, Citrus, USP
CAS Number	9000-69-5
Molecular Formula	
Molecular Weight	
MDL Number	
Synonyms	Colyer Pectin ; Citrus

Test	Specification	
	Min	Max
APPEARANCE		
IDENTIFICATION	NLT 0.5 x 10 ⁷ 5 M	
DEGREE OF ESTERIFICATION	55.0	65.0%
GALACTURONIC ACID (C ₆ H ₁₀ O ₇)	74.0 %	
METHOXY GROUPS	6.7 %	
ARSENIC		3 ppm
LEAD		5 ppm
LOSS ON DRYING		10.0 %
METHANOL, ETHANOL, AND ISOPROPANOL		1 %
SUGARS AND ORGANIC ACIDS		16 %
SULFUR DIOXIDE		10 ppm
MICROBIAL LIMITS:		
TOTAL AEROBIC MICROBIAL COUNT (TAMC)		10 ³ cfu/g
TOTAL COMBINED YEASTS / MOLDS COUNT (TYMC)		10 ² cfu/g
ELEMENTAL IMPURITIES	AS REPORTED	
CERTIFIED HALAL		
EXPIRATION DATE		
DATE OF MANUFACTURE		
MONOGRAPH EDITION		
RESIDUAL SOLVENTS:	AS REPORTED	

Spectrum Chemical Mfg Corp
 Corporate Headquarters: 769 Jersey Ave., New Brunswick, NJ 08901
 West Coast Facility: 14422 S. San Pedro St., Gardena, CA 90248

(Spectrum, 2023)

G. PECTINA EN LA CÁSCARA DE MANZANA

La disponibilidad de la manzana es una de las razones por las que se prefiere realizar la extracción a partir de su cáscara. Debido a que generalmente la cáscara se desecha en diferentes procesos, es una buena fuente de aprovechamiento residual, de esta manera se aprovechan recursos y se reduce el desperdicio. Asimismo, extraer pectina de esta fuente, es sostenible, ya que es un producto natural, no contiene aditivos artificiales y esto puede tener un gran beneficio para personas que desean opciones de alimentos naturales (Canteri-Schemin, M., Ramos, H., Waszcynskyj, N., Wosiacki, G., 2005).

La cáscara de manzana contiene quercetina y pectina. La quercetina es un flavonoide, este compuesto es una sustancia química vegetal y natural que tiene propiedades antioxidantes y antiinflamatorios. Por otro lado, está la pectina que es una fibra soluble que previene el estreñimiento y reduce el colesterol (Harvard T.H. Chan School of Public Health, 2023).

Por otro lado, la pectina se encuentra dentro de la pared celular. La composición de polímeros en la pared celular primaria consta en su mayor parte de pectina, seguido de celulosa, hemicelulosa y por último proteínas. La pectina contenida en las paredes celulares se degrada en oligosacáridos más pequeños, esto lo hace de forma muy selectiva mediante hidrólisis (Voragen, A.G.J., Coenen, GJ., Verhoef, R.P. et al., 2009).

H. EXTRACCIÓN DE LA PECTINA DE LA CÁSCARA DE MANZANA

Debido a que la pectina se encuentra en la pared celular de las plantas, frutas y hortalizas, es necesario, es necesario realizar una extracción para obtenerla. Para llevar a cabo la extracción por distintos métodos, es necesario un pretratamiento de la materia prima, extracción y etapa luego de la extracción (Robledo, V. & Castro, L., 2019).

En el pretratamiento de la materia prima, es importante lavarla para eliminar suciedad de la cáscara. Este paso es importante para que el proceso sea más eficiente, para ello se debe llevar hasta ebullición el agua en contacto con la materia prima, en esta parte también se eliminan el resto de las suciedades o microorganismos (Devia, 2002).

Al realizar una extracción, es esencial que se seque la materia prima, ya que, si no esto no se realiza, se pueden producir bacterias y mohos que llevan a la producción de las enzimas metilesterasa y poligalacturonasa. Esta última, degrada la calidad de la pectina y puede tener un efecto adverso sobre la capacidad gelificante de la pectina (Narasimman, P. & Sethuraman, P., 1855-1860).

Para el tratamiento posterior a la extracción, pueden realizarse dos procedimientos distintos, los cuales son: separación de pectinas del resto de materiales al precipitar con etanol puro, etanol comercial,

metanol o isopropanol a bajas temperaturas y utilizando el doble del volumen obtenido y el otro método se trata de utilizar otra sustancia que precipite las pectinas como sales insolubles (Al^{3+} o Cu^{2+}) con iones metálicos multivalentes que sean adecuados. De ambas formas, se obtienen pectinas con alto contenido de metoxilo y bajo contenido de metoxilo (Ruano, P., Lazo Delgado, L., Picco, S., Villegas, L., Tonelli, F., Merlo, M., Rigau, J., Diaz, D., Masuelli, M., 2020). Es preferible utilizar alcohol, ya que este no deja residuos, mientras que, con las sales, es necesario realizar un lavado más meticuloso. Asimismo, no se han observado diferencias significativas con los alcoholes que se utilizan para precipitar, por lo que se ha optado por utilizar alcohol comercial ya que este es de menor costo y se tiene más facilidad para conseguir en el mercado (Devia, 2002).

1. Métodos químicos

Uno de los métodos más utilizados, es en el que se utilizan ácidos, debido que tienen un impacto en el contenido y composición de la pectina monomérica y en las propiedades fisicoquímicas, como la actividad emulsionante, viscosidad y entre otras. Los ácidos que más se utilizan, son el ácido sulfúrico, clorhídrico, fosfórico o cítrico (Robledo, V. & Castro, L., 2019). Se suelen utilizar estos ácidos debido que tienen ventajas al proporcionar un rendimiento alto y reducen el tiempo de extracción. En cuanto a las concentraciones, aunque los dos ácidos son fuertes, se utiliza el ácido clorhídrico a mayor concentración ya que es monoprótico, quiere decir que solo dona un protón de H^+ por molécula, lo que lo hace un poco más débil en términos de acidez en comparación al ácido sulfúrico que es diprótico y puede donar dos protones por molécula. Por otro lado, el ácido fosfórico se considera como un ácido débil ya que no logra ionizar completamente, por lo que este se utiliza a mayor concentración durante la extracción. Asimismo, en algunos casos, se opta por utilizar ácidos fuertes ya que estos tienen mayor afinidad por iones de calcio presentes en la pectina (Jong, S., Abdullah, N., Muhammad, N., 2023).

En el caso de la hidrólisis ácida, en donde se lleva a cabo la ruptura del enlace entre el carboxilo y metilo, al disminuir el pH durante la extracción, se tiene un aumento en el rendimiento, por ello se debe mantener un pH entre 1 y 3, esto debido a que, a pH más altos, solamente se logra hidrolizar un porcentaje muy bajo. Al realizar extracciones sin la adición de sales polivalentes y manteniendo un pH entre 3 y 3.3, es posible la extracción de la pectina no sensible al calcio y con pH cercano a 2, también es posible realizar la extracción del resto de la pectina. Asimismo, al utilizar valores de pH entre 1 y 3, se confirma un mayor rendimiento porque aumenta la masa molar y viscosidad de la pectina (Zegada, 2015).

Por otro lado, la pectina es muy sensible al calor, debido a esto es importante que se controle la temperatura durante la extracción, de esta forma se puede obtener un producto de alta calidad. Las temperaturas mayores a los $98\text{ }^{\circ}C$ y tiempos de hidrólisis mayores a los 90 minutos tienen un efecto negativo, ya que pueden causar la desnaturalización y disminuyen el grado de esterificación de la pectina (Lliuyacc, 2018).

Las hidrólisis pueden llevarse a cabo en un sistema abierto en donde el recipiente está abierto a la atmósfera y en sistema cerrado, en donde se utiliza un condensador para tener un reflujo del ácido (Devia, 2002).

2. Técnicas novedosas

Actualmente, se han desarrollado técnicas más novedosas que se inclinan hacia un proceso de extracción más limpio. Estas técnicas también se conocen como no convencionales, entre ellas se encuentra el aislamiento asistido por ultrasonido (UAE), extracción con agua subcrítica (SWE) y extracción asistida por microondas (MAE) (Robledo, V. & Castro, L., 2019).

Otra técnica que se ha desarrollado es la extracción asistida por enzimas (EAE), uno de sus beneficios es evitar la presencia de trazas de solventes químicos en productos provenientes de procesos de extracción que se basan en solventes. Asimismo, las enzimas utilizadas, tienen un nivel alto de selectividad, lo cual tiene como efecto reducir la cantidad de químico (solvente) a utilizar. Se pueden utilizar de dos formas las enzimas; que degraden la pectina y ayudan a aislar fragmentos de esta o que ayuden a deconstruir la pared celular vegetal y aislar pectina (Robledo, V. & Castro, L., 2019).

I. CARACTERIZACIÓN DE LA PECTINA

La caracterización de la pectina es un proceso esencial para conocer su calidad, ya que esto es importante para asegurarse que la pectina cumpla con ciertos estándares y requisitos en cuanto a propiedades gelificantes, grado de metoxilación y esterificación, capacidad para retener agua y entre otras características. Con estos parámetros se puede garantizar si la pectina extraída cumple con ciertas especificaciones para poder ser utilizada en la industria (Robledo, V. & Castro, L., 2019).

Por otro lado, la caracterización va a depender de la aplicación que se le vaya a dar a la pectina. Con la caracterización se va a conocer la capacidad que tiene para formar geles, la resistencia que tiene a la temperatura y pH, capacidad de estabilizar emulsiones, etc. En base a los resultados que se obtengan de las características de la pectina, se puede seleccionar cual es la adecuada para la aplicación específica que se quiere y así se puede garantizar el rendimiento que se desea en el producto a elaborar (Robledo, V. & Castro, L., 2019).

Con la información de caracterización, se puede optimizar procesos en la producción, ya que al conocer los anteriormente mencionados, permite que se ajusten parámetros en el procesamiento, tales como; el tiempo de cocción, temperatura, concentración, etc. Al llevar a cabo una optimización, la eficiencia aumenta en la producción y a su vez lo hace la calidad en el producto final (Robledo, V. & Castro, L., 2019).

Asimismo, la caracterización también es importante para el etiquetado del producto y cumplimiento de normas y regulaciones. Con ello, puede asegurarse que el producto cumple con estándares que están establecidos y puede colocarse esta información en la etiqueta (Robledo, V. & Castro, L., 2019).

1. Parámetros de caracterización

a. Contenido de metoxilo:

Este es importante porque determina el grado de metilación, el cual se refiere a la cantidad de grupos metilo que se encuentran unidos a unidades de ácido galacturónico en una cadena de pectina. El contenido de metoxilo afecta directamente propiedades que son funcionales de la pectina (Robledo, V. & Castro, L., 2019).

Este influye en la capacidad de gelificación y formación de geles y a medida que el grado de metilación aumenta, la capacidad de formar geles más firmes va a disminuir. Este también afecta en la solubilidad, al disminuir su grado de metilación, la pectina va a ser menos soluble en agua (Robledo, V. & Castro, L., 2019).

Entonces, este parámetro va a ser de gran utilidad para la determinación del comportamiento de la pectina en aplicaciones como la producción de mermeladas, jaleas, lácteos o alimentos que requieren textura gelatinosa (Robledo, V. & Castro, L., 2019).

b. Alcalinidad de la ceniza:

Es utilizada para poder determinar el contenido de sales minerales presentes en la muestra de pectina. Sirve como una medida indirecta de cantidad de sales alcalinas, en especial los carbonatos y bicarbonatos. Esto es importante porque la presencia de las sales puede afectar propiedades funcionales, como la viscosidad y gelificación, en otras palabras, su calidad (Robledo, V. & Castro, L., 2019).

El contenido de alcalinidad de la ceniza se expresa en términos de carbonato de sodio equivalente, lo que significa que se informa la cantidad de carbonato de sodio que tendría la misma capacidad neutralizante que las sales presentes en la muestra (Robledo, V. & Castro, L., 2019).

c. Ácido anhidrouónico:

Se refiere a la cantidad de unidades de ácido galacturónico que perdieron grupos metilo, por lo que también perdieron su estructura original de ácido galacturónico metilado. La presencia de este ácido afecta las propiedades para formar geles y capacidad de retener agua, por lo que cuando aumenta la cantidad del ácido, la pectina tiene menor capacidad de gelificación (Robledo, V. & Castro, L., 2019).

Por otro lado, también puede afectar la capacidad de interacción de la pectina con otros ingredientes que se vayan a mezclar (azúcar, proteína, etc.), lo cual influye en la estabilidad y textura de los productos en los cuales se utiliza pectina. Este puede determinarse mediante técnicas analíticas como HPLC o NIR (Robledo, V. & Castro, L., 2019).

d. Grado de esterificación:

Este parámetro se refiere a la proporción de grupos metilo unidos a unidades de ácido galacturónico en la cadena de pectina. Tiene un impacto en la capacidad de gelificación y comportamiento en sistemas acuosos (Robledo, V. & Castro, L., 2019). Si el grado de esterificación es

mayor a 50%, se clasifica la pectina como alta en grado de esterificación y si es menor al 50%, se clasifica como pectina baja en grado de esterificación (Nadar, C., Arora, A., Shastri, Y., 2022).

Al aumentar el grado de esterificación (menos grupos metilo disponibles), la pectina tiende a perder capacidad de formación de geles sólidos y va a tener mayor capacidad de formación de soluciones viscosas. Cuando este parámetro se controla, puede modularse y ajustarse las propiedades de la pectina y así poder utilizarse en diversas aplicaciones. En el caso de las pectinas con un alto grado de esterificación, son útiles para la estabilización de emulsiones, espesar productos y mejorar textura de mermeladas o jaleas. Para pectinas con un bajo grado de esterificación, se utilizan en producción de gelatinas o recubrimientos de frutas (Robledo, V. & Castro, L., 2019).

J. ESTANDARIZACIÓN DE PECTINA EN LA INDUSTRIA

En la industria, la pectina es estandarizada con dextrosa y/o sales inorgánicas específicas para poder ofrecer al cliente un producto con un grado de gelificación constante para su aplicación final (Smith, 2003).

La estandarización con dextrosa facilita la dispersión en solución de la pectina, también mejora sus propiedades de gelificación y ajustar el rendimiento de esta en distintas aplicaciones. La estandarización tiene distintos objetivos, como lograr una gelificación más consistente, mejorar la estabilidad y que se reduzcan factores de los que pueden depender estas propiedades, como el pH o concentración de azúcares (Smith, 2003).

Este proceso va a variar dependiendo de la aplicación que se le dé a la pectina, generalmente lo que se realiza es una mezcla de dextrosa con la pectina en ciertas proporciones y se hacen pruebas y ajustes para determinar que cumpla el objetivo deseado (Smith, 2003).

K. REACCIONES INVOLUCRADAS EN LA EXTRACCIÓN Y CARACTERIZACIÓN DE LA PECTINA

1. Reacción de hidrólisis con ácido clorhídrico



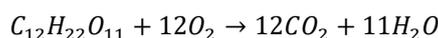
2. Reacción de hidrólisis con ácido sulfúrico



3. Reacción de hidrólisis con ácido orto – fosfórico



4. Reacción de combustión de pectina



L. TIPOS DE HIDRÓLISIS

La hidrólisis es una reacción en donde una molécula se descompone a componentes más simples cuando se añade agua (Flores, J., Caballero, C., Moreira, M., 2008). Hay una variedad de hidrólisis que van a depender de los compuestos involucrados o condiciones, las dos principales son:

1. Hidrólisis ácida

Esta ocurre cuando hay una presencia de ácido, el cual actúa como un catalizador durante la reacción. En este proceso, el ácido dona iones de hidrógeno al agua, aumentando su concentración de hidronio y así hace que la ruptura de los enlaces de la molécula de interés sea más rápida (Flores, J., Caballero, C., Moreira, M., 2008).

2. Hidrólisis básica

Esta ocurre cuando hay una presencia de una base fuerte, estas liberan iones hidroxilo aumentando la concentración y esto tiene como efecto que la molécula se descomponga con mayor velocidad (Flores, J., Caballero, C., Moreira, M., 2008).

M. ANÁLISIS COSTO BENEFICIO

Es una técnica utilizada para evaluar proyectos y determinar si este es viable o no. Tiene como objetivo principal evaluar y comparar los costos y beneficios asociados con el proyecto. En un análisis de este tipo, se deben incluir los costos directos e indirectos que están asociados al proyecto, entre estos se encuentran los costos operativos, costos iniciales, costos de mantenimiento y entre otros. Por otro lado, los beneficios son las ganancias o ventajas del proyecto, los cuales pueden ser económicos, sociales o ambientales, entre estos beneficios se encuentran los ahorros de costos, ingresos adicionales, mejoras de la calidad, etc (Canso, 2023).

Para poder concluir sobre el análisis, es necesario encontrar la razón B/C, en donde se toman en cuenta todos los costos y los beneficios del proyecto. Si la razón B/C es mayor a 1, entonces el proyecto es económicamente aceptable. De lo contrario, si la razón B/C es menor a 1, no es económicamente viable (Blank, L., Tarquin, A., 2006).

N. ESTADÍSTICA DESCRIPTIVA

Las medidas estadísticas como la media, desviación estándar y entre otras, son medidas numéricas que ayuda a comprender e interpretar mejor los datos. Existen dos formas de analizar estas medidas, como cuando se trabaja con una sola variable, por el contrario, cuando se consta de más variables, las mismas medidas pueden calcularse, pero por separado (Anderson, David R.; Sweeney, Dennis J.; Williams, Thomas A., 2015).

1. Media

Es la medida más importante para una variable, ya que proporciona la medida de la ubicación central de los datos (Anderson, David R.; Sweeney, Dennis J.; Williams, Thomas A., 2015).

2. Desviación estándar

Esta se define como la raíz cuadrada positiva de la varianza. Se utiliza para determinar qué tan dispersos están los valores de un conjunto de datos con respecto a la media. Esto quiere decir que indica cuánto se alejan en promedio las muestras del conjunto de datos (Anderson, David R.; Sweeney, Dennis J.; Williams, Thomas A., 2015).

3. Coeficiente de variación

Indica qué tan grande es la desviación estándar con respecto a la media. Esta se expresa como un porcentaje para para que la comparación pueda ser más sencilla entre conjuntos de datos. Entre mayor es el CV, mayor es la variabilidad y sugiere que los datos están más dispersos alrededor de la media. Al contrario, entre menor es este valor, indica que los datos se encuentran más concentrados alrededor de la media (Anderson, David R.; Sweeney, Dennis J.; Williams, Thomas A., 2015).

4. Intervalo de confianza

Este se utiliza para estimar rangos posibles para un parámetro que se basa en una muestra de datos y nivel de confianza. En el rango obtenido se espera que se encuentre el valor de la muestra, esto en base a cierto nivel de confianza. En otras palabras, es una medida de incertidumbre que se asocia a estimaciones de parámetros (Anderson, David R.; Sweeney, Dennis J.; Williams, Thomas A., 2015).

V. ANTECEDENTES

En el estudio llevado a cabo por Kumar, Ozukum y Girish, se extrajo pectina de cáscara de manzana para la producción de mermelada. En este trabajo, utilizaron ácido clorhídrico, nítrico, cítrico y sulfúrico, todos a una concentración de 0.05 M. Concluyeron que el mejor ácido a utilizar para obtener las propiedades adecuadas de pectina en la elaboración de mermelada era el ácido clorhídrico. Asimismo, realizaron el procedimiento para cáscara lavada y sin lavar, en donde determinaron que se obtuvo mejor rendimiento al tratar la cáscara antes de realizar la extracción (Kumar, S., Ozukum, R., Mathad, G., 2020).

En otro estudio, realizado por Virk y Sogi, llevaron a cabo extracción de pectina de cáscara de manzana utilizando ácido clorhídrico 0.02 M y 0.05 M y ácido cítrico al 1%. En este trabajo se determinó que el ácido cítrico fue más efectivo, en donde se obtuvo un promedio de 0.4688 g. Por otro lado, realizaron la caracterización de la pectina, en donde obtuvieron un contenido de cenizas del 1.4%, peso equivalente de 652.48, contenido de metoxilo de 3.7%, ácido anhidrouónico de 62.82%, grado de esterificación de 33.44% y valor de acetilo de 0.68 (Virk and Sogi, 2004).

VI. METODOLOGÍA

a) Adecuación y tratamiento cáscara de manzana

Tabla 1. Equipo y cristalería para adecuación de cáscara de manzana.

Equipo y cristalería	Capacidad	Marca	Modelo
Olla	N/A	N/A	N/A
Estufa	2000 W	Indurama	OVIEDO
Balanza	6.000 kg \pm 0.1000 g	OHAUS	Valor 3000 Xtreme
Bandeja para hornear	N/A	N/A	N/A
Licuadaora	1.5 L	Rosthal	PN - 919

- a. Lavar cáscara con agua destilada.
 - b. Eliminación de suciedad y microorganismos.
 - 1) En una olla, colocar la cáscara de manzana y añadir agua, asegurándose que toda que completamente cubierta para un correcto tratamiento, alrededor de 2 veces más de cáscara pesada.
 - 2) Hervir la cáscara de 6 - 10 minutos.
 - 3) Retirar la cáscara y colocar en un recipiente de plástico.
 - c. Secado
 - 1) Tomar una muestra de cáscara y pesar en una balanza para anotar su peso inicial.
 - 2) En una bandeja colocar muestras de cáscara y colocar en un horno a una temperatura de 105 °C por 4 horas.
 - 3) Tomar una muestra y pesar nuevamente en balanza, realizar esto hasta que el peso se vuelva constante.
 - d. Utilizando una licuadora, pulverizar la cáscara seca.
 - e. Almacenar en una bolsa ziploc y envuelta en aluminio o en un recipiente hermético y en un lugar fresco y seco. Si debe almacenarse por un período muy largo, hacerlo en un congelador.
- b) Hidrólisis ácida

Tabla 2. Equipo y cristalería para las hidrólisis ácidas.

Equipo y cristalería	Capacidad	Marca	Modelo
Beaker (3)	250 \pm 5 ml	KIMAX	N/A
Beaker (1)	1000 ml \pm 5 ml	PYREX	N/A
Balón aforado (2)	250 ml \pm 0.15 ml	MARIENFELD	N/A
Pipeta graduada (1)	10 ml \pm 0.1 ml	SILBERBRAND	N/A
Balanza	6.000 kg \pm 1.000 g	OHAUS	Valor 3000 Xtreme
Estufa	0 - 350 °C	VEVOR	SH - 3ABE
Termómetro de alcohol (1)	-10 a 110 °C	EISCO	N/A
Tiras para medición de pH	N/A	N/A	N/A

Tabla 3. Reactivos para hidrólisis ácida.

Reactivo	Pureza	Marca
Ácido clorhídrico	37%	Merck
Ácido Sulfúrico	95% – 97%	Merck
Ácido Orto fosfórico		Merck
Hidróxido de sodio	N/A	Merck

*El hidróxido de sodio se utiliza en las hidrólisis de los tres ácidos.

- a. Solución de ácido clorhídrico 0.5 M.
 - 1) Tomar 10 g de muestra de cáscara de manzana pulverizada y mezclar con agua destilada en un beaker de 250 ml, colocar en un baño María utilizando un beaker de 1 L hasta llevar a una temperatura de 70 -75 °C. Agregar unas gotas de la solución de ácido para mantener un pH entre 2.5 y 3 y dejar que se lleve a cabo la extracción por 1 hora 15 minutos. Este procedimiento debe mantenerse agitado. Llevar a cabo un triplicado.
 - 2) Realizar una solución de NaOH 0.5 M en caso de que se requiera neutralizar la solución para obtener el pH deseado.
 - 3) Dejar enfriar la solución.
 - 4) Realizar una filtración al vacío utilizando un Kitasato, embudo y papel filtro. Filtrar la solución poco a poco.

- b. Ácido sulfúrico 0.05 M
 - 1) Tomar 10 g de muestra de cáscara de manzana pulverizada y mezclar con agua destilada en un Erlenmeyer de 250 ml hasta llevar a una temperatura de 75 °C. Agregar unas gotas de la solución de ácido para mantener un pH entre 2.5 y 3 y dejar que se lleve a cabo la extracción por 1 hora y 15 minutos. Este procedimiento debe mantenerse agitado. Llevar a cabo un triplicado.
 - 2) Realizar una solución de NaOH 0.1 M en caso de que se requiera neutralizar la solución para obtener el pH deseado.
 - 3) Dejar enfriar la solución.
 - 4) Realizar una filtración al vacío utilizando un Kitasato, embudo y papel filtro. Filtrar la solución poco a poco.

- c. Ácido fosfórico 1.0 M
 - 1) Tomar 10 g de muestra de cáscara de manzana pulverizada y mezclar con agua destilada en un Erlenmeyer de 250 ml hasta llevar a una temperatura de 70 - 75 °C. Agregar unas gotas de la solución de ácido para mantener un pH entre 2.5 y 3 y dejar que se lleve a cabo la extracción por 1 hora y 15 minutos. Este procedimiento debe mantenerse agitado. Llevar a cabo un triplicado.
 - 2) Realizar una solución de NaOH 0.05 M en caso de que se requiera neutralizar la solución para obtener el pH deseado.
 - 3) Dejar enfriar la solución.
 - 4) Realizar una filtración al vacío utilizando un Kitasato, embudo y papel filtro.

c) Purificación

Tabla 4. Cristalería y reactivo para purificación.

Equipo y cristalería	Capacidad	Marca	Modelo
Beaker (3)	600 ± 5 ml	PYREX	N/A
Beaker (1)	250 ± 5 ml	KIMAX	N/A
Secador	0 – 200 °C	Symphony	VWR
Etanol	N/A	N/A	N/A

- Coagular cada extracto de pectina con etanol usando un volumen de 2:1.
- Dejar reposar la mezcla homogénea por 12 horas en refrigeradora.
- Decantar la solución y almacenar la pectina a baja temperatura.
- Secar la pectina en horno a temperatura entre 50 – 60 °C por 48 horas.

d) Rendimiento

- Pesar la cantidad de pectina obtenida en balanza OHAUS modelo VALOR 3000 Xtreme con rango de 6.000 kg ± 1.000 g.
- Con la siguiente ecuación, determinar el rendimiento:

Ecuación 1. Rendimiento de pectina.

$$\text{Rendimiento de pectina (\%)} = \frac{\text{Peso de pectina obtenida}}{\text{Peso de materia prima utilizada}} * 100$$

e) Caracterización

Tabla 5. Cristalería y equipo para caracterización de pectina.

Equipo y cristalería	Capacidad	Marca	Modelo
Erlenmeyer (6)	250 ± 5 ml	PYREX	N/A
Balón aforado (3)	250 ml ± 0.15 ml	MARIENFELD	N/A
Pipeta graduada (1)	10 ml ± 0.1 ml	SILBERBRAND	N/A
Bureta para titular (1)	50 ml ± 0.1 ml	MARIENFELD	N/A
Balanza	6.000 kg ± 0.1000 g	OHAUS	Valor 3000 Xtreme
Estufa	0 – 350 °C	VEVOR	SH – 3ABE
SopORTE de metal y pinzas	N/A	N/A	N/A
Mufla	0 a 1000 °C	Thermo Fisher	F6010
3 crisoles	N/A	N/A	N/A

Tabla 6. Reactivos para caracterización de pectina.

Reactivo	Pureza	Marca
Ácido clorhídrico	37%	Merck
Hidróxido de sodio	N/A	Merck
Etanol	N/A	N/A
Cloruro de sodio	N/A	Merck

- Tomar una muestra de 0.4 g y colocar en un Erlenmeyer de 250 ml y agregar 5 ml de etanol, 1 g de cloruro de sodio y 100 ml de agua destilada. Como indicador, añadir 6 gotas de fenolftaleína. Titular con NaOH 0.1 M hasta que se torne color rosa pálido por al menos 40 segundos. Esta solución se debe almacenar a temperatura ambiente.

- b. Calcular el peso equivalente utilizando la siguiente ecuación:

Ecuación 2. Peso equivalente.

$$\text{Peso equivalente} = \frac{\text{peso muestra (g)} * 100}{V \text{ de álcali (ml)} * \text{Normalidad de álcali}}$$

- c. Con la solución neutra titulada, añadir 25 ml de NaOH 0.25 N, agitar y mantener en reposo a temperatura ambiente por media hora. Añadir 25 ml de HCl 0.25 M y titular con NaOH 0.1 M hasta el mismo punto que el anterior.
- d. Calcular el contenido de metoxilo utilizando la siguiente ecuación:

Ecuación 3. % de metoxilo.

$$\% \text{ de metoxilo} = \frac{V \text{ de álcali} * \text{normalidad de álcali} * 3.1}{\text{peso de la muestra (g)}}$$

- e. Calcinar una muestra de pectina en una mufla por 4 horas a 550 °C y añadir 25 ml de HCl 0.1 M. Calentar mezcla hasta ebullición, enfriar y titular con NaOH 0.1 M usando como indicador fenolftaleína. Titular en blanco con HCl 0.1 M.
- f. Calcular la alcalinidad con la siguiente ecuación:

Ecuación 4. Alcalinidad.

$$\text{Alcalinidad (\%)} = \frac{(\text{Blanco} - \text{Titulado}) * \text{Normalidad de álcali} * 60 * 100}{\text{peso de la ceniza (g)} * 1000}$$

- g. Los miliequivalentes de álcali del peso equivalente, contenido de metoxilo y alcalinidad de las cenizas, se utilizan para calcular el contenido de ácido anhidrouónico (AUA) con la siguiente ecuación:

Ecuación 5. % AUA.

$$\text{AUA (\%)} = \frac{176 * (0.1z) * 100}{\text{peso muestra (g)} * 1000} + \frac{176 * (0.1y) * 100}{\text{peso muestra (g)} * 1000}$$

Donde:

z = volumen de NaOH utilizado en peso equivalente.

y = volumen de NaOH utilizado en contenido de metoxilo.

- h. Para el grado de esterificación utilizar el contenido de metoxilo y AUA para llevar a cabo la siguiente ecuación:

Ecuación 6. Grado de esterificación.

$$\text{Grado de esterificación} = \frac{176 * \text{contenido de metoxilo (\%)} * 100}{31 * \text{AUA(\%)}}$$

VII. RESULTADOS

Tabla 7. Rendimiento de extracción de pectina.

Solución Ácida	Rendimiento (%)
HCl (0.5 M)	8.667 ± 1.739
H ₂ SO ₄ (0.05M)	9.666 ± 1.740
H ₃ PO ₄ (1.00 M)	8.333 ± 1.738

*El promedio de los datos del rendimiento fueron calculados a partir de las Tablas 28, 29 y 30 en la sección de Anexos.

Tabla 8. Caracterización de pectina.

Solución ácida	Peso equivalente (mg/meq)	% de metoxilo	Alcalinidad (%)	% AUA	Grado de esterificación (%)
HCl (0.5 M)	1222.0 ± 533.6	8.0858 ± 3.501	6.504 ± 4.699	47.37 ± 20.55	96.90 ± 24.30
H ₂ SO ₄ (0.05M)	634.9 ± 275.6	7.156 ± 3.150	4.349 ± 2.659	43.41 ± 19.093	93.30 ± 23.39
H ₃ PO ₄ (1.00 M)	429.6 ± 186.26	7.750 ± 3.357	4.999 ± 3.713	48.11 ± 20.87	91.46 ± 22.94

*El promedio de los datos del peso equivalente, % de metoxilo, alcalinidad, % de AUA y grado de esterificación fueron calculados a partir de las Tablas 28, 29 y 30 en la sección de Anexos.

Tabla 9. Análisis costo – beneficio para cada ácido.

Factor analizado	Solución HCl (0.5 M)	Solución H ₂ SO ₄ (0.05 M)	Solución H ₃ PO ₄ (1.00 M)
Costos operativos	Q 183.64	Q 185.44	Q 182.19
Ingresos por corrida (oz)	Q 0.9035	Q 1.0385	Q 0.8308
Razón B/C	0.004920	0.005600	0.004560

*En este cuadro se muestran los costos a partir de las Tablas 24 y 26 y el cálculo de los ingresos y la razón B/C a partir de la Tabla 33.

VIII. ANÁLISIS DE RESULTADOS

Teniendo como objetivo la extracción de pectina a partir de residuos de cáscara de manzana haciendo uso de soluciones ácidas, se llevó a cabo el acondicionamiento de la materia prima, extracción mediante hidrólisis con soluciones de ácido clorhídrico, sulfúrico y fosfórico, la precipitación y separación de la pectina y posteriormente su caracterización.

Para propósitos de este trabajo, los residuos de manzana se definen solamente como la cáscara. Este residuo proviene de panaderías, por lo que, en el inicio, se tiene cáscara de manzana con fruto. Debido a esto, el primer paso fue acondicionar la materia prima. El acondicionamiento fue realizar una limpieza de la materia prima, lo cual consistió en la separación manual de la cáscara y cáscara que contiene aún fruto, la materia prima deseada es aquella que no contiene fruto.

Posteriormente, se deshidrató la cáscara, llevando su humedad de 52.63% hasta 0.1800% en un horno de estufa, esto debido a que la humedad presente en una muestra puede afectar el rendimiento de la extracción al producir bacterias o mohos que producen enzimas como la metilesterasa y poligalacturonasa, que pueden degradar la calidad de la pectina afectando su capacidad gelificante. Como se observa en la Tabla 24 y Figura 11, el tiempo de secado para la cáscara de manzana es de 100 min (1.7 horas), esto debido a que la cáscara es bastante delgada y esto tiene un efecto positivo en la transferencia de masa, puesto que, cuando se tiene un menor grosor el tiempo de secado va a ser mucho menor y el calor penetra y elimina la humedad con mayor rapidez, ya que la humedad recorre menor distancia desde el interior hasta la superficie. Al recorrer una menor distancia, se tiene una mayor uniformidad en el secado (Treybal, 1981). Asimismo, es importante conocer el tiempo de secado, ya que, si no se remueve completamente la humedad de la cáscara, puede verse afectado el rendimiento de la extracción. Por otro lado, conocer el tiempo óptimo de secado puede reducir costos en cuanto al consumo energético.

Para la extracción se utilizaron soluciones de ácido clorhídrico a 0.5 M, ácido sulfúrico a 0.05 M y fosfórico a 1.0 M, estos se escogieron debido a que se ha demostrado que proporcionan un alto rendimiento. Por otro lado, las concentraciones se variaron debido a la naturaleza química de cada ácido y su capacidad para ionizar en soluciones. En el caso del ácido clorhídrico y sulfúrico, ambos son fuertes y tienen la capacidad de ionizar por completo, sin embargo, el clorhídrico es monoprótico (dona solo un ion hidrógeno por molécula) y el sulfúrico es diprótico (dona dos iones hidrógeno por molécula), asimismo, el ácido clorhídrico utilizado para la extracción se encuentra más diluido en agua ya que tenía una pureza del 37%, mientras que el sulfúrico tenía una pureza del 95%, lo que lo hace más fuerte y por lo tanto, se debe usar a una concentración más baja. Por otro lado, el ácido fosfórico es un ácido débil y solamente se ioniza parcialmente, debido a esto, es que se utilizó a una concentración más alta que los otros dos.

Para la extracción, se estableció una temperatura de 75 °C, pH entre 2.5 y 3, un tiempo de 75 minutos y agitación. Estas condiciones se escogieron ya que, para un buen rendimiento el pH debe ser

entre 1 y 3, de esta manera se puede aumentar la masa molar y viscosidad de la pectina y para evitar efectos adversos como la desnaturalización, daños a la cadena o estructura del producto o disminución del grado de esterificación del producto, se mantuvo una temperatura baja y controlada y un tiempo no mayor a 90 minutos de reacción. Un estudio realizado por Zaid, R., Mishra, P., Tabassum, S. y Wahid, Z. (2019) demostró que, a temperaturas mayores de 80 °C y tiempos muy prolongados, provocan la degradación de la pectina al despolimerizar a monosacáridos y oligosacáridos. Luego de la extracción se realiza una filtración, para obtener un líquido como el que se observa en la Figura 13. La filtración es necesaria para que pueda facilitar la precipitación y se obtenga una mejor calidad del producto final. El líquido obtenido, es necesario precipitarlo ya que la pectina se encuentra en solución que puede poseer azúcares, proteínas o impurezas que no se desean. En este paso, se requería de un agente deshidratante debido a que las pectinas son muy sensibles a la deshidratación, para ello se escogió etanol al 96% porque la pectina va a ser menos soluble en etanol puro que en el agua y este reduce la capacidad del agua para retener a la pectina en la solución. Se busca que el etanol sea lo más puro posible ya que se asegura que no haya componentes no deseados durante la precipitación. La precipitación se realizó a una temperatura de 7 °C ya que la solubilidad de la pectina va a disminuir a medida que lo hace la temperatura. Una vez separada la pectina del resto de la solución se secó lo cual se realizó a una temperatura de 60 °C, la cual es baja, ya que como se mencionó anteriormente, la calidad de la pectina puede verse afectada si se utilizan temperaturas muy altas.

Para los rendimientos, como se observa en la Tabla 7, se obtuvo un valor de $8.667\% \pm 1.739\%$ para el ácido clorhídrico (0.5 M), un valor de $9.666\% \pm 1.740\%$ para el ácido sulfúrico (0.05 M) y un valor de $8.333\% \pm 1.738\%$ para el ácido fosfórico (1.0 M), estos valores son cercanos, sin embargo, el ácido sulfúrico presenta un rendimiento mayor, esto puede deberse a que, a pesar de que ambos son considerados ácidos fuertes, el sulfúrico posee mayor capacidad para donar protones. Esto tiene como efecto el aumento de acidez en la solución, mejorando la solubilidad de la pectina en el medio y facilitando aún más la descomposición y liberación de esta, provocando una mejor extracción.

Se llevó a cabo la caracterización de la pectina obtenida, porque es esencial para conocer la calidad y asegurarse que la pectina cumpla con ciertas características en cuanto a propiedades gelificantes, debido a que su uso principal es para brindar consistencia a los productos y de esta forma se pueda identificar cuál es la mejor aplicación para la misma. En cuanto a la caracterización, se observa en la Tabla 8 que para el ácido clorhídrico se obtuvo un peso equivalente de 1222.2 ± 533.6 mg/meq, para el sulfúrico un valor de 634.9 ± 275.6 mg/meq y para el fosfórico un valor de 429.6 ± 186.26 mg/meq. Siendo el valor más grande el obtenido con el ácido clorhídrico, indica que la pectina extraída, posee una mayor capacidad para formar un gel más fuerte y estable que la pectina extraída con el ácido sulfúrico y fosfórico. Esta diferencia podría deberse a que el ácido sulfúrico es más fuerte lo que puede afectar ciertos compuestos de la pectina. Para el porcentaje de metoxilo, el valor obtenido fue de $8.0858\% \pm 3.501\%$, para el ácido clorhídrico, de $7.156\% \pm 3.150\%$ para el ácido sulfúrico y de $7.750\% \pm 3.357\pm$, estos indican que la pectina extraída es de bajo metoxilo, por lo que puede formar geles con o sin azúcar, a diferencia de las pectinas de alto metoxilo que requieren de grandes cantidades, por lo tanto, la pectina extraída puede ser utilizada en productos bajos en azúcar. Para la alcalinidad de las cenizas se obtuvo un

valor de $6.504\% \pm 4.699\%$ para el ácido clorhídrico, un valor de $4.349\% \pm 2.659\%$ para el sulfúrico y uno de $4.999\% \pm 3.713\%$ para el fosfórico. Según un estudio realizado por Perez, Gomez y Vega (2021), la pectina estandarizada posee un valor de 2.34% de alcalinidad de cenizas. En otro estudio realizado por Ramadan y Elghali (2017), se determinó que la pectina contenía un 7.1% de alcalinidad. Tomando estos valores como referencia, los obtenidos en la experimentación entran en este rango y pueden considerarse aceptables, sin embargo, va a depender principalmente de la aplicación a la que se dirija la pectina y las necesidades de ésta que valor puede ser el más indicado. Por otro lado, podría decirse que este porcentaje no tendrá un mayor efecto en las propiedades funcionales de la pectina, ya que, al entrar en un rango aceptable, indica que no hay mayor cantidad de sales alcalinas, las cuales afectan la viscosidad y gelificación. Para el porcentaje de AUA, se obtuvieron valores cercanos de $47.37\% \pm 20.55\%$, $43.41\% \pm 19.093\%$ y $48.11\% \pm 20.87\%$ para el ácido clorhídrico, sulfúrico y fosfórico respectivamente, estos valores no exceden el 50%, por lo que podría considerarse que tiene una buena capacidad para formar geles. Por último, el grado de esterificación obtenido para el ácido clorhídrico fue de $96.90\% \pm 24.30\%$, para el sulfúrico uno de $93.30\% \pm 23.39\%$ y para el fosfórico uno de $91.46\% \pm 22.94\%$, siendo estos valores mayores al 50%, indica que la pectina es de alto grado de esterificación y es útil para estabilizar emulsiones y espesar productos.

A pesar de que el rendimiento de extracción fue mayor con el ácido sulfúrico 0.05M, puede observarse que los resultados de la caracterización de la pectina extraída con ácido clorhídrico 0.5 M, muestran que el producto es de mayor calidad, principalmente para el peso equivalente y el grado de esterificación, en donde los valores son más altos a los obtenidos con los otros dos ácidos.

Con respecto al análisis estadístico, se llevó a cabo en triplicado, ya que con este fue posible realizar la estadística necesaria para determinar precisión, incertidumbre e identificar algún valor atípico durante la experimentación. En la Tabla 33, se encuentran los valores de desviación estándar para el rendimiento y caracterización de la pectina a partir de la extracción con ácido clorhídrico, puede observarse que todos los valores son bajos en comparación con la media, lo que indica que los datos se encuentran agrupados y no están tan dispersos, a excepción de la desviación del peso equivalente (192.5), que al analizar los datos calculados de este parámetro en la Tabla 30, puede notarse que sí presentan diferencia significativa, lo cual indica que se tienen valores más dispersos en comparación a los otros datos y la muestra de datos es menos homogénea que el resto. Asimismo, se tiene el coeficiente de variación, en donde el dato con un coeficiente mayor al 10%, en este caso el peso equivalente con un valor de 15.75%, muestra que los datos no son tan consistentes y existe una mayor variabilidad relativa en cuanto a la media. Por otro lado, se tiene el intervalo de confianza y sus respectivos intervalos superiores e inferiores, en donde los rangos obtenidos para los parámetros de la caracterización son relativamente estrechos, por lo tanto, es una estimación bastante precisa. Sin embargo, el intervalo del peso equivalente posee un rango más alto, con valores de [1440, 1004.4], lo que indica que existe una mayor incertidumbre en la estimación de este parámetro.

En la Tabla 34, se pueden observar los valores de desviación estándar para el rendimiento y caracterización del ácido sulfúrico, nuevamente los valores no se encuentran dispersos a excepción del

porcentaje de AUA, con una desviación de 8.891. Por otro lado, en el coeficiente de variación se puede observar que se tienen valores altos de variabilidad del porcentaje de metoxilo y AUA, siendo estos de 22.47% y 20.48% respectivamente, lo que indica que estos poseen mayor variabilidad en cuanto a la media. Asimismo, en el intervalo de confianza, se puede observar que tanto para el porcentaje de metoxilo con un intervalo de [8.975, 5.337] y el porcentaje AUA con un intervalo de [53.47, 33.35], poseen los rangos más altos, teniendo estos parámetros mayor incertidumbre en su estimación.

Por otro lado, en la Tabla 35, se observan los valores de desviación estándar para el rendimiento y caracterización del ácido fosfórico, en este caso, no hay mucha dispersión entre datos, exceptuando el peso equivalente, en donde la desviación es de 25.66. Para el coeficiente de variación se observa que no hay mayor variabilidad en cuanto a la media de cada muestra. En cuanto al intervalo de confianza, se puede observar nuevamente, el peso equivalente posee un valor alto en comparación al resto de parámetros, siendo este de [458.7, 400.6], por lo que es el dato con mayor incertidumbre en su estimación.

Como se observa en la Ilustración 14, luego de realizar la extracción y filtración, se obtienen los residuos de cáscara de manzana, los cuales pueden ser aprovechables de distintas maneras. Debido a que, luego de llevar a cabo la extracción, el pH de la cáscara es bajo, puede tener aplicaciones en alimentos o suplementos nutricionales. También puede aprovecharse para alimentar a animales al incluirlo en sus dietas. Es importante evaluar que la cáscara contenga los componentes necesarios para estas aplicaciones y que se evalúe el tratamiento post extracción para que pueda ser utilizada. Para la solución restante luego de la filtración (Ilustración 13), se recomienda llevar a cabo un análisis para determinar un tratamiento y que pueda ser reutilizada en el proceso de extracción.

Para el análisis costo beneficio, se realizó un cálculo aproximado del costo de energía asociado al proceso (Tabla 28), obteniendo un valor de Q108.04 y se tomaron costos aproximados de los reactivos utilizados para la extracción con ácido clorhídrico (Tabla 25) con un valor total de Q75.60, para el ácido sulfúrico (Tabla 26) con un valor de Q77.40 y para el ácido fosfórico con un valor de Q74.15, estos costos se realizaron con base en una corrida y se tomaron como costos operativos. En cuanto al beneficio de la extracción de pectina en la Tabla 35, se tomaron precios del mercado para obtener un precio de venta y así calcular un valor de ingresos por corrida en base a la extracción realizada a escala laboratorio. Con los costos totales asociados mencionados anteriormente y los beneficios por corrida (Tabla 9), se calculó la razón B/C (costo beneficio), en donde se obtuvo un valor de 0.004920 para el ácido clorhídrico, uno de 0.005600 para el ácido sulfúrico y uno de 0.004560 para el ácido fosfórico. Estos valores, al ser menores que 1, indican que el proyecto no es rentable a escala laboratorio, ya que los costos superan los ingresos.

No obstante, al comparar los resultados del análisis costo beneficio, se determina que se va a obtener un mayor beneficio al extraer con ácido sulfúrico, debido a que el rendimiento de la extracción con esta solución es el más alto. Sin embargo, si se analiza los costos de reactivos, el ácido fosfórico es el que posee el valor más bajo y también es uno de los ácidos que se encuentra con más disponibilidad en el mercado y el que requirió menos volumen para llevar a cabo la hidrólisis. Asimismo, el ácido clorhídrico es el que obtuvo una razón B/C, costos de reactivos y rendimiento intermedio al comparar

con las otras dos soluciones, y tomando en cuenta que la pectina obtenida con él posee mejores propiedades, el ácido clorhídrico (0.5 M) podría ser la opción más viable para llevar a cabo este proceso.

Además, se realizó una estimación de los costos iniciales, en los que se incluyen los equipos y cristalería utilizada durante el proceso de extracción y caracterización, estos valores pueden observarse en la Tabla 24, teniendo un costo total de Q30,165.06, este no se tomó en cuenta para el análisis, ya que no se planteó a largo plazo, solamente por cada corrida de extracción, no obstante, puede plantearse una idea del valor aproximado que se requeriría en el caso de adquirir el equipo necesario para llevar a cabo este proceso en un laboratorio. Con esto planteado, se puede decir entonces que la extracción a escala laboratorio no es viable económicamente y puede verse reflejado principalmente en los costos de energía, puesto que, para una pequeña muestra, la estufa para el pretratamiento, la refrigeradora para la precipitación y el secador son los que tienen un mayor consumo energético y por lo tanto un mayor costo. El uso de estos equipos no pudo ser aprovechado en su mayoría, ya que, solamente se utilizó para 3 muestras de aproximadamente 1.00 gramo, sin embargo, podría obtenerse un mayor provecho al ingresar mayor cantidad de muestras y podría disminuir el impacto económico. Asimismo, el precio que se utilizó para el análisis costo beneficio (Tabla 35), siendo este de Q29.44, también influye en los beneficios, ya que esos precios son dados en base a una producción mayorista, lo que podría hacer que el precio sea menor debido a que la pectina se produce en mayor cantidad.

Por otro lado, es recomendable que se lleve a cabo un análisis costo beneficio a una escala mayor o industrial con el ácido clorhídrico, pues al aumentar la producción de pectina, se podrían tener mayores ingresos y mejor aprovechamiento energético. Para poder realizar el escalamiento industrial, deben tomarse en cuenta las siguientes etapas: secado, trituración, hidrólisis ácida y centrifugación. En el caso de la trituración en el tratamiento de la cáscara, se recomienda utilizar un molino de cuchillas y así obtener el tamaño de partícula deseado como se realizó a escala laboratorio, para la molienda luego de la extracción y secado de pectina, se puede utilizar un molino de discos, ya que este funciona por frotación y se va a obtener un polvo fino de pectina. Por último, para poder llevar a cabo la hidrólisis, la reacción debe ocurrir en un reactor agitado y se debe evaluar qué tipo de reactor sería el más adecuado para esta reacción y proceso.

IX. CONCLUSIONES

1. Se determinó del rendimiento para las soluciones ácidas empleadas en la extracción de pectina, obteniendo valores de $8.667\% \pm 1.739\%$ para el ácido clorhídrico, de $9.666\% \pm 1.740\%$ para el ácido sulfúrico y de $8.333\% \pm 1.738\%$ para el ácido fosfórico. Se determinó que el ácido sulfúrico a una concentración de 0.05 M empleado en una hidrólisis realizada a $75\text{ }^{\circ}\text{C}$, manteniendo un pH de 2.5 a 3 por 75 minutos y con agitación constante, es el más adecuado para obtener un mejor rendimiento en la extracción de pectina de residuos de cáscara de manzana.

2. Se obtuvo valores de peso equivalente, porcentaje de metoxilo, alcalinidad, AUA y grado de esterificación para el ácido clorhídrico de $1222.0 \pm 533.6\text{ mg/meq}$, $8.0858\% \pm 3.501\%$, $6.504\% \pm 4.699\%$, $47.37\% \pm 20.55\%$ y $96.90\% \pm 24.30\%$ respectivamente, para el ácido sulfúrico de $634.9 \pm 275.6\text{ mg/meq}$, $7.156\% \pm 3.150\%$, $4.349\% \pm 2.659\%$, $43.41\% \pm 19.093\%$ y $93.30\% \pm 23.39\%$ y para el ácido fosfórico valores de $429.6 \pm 186.26\text{ mg/meq}$, $7.750\% \pm 3.357\%$, $4.999\% \pm 3.713\%$, $48.11\% \pm 20.87\%$ y $91.46\% \pm 22.94\%$. Estos valores indican que la pectina extraída de residuos de cáscara de manzana tiene una buena capacidad de gelificación, ya que es de bajo metoxilo, la alcalinidad no tendría un mayor efecto en sus propiedades funcionales y en base al alto grado de esterificación se comprobó que es útil para la estabilización de emulsiones y espesar productos. Asimismo, se determinó que los valores obtenidos con el ácido clorhídrico muestran que la pectina es de mejor calidad que la extraída con los otros dos ácidos.

3. Para el análisis costo beneficio, se obtuvo una razón B/C de 0.004920 para el ácido clorhídrico, una de 0.005600 para el ácido sulfúrico y una de 0.004560 para el fosfórico, lo que indicó que la extracción de pectina de residuos de cáscara de manzana a escala laboratorio, no es económicamente viable, ya que los costos superan los ingresos o beneficios. Esto se debe a que la pectina extraída por corrida es muy poca y, además, el uso de la estufa, refrigeradora y secador no se aprovecha al máximo. Asimismo, el precio que se utilizó para calcular los ingresos es en base a producción mayorista, lo que podría hacer que el precio más bajo ya que la pectina es producida en una escala mayor. Por otro lado, en base a los costos de reactivos, la razón B/C, el rendimiento y propiedades de la pectina extraída con ácido clorhídrico 0.5 M, se determinó que puede ser la opción más viable para llevar a cabo el proceso.

X. RECOMENDACIONES

1. Se recomienda analizar el rendimiento de los ácidos al realizar extracciones con cáscara y fruto para determinar si al poseer parte de la fruta tendría un aumento significativo y así evaluar la eficacia del primer paso del acondicionamiento de la materia prima. También se recomienda evaluar residuos generados por industrias que se enfocan en la producción de manzana y venden la pulpa o concentrado a los productores de bebidas.

2. En base a la caracterización, realizar pruebas para la elaboración de jaleas y mermeladas y determinar la calidad de estas y si la pectina cumple con los requisitos para utilizarse en la industria de alimentos. Asimismo, evaluar el porcentaje de AUA realizando pruebas en cuanto a la formación de geles para analizar si el porcentaje obtenido es alto o no.

3. En cuanto al análisis costo beneficio, se recomienda realizar un análisis a mayor escala o a escala industrial y a largo plazo de la extracción realizada con ácido clorhídrico 0.5 M, en donde pueda analizarse el impacto del consumo energético por los equipos mencionados y el precio de venta al aumentar la producción.

XI. REFERENCIAS

- Agrinotas. (2023). *Manzana guatemalteca con futuro prometedor*. Obtenido de Agrinotas: Agricultura Moderna: <http://agrinotas.com/?p=6633>
- Anderson, David R.; Sweeney, Dennis J.; Williams, Thomas A. (2015). *Estadística para Negocios y Economía*. México: 12va ed. Cengage Learning.
- Blank, L., Tarquin, A. . (2006). *Ingeniería Económica*. México D.F.: McGraw-Hill.
- Britannica. (2023). *Composting*. Obtenido de Britannica: <https://www.britannica.com/technology/environmental-infrastructure>
- Calvo, M. (2023). *Pectinas*. Obtenido de Bioquímica de los Alimentos: [http://milksci.unizar.es/bioquimica/temas/azucares/pectinas.html#:~:text=Las%20pectinas%20est%C3%A1n%20formadas%20fundamentalmente,esterificado%20por%20metanol%20\(metoxilado\).&text=Las%20unidades%20de%20%C3%A1cido%20galactur%C3%B3nico,s%C3%AD%20por%20enla](http://milksci.unizar.es/bioquimica/temas/azucares/pectinas.html#:~:text=Las%20pectinas%20est%C3%A1n%20formadas%20fundamentalmente,esterificado%20por%20metanol%20(metoxilado).&text=Las%20unidades%20de%20%C3%A1cido%20galactur%C3%B3nico,s%C3%AD%20por%20enla)
- Canso. (2023). *Guía Básica de Análisis Costo-Beneficio ADS-B*. Obtenido de Canso: Civil air navigation services organization: <chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/https://www.icao.int/nacc/documents/edocs/fasid/ccarwg9caanew.pdf>
- Canteri-Schemin, M., Ramos, H., Waszcynskyj, N., Wosiacki, G. (2005). Extraction of Pectin from Apple Pomace. *Brazilian Archives of Biology and Technology: An International Journal*, 48, 259-266.
- Center for Agriculture, Food, and the environment. (2023). *Organic Waste Management*. Obtenido de University of Massachusetts Amherst : <https://ag.umass.edu/greenhouse-floriculture/greenhouse-best-management-practices-bmp-manual/organic-waste-management>
- Cortés, F. (2020). *La Economía Circular*. Obtenido de Ideas claves para la comprensión de un nuevo modelo de gestión de los recursos económicos: chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/https://repositorio.uautonoma.cl/bitstream/handle/20.500.12728/3246/ECONOMIA_CIRCULAR.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- Devia, J. (2002). *Proceso para producir Pectinas Cítricas*. Obtenido de Revista Universidad EAFIT No. 129: <chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/https://repository.eafit.edu.co/bitstream/handle/10784/17236/document%20-%202020-08-21T205613.555.pdf?sequence=2&isAllowed=y>
- Flores, J., Caballero, C., Moreira, M. (2008). Una interpretación aproximativa del concepto de hidrólisis en estructuras peptídicas en un curso de Bioquímica del IPC en el contexto de la teoría de los campos conceptuales de Vergnaud. *Universidad Pedagógica Experimental Libertador* , 135 - 159.
- Harvard T.H. Chan School of Public Health. (2023). *The Nutrition Source*. Obtenido de Harvard : <https://www.hsph.harvard.edu/nutritionsource/food-features/apples/>
- Herbstreith & Fox. (2023). *Pectin applications for our H&F products*. Obtenido de <https://www.herbstreith-fox.de/en/applications/>
- Jong, S., Abdullah, N., Muhammad, N. (2023). Effect of acid type and concentration on the yield, purity, and esterification degree of pectin extracted from durian rinds. *Results in Engineering*, Volume 17. Obtenido de Elsevier: [https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2590123023001019#:~:text=The%20pectin%20yield%20and%20DE,purity%20\(AUA%20%3E%2065%25\)](https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2590123023001019#:~:text=The%20pectin%20yield%20and%20DE,purity%20(AUA%20%3E%2065%25)).

- Treybal, R. (1981). *Mass transfer operations*. McGraw-Hill.
- Universidad Complutense de Madrid . (2020). Alargan la vida del subproducto de manzana y mejoran sus propiedades prebióticas. *Vicerrectorado de Investigación y transferencia* .
- Venkatanagaraju, E., Bharathi, N., Sindhuja, R., Chowdhury, R., Sreelekha, Y. (2020). Extraction and Purification of Pectin from Agro - Industrial Wastes. En M. Masueli, *Pectins - Extraction, Purification, Characterization and Applications*. . IntechOpen. doi: 10.5772/intechopen.85585.
- Virk and Sogi. (2004). Extraction and Characterization of Pectin from apple. *International Journal of Food Properties*, 7, 693-703.
- Voragen, A.G.J., Coenen, GJ., Verhoef, R.P. et al. (2009). Pectin, a versatile polysaccharide present in plant cell walls. *Struct Chem* , 263-275.
- Zaid RM, Mishra P., Tabassum S., Ab Wahid Z., Sakinah. (2019). High methoxyl pectin extracts from *Hylocereus polyrhizus*'s peels: Extraction kinetics and thermodynamic studies. *Int. J. Biol. Macromol.* , 1147–1157.
- Zegada, V. (2015). EXTRACCIÓN DE PECTINA DE RESIDUOS DE CÁSCARA DE NARANJA POR HIDRÓLISIS ÁCIDA ASISTIDA POR MICROONDAS (HMO). *Investigación & Desarrollo* , 1(15), 65-76.

XII. ANEXOS

A. BALANCES DE MASA Y ENERGÍA

Figura 1. Balance de Masa y Energía del tratamiento de residuos de cascara de manzana.

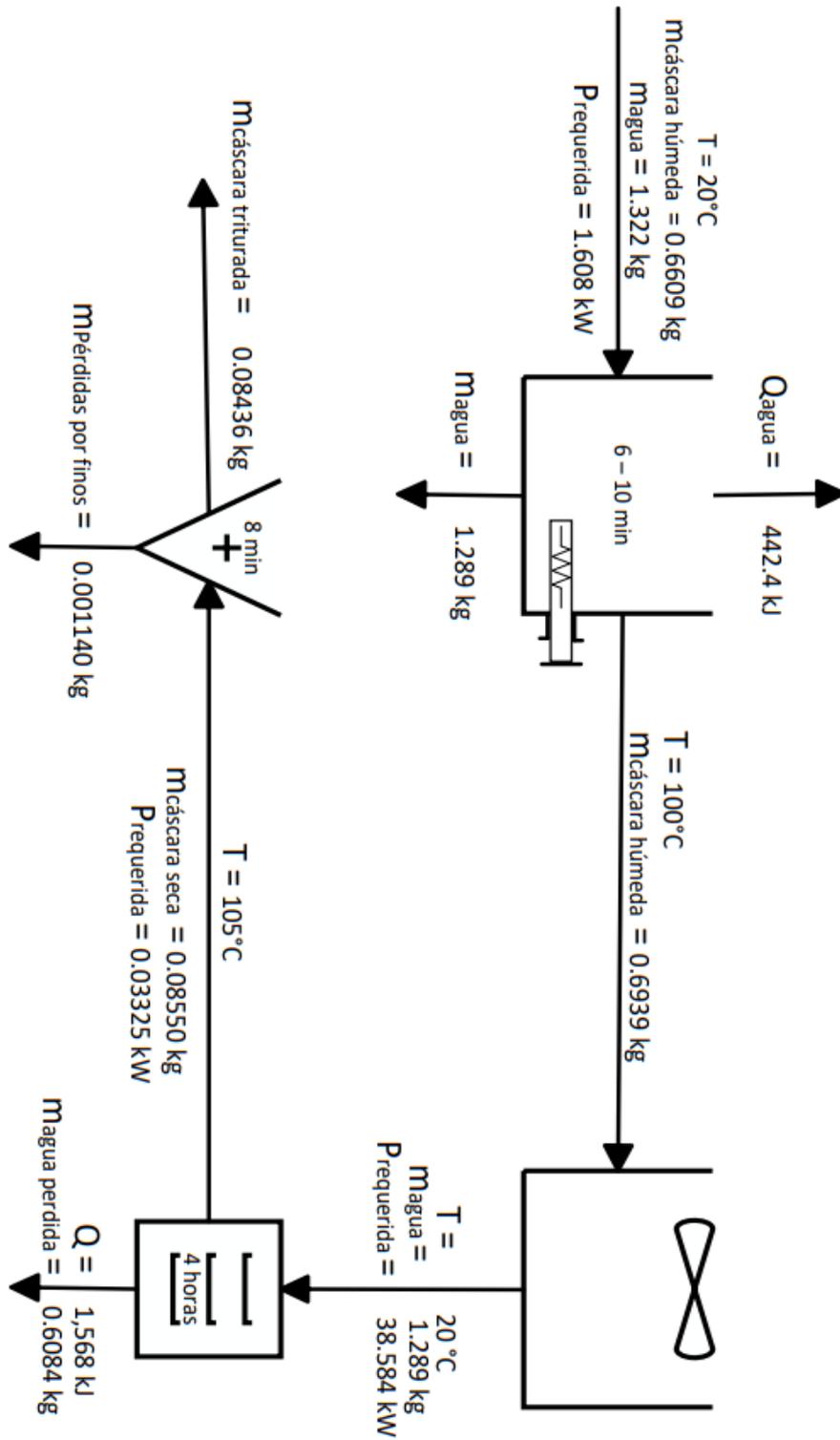


Figura 2. Balance de Masa y Energía extracción de pectina con ácido clorhídrico.

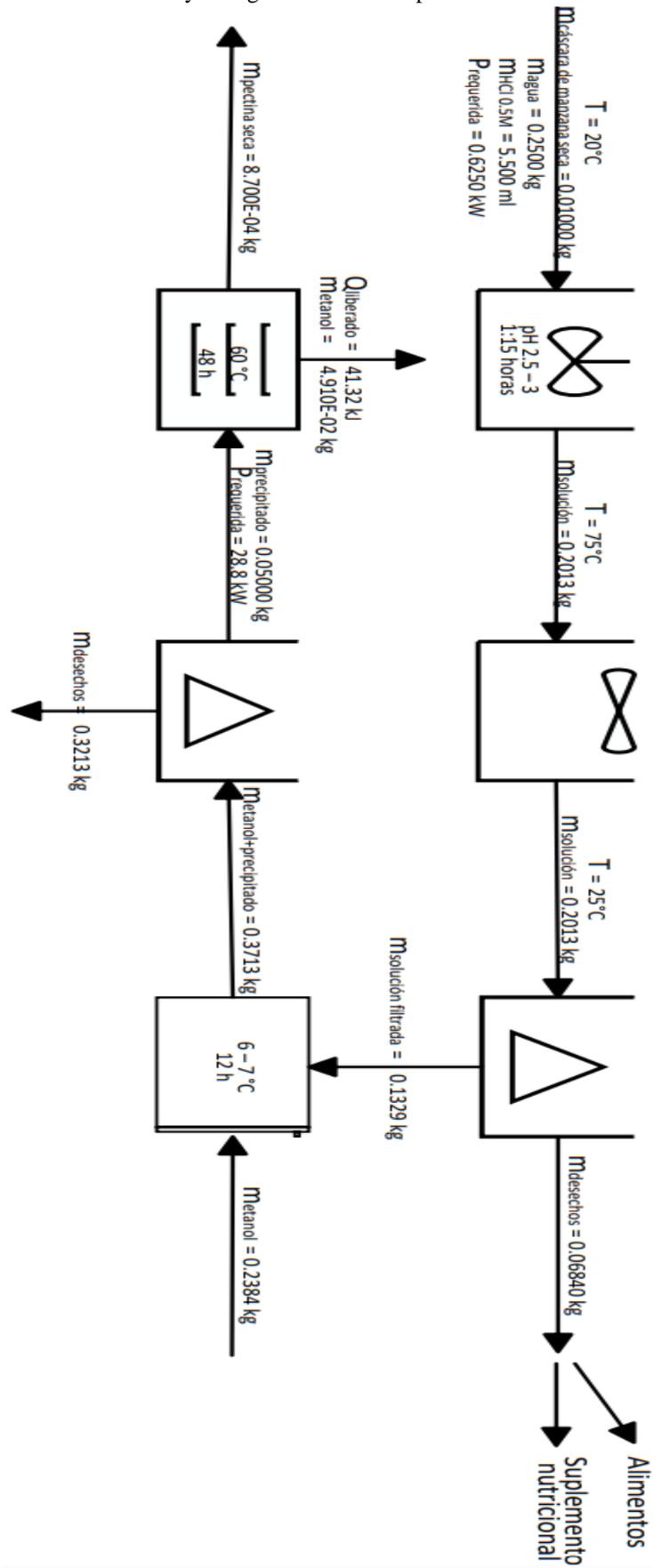


Figura 3. Balance de Masa y Energía extracción de pectina con ácido sulfúrico.

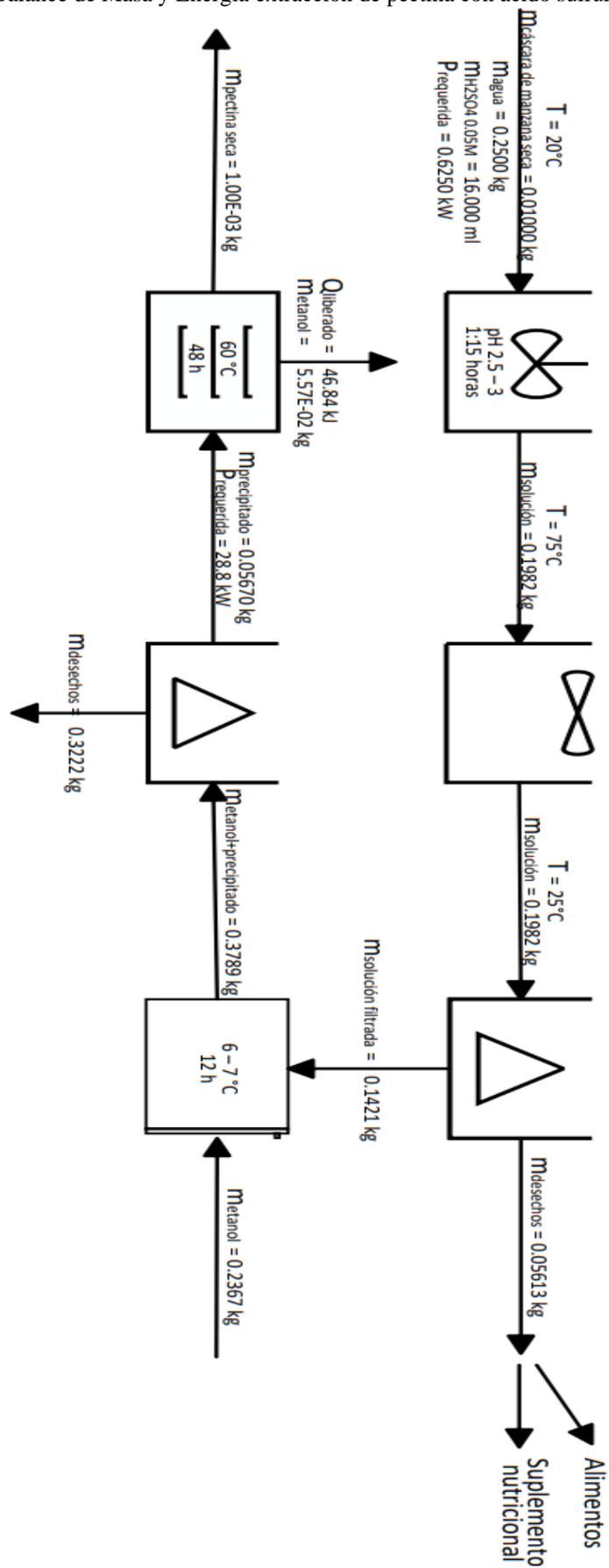


Figura 4. Balance de Masa y Energía extracción de pectina con ácido fosfórico.

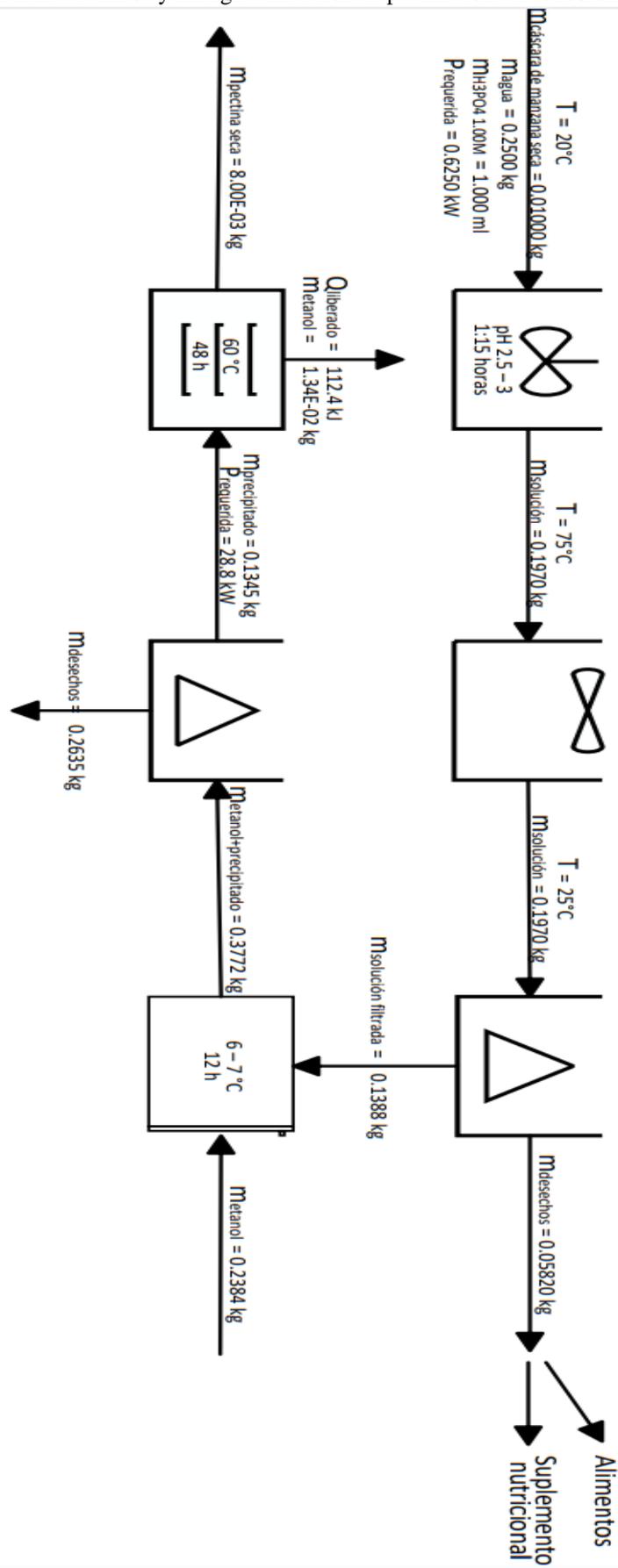
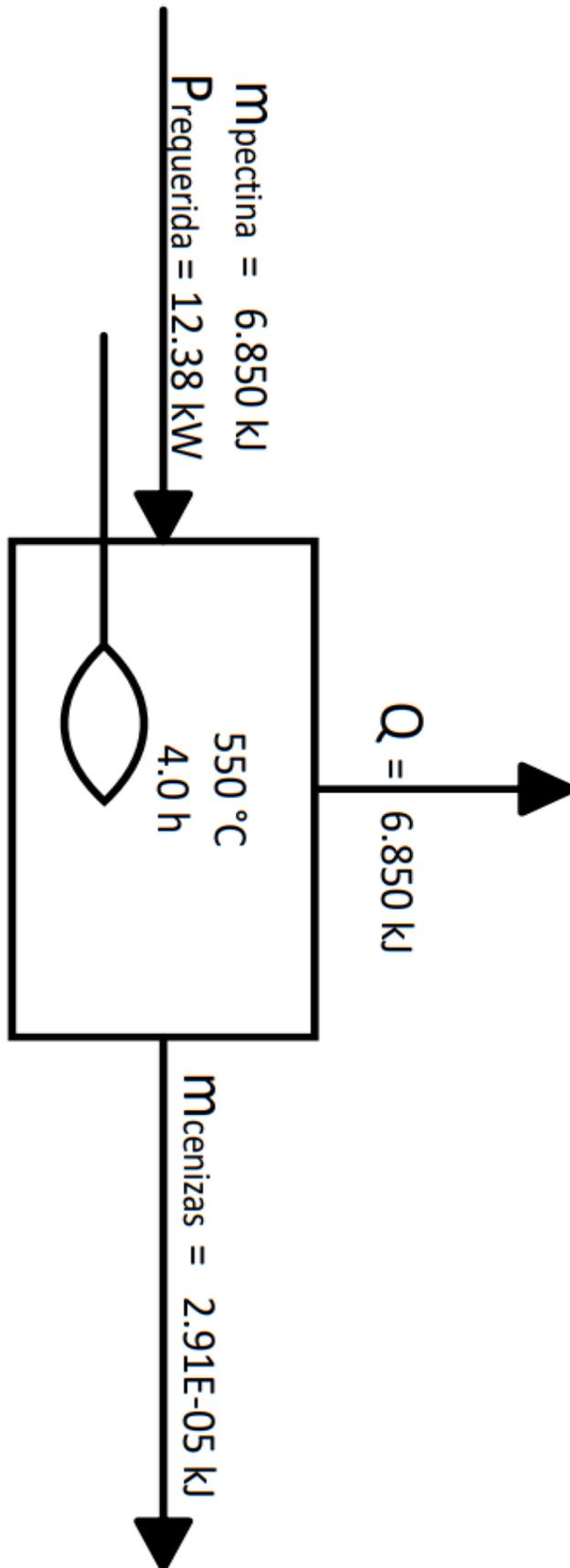


Figura 5. Balance de Masa y Energía calcinación pectina en Mufla.



B. CÁLCULOS DE MUESTRA

Cálculo 1. Peso agua en cascara de manzana.

$$\text{Peso agua en muestra (g)} = \text{peso inicial muestra (g)} - \text{peso final muestra (g)}$$

$$\text{Peso agua en muestra (g)} = 0.6000 \text{ g} - 0.3100 \text{ g} = 0.29 \text{ g de agua}$$

*Este cálculo se realizó para poder obtener el porcentaje de humedad de la muestra y realizar la curva de secado de la cáscara de manzana.

Cálculo 2. Porcentaje de humedad en cáscara de manzana.

$$\% \text{ de humedad en cáscara de manzana} = \frac{\text{peso de agua en muestra (g)}}{\text{peso total de agua en muestra (g)}} * 100$$

$$\% \text{ de humedad en cáscara de manzana} = \frac{0.2900 \text{ g}}{0.5500} * 100 = 52.63\%$$

*Este cálculo se realizó para construir la curva de secado de la cáscara de manzana.

Cálculo 3. Volumen de ácido clorhídrico para solución 0.5 M.

$$250 \text{ ml de solución} * \frac{0.5 \text{ mol HCl}}{1000 \text{ ml solución}} * \frac{36.4609 \text{ g HCl}}{1 \text{ mol HCl}} * \frac{1 \text{ ml HCl}}{1.19 \text{ g}} * \frac{100 \text{ ml impuros}}{37 \text{ ml puro}} \\ = 10.35 \text{ ml de HCl}$$

*Este cálculo se realizó para la solución empleada en la extracción de pectina. El mismo cálculo estequiométrico se llevó a cabo para las soluciones de ácido sulfúrico y fosfórico. También se realizó este cálculo para las soluciones 0.1 M utilizadas en la caracterización de pectina.

Cálculo 4. Masa de hidróxido de sodio para solución neutralizante.

$$250 \text{ ml de solución} * \frac{0.5 \text{ mol NaOH}}{1000 \text{ ml de solución}} * \frac{40 \text{ g NaOH}}{1 \text{ mol NaOH}} = 2.000 \text{ g de NaOH}$$

*Este cálculo se realizó para para solución empleada como regulador de pH en la hidrólisis con los tres ácidos empleados. Asimismo, se realizó el mismo cálculo para las soluciones empleadas en las titulaciones de la caracterización de la pectina.

Cálculo 5. Rendimiento de pectina.

$$\text{Rendimiento de pectina con HCl (\%)} = \frac{0.9 \text{ g de pectina obtenida}}{10 \text{ g materia prima utilizada}} * 100 \\ = 9.000\%$$

*Este cálculo se realizó empleando la Ecuación 1 (metodología), para la extracción con ácido clorhídrico. El mismo cálculo se realizó para el ácido sulfúrico y fosfórico.

Cálculo 6. Peso equivalente.

$$\text{Peso equivalente} = \frac{0.4 \text{ g} * 100}{0.4 \text{ ml de álcali} * 0.1 \text{ N de NaOH}} = 1000.0$$

*Este cálculo se realizó empleando la Ecuación 2 (metodología), para la caracterización de la extracción con ácido clorhídrico. El mismo cálculo se realizó para el ácido sulfúrico y fosfórico.

Cálculo 7. Porcentaje de metoxilo.

$$\% \text{ de metoxilo} = \frac{10.4 \text{ ml álcali} * 0.1 \text{ N de NaOH} * 3.1}{0.4 \text{ g}} = 8.0600 \%$$

* Este cálculo se realizó empleando la Ecuación 3 (metodología), para la caracterización de la extracción con ácido clorhídrico. El mismo cálculo se realizó para el ácido sulfúrico y fosfórico.

Cálculo 8. Alcalinidad.

$$\begin{aligned} \text{Alcalinidad (\%)} &= \frac{(25.9 \text{ ml de blanco} - 22.9 \text{ ml de NaOH}) * 0.1 \text{ N de NaOH} * 60 * 100}{0.284 \text{ g de ceniza} * 1000} \\ &= 6.338 \% \end{aligned}$$

* Este cálculo se realizó empleando la Ecuación 4 (metodología), para la caracterización de la extracción con ácido clorhídrico. El mismo cálculo se realizó para el ácido sulfúrico y fosfórico.

Cálculo 9. Porcentaje AUA.

$$\begin{aligned} \text{AUA \%} &= \frac{176 * (0.1 \text{ N} * 0.4 \text{ ml NaOH}) * 100}{0.4 \text{ g de muestra} * 1000} + \frac{176 * (0.1 \text{ N} * 10.4 \text{ ml NaOH}) * 100}{0.4 \text{ g de muestra} * 1000} \\ &= 47.52 \% \end{aligned}$$

* Este cálculo se realizó empleando la Ecuación 5 (metodología), para la caracterización de la extracción con ácido clorhídrico. El mismo cálculo se realizó para el ácido sulfúrico y fosfórico.

Cálculo 10. Grado de esterificación.

$$\text{Grado de esterificación} = \frac{176 * 8.0600 * 100}{31 * 47.52} = 96.30$$

* Este cálculo se realizó empleando la Ecuación 6 (metodología), para la caracterización de la extracción con ácido clorhídrico. El mismo cálculo se realizó para el ácido sulfúrico y fosfórico.

Cálculo 11. Razón costo – beneficio.

$$\text{Razón } \frac{B}{C} = \frac{\text{Beneficio}}{\text{Costos}} = \frac{Q29.10}{Q35,683.92} = 0.0008155$$

*Este cálculo se realizó para determinar el beneficio ante los costos de la extracción de pectina de cáscara de manzana a escala laboratorio.

C. DATOS ORIGINALES

Tabla 10. Tiempo y masa de cáscara de manzana durante el secado.

Tiempo (min)	Peso Al y muestra (g)
0.000	0.6000 ± 0.1000
10.00	0.3100 ± 0.1000
20.00	0.2201 ± 0.1000
30.00	0.2015 ± 0.1000
40.00	0.1558 ± 0.1000
50.00	0.1280 ± 0.1000
60.00	0.1000 ± 0.1000
70.00	0.08000 ± 0.1000
80.00	0.06000 ± 0.1000
90.00	0.05000 ± 0.1000
100.0	0.04901 ± 0.1000

*Los datos de esta Tabla se utilizaron para realizar los cálculos de la curva de secado de la cáscara de manzana.

Tabla 11. Datos recolectados en el tratamiento y secado de cáscara de manzana.

Cáscara pesada al inicio (g)	Cáscara pesada después de eliminación de suciedad (g)	Cáscara seca (g)	Cáscara triturada (g)
660.9 ± 0.1000	693.3 ± 0.1000	85.50 ± 0.1000	84.36 ± 0.1000

*Con esta Tabla se realizaron los balances de masa y energía para el tratamiento y secado de cáscara de manzana.

Tabla 12. Datos recolectados extracción de pectina con ácido clorhídrico.

Corrida	Peso muestra (g)	Gotas HCl añadidas	Tiempo Hidrólisis (h)	pH	T (°C)	Cantidad de solución filtrada (g)	Desechos (g)
1	10.00 ± 0.1000	110	01:15	2.500	75	147.2 ± 0.1000	77.80 ± 0.1000
2	10.00 ± 0.1000	110	01:15	2.500	75	134.0 ± 0.1000	61.80 ± 0.1000
3	10.00 ± 0.1000	110	01:15	2.500	75	117.5 ± 0.1000	65.60 ± 0.1000

*Con esta Tabla se realizaron los balances de masa y energía para la extracción con ácido clorhídrico.

Tabla 13. Datos recolectados extracción de pectina con ácido sulfúrico.

Corrida	Peso muestra (g)	Gotas H2SO4 añadidas	Tiempo Hidrólisis (h)	pH	T (°C)	Cantidad de solución filtrada (g)	Desechos (g)
1	10.00 ± 0.1000	320	01:15	2.500	75	123.2 ± 0.1000	65.50 ± 0.1000
2	10.00 ± 0.1000	320	01:15	2.500	75	142.5 ± 0.1000	58.00 ± 0.1000
3	10.00 ± 0.1000	320	01:15	2.500	75	160.7 ± 0.1000	44.90 ± 0.1000

*Con esta Tabla se realizaron los balances de masa y energía para la extracción con ácido sulfúrico.

Tabla 14. Datos recolectados extracción de pectina con ácido fosfórico.

Corrida	Peso muestra (g)	Gotas H ₃ PO ₄ añadidas	Tiempo Hidrólisis (h)	pH	T (°C)	Cantidad de solución filtrada (g)	Desechos (g)
1	10.00 ± 0.1000	20	01:15	2.500	75	138.8 ± 0.1000	58.80 ± 0.1000
2	10.00 ± 0.1000	20	01:15	2.500	75	137.4 ± 0.1000	59.30 ± 0.1000
3	10.00 ± 0.1000	20	01:15	2.500	75	140.2 ± 0.1000	58.20 ± 0.1000

*Con esta Tabla se realizaron los balances de masa y energía para la extracción con ácido fosfórico.

Tabla 15. Datos recolectados en la precipitación y secado de pectina con ácido clorhídrico.

Cantidad de etanol (g)	Precipitado + etanol (g)	Precipitado (g)	Desechos (g)	Pectina seca (g)
226.7 ± 0.1000	373.9 ± 0.1000	47.50 ± 0.1000	326.4 ± 0.1000	0.9000 ± 0.1000
244.9 ± 0.1000	378.9 ± 0.1000	50.60 ± 0.1000	328.3 ± 0.1000	0.9000 ± 0.1000
243.5 ± 0.1000	361.0 ± 0.1000	51.90 ± 0.1000	309.1 ± 0.1000	0.8000 ± 0.1000

*Con esta Tabla se realizaron los balances de masa y energía para la extracción con ácido clorhídrico y la pectina seca sirvió para el cálculo del rendimiento.

Tabla 16. Datos recolectados en la precipitación y secado de pectina con ácido sulfúrico.

Cantidad de etanol (g)	Precipitado + etanol (g)	Precipitado (g)	Desechos (g)	Pectina seca (g)
227.07 ± 0.1000	350.3 ± 0.1000	54.20 ± 0.1000	296.07 ± 0.1000	0.9000 ± 0.1000
224.7 ± 0.1000	367.2 ± 0.1000	56.40 ± 0.1000	310.8 ± 0.1000	0.9000 ± 0.1000
258.4 ± 0.1000	419.1 ± 0.1000	59.50 ± 0.1000	359.6 ± 0.1000	1.100 ± 0.1000

*Con esta Tabla se realizaron los balances de masa y energía para la extracción con ácido sulfúrico y la pectina seca sirvió para el cálculo del rendimiento.

Tabla 17. Datos recolectados en la precipitación y secado de pectina con ácido fosfórico.

Cantidad de etanol (g)	Precipitado + etanol (g)	Precipitado (g)	Desechos (g)	Pectina seca (g)
227.07 ± 0.1000	365.9 ± 0.1000	165.1 ± 0.1000	200.8 ± 0.1000	0.9000 ± 0.1000
229.8 ± 0.1000	367.2 ± 0.1000	118.8 ± 0.1000	310.8 ± 0.1000	0.8000 ± 0.1000
258.4 ± 0.1000	398.59 ± 0.1000	119.6 ± 0.1000	278.9 ± 0.1000	0.8000 ± 0.1000

*Con esta Tabla se realizaron los balances de masa y energía para la extracción con ácido fosfórico y la pectina seca sirvió para el cálculo del rendimiento.

Tabla 18. Datos recolectados en la caracterización de la pectina extraída con ácido clorhídrico.

Corrida	Peso muestra (g)	V álcali Peso equivalente (ml)	V álcali % de metoxilo (ml)	Normalidad álcali
1	0.4000 ± 0.1000	0.4000 ± 0.1000	10.40 ± 0.1000	0.1 ± 0.01000
2	0.4000 ± 0.1000	0.3000 ± 0.1000	10.40 ± 0.1000	0.1 ± 0.01000
3	0.4000 ± 0.1000	0.3000 ± 0.1000	10.50 ± 0.1000	0.1 ± 0.01000

*Estos datos se utilizaron para realizar los cálculos de la caracterización de la pectina extraída con ácido clorhídrico.

Tabla 19. Datos recolectados para la caracterización del contenido de cenizas en la extracción de ácido clorhídrico.

V blanco (ml)	V titulación (ml)	Normalidad	Masa de cenizas (g)
25.90 ± 0.1000	22.90 ± 0.1000	0.1000 ± 0.01000	0.2840 ± 0.1000
25.80 ± 0.1000	22.70 ± 0.1000	0.1000 ± 0.01000	0.2890 ± 0.1000
25.80 ± 0.1000	22.60 ± 0.1000	0.1000 ± 0.01000	0.2850 ± 0.1000

*Estos datos se utilizaron para realizar los cálculos de la alcalinidad de la pectina extraída con ácido clorhídrico.

Tabla 20. Datos recolectados en la caracterización de la pectina extraída con ácido sulfúrico.

Corrida	Peso muestra (g)	V álcali Peso equivalente (ml)	V álcali % de metoxilo (ml)	Normalidad álcali
1	0.4000 ± 0.1000	0.6000 ± 0.1000	9.600 ± 0.1000	0.1000 ± 0.01000
2	0.4000 ± 0.1000	0.7000 ± 0.1000	7.000 ± 0.1000	0.1000 ± 0.01000
3	0.4000 ± 0.1000	0.6000 ± 0.1000	11.10 ± 0.1000	0.1000 ± 0.01000

*Estos datos se utilizaron para realizar los cálculos de la caracterización de la pectina extraída con ácido sulfúrico.

Tabla 21. Datos recolectados para la caracterización del contenido de cenizas en la extracción de ácido sulfúrico.

V blanco (ml)	V titulación (ml)	Normalidad	Masa de cenizas (g)
18.20 ± 0.1000	16.30 ± 0.1000	0.1 ± 0.01000	0.2500 ± 0.1000
18.70 ± 0.1000	16.60 ± 0.1000	0.1 ± 0.01000	0.3000 ± 0.1000
19.20 ± 0.1000	14.20 ± 0.1000	0.1 ± 0.01000	0.7000 ± 0.1000

*Estos datos se utilizaron para realizar los cálculos de la alcalinidad de la pectina extraída con ácido sulfúrico.

Tabla 22. Datos recolectados en la caracterización de la pectina extraída con ácido fosfórico.

Corrida	Peso muestra (g)	V álcali Peso equivalente (ml)	V álcali % de metoxilo (ml)	Normalidad álcali
1	0.4000 ± 0.1000	0.9000 ± 0.1000	10.30 ± 0.1000	0.1000 ± 0.01000
2	0.4000 ± 0.1000	0.9000 ± 0.1000	9.800 ± 0.1000	0.1000 ± 0.01000
3	0.4000 ± 0.1000	1.0000 ± 0.1000	9.900 ± 0.1000	0.1000 ± 0.01000

*Estos datos se utilizaron para realizar los cálculos de la caracterización de la pectina extraída con ácido fosfórico.

Tabla 23. Datos recolectados para la caracterización del contenido de cenizas en la extracción de ácido fosfórico.

V blanco (ml)	V titulación (ml)	Normalidad	Masa de cenizas (g)
18.60 ± 0.1000	16.50 ± 0.1000	0.1 ± 0.01000	0.2340 ± 0.1000
18.90 ± 0.1000	16.70 ± 0.1000	0.1 ± 0.01000	0.2780 ± 0.1000
18.50 ± 0.1000	14.40 ± 0.1000	0.1 ± 0.01000	0.2590 ± 0.1000

*Estos datos se utilizaron para realizar los cálculos de la alcalinidad de la pectina extraída con ácido fosfórico.

Tabla 24. Costos iniciales de equipo y cristalería para análisis costo – beneficio.

Descripción	Capacidad	Cantidad	Costo aproximado
Ollas	16 L	2	Q 319.99
Estufa	9 niveles de potencia (2000 W)	1	Q 5,169.00
Estufa	0 - 350 °C	2	Q 811.25
Tiras para medición pH	N/A	2 cajas (100 tiras)	Q 476.00
Termómetro de alcohol	De -10 a 110 °C	2	Q 50.00
Balanza	6 kg	1	Q 3,706.84
Licudora	1.5 L	1	Q 349.99
Secador	De 0 a 200 °C	1	Q 7,365.01
Refrigerador	321 L	1	Q 3,999.00
Mufla	De 0 a 1000 °C	1	Q 4,526.00
Soporte de metal y pinza	N/A	1	Q 404.89
Beakers	250 ml	7	Q 320.46
Beakers	1 L	2	Q 331.32
Beakers	600 ml	6	Q 791.16
Erlenmeyer	250 ml	6	Q 343.56
Balones aforados	250 ml	3	Q 281.37
Pipeta graduada	10 ml	2	Q 124.80
Bureta para titular	50 ml	1	Q 208.00
Kitasato	1000 ml	1	Q 501.77
Embudo Buchner	N/A	1	Q 84.65
		Total	Q 30,165.06

Tabla 25. Costos de reactivos para análisis costo – beneficio ácido clorhídrico.

Descripción	Consumo	Costo aproximado
Ácido clorhídrico	0.0055 L	Q 1.865
Etanol 96%	0.330 L	Q 18.13
Hidróxido de sodio	0.008 kg	Q 3.728
Cloruro de sodio	0.001 kg	Q 0.3696
Agua destilada	1.5 L	Q 51.51
	Total	Q 75.60

* Estos reactivos se utilizaron durante la extracción y caracterización de la pectina, sus costos se utilizaron posteriormente para realizar el análisis costo – beneficio.

Tabla 26. Costos de reactivos para análisis costo – beneficio ácido sulfúrico.

Descripción	Consumo	Costo aproximado
Ácido sulfúrico	0.016 L	Q 3.667
Etanol 96%	0.330 L	Q 18.13
Hidróxido de sodio	0.008 kg	Q 3.728
Cloruro de sodio	0.001 kg	Q 0.3696
Agua destilada	1.5 L	Q 51.51
	Total	Q 77.40

Tabla 27. Costos de reactivos para análisis costo – beneficio ácido fosfórico.

Descripción	Consumo	Costo aproximado
Ácido fosfórico	0.0010 L	Q 0.409
Etanol 96%	0.330 L	Q 18.13
Hidróxido de sodio	0.008 kg	Q 3.728
Cloruro de sodio	0.001 kg	Q 0.3696
Agua destilada	1.5 L	Q 51.51
	Total	Q 74.15

Tabla 28. Consumo de energía eléctrica por equipo.

Descripción	Tiempo (h)	Consumo (kWh)
Estufa pretratamiento	4.000	38.58
Licuada para triturar	0.133	0.03325
Estufa calentamiento hidrólisis	1.250	0.6250
Refrigeradora precipitación	12.00	5.250
Secador	48.00	28.80
Estufa calentamiento caracterización	0.01670	0.004175
	Total (kWh)	73.29
	Costo mensual	Q 108.04

*Este consumo de energía calculado se realizó por equipo utilizado durante el tratamiento de la cáscara, extracción de la pectina y caracterización.

D. DATOS CALCULADOS

Tabla 29. Disminución del porcentaje de humedad y peso de agua del secado de cáscara de manzana.

Tiempo (min)	Peso agua (g)	% de humedad
0.0000		
10.00	0.2900 ± 0.1000	0.5263 ± 0.1000
20.00	0.08990 ± 0.1000	0.1631 ± 0.1000
30.00	0.01860 ± 0.1000	0.03375 ± 0.1000
40.00	0.04570 ± 0.1000	0.08294 ± 0.1000
50.00	0.02780 ± 0.1000	0.05045 ± 0.1000
60.00	0.02800 ± 0.1000	0.05081 ± 0.1000
70.00	0.02000 ± 0.1000	0.03629 ± 0.1000
80.00	0.02000 ± 0.1000	0.03630 ± 0.1000
90.00	0.01000 ± 0.1000	0.01815 ± 0.1000
100.0	0.00099 ± 0.1000	0.001796 ± 0.1000

*Estos datos se utilizaron para construir la curva de secado de la cáscara de manzana.

Figura 6. Curva de secado de manzana.

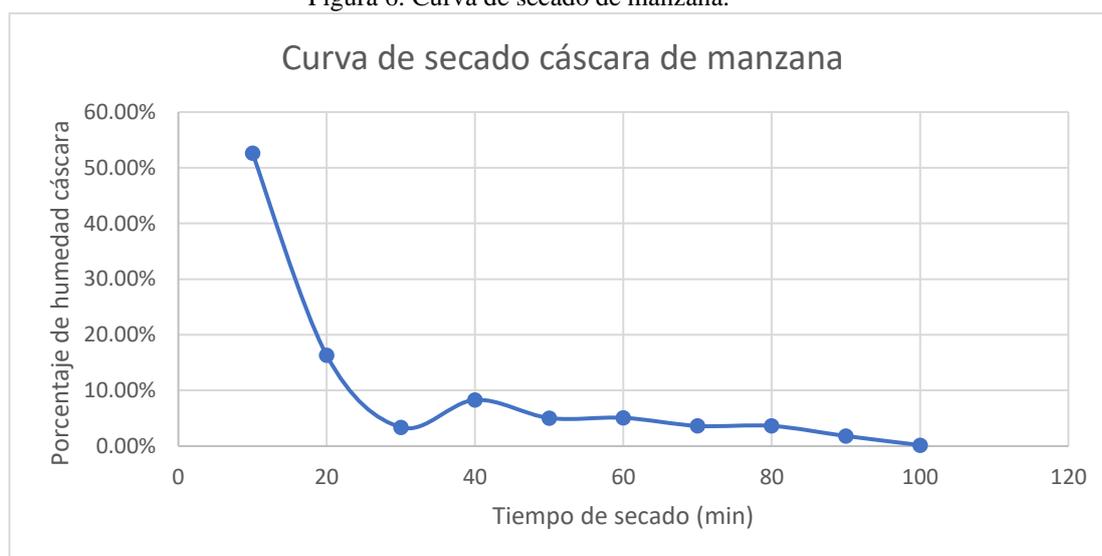


Tabla 30. Datos calculados del rendimiento y caracterización de pectina extraída con ácido clorhídrico.

Corrida	Rendimiento (m/m)	Peso equivalente	% de metoxilo	Alcalinidad	% AUA	Grado de esterificación
1	9.00% ± 1.004%	1000.0 ± 250.1	8.0600 ± 2.0150	6.338 ± 2.662	47.52 ± 11.90	96.30% ± 24.15%
2	9.00% ± 1.004%	1333.3 ± 333.4	8.0600 ± 2.0150	6.436 ± 2.663	47.08 ± 11.79	97.20% ± 24.38%
3	8.00% ± 1.003%	1333.3 ± 333.4	8.1375 ± 2.0344	6.737 ± 2.812	47.52 ± 11.90	97.22% ± 24.38%

*Los valores de esta Tabla fueron obtenidos con los cálculos del 5 al 10.

Tabla 31. Datos calculados del rendimiento y caracterización de pectina extraída con ácido sulfúrico.

Corrida	Rendimiento (m/m)	Peso equivalente	% de metoxilo	Alcalinidad	% AUA	Grado de esterificación
1	9.00% ± 1.004%	666.7 ± 166.7	7.440 ± 1.860	4.560 ± 1.960	44.88 ± 11.24	94.12% ± 23.60%
2	9.00% ± 1.004%	571.4 ± 142.9	5.425 ± 1.356	4.200 ± 1.564	33.88 ± 8.478	90.91% ± 22.78%
3	11.00% ± 1.006%	666.7 ± 166.7	8.603 ± 2.151	4.286 ± 0.8630	51.48 ± 12.80	94.87% ± 23.80%

*Los valores de esta Tabla fueron obtenidos con los cálculos del 5 al 10.

Tabla 32. Datos calculados del rendimiento y caracterización de pectina extraída con ácido fosfórico.

Corrida	Rendimiento (m/m)	Peso equivalente	% de metoxilo	Alcalinidad	% AUA	Grado de esterificación
1	9.00 % ± 1.004%	444.4 ± 111.1	7.983 ± 1.996	5.385 ± 3.464	49.28 ± 12.345	91.96 ± 23.068
2	8.00 % 1.003%	444.4 ± 111.1	7.595 ± 1.899	4.748 ± 3.672	47.08 ± 11.79	91.59 ± 22.97
3	8.00 % 1.003%	400.4 ± 100.0	7.673 ± 1.918	4.865 ± 3.443	47.96 ± 12.013	90.83 ± 22.78

*Los valores de esta Tabla fueron obtenidos con los cálculos del 5 al 10.

Tabla 33. Análisis estadístico para la extracción de pectina con ácido clorhídrico.

Análisis	Media	Desviación Estándar	Coefficiente de variación	Intervalo de Confianza	Intervalo superior	Intervalo inferior
Rendimiento (m/m)	8.667% ± 1.739%	0.005774	6.662%	0.006533	9.320%	8.0133%
Peso equivalente	1222 ± 533.64	192.5	15.75%	217.8	1440.0	1004.4
% de metoxilo	8.0858 ± 3.501	0.04474	0.5534%	0.05063	8.136	8.0352
Alcalinidad	6.504 ± 4.699	0.21	3.20%	0.24	6.7	6.27
%AUA	47.37 ± 20.55	0.2540	0.5362%	0.2875	47.66	47.086
% Grado	96.90 ± 24.30	0.5272	0.5441%	0.5966	97.50	96.31

*Los valores de esta Tabla fueron obtenidos con los cálculos del 11 al 14.

Tabla 34. Análisis estadístico para la extracción de pectina con ácido sulfúrico.

Análisis	Media	Desviación Estándar	Coefficiente de variación	Intervalo de Confianza	Intervalo superior	Intervalo inferior
Rendimiento (m/m)	9.666% ± 9.67%	0.01154	11.94%	0.01306	10.97%	8.360%
Peso equivalente	634.9 ± 257.6	54.99	8.660%	62.22	697.1	572.7
% de metoxilo	7.156 ± 3.150	1.608	22.47%	1.819	8.975	5.337
Alcalinidad	4.349 ± 2.659	0.1881	4.324%	0.2128	4.561	4.136
%AUA	43.41 ± 19.09	8.891	20.48%	10.061	53.47	33.35
% Grado	93.30 ± 23.30	2.104	2.255%	2.381	95.68	90.92

*Los valores de esta Tabla fueron obtenidos con los cálculos del 11 al 14.

Tabla 35. Análisis estadístico para la extracción de pectina con ácido fosfórico.

Análisis	Media	Desviación Estándar	Coefficiente de variación	Intervalo de Confianza	Intervalo superior	Intervalo inferior
Rendimiento (m/m)	8.333% ± 1.738%	0.00577	6.93%	0.00653	8.99%	7.680%
Peso equivalente	429.6 ± 186.26	25.66	5.973%	29.04	458.7	400.6
% de metoxilo	7.750 ± 3.357	0.205	2.65%	0.232	7.982	7.518
Alcalinidad	4.999 ± 3.713	0.3388	6.777%	0.3834	5.383	4.616
%AUA	48.11 ± 20.87	1.107	2.30%	1.253	49.36	46.85
% Grado	91.46 ± 22.94	0.580	0.634%	0.657	92.12	90.80

*Los valores de esta Tabla fueron obtenidos con los cálculos del 11 al 14.

Tabla 36. Razón B/C para análisis costo – beneficio a escala laboratorio para cada ácido.

Factor	Beneficio Pectina		
	HCl (0.5 M)	H2SO4 (0.05 M)	H3PO4 (1.00 M)
Precio pectina por oz	Q 29.44	Q 29.44	Q 29.44
Producción por corrida (oz)	0.03069	0.03527	0.02822
Ingresos por corrida	Q 0.9035	Q 1.0385	Q 0.8308
Razón B/C	0.004920	0.005600	0.004560

*Los datos del precio por pectina, se tomaron de un promedio en base a mercado en internet, este se multiplicó por lo obtenido en las tres corridas de ácido sulfúrico.

E. ANÁLISIS DE ERROR

Cálculo 11. Media del rendimiento de extracción de pectina con ácido clorhídrico.

$$\mu = \frac{9.00\% + 9.00\% + 11.00\%}{3} = 6.662\%$$

*Este cálculo se realizó para poder determinar la media de los rendimientos, pesos equivalentes, % de metoxilo, alcalinidad, % AUA y grado de esterificación de la pectina extraída con los tres ácidos.

Cálculo 12. Desviación estándar del rendimiento de extracción de pectina con ácido clorhídrico.

$$\sigma = \sqrt{\frac{(8.667 - 9.000)^2 + (8.667 - 9.000)^2 + (8.667 - 9.000)^2}{3}} = 0.005774$$

*Este cálculo se realizó para poder determinar la desviación estándar de los rendimientos, pesos equivalentes, % de metoxilo, alcalinidad, % AUA y grado de esterificación de la pectina extraída con los tres ácidos.

Cálculo 13. Intervalo de confianza del rendimiento de extracción de pectina con ácido clorhídrico.

$$I.C. = 8.667 \pm 0.95 * \frac{0.005774}{\sqrt{3}} = (9.320 - 8.0133)$$

*Este cálculo se realizó para poder determinar el intervalo de confianza de los rendimientos, pesos equivalentes, % de metoxilo, alcalinidad, % AUA y grado de esterificación de la pectina extraída con los tres ácidos.

Cálculo 14. Coeficiente de variación del rendimiento de extracción de pectina con ácido clorhídrico.

$$CV = \frac{0.005774}{8.667} * 100 = 6.662\%$$

*Este cálculo se realizó para poder determinar el coeficiente de variación de los rendimientos, pesos equivalentes, % de metoxilo, alcalinidad, % AUA y grado de esterificación de la pectina extraída con los tres ácidos.

Cálculo 15. Propagación de error del rendimiento en la extracción con ácido clorhídrico.

$$S_y = 9.000\% * \sqrt{\left(\frac{0.1}{10.00}\right)^2 + \left(\frac{0.1}{0.9}\right)^2} = 1.004\%$$

*Este cálculo se realizó para obtener la incertidumbre de los rendimientos en cada extracción, el mismo cálculo se llevó a cabo para cada extracción.

Cálculo 16. Propagación de error de la Normalidad de la solución de hidróxido de sodio 0.1 N.

$$S_y = 0.1 * \sqrt{\left(\frac{0.01}{0.1}\right)^2 + \left(\frac{0.00015}{0.250}\right)^2} = 0.01$$

*Este cálculo se realizó para la solución empleada en las titulaciones de la caracterización de pectina.

Cálculo 17. Propagación de error del peso equivalente en la extracción con ácido clorhídrico.

$$S_y = 0.04 * \sqrt{\left(\frac{0.1}{0.4}\right)^2 + \left(\frac{0.01}{0.1}\right)^2} = 0.0116$$

$$S_y = 1000.00 * \sqrt{\left(\frac{0.1}{0.6}\right)^2 + \left(\frac{0.01}{0.1}\right)^2} = 250.01$$

*Este cálculo se realizó para obtener la incertidumbre de los pesos equivalentes en cada extracción. Se observa en el cálculo 6 que consta de una multiplicación y división, por lo que se calcula primero la incertidumbre de las multiplicaciones y luego de la división.

Cálculo 18. Propagación de error del % de metoxilo en la extracción de ácido clorhídrico.

$$S_y = 1.04 * \sqrt{\left(\frac{0.01}{0.1}\right)^2 + \left(\frac{0.1}{10.4}\right)^2} = 0.1045$$

$$S_y = 8.06\% * \sqrt{\left(\frac{0.1045}{1.04}\right)^2 + \left(\frac{0.1}{0.4}\right)^2} = 2.0150\%$$

*Este cálculo se realizó para obtener la incertidumbre de los % de metoxilo en cada extracción. Se observa en el cálculo 7 que consta de una multiplicación y división, por lo que se calcula primero la incertidumbre de las multiplicaciones y luego de la división.

Cálculo 19. Propagación de error de la alcalinidad en la extracción de ácido clorhídrico.

$$S_y = 3 * \sqrt{(0.1)^2 + (0.1)^2} = 0.1414$$

$$S_y = 1800 * \sqrt{\left(\frac{0.1414}{3}\right)^2 + \left(\frac{0.01}{0.1}\right)^2} = 6.8684$$

$$S_y = 6.338 * \sqrt{\left(\frac{6.8684}{1800}\right)^2 + \left(\frac{0.01}{0.1}\right)^2 + \left(\frac{0.284}{0.1}\right)^2} = 2.6620$$

*Este cálculo se realizó para obtener la incertidumbre de los % de metoxilo en cada extracción. Se observa en el cálculo 8 que consta de una resta, multiplicación y división, por lo que se calcula primero la incertidumbre de las restas, multiplicaciones y luego de la división.

Cálculo 20. Propagación de error del % AUA en la extracción de ácido clorhídrico.

$$S_y = 3 * \sqrt{(0.1)^2 + (0.1)^2} = 0.1414$$

$$S_y = 190.08 * \sqrt{\left(\frac{0.1414}{10.8}\right)^2 + \left(\frac{0.01}{0.1}\right)^2} = 2.489$$

$$S_y = 47.52 * \sqrt{\left(\frac{2.489}{190.08}\right)^2 + \left(\frac{0.1}{0.4}\right)^2} = 11.90$$

*Este cálculo se realizó para obtener la incertidumbre de los % AUA en cada extracción. Se observa en el cálculo 9 que consta de una suma, multiplicación y división, por lo que se calcula primero la incertidumbre de las sumas, multiplicaciones y luego de la división.

Cálculo 21. Propagación de error del Grado de esterificación en la extracción de ácido clorhídrico.

$$S_y = 96.30 * \sqrt{\left(\frac{0.1045}{8.0600}\right)^2 + \left(\frac{11.90}{47.52}\right)^2} = 24.15$$

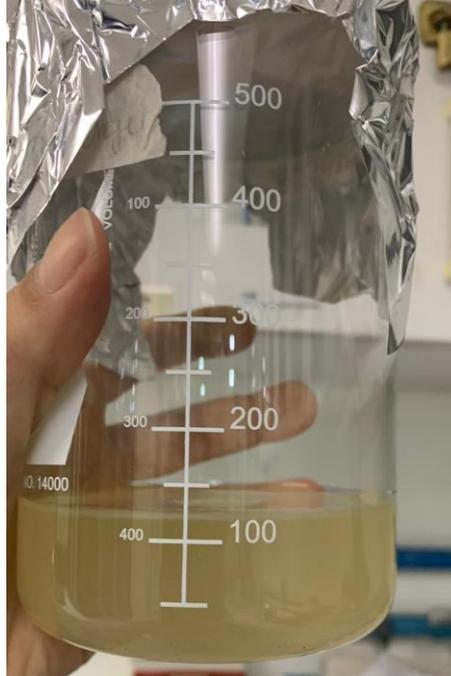
*Este cálculo se realizó para obtener la incertidumbre del grado de esterificación en cada extracción. Se calcula a partir de las incertidumbres del cálculo 18 y 20.

F. IMÁGENES DE EXPERIMENTACIÓN

Ilustración 9. Cáscara de manzana seca y triturada.



Ilustración 10. Solución filtrada después de extracción.



*Se muestra la solución obtenida que contiene pectina luego de la extracción por hidrólisis.

Ilustración 11. Desechos de cáscara de manzana luego de la filtración.



Ilustración 12. Pectina precipitada.



*Se muestra la pectina luego de precipitarse por 12 horas a una temperatura de 7 °C.

Ilustración 13. Pectina seca y triturada.



*Se muestra la pectina luego de ser secada por 48 horas en un secador a 60 °C.

Ilustración 14. Ficha técnica pectina extraída con los 3 ácidos.

Ficha Técnica Pectina					
Producto	Pectina de cáscara de manzana verde				
Descripción	Pectina de bajo metoxilo, extraída de cáscara de residuos de cáscara de manzana verde con soluciones de HCl (0.5 M),				
País de origen	Guatemala				
Presentación	0.870 - 1.00 g				
Apariencia	Polvo beige				
Aplicaciones	Estabilización de emulsiones y espesar productos.				
Especificaciones					
	Peso equivalente (mg/meq)	% de metoxilo	Alcalinidad (%)	% AUA	% GE
HCl (0.5 M)	1222	8.086	6.50	47.4	96.9
H₂SO₄ (0.05 M)	635	7.16	4.35	43.4	93.3
H₃PO₄ (1.00 M)	430	7.75	5.00	48.1	91.5
Almacenaje	Condiciones frescas y secas.				

XIII. GLOSARIO

Ácido galacturónico: tipo de ácido urónico presente como polímero en las pectinas, brindándoles estructura (Venkatanagaraju, E., Bharathi, N., Sindhuja, R., Chowdhury, R., Sreelekha, Y., 2020).

Hidrólisis ácida: descomposición de una sustancia compleja a una más simple mediante la adición de agua en presencia de un ácido. El ácido actúa como catalizador al proporcionar iones de hidrógeno que pueden romper enlaces químicos (Robledo, V. & Castro, L., 2019).

Homogalacturonano (HGA): cadena lineal de ácido galacturónico. Principal sustancia que compone la pectina que brinda las propiedades de gelificación o capacidad de retención de agua (Venkatanagaraju, E., Bharathi, N., Sindhuja, R., Chowdhury, R., Sreelekha, Y., 2020).

Pectina: polisacárido complejo presente en la pared celular de plantas. Considerado una fibra soluble (Venkatanagaraju, E., Bharathi, N., Sindhuja, R., Chowdhury, R., Sreelekha, Y., 2020).

Pectina de bajo metoxilo: posee baja proporción de grupos metoxilo (CH₃). Capacidad para formar geles firmes alta.

Pectina de alto metoxilo: posee alta proporción de grupos metoxilo (CH₃). Capacidad de formar geles firmes disminuye (Robledo, V. & Castro, L., 2019).

Quercetina: sustancia química natural y vegetal con propiedades antioxidantes y antiinflamatorias (Harvard T.H. Chan School of Public Health, 2023).

Ramnogalacturonano – I (RG-I): polisacárido abundante en paredes celulares de tejidos en frutas que brindan una estructura ramificada. Compuesto principalmente por unidades de galactosa y ramnosa (Venkatanagaraju, E., Bharathi, N., Sindhuja, R., Chowdhury, R., Sreelekha, Y., 2020).

Ramnogalacturonano – II (RG-II): estructura compleja que forma parte de las paredes celulares en plantas, siendo componente esencial en la pectina. Uno de los principales tipos de pectina que brinda propiedades de integridad. Compuesto cadenas de azúcares como ramnosa y galacturónico (Venkatanagaraju, E., Bharathi, N., Sindhuja, R., Chowdhury, R., Sreelekha, Y., 2020).