

# **INTRODUCCIÓN**

## ANTECEDENTES

### **Pectina**

La pectina es un polisacárido, el cual se encuentra presente de forma natural en la pared celular de todas las plantas superiores y es usada por la industria alimenticia, cosmética y farmacéutica por sus propiedades gelatinizantes, espesantes y estabilizantes.

La pectina tiene una larga historia. En tiempos antiguos las frutas ricas en pectina, como las manzanas y los membrillos, se usaban con fines medicinales y para hacer jaleas y mermeladas, en 1750 se publicaron recetas de gelatina de manzana, grosella y membrillo en el "London Housewife's Family Companion ", luego en el año 1790, Vauquelin señala que la pectina es una sustancia soluble en el zumo de fruta.

No fue hasta el año 1825 cuando Henri Braconnot, un químico francés, fue el primero en aislar la pectina del material vegetal. Descubrió que la pectina podía extraerse de las manzanas y usarse para hacer un gel. Braconnot llamó a la sustancia "ácido péctico" porque pensó que era un ácido.

En el año 1859 Thomas B. Osborne, un químico estadounidense, identificó la pectina como un polisacárido y publicó sus hallazgos en el American Journal of Science.

La primera producción comercial de pectina se inició el año 1908 en Alemania utilizando manzanas como fuente principal, posteriormente un químico alemán llamado Julius Spitzer desarrolló un método para extraer pectina de las cáscaras de cítricos, que se convirtió en una fuente importante de producción de pectina, posteriormente el químico estadounidense Victor K. LaMer descubrió que la pectina podía usarse para estabilizar emulsiones. Descubrió que la pectina podía ayudar a que el aceite y el agua se mezclaran y evitar la separación.

En la década de 1920 el uso de pectina en la industria alimentaria siguió creciendo y se desarrollaron nuevas técnicas para extraer pectina. Uno de los métodos más populares fue el uso de ácido para descomponer la pectina en el material vegetal.

Para la década de 1930, la pectina se volvió ampliamente utilizada como agente gelificante en la producción de mermeladas, jaleas y otras conservas de frutas. También se usó en la producción de dulces a base de frutas, como masticables de frutas y gomitas.

En la década de 1940, el ejército de los Estados Unidos usó pectina como estabilizador de alimentos durante la Segunda Guerra Mundial. Se añadía pectina a las frutas y verduras enlatadas para evitar que se echaran a perder, por lo que este país realizó una producción masiva de pectina.

Durante la década de 1950, se desarrollaron metodologías innovadoras para la extracción de pectina a partir de materias vegetales, destacando la incorporación de procesos enzimáticos. Estos avances no solo optimizaron la eficiencia de la producción, sino que también permitieron obtener un producto de calidad superior.

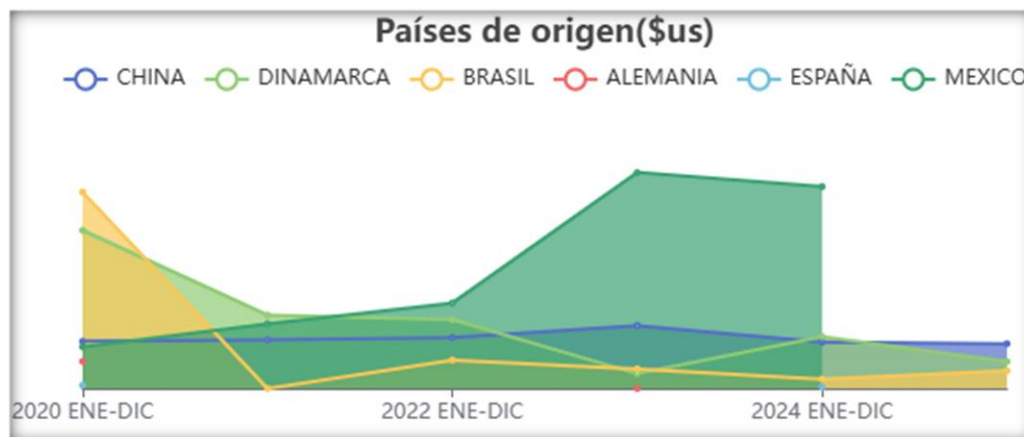
En la década de los 2000 se desarrollaron nuevos tipos de pectina, incluida la pectina con alto contenido de metoxilo y bajo contenido de metoxilo. Estas nuevas variedades de pectina permitieron un control aún mayor sobre la textura y la estabilidad de los productos alimenticios. La pectina ahora se usa en una amplia gama de productos alimenticios y bebidas, incluidos yogur, helados y productos horneados.

El mercado mundial de pectina está creciendo, se espera que el mercado mundial de pectina alcance los 1500 millones de dólares en los próximos años, impulsado por la creciente demanda de ingredientes alimentarios naturales y saludables. (Fuente: MarketsandMarkets). Europa es la región con la mayor participación en el mercado de la pectina, seguida de América del Norte.

En Bolivia industrias como; Compañía Industrial Azucarera San Aurelio S.A. – Ciasa, Pil Andina, Fabrica Cruceña de Levaduras S.A, Ferrari Ghezzi Ltda, Química Anders Ltda, Industrial Comercial América Ltda, Industrias Agrícolas de Bermejo S.A, Sameq SRL, Industrias De Pastas Alimenticias Del Sur S.A. – Inpasta, Ingenio Azucarero Guabirá S.A. - I.A.G. S.A, distribuidora Inalim, Ingredientes Esenciales S.R.L, Poplar Capital S.A, importan materias pécticas, pectinatos y pectatos.

Los mayores proveedores en los últimos años de este producto a nuestro país son; China, Dinamarca, Brasil y México.

**Figura 1 Materias pécticas, pectinatos y pectatos importadas de acuerdo al país de origen en Bolivia**



**Fuente:** INE Elaboración: MDPYEP-DAPRO

**Tabla 1. Importación materias pécticas, pectinatos y pectatos en Bolivia**

| Gestión | Volumen (TM) |
|---------|--------------|
| 2011    | 20           |
| 2012    | 13,71        |
| 2013    | 16,14        |
| 2014    | 33,67        |
| 2015    | 13,09        |
| 2016    | 11,69        |
| 2017    | 21,05        |
| 2018    | 7,4          |
| 2019    | 9,88         |
| 2020    | 20,74        |
| 2021    | 6,61         |
| 2022    | 7,51         |
| 2023    | 8,31         |
| 2024    | 8,42         |
| 2025    | 14,31        |

**Fuente:** INE, Elaboración DAPRO

### **Sandía (cáscara de sandía)**

La sandía (*Citrullus lanatus*) es una cucurbitacea, planta herbácea rastrera o planta trepadora caracterizada por ser un fruto grande y jugoso. La sandía constituye aproximadamente un 2% de semillas, un 30% de corteza y 68% de pulpa.

Es una de las frutas con más contenido de agua en su composición, lo que la convierte es un postre ideal o tentempié refrescante y con pocas calorías, aportando 30 calorías por cada 100 gramos.

El nutriente principal son los hidratos de carbono, concretamente azúcares simples, ya que la sandía contiene muy poca fibra. Es deficitaria en proteínas y grasas, estas últimas casi indetectables.

La sandía tiene su origen en el desierto de Kalahari, en el continente africano, donde aún hoy en día crece de forma silvestre. No obstante, existen evidencias arqueológicas de que se cultivaba en Egipto 3000 a.C, donde se expandió en las fértiles márgenes del río Nilo. Desde aquí, pasó a los países mediterráneos, Italia, Grecia o España.

Se pierden los cultivos con la decadencia del Imperio romano, pero los árabes la llevan de nuevo a España y de ahí, al resto de Europa. Las rutas comerciales entre árabes y chinos, hacen que se expanda su cultivo a China, de ahí a Japón y a India.

Los exploradores españoles y portugueses la llevaron a América, extendiendo su cultivo por todo el continente. Los principales productores de sandía en el mundo siguen siendo algunos de los primeros países que la cultivaron en Europa, como España, Italia o Grecia, así como China, Japón y Turquía.

Una patente de 1976 incluyó la cáscara de sandía como un producto no asimilable para su uso en la producción de un producto de pasta bajo en calorías (Blake et al. 1975). Huor (1979) informó que la pectina se extrajo de alto grado de la cáscara de sandía. Otro método para la extracción de pectina de la cáscara de sandía fue discutido por Crandall et al. (1981). Un proceso fue patentado en 1989 enumerar la cáscara de sandía como una posible fuente para la liberación de pectina del tejido utilizando microorganismos *Bacillus* (Sakai, 1989). El USDA ARS presentó una patente para

utilizar citrulina extraída de la corteza, un aminoácido que ayuda a eliminar el nitrógeno de la sangre para conversión a orina (Perkins, 2004, Pons, 2003). Se han realizado otras investigaciones sobre la utilización de la cáscara como ingrediente en productos que incluyen encurtidos, dulces, vadiyam, y queso (Madhuri et al., 2003, Kumar, 1985, Simonne et al., 2002).

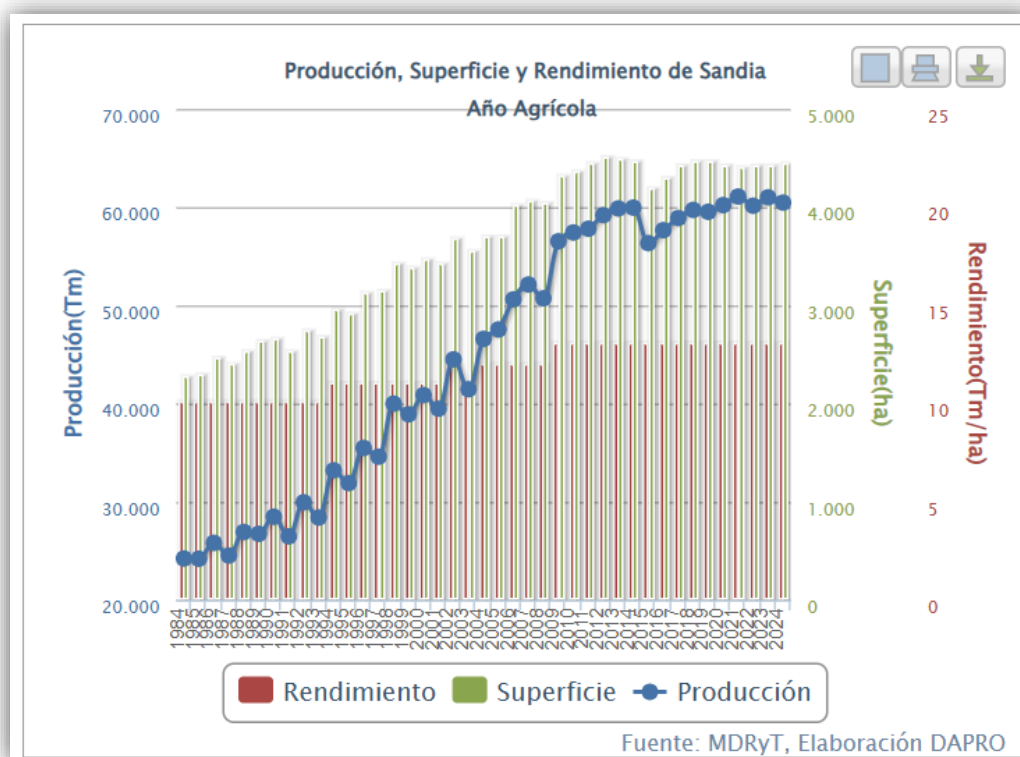
La sandía (*Citrullus lanatus*) es una de las frutas mundiales económicamente importantes con una producción mundial de 101 millones de toneladas en 2020. Actualmente crece en todos los continentes y en 122 países. La cáscara de la sandía es uno de los principales residuos sólidos que se desechan al medio ambiente. Más del 90% de los desechos de cáscara de sandía se vierten como residuo en el medio ambiente, lo que constituye un desafío ambiental. Alrededor de 36 millones de toneladas de cáscara de sandía se desecharon en el medio ambiente en 2013. La utilización de estos residuos es muy importante por su valor económico, así como por los problemas medioambientales. La sandía contiene carbohidratos, proteínas, grasas, minerales, vitaminas, etc. Los carbohidratos son el componente principal de la cáscara de la sandía; por lo tanto, puede usarse para la recuperación de compuestos valiosos como la pectina.

Bolivia produce sandía, con un volumen de producción que ha promediado alrededor de 58 mil toneladas métricas anuales durante las últimas décadas, El cultivo de sandía en Bolivia se concentra en la región oriental del país, particularmente en los departamentos de Santa Cruz y Cochabamba, seguido por Tarija que ocuparía el tercer puesto en producción de sandía.

**Tabla 2 Producción de Sandía en Bolivia**

| DEPARTAMENTO | PRODUCCIÓN(TM.) |        |        |        |        |        |        |        |        |        |
|--------------|-----------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
|              | 2015            | 2016   | 2017   | 2018   | 2019   | 2020   | 2021   | 2022   | 2023   | 2024   |
| CHUQUISACA   | 1.217           | 1.245  | 1.100  | 1.173  | 1.189  | 1.185  | 1.185  | 1.166  | 1.143  | 1.165  |
| LA PAZ       | 1.541           | 1.325  | 1.412  | 1.398  | 1.401  | 1.415  | 1.417  | 1.408  | 1.411  | 1.409  |
| COCHABAMBA   | 7.742           | 7.623  | 8.250  | 9.065  | 9.621  | 9.100  | 9.550  | 9.261  | 9.070  | 9.444  |
| TARIJA       | 5.090           | 5.274  | 5.409  | 5.342  | 5.524  | 5.367  | 5.442  | 5.417  | 5.411  | 5.410  |
| SANTA CRUZ   | 37.443          | 38.310 | 38.225 | 38.268 | 37.248 | 38.878 | 39.225 | 38.460 | 38.835 | 38.596 |
| BENI         | 2.660           | 3.223  | 3.821  | 3.781  | 3.876  | 3.593  | 3.570  | 3.745  | 4.027  | 3.744  |
| PANDO        | 619             | 643    | 665    | 675    | 648    | 664    | 676    | 666    | 1.076  | 686    |

**Fuente:** MDRyT, Elaboración DAPRO

**Figura 2 Producción, superficie y rendimiento de sandía por año Bolivia**

**Fuente:** MDRyT, Elaboración DAPRO

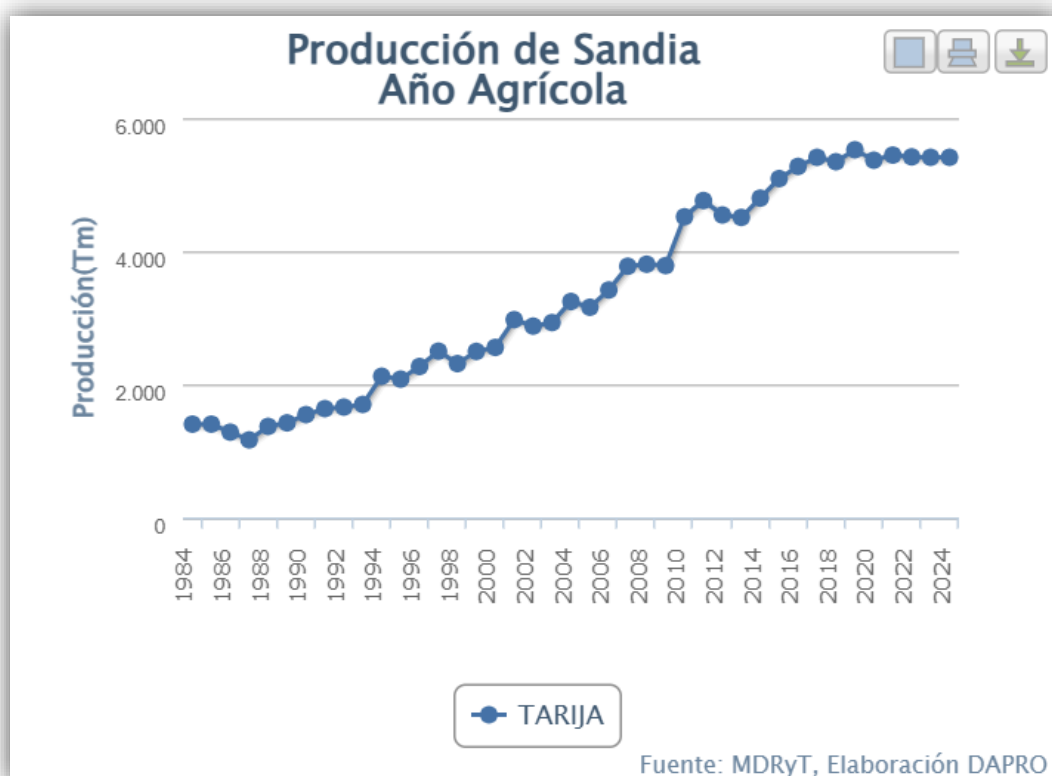
En el departamento de Tarija la producción de sandía en la última década tiene un promedio de 5 mil toneladas métricas, se cultivan mayormente en Villamontes y Yacuiba.

**Figura 3 Producción de sandía en municipios de Tarija**



**Fuente:** MDRyT, Elaboración DAPRO

**Figura 4 Producción de Sandía año agrícola en Tarija**



**Fuente:** MDRyT, Elaboración DAPRO

La pectina comercial se extrae generalmente de las cáscaras de cítricos (limón, lima, naranja), orujo de manzana y pulpa de remolacha azucarera. Actualmente, el 85,5% de la pectina en el mercado mundial se produce a partir de cáscaras de cítricos, el 14,0% a partir de pulpa de manzana y el 0,5% restante a partir de pulpa de remolacha azucarera. De las cáscaras de cítricos, los aportes de cáscaras de limón, lima y naranja son del 56%, 30% y 13%, respectivamente. Aunque estos residuos han servido como la principal fuente de pectina comercial, un aumento en la demanda mundial de pectina, la susceptibilidad de las plantas de cítricos a las enfermedades como el cancro, la mancha grasosa y la mancha negra y las aplicaciones emergentes como la utilización para biopolímeros, aplicaciones biomédicas y de suministro de fármacos. También se ha utilizado como adsorbente y como inhibidor de la corrosión verde, impulsan la necesidad de buscar fuentes alternativas.

La cáscara de sandía, un residuo abundante en Tarija, representa un costo ambiental y económico por su desaprovechamiento. La investigación propone su valorización como materia prima para la extracción de pectina, un insumo que actualmente es importado a un alto costo por las industrias alimentaria y farmacéuticas locales, se busca dar un valor a los residuos agroalimentarios que particularmente son desechados y no aprovechados.

## **OBJETIVOS**

### **OBJETIVO GENERAL**

Obtener pectina a partir de la cáscara de sandía (*Citrullus lanatus*) producida en el departamento de Tarija, como fuente alternativa a los cítricos.

### **OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

- Realizar la caracterización fisicoquímica, mediante análisis fisicoquímicos de la cáscara de sandía (*Citrullus lanatus*) utilizada como materia prima para la extracción de pectina.
- Ejecutar la fase experimental del proceso mediante el método de extracción seleccionado para obtener pectina a partir de cáscara de sandía (*Citrullus lanatus*).
- Emplear un diseño factorial con sus respectivos niveles y factores para optimizar el proceso de extracción de pectina, identificando las variables significativas y determinar los parámetros óptimos para la extracción.
- Realizar análisis fisicoquímicos correspondientes para la caracterización y evaluación de calidad de la pectina obtenida de la cáscara de sandía (*Citrullus lanatus*), de acuerdo con la normativa de referencia aplicable.
- Calcular el rendimiento del proceso experimental de obtención de pectina a partir de la cáscara de sandía (*Citrullus lanatus*).
- Determinar el costo de producción de pectina obtenida a partir de cáscara de sandía (*Citrullus lanatus*) a escala de laboratorio.

## **JUSTIFICACIÓN**

### **Justificación económica**

El mercado mundial de pectina está creciendo, impulsado por la creciente demanda de ingredientes alimentarios naturales y su incorporación en diferentes ámbitos.

Bolivia importa este producto lo que significa que existe demanda del mismo, la pectina tiene un valor elevado en el mercado, incorporar este producto en el mercado nacional, puede beneficiar a industrias de alimentos y farmacéuticas.

### **Justificación social**

El cultivo de sandía en territorio boliviano, así como en el departamento de Tarija en los últimos años se observa un crecimiento significativo. Actualmente, la cáscara de este fruto es considerada un subproducto sin valor comercial, sin embargo, la cáscara de sandía contiene altos niveles de pectina, la transformación de la cáscara en pectina un insumo de alta demanda en las industrias alimentaria y farmacéutica abre las puertas a la innovación empresarial. Su aprovechamiento no solo permitiría la obtención de este aditivo, sino que también incentivaría la creación de nuevos emprendimientos y empleos, otorgando así un valor agregado.

### **Justificación tecnológica**

La hidrólisis ácida es el método más usado para la obtención de pectina a partir de residuos alimentarios. Por lo tanto, los objetivos de este estudio es optimizar y caracterizar la extracción de pectina de la cáscara de sandía. Obteniendo datos referenciales del proceso y generando información técnica acerca del método, que ayude en el desarrollo de proyectos o futuros estudios que se realicen.

### **Justificación ambiental**

Las principales fuentes de extracción industrial de pectina son de cáscaras de cítricos y pulpa de manzana. Sin embargo, la pectina proveniente de desechos de procesos agroindustriales está generando gran interés debido a que su uso puede reducir el impacto ambiental que genera y dar valor agregado a la cadena productiva agroindustrial.

La cantidad de residuos de cascara de sandía generados en los hogares e industrias es significativa. La disposición adecuada de estos residuos es un problema para muchas personas, la falta de opciones para reutilizar estos residuos contribuye al desperdicio de recursos, por lo cual este estudio busca aprovechar estos residuos y darle un valor agregado. Se considerará el impacto ambiental de la obtención de pectina a partir de la cáscara de la sandía y apuntar a minimizar los desechos y el consumo de recursos.

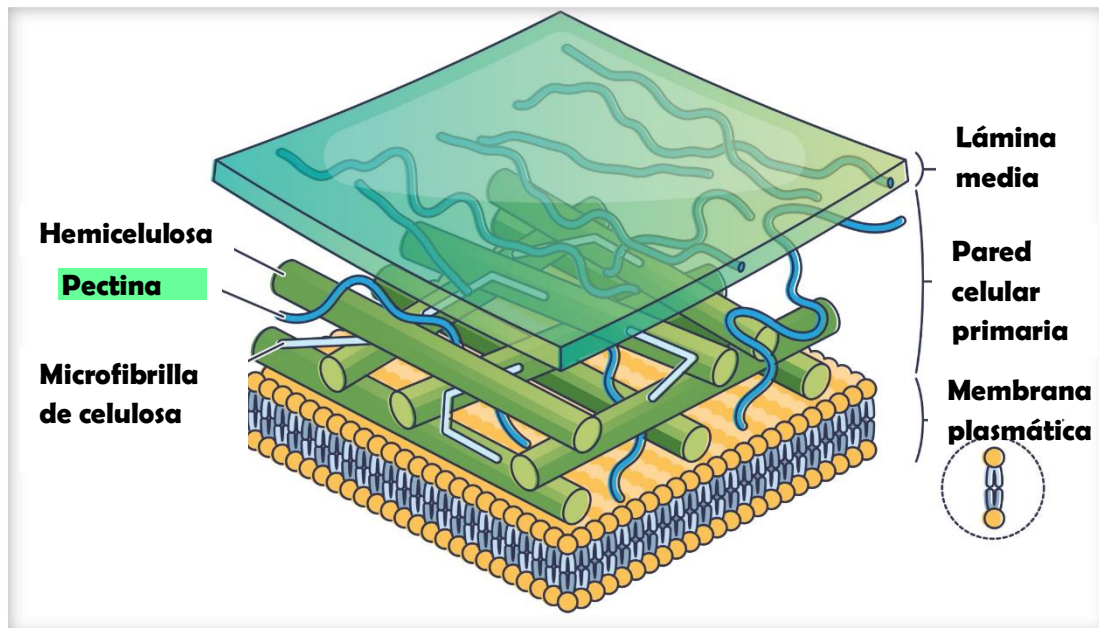
# **CAPÍTULO I**

## **MARCO TEÓRICO**

### 1.1. Descripción de la pectina

La pectina es un tipo de fibra soluble que se encuentra de forma natural en las paredes celulares de las plantas, especialmente en las frutas y verduras. Químicamente, es un heteropolisacárido, lo que significa que es un carbohidrato complejo formado por diferentes tipos de azúcares. El componente principal de la pectina es el ácido galacturónico, un derivado del azúcar galactosa.

**Figura 1-1 Ilustración de la Pectina en la Pared Celular**



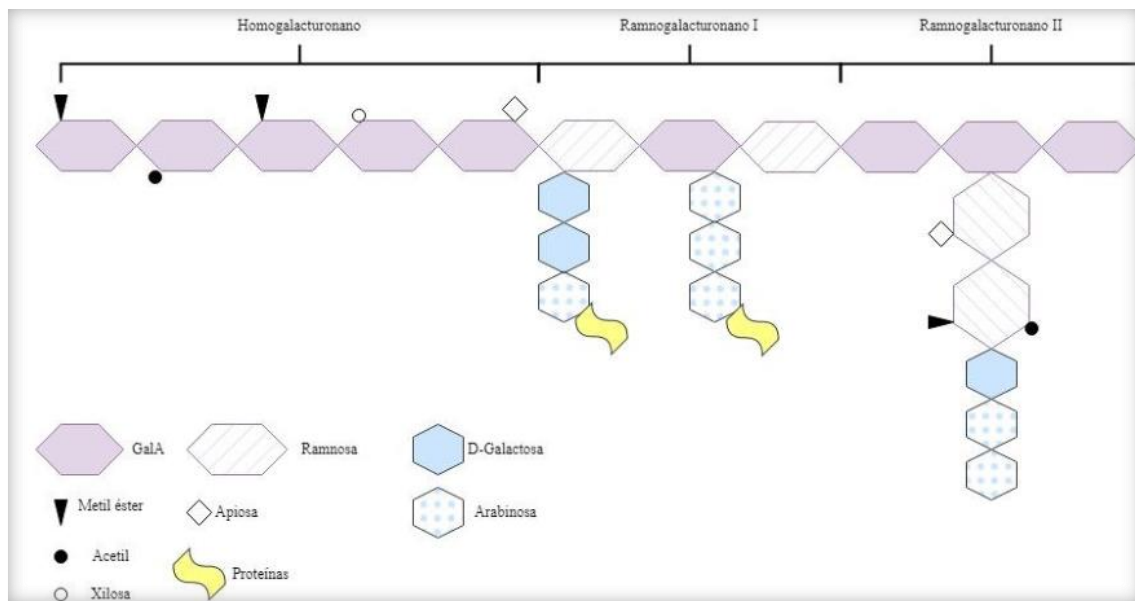
**Fuente:** Cosgrove, D. J. (2005)

La pectina está formada por tres dominios principales que están unidos covalentemente entre sí, homogalacturonano, ramnogalacturonano I (RG-I) y ramnogalacturonano II (RG-II). La característica dominante de la pectina consiste en una cadena lineal de unidades de ácido D -galacturónico unidas por  $\alpha$ -(1,4) conocidas como dominio de homogalacturonano o región suave de pectina. La segunda característica fundamental de la estructura de la pectina es la presencia recurrente de residuos de ramnosilo. Su estructura incluye otros componentes como los azúcares neutros: arabinosa, galactosa, ramnosa, xilosa cantidades menores de algunos otros azúcares, que pueden reaccionar con el metanol para formar ésteres metílicos o neutralizados por una base. Estos

componentes se ramifican del esqueleto homogalacturónico como cabellos y, por esta razón, estas estructuras altamente ramificadas se denominan "regiones peludas" de la pectina.

Las unidades de D-galacturonopiranosilo enlazadas a  $\alpha$ -(1,4) pueden interrumpirse mediante la inserción de L enlazadas a A-(1,2)-unidades de ramnopiranosilo que dan un ramnogalacturonano de tipo I al que generalmente se unen cadenas laterales que contienen arabinosa y galactosa. Finalmente, el ramnogalacturonano II, que consiste en un oligosacárido de homogalacturonano altamente ramificado, es un elemento menor, aunque crucial de la pectina. Se sabe mucho sobre la estructura de los diferentes dominios de pectina, aún es un desafío comprender la heterogeneidad intra e intermolecular de las macromoléculas de pectina y la forma en que los dominios de pectina se unen entre sí.

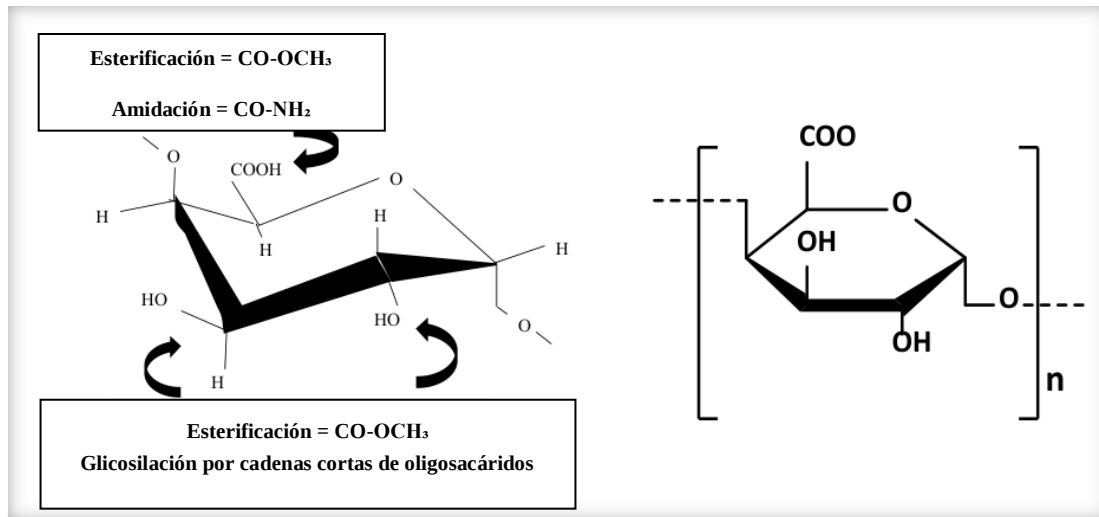
**Figura 1-2 Estructura general de la pectina.**



**Fuente:** Belkheiri et al. 2021

La base o "columna vertebral" de la pectina está formada por una larga cadena de unidades de ácido D-galacturónico, que es un derivado de la galactosa. Estas unidades se unen entre sí para formar una cadena larga y lineal.

**Figura 1-3 Sustitución del ácido galacturónico**



**Fuente:** Appl. Sci. 2021, 11, 6596.

La esterificación de la pectina es el proceso químico que transforma los grupos ácidos de su estructura en ésteres. Este proceso ocurre de manera natural dentro de la planta y es fundamental para definir las propiedades de la pectina, como su capacidad para formar geles.

El proceso se centra en el componente principal de la pectina: la cadena de ácido D-galacturónico. Cada una de estas unidades posee un grupo funcional llamado ácido carboxílico. Durante la esterificación, este grupo ácido reacciona con un grupo metilo para formar un éster metílico. Esencialmente, el hidrógeno del grupo ácido es reemplazado por un grupo metilo.

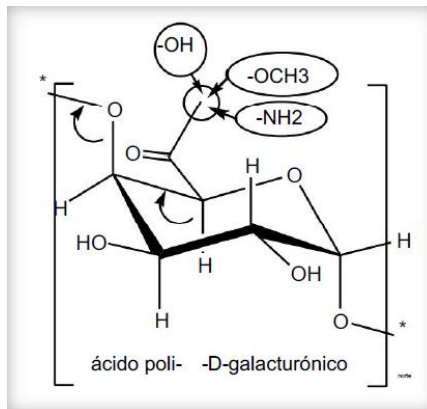
En la naturaleza, esta reacción no ocurre al azar. Es un proceso biológico finamente controlado que sucede dentro de las células de la planta mientras la pectina se está construyendo.

**Ubicación:** La esterificación se lleva a cabo en el Aparato de Golgi, que es como la "fábrica" de ensamblaje y modificación de moléculas complejas en la célula vegetal.

**La Enzima:** El proceso es catalizado por una familia de enzimas llamadas pectinas metiltransferasas (PMTs). Estas enzimas actúan como catalizadores biológicos, acelerando la reacción.

**El Donante de Metilo:** La célula no utiliza metanol libre. En su lugar, usa una molécula especializada llamada S-Adenosil metionina (SAM). La SAM es conocida como el "donante universal de metilos" en la biología y transporta de forma segura el grupo metilo a la enzima para que esta lo transfiera a la cadena de pectina (Mohnen, D. 2008).

**Figura 1-4 Formas naturales de residuos de ácido D-galacturónico donde las flechas indican una posible eliminación  $\beta$  en forma de éster**



**Fuente:** Hanan M.A. Al-Sayed

### **Impacto de la Estructura**

**Forma no esterificada (Ácido Galacturónico):** En la forma no esterificada, la estructura presenta grupos carboxilo libres que, en condiciones de pH neutro, adquieren una carga negativa. Estas cargas generan una repulsión electrostática entre sí, lo cual provoca que las cadenas de pectina se mantengan separadas y dispersas.

**Forma esterificada (Galacturonato de Metilo):** Dichos grupos ácidos son sustituidos por grupos metoxilo, los cuales son eléctricamente neutros. Esta ausencia de carga elimina la repulsión, permitiendo que las cadenas poliméricas se aproximen y formen una red tridimensional (gel) mediante interacciones hidrofóbicas; este fenómeno se ve

favorecido cuando una alta concentración de azúcar reduce la disponibilidad de agua en el medio.

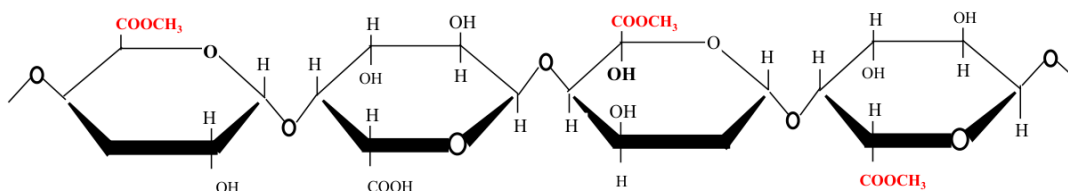
### 1.1.1. Clases de pectina

La pectina se puede clasificar según diversos aspectos, uno de los más importantes es la cantidad de grupos carboxílicos esterificados, resultando dos clases: Pectinas de alto índice metoxilo HM (High metoxil), pectinas de bajo metoxilo LM (Low metoxil) y finalmente las pectinas amidadas, que son un subconjunto de bajo metoxilo.

#### 1.1.1.1. Pectinas de alto índice metoxilo HM

Las pectinas HM se caracterizan por tener más del 50% de los grupos carboxílicos esterificados, se usan especialmente para formar geles en productos con alto contenido de azúcar (confituras). A su vez, las pectinas HM se subdividen en tres clases, gelificación rápida, medio rápida y lenta.

**Figura 1-5 Estructura de Pectina HM (Alto metoxilo)**



**Fuente:** Appl. Sci. 2021, 11, 6596.

**Tabla I-1 Tipos de pectina HM y características respectivas.**

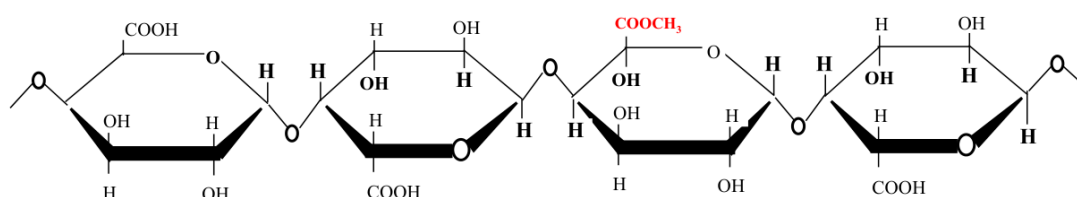
| Tipo de pectina           | Grupos carboxílicos Esterificados | T °C gelificación  | Tiempo gelificación |
|---------------------------|-----------------------------------|--------------------|---------------------|
| Gelificación Rápida       | >68%                              | Relativamente alta | Corto               |
| Gelificación medio Rápida | >60% Y <68%                       | Media              | Medio               |
| Gelificación Lenta        | <60%                              | Baja               | Largo               |

**Fuente:** Elaboración propia

#### 1.1.1.2. Pectinas de bajo metoxilo LM

Este tipo de pectinas tienen menos del 50% de grupos carboxílicos esterificados, se usan principalmente en mermeladas, jaleas y alimentos con bajo contenido de azúcar, adicionalmente estos alimentos son de pH alto, por encima de 3.4. La formación de geles con este tipo de pectinas es más compleja en comparación con las pectinas HM ya que es necesario la presencia de iones de calcio, esta cantidad de calcio varía según la cantidad de grupos esterificados presentes.

**Figura 1-6 Estructura de Pectina LM (Bajo metoxilo)**

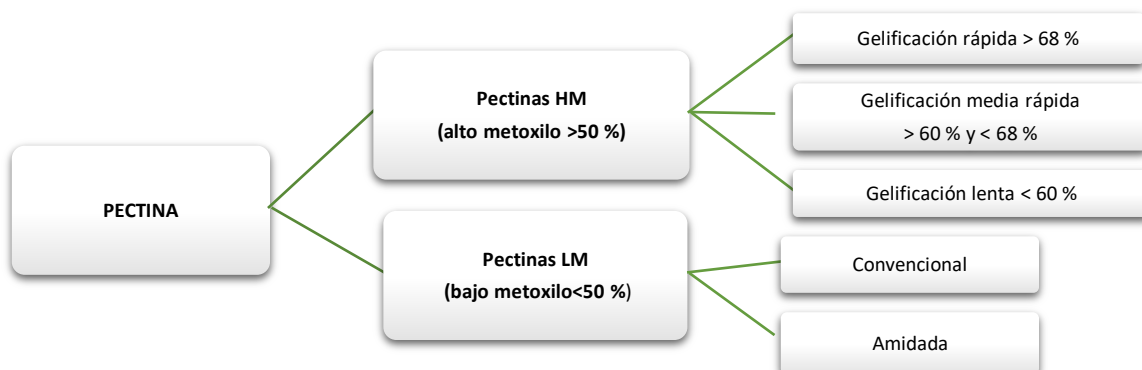


**Fuente:** Appl. Sci. 2021, 11, 6596.

### 1.1.1.3. Pectinas Amidadas

La pectina amidada se obtiene a partir de pectinas HM cuando se utiliza amoníaco en el proceso de desesterificación alcalina. Durante este proceso, algunos de los grupos carboxilo se convierten en la amida ácida. Pequeñas cantidades de pectina amidada se pueden encontrar naturalmente en la remolacha azucarera y algunas otras fuentes.

**Figura 1-7 Clasificación de pectinas**



**Fuente:** Elaboración propia

### 1.1.2. Clasificación de las sustancias pécticas

**Protopectinas:** Se definen como las sustancias precursoras de la pectina, insolubles en agua. Se encuentran en mayor proporción en los tejidos de frutos inmaduros o verdes, aportando rigidez a la estructura celular. A medida que el fruto madura, la protopectina se hidroliza transformándose en pectina soluble.

**Ácidos pectínicos:** Son polímeros del ácido galacturónico que presentan una esterificación parcial en sus grupos carboxilo. Estos compuestos poseen la capacidad de formar geles si se establecen las condiciones adecuadas de pH y concentración de sólidos solubles (azúcar). A las sales derivadas de estos ácidos se les denomina pectinatos.

**Pectinas:** Término general utilizado para designar a los ácidos pectínicos que son solubles en agua caliente y poseen un contenido variable de éster metílico. Su característica funcional más relevante es la capacidad de formar geles en presencia de suficientes sólidos solubles, ácidos o iones polivalentes.

**Ácidos pécticos:** Son cadenas poliméricas que no poseen grupos carboxílicos esterificados (están totalmente desesterificados). Sus sales se denominan pectatos; estas reaccionan fácilmente con iones de calcio presentes en las células o el medio, formando compuestos insolubles. En la industria de jugos y néctares, esta reacción es crítica pues provoca precipitados visibles o la separación de fases (fenómeno conocido como abanderamiento).

### 1.1.3. Aplicaciones

La pectina se puede utilizar para numerosas aplicaciones, principalmente porque es un producto seguro, no tóxico, con bajo costo de producción y alta disponibilidad; además, sus funcionalidades están influenciadas por su estructura. En este sentido, a continuación, se describen temas detallados sobre la aplicación de la pectina.

#### 1.1.3.1. La pectina en la industria alimentaria

La pectina se utiliza generalmente en la industria alimentaria como agente gelificante, espesante, estabilizante y emulsionante. La pectina forma hidrogeles y, por lo tanto, se

utiliza ampliamente en alimentos hidratados y viscosos. Popular para su uso en mermeladas, zumos de frutas, postres, productos lácteos y jaleas, por lo que las propiedades gelificantes de la pectina son bien conocidas. El uso como agente estabilizador en dispersiones coloidales varía entre emulsiones, alimentos fortificados con antioxidantes, bebidas lácteas acidificadas y bebidas de frutas con alto contenido proteico.

Otra aplicación importante de la pectina en la industria alimentaria es la producción de materiales de envasado y recubrimientos comestibles. Su capacidad para formar geles y películas explica su uso en el desarrollo de envases alimentarios biodegradables o recubrimientos comestibles para la conservación de alimentos.

La industria alimentaria se enfrenta a muchos desafíos para mantener las propiedades de los alimentos procesados. La aplicación de películas a base de pectina, que se definen como envases “verdes” debido a su renovabilidad y sostenibilidad, puede destacarse como un método alternativo para preservar dichas propiedades. Las películas a base de pectina presentan algunas características positivas, tales como: su biodegradabilidad, producción de bajo coste, excelentes propiedades mecánicas, posibilidad de extender la vida útil del alimento envasado y su viabilidad para producir películas independientes o incorporadas con compuestos activos, o incluso combinadas con otros polímeros en mezclas o bicapas.

#### **1.1.3.2. La pectina como producto biomédico**

Como un dominio innovador de la tecnología de biomateriales, los estudios citan a la pectina como un polisacárido con efectos prometedores para la salud, que se está explorando para la administración de fármacos, la administración de genes, la cicatrización de heridas, la reducción del colesterol, la ingeniería de tejidos, la fabricación de membranas utilizadas en el desarrollo de lentes de contacto, córneas artificiales, catéteres, actividades anticancerígenas, y como vehículo mucoso y gastrointestinal para la administración de fármacos y como vehículo celular del tejido óseo.

Los beneficios para la salud de este polisacárido provienen de su composición y la presencia de dominios estructurales específicos, con propiedades bioactivas. En cuanto a los mecanismos antitumorales, se asocian con su actividad probiótica, mejora inmunológica, inhibición del crecimiento tumoral y potencial antimutagénico.

Debido a la capacidad de la pectina para formar geles en medios ácidos, se observa una mejora en el tiempo de contacto de los medicamentos para la obesidad y los tratamientos oculares. La capacidad de los geles para hincharse en condiciones ácidas puede beneficiar los tratamientos para la reducción de peso y la obesidad.

En algunas aplicaciones de la pectina como agente encapsulante en la administración de fármacos, se utilizan pectinas HM debido a que tienen mayor peso molecular y menor solubilidad en agua. Sin embargo, al encapsular fármacos con pectina HM, puede ocurrir una liberación temprana y erosión del recubrimiento. En este sentido, la pectina LM ha sido utilizada con mayor frecuencia (Hanan M.A. Al-Sayed). Estudios que utilizan pectina como producto biomédico, se detallan en Anexos.

#### **1.1.3.3. La pectina en el tratamiento del cáncer**

En 2020, se registraron 19,3 millones de casos de tumores a nivel mundial, lo que provocó 10 millones de muertes. Se estima que estas notificaciones aumentarán un 47 % para 2040. A pesar de las continuas mejoras en quimioterapia, radioterapia, inmunoterapia y terapia génica, las muertes se producen principalmente por metástasis. Además, la resistencia a los fármacos que presentan las células tumorales dificulta el tratamiento.

Las investigaciones con pectina, y en particular con pectina descompuesta en fragmentos más pequeños (MP), con menor peso molecular que el cuerpo puede absorber, han demostrado un papel en la inhibición de la metástasis. Los cambios estructurales confieren cambios físicos y químicos en la macromolécula, que se correlacionan con su mayor biodisponibilidad y bioactividad. Los MP modificados con productos químicos, calor, radiación y enzimas tienen una actividad antitumoral más profunda que la pectina sin modificar

#### **1.1.3.4. Aplicaciones en otros segmentos**

Además de la información mencionada hasta ahora, se tiene en cuenta que las aplicaciones no se limitan a las industrias de alimentos, farmacéutica y productos biomédicos. Actualmente, las pectinas extraídas de diferentes fuentes de biomasa se han investigado como adsorbentes debido a su biodegradabilidad, biocompatibilidad, no toxicidad y relación costo-beneficio (Nsom et al). Han desarrollado nanopartículas híbridas de pectina y almidón para su uso como absorbentes para el tinte azul de metileno basado en el reciclaje de agua en la industria textil. Según los resultados, las nanopartículas han demostrado eficiencia y beneficios tales como facilidad de síntesis y recuperación, ausencia de contaminantes secundarios, costo-beneficio y compatibilidad ambiental (Raghav et al). investigaron la aplicación de andamios de biomateriales basados en pectina y alginato dentro de óxido trimetálico para absorber fluoruro del agua. Según los autores, este adsorbente es económicamente viable y abre una nueva clase de adsorbentes en los estudios de eliminación de fluoruro.

#### **1.1.3.5. Conjugados de pectina**

Actualmente se investiga la unión de la pectina con otros productos para mejorar sus propiedades funcionales, incluyendo la solubilidad, la estabilidad y una mejor actividad antioxidante.

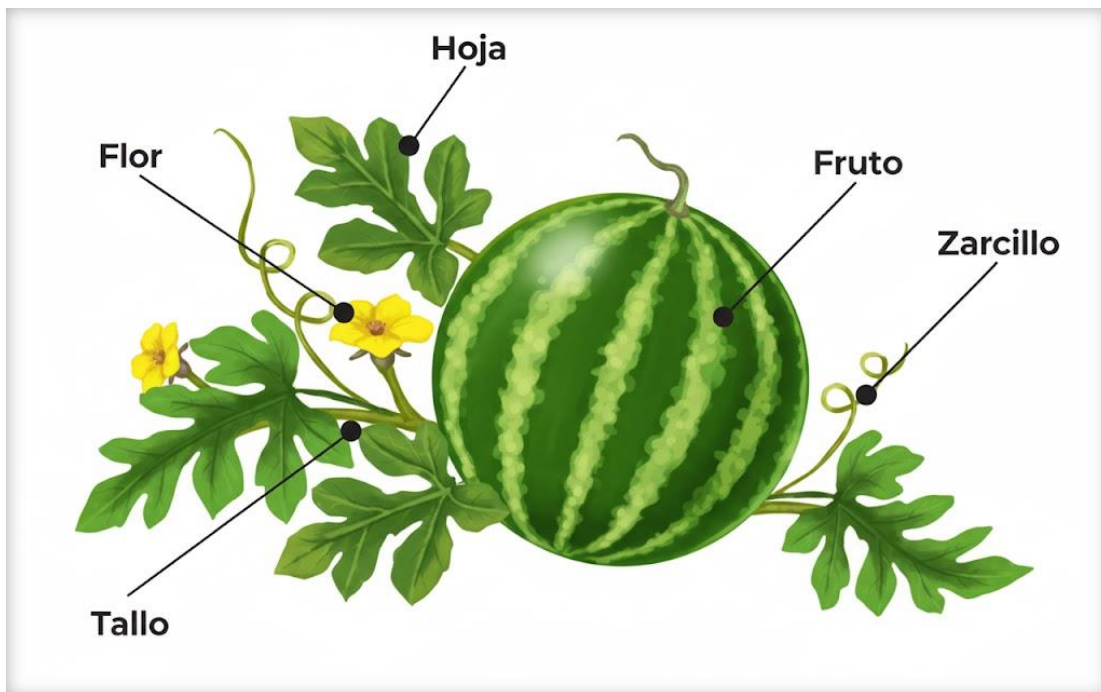
La sensibilidad de la proteína a los cambios de pH y temperatura limita su uso industrial; por ello, se han realizado numerosos estudios para combinar proteínas y pectina con el fin de mejorar sus aplicaciones industriales. Estas moléculas enlazadas covalentemente se conocen como conjugados. En este sentido, se mejoró la actividad emulsionante de las proteínas mediante el uso de polisacáridos de alto peso molecular, como la pectina, conjugados con proteínas como la lisozima y la proteína de suero.

### **1.2. Descripción de la materia prima**

La sandía (*Citrullus lanatus*) es un miembro de la familia de las cucurbitáceas (*Cucurbitaceae*). El cultivo se cultiva comercialmente en áreas con largos períodos cálidos libres de heladas, cultivadas al aire libre florecen entre finales de primavera y

principios de verano, por lo que los frutos están en su punto óptimo de sazón a lo largo de todo el verano y principios del otoño. No obstante, la sandía se cultiva en invernadero, por lo que es fácil disponer de ejemplares a lo largo de todo el año. El cultivo puede establecerse en el campo plantando semillas o utilizando trasplantes en contenedores.

**Figura 1-8 Partes de lo que está compuesta la planta de sandía**



**Fuente:** Infoagro. (s.f.). El Cultivo de la Sandía.

Se tiene constancia de más de cincuenta variedades de sandía, que se clasifican en función de la forma de sus frutos, el color de la pulpa, el color de la piel, el peso, el periodo de maduración, etc. Genéticamente existen dos tipos de sandías:

- **Sandías diploides o con semillas:** son las variedades cultivadas tradicionalmente, que producen semillas negras o marrones de consistencia leñosa, y con cáscara de color verde oscuro.
- **Sandías triploides o sin semillas:** se trata de variedades que tienen unas semillas tiernas de color blanco que pasan desapercibidas al comer el fruto. Se

caracterizan por tener la corteza verde clara con rayas verdes oscuras y la carne puede ser de color rojo o amarillo.

### **1.2.1. Variedades principales de sandía cultivadas en Tarija**

**San Amelia (o Santa Amelia):** Reconocida por su dulzor excepcional, alcanzando hasta 12,5 grados Brix en eventos locales; es una variedad popular en Villa Montes por su sabor dulce y textura firme.

**Santa Patrona:** Destaca por producir frutos grandes, con pesos de hasta 20 kg; apreciada por su tamaño y rendimiento en cultivos regionales.

**Santa Matilde:** Es una de las variedades más conocidas y cultivadas. Se destaca por su gran tamaño, uniformidad, pulpa de color rojo intenso y excelente sabor. Es muy apreciada en los mercados de La Paz, Cochabamba y Santa Cruz.

**Híbridos como Shakira F1 y Sweet Andina F1:** Estos ofrecen mayor productividad y resistencia a enfermedades; estudios sugieren que Shakira F1 puede rendir hasta 54 toneladas por hectárea bajo condiciones óptimas en Bermejo.

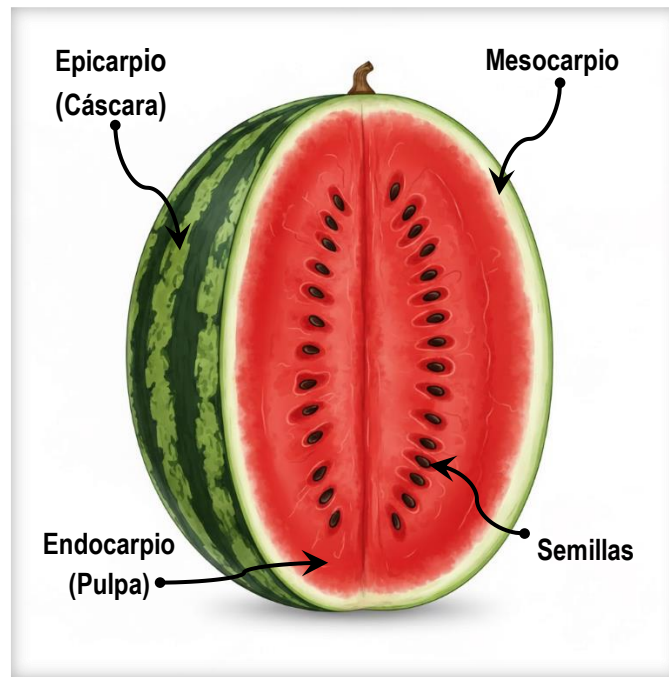
**Crimson Sweet (criolla):** Variedad tradicional adaptada al clima local, aunque con menor precocidad y rendimiento comparado con híbridos; se usa comúnmente como referencia en evaluaciones.

**Otras emergentes:** Como Tropical Sunshine (amarilla), que se introduce en Bolivia por su novedad, aunque su adopción específica en Tarija es limitada.

### **1.2.2. Fruto de la sandía**

La sandía es un fruto grande y de forma más o menos esférica que suele consumirse cruda como postre. Su pulpa es de color rojizo o amarillento y de sabor dulce. La sandía es un fruto grande, de hasta 25 cm de diámetro, que puede alcanzar los 15 kg de peso. La forma es ovalada o esférica, con una corteza lisa y de color verde oscuro, que a veces presenta bandas irregulares más pálidas. La pulpa es dulce, jugosa, refrescante y de color amarillento o rojizo. Contiene muchas pepitas de color negro, marrón o blanco.

**Figura 1-9 Morfología del fruto de la sandía**



**Fuente:** Elaboración propia

**Epicarpio (Cáscara):** Es la capa más externa, lisa y dura, que protege el fruto. Comúnmente la llamamos cáscara o corteza. Su color verde y el patrón de rayas son distintivos de la variedad.

**Mesocarpio:** Es la capa intermedia de color blanco que se encuentra directamente debajo de la cáscara. Es firme y menos dulce que la pulpa roja. Esta parte es especialmente importante para la extracción de pectina, ya que tiene una alta concentración de este polisacárido.

**Endocarpio (Pulpa):** Es la parte más interna y carnosa del fruto. Es la pulpa de color rojo, llena de agua y azúcares, lo que le da su característico sabor dulce y refrescante.

**Semillas:** Se desarrollan a partir de los óvulos de la flor y se encuentran incrustadas en el endocarpio. Son el medio de reproducción de la planta.

#### 1.2.2.1 Valoración nutricional

La sandía es muy apreciada por ser refrescante y rica en agua y sales. En concreto, es la fruta que mayor cantidad de agua contiene (95% de su peso), por lo que aporta muy poca energía y en general pocos nutrientes, aunque contiene cantidades apreciables de diversas vitaminas y minerales como vitamina A, B, C, y fuente de minerales como el potasio y magnesio.

Lo más destacable en su composición es su contenido en carotenoides sin actividad provitamínica (luteína y licopeno), entre los que destaca el licopeno, ya que se encuentra en una elevada cantidad, siendo este alimento una de las principales fuentes dietéticas del fitoquímico.

**Tabla I-2 Composición nutricional de la Sandía**

|                                     | Por 100 g de porción comestible | Porción (300 g) | Recomendaciones día-hombres | Recomendaciones día-mujeres |
|-------------------------------------|---------------------------------|-----------------|-----------------------------|-----------------------------|
| <b>Energía (Kcal)</b>               | 21                              | 33              | 3.000                       | 2.300                       |
| <b>Proteínas (g)</b>                | 0,4                             | 0,6             | 54                          | 41                          |
| <b>Lípidos totales (g)</b>          | Tr                              | Tr              | 100-117                     | 77-89                       |
| AG saturados (g)                    | —                               | —               | 23-27                       | 18-20                       |
| AG monoinsaturados (g)              | —                               | —               | 67                          | 51                          |
| AG poliinsaturados (g)              | —                               | —               | 17                          | 13                          |
| ω-3 (g)*                            | —                               | —               | 3,3-6,6                     | 2,6-5,1                     |
| C18:2 Linoleico (ω-6) (g)           | —                               | —               | 10                          | 8                           |
| Colesterol (mg/1000 kcal)           | 0                               | 0               | <300                        | <230                        |
| <b>Hidratos de carbono (g)</b>      | 4,5                             | 7,0             | 375-413                     | 288-316                     |
| <b>Fibra (g)</b>                    | 0,5                             | 0,8             | >35                         | >25                         |
| <b>Agua (g)</b>                     | 94,6                            | 148             | 2.500                       | 2.000                       |
| <b>Calcio (mg)</b>                  | 7                               | 10,9            | 1.000                       | 1.000                       |
| <b>Hierro (mg)</b>                  | 0,3                             | 0,5             | 10                          | 18                          |
| <b>Yodo (μg)</b>                    | Tr                              | Tr              | 140                         | 110                         |
| <b>Magnesio (mg)</b>                | 11                              | 17,2            | 350                         | 330                         |
| <b>Zinc (mg)</b>                    | 0,1                             | 0,2             | 15                          | 15                          |
| <b>Sodio (mg)</b>                   | 4                               | 6,2             | <2.000                      | <2.000                      |
| <b>Potasio (mg)</b>                 | 120                             | 187             | 3.500                       | 3.500                       |
| <b>Fósforo (mg)</b>                 | 5,5                             | 8,6             | 700                         | 700                         |
| <b>Selenio (μg)</b>                 | Tr                              | Tr              | 70                          | 55                          |
| <b>Tiamina (mg)</b>                 | 0,02                            | 0,03            | 1,2                         | 0,9                         |
| <b>Riboflavina (mg)</b>             | 0,02                            | 0,03            | 1,8                         | 1,4                         |
| <b>Equivalentes niacina (mg)</b>    | 0,3                             | 0,5             | 20                          | 15                          |
| <b>Vitamina B<sub>6</sub> (mg)</b>  | 0,07                            | 0,11            | 1,8                         | 1,6                         |
| <b>Folatos (μg)</b>                 | 3                               | 4,7             | 400                         | 400                         |
| <b>Vitamina B<sub>12</sub> (μg)</b> | 0                               | 0               | 2                           | 2                           |
| <b>Vitamina C (mg)</b>              | 5                               | 7,8             | 60                          | 60                          |
| <b>Vitamina A: Eq. Retinol (μg)</b> | 33                              | 51,5            | 1.000                       | 800                         |
| <b>Vitamina D (μg)</b>              | 0                               | 0               | 15                          | 15                          |
| <b>Vitamina E (mg)</b>              | 0,1                             | 0,2             | 12                          | 12                          |

**Fuente:** Moreiras y Col, 2013. (Sandía)

### 1.2.3. Cáscara de sandía

A pesar de ser comestible, la corteza a menudo se desecha antes de servirla o procesarla, lo que provoca la pérdida de biomasa. Actualmente, los residuos se envían a vertederos, se incineran, se utilizan para alimentación animal o se convierten en abono, todos los cuales son de bajo valor, costosos o tienen efectos ambientales negativos adicionales. Los residuos de corteza podrían ser redirigidos a uso comercial en la industria alimentaria. El valor potencial de la cáscara de sandía ha sido reconocido y explorado. Los enfoques incluyen la conversión de polisacáridos de la corteza en otros productos como bioetanol, biosorbente y biocarbón. La corteza también es una fuente de ingredientes alimentarios de pectina y citrulina, la citrulina es un aminoácido que tiene un papel fundamental en el ciclo ureal del cuerpo humano, esta se encarga de remover el nitrógeno de la sangre y ayuda a convertirlo a la orina, es aquí donde la citrulina ayuda a crear la arginina que constituye un aminoácido esencial para el cuerpo.

La corteza ha sido procesada directamente por decapado, además de incorporarse a mermeladas. La cáscara de sandía en forma de polvo se ha aplicado en pasteles, galletas, fideos, hamburguesas de carne de res y hamburguesas de cerdo. Además, algunos estudios han investigado el uso de la cáscara de sandía entera como medio para microbios. En general, se determinó que la incorporación de la corteza en los alimentos añadía valor, como pectina y aminoácidos específicos.

### **1.2.3.1-Composición nutricional de la cáscara de sandía**

Aunque no presenta suficiente sabor y jugo, la cáscara de la sandía contribuye muy poco a las necesidades nutricionales diarias. Un cubo de 1 pulgada (2,54 cm) de cáscara de sandía presenta 1,8 calorías y una cantidad despreciable de azúcar, fibras, proteína, grasas y sodio. Se puede utilizar en la cocina para proveer peso extra sin alterar el sabor o el contenido nutricional de un plato (Aguilar, 2020). En una dieta basada en 2000 calorías al día, 1 pulgada (2,54 cm) la cáscara de sandía contiene 2 % de la dosis de vitamina C diaria y 1 % de vitamina B6. Mientras que en 50 cubos tiene 1/2 g de grasas y aproximadamente 15 g de carbohidratos, este tamaño de la porción provee con el 50 % de la necesidad diaria de vitamina B6 y casi el 100 % de vitamina C (Duran, Villegas y Nieves, 2015).

La cáscara de sandía ayuda a conciliar el sueño, contiene vitamina B6 que es un nutriente esencial para sintetizar el magnesio y mejorar la energía. Vitamina A, C y licopeno de la cáscara de esta fruta reduce la aparición de arrugas y el deterioro de la piel. No puede ser tan jugosa como la pulpa, pero si se puede ingerir dándole un valor agregado como la elaboración de una harina nutricional. Esto permite que la cáscara de sandía sea saludable para la piel, el sistema inmune y el sistema nervioso (Negrete, 2021).

**Tabla I-3 Propiedades aproximadas de la cáscara de sandía**

| <b>Propiedad</b>                                    | <b>Corteza de sandía</b>                                                                  |
|-----------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------|
| Color                                               | Exterior verde, desvaneciéndose a blanco pálido en el interior.                           |
| Textura                                             | Más dura y menos jugosa que la fruta.                                                     |
| Nutrientes                                          | Bajo en calorías, alto en vitamina C, vitamina A, vitamina B6, potasio y zinc             |
| Antioxidantes                                       | Contiene clorofila, citrulina, licopeno, aminoácidos, flavonoides y compuestos fenólicos. |
| Humedad                                             | 10,61%                                                                                    |
| Ceniza                                              | 13,09%                                                                                    |
| Grasa                                               | 2,44%                                                                                     |
| Proteína                                            | 11,17%                                                                                    |
| carbohidratos                                       | 56,02%                                                                                    |
| Fibra cruda                                         | 17,28%                                                                                    |
| Actividad de eliminación de radicales libres (DPPH) | 39,70%                                                                                    |
| B-Caroteno                                          | 96,44%                                                                                    |

**Fuente:** Hanan M.A. Al-Sayed a, Abdelrahman R. Ahmed

Se debe de tomar en cuenta que estos datos son aproximados, los cuales pueden variar de acuerdo a la variedad de sandía, condiciones de terreno y almacenamiento.

#### **1.2.4 Taxonomía**

**Tabla I-4 Taxonomía de Sandía (*Citrullus lanatus*)**

|                           |                                     |
|---------------------------|-------------------------------------|
| <b>Reino:</b>             | Vegetal                             |
| <b>Phylum:</b>            | Teleomorphytae                      |
| <b>División:</b>          | Magnoliophyta                       |
| <b>Sub-división:</b>      | Angiospermae                        |
| <b>Clase:</b>             | Magnoliopsida                       |
| <b>Sub-clase:</b>         | Dicotyledoneae                      |
| <b>Grado Evolutivo:</b>   | Metachlamydeae                      |
| <b>Grupo de Ordenes:</b>  | Tetracíclicos                       |
| <b>Orden:</b>             | Cucurbitales                        |
| <b>Familia:</b>           | Cucurbitaceae                       |
| <b>Género:</b>            | Citrullus                           |
| <b>Especie:</b>           | lanatus                             |
| <b>Nombre científico:</b> | Citrullus lanatus (var. San Amelia) |
| <b>Nombre común:</b>      | Sandía San Amelia                   |

**Fuente:** Herbario Universitario T.B. 2025

### **1.3. Descripción de alternativas para la obtención de pectina**

#### **1.3.1. Método Enzimático**

El método enzimático de extracción de pectina implica el uso de enzimas para descomponer las moléculas de pectina presentes en los materiales vegetales, lo que facilita su separación y extracción.

La despolimerización de polisacáridos mediante el uso de enzimas es uno de los métodos más utilizados para grandes producciones de oligosacáridos. Las enzimas pueden ser altamente regioselectivas y estereoselectivas, por lo que estos biocatalizadores se desarrollan para preparar oligosacáridos con un tamaño molecular deseado y con mínimas modificaciones químicas en su estructura, siendo estos los procesos más utilizados debido a que se obtienen buenos resultados y productos de elevada calidad.

#### **1.3.2. Método convencional o Hidrólisis ácida**

El método convencional de hidrólisis ácida es una técnica ampliamente utilizada para la extracción de pectina. Implica el uso de ácido para descomponer las moléculas de pectina presentes en los materiales vegetales.

La pectina se ha extraído utilizando métodos químicos para analizar sus características estructurales y propiedades funcionales. Los agentes químicos empleados en su extracción se clasifican en cuatro categorías: Agua y amortiguadores, Agentes quelantes de iones de calcio, Ácidos, Bases.

Entre estos, los ácidos son los agentes más efectivos, ya que permiten la extracción de pectina insoluble fuertemente unida a la matriz celular de los vegetales, logrando así mayores rendimientos.

La pectina es rica en ácido galacturónico. Estudios han demostrado que la fuerza del ácido utilizado influye directamente en: El rendimiento de la extracción, las propiedades químicas y fisicoquímicas de la pectina obtenida.

#### Ácidos Más Utilizados

- Orgánicos: Acético, cítrico, láctico, málico, tartárico.
- Inorgánicos: Clorhídrico, nítrico, oxálico, fosfórico, sulfúrico.

Este enfoque ácido es clave para optimizar la producción y calidad de la pectina en aplicaciones industriales.

#### **1.3.3. Método de Extracción asistido por microondas**

La extracción asistida por microondas implica el calentamiento dieléctrico de las moléculas vegetales a través de la exposición a las microondas. La relación dipolar del agua se produce debido a la absorbancia de la energía de microondas, lo que conduce a la generación de calor dentro de los tejidos de la planta. La extracción asistida por microondas (MAE) ha sido investigada recientemente por muchos investigadores y descubrió que puede conducir a un aumento considerable en el rendimiento y la calidad de la pectina extraída.

#### **1.3.4. Método de extracción asistida por ultrasonido**

Este método utiliza ondas ultrasónicas para romper las paredes celulares de las plantas y liberar la pectina en la solución. Los pasos involucrados en este proceso son similares a los del método convencional, pero con la adición de energía ultrasónica durante la etapa de extracción ácida.

#### **1.4. Caracterización del producto**

La caracterización de la pectina estándar según normativas internacionales se basa en parámetros fisicoquímicos, funcionales y de pureza establecidos por organismos como la FAO/WHO (Food and Agriculture Organization/World Health Organization), la FCC (Food Chemicals Codex), la USP (United States Pharmacopeia) y la EFSA (European Food Safety Authority).

Según el Codex Alimentarius, la pectina está calificada como aditivo alimentario autorizado y seguro, que no presenta peligro alguno al ser consumida por los seres humanos.

Los aditivos alimentarios como la pectina son sustancias no consumidas de forma regular ni directa por las personas, no constituyen un componente esencial en la elaboración de alimentos y pueden o no presentar características nutricionales; su adición en productos alimenticios se realiza para mejorar sus propiedades organolépticas. (Norma Codex Stan 192-1995, pág.3).

Cuando hablamos de "pectina estándar", nos referimos a esa pectina que cumple con unos requisitos específicos que están bien definidos por normas internacionales y nacionales. Esto es para asegurarse de que sea de buena calidad y funcione como se espera en diferentes usos.

Los parámetros fisicoquímicos de las pectinas comerciales están establecidos por las distintas organizaciones las cuales son: Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO), Código de Sustancias Químicas para Alimentos (FCC) y el Consejo Ambiental de Exportación (ECC).

**Tabla I-5 Caracterización de pectina estándar**

| <b>Componente</b>                       | <b>Especificación<br/>(pectina estándar)</b> | <b>Unidad</b> |
|-----------------------------------------|----------------------------------------------|---------------|
| Grado de esterificación                 | 74,71 ± 3,32                                 | %             |
| pH                                      | 2,8 – 3,60                                   | -             |
| Humedad                                 | 8,51 ± 1,96                                  | % masa        |
| Cenizas                                 | 3,77 ± 3,39                                  | % masa        |
| Contenido de azúcar                     | 55 – 85                                      | % masa        |
| Peso equivalente                        | 1775,46 ± 1143,78                            | mg/meq        |
| Ácido galacturónico                     | 68,29 ± 1339                                 | %             |
| Contenido de metoxilo                   | 6,93 ± 3,22                                  | %             |
| Acidez libre                            | 0,78 ± 0,46                                  | meq/g         |
| Hierro                                  | 9,50                                         | mg/100 g      |
| Calcio                                  | 1034,42                                      | mg/100 g      |
| Bacteriológico                          | -                                            | -             |
| Cuenta de hongos y levaduras<br>(25 °C) | Menos de 10/g                                | -             |
| Recuento total en placa                 | Menos de 500/g                               | -             |
| Escherichia coli                        | Prueba negativa                              | -             |
| Salmonella                              | Prueba negativa                              | -             |
| Estafilococos                           | Prueba negativa                              | -             |

**Fuente:** Barreto et al., 2017

#### **1.4.1.-Propiedades químicas y físicas de las pectinas**

Las propiedades físicas, químicas y funcionales de las pectinas son de gran interés para una gran cantidad de científicos y tecnólogos en alimentos, ya que la pectina puede ser clasificada como un polisacárido complejo, una fibra muy importante y un factor nutricional, así como un agente gelificante de alimentos. Mejoras constantes en la calidad y en las fuentes tecnológicas disponibles, hacen posible en nuestros días el producir pectinas que tienen diferentes características requeridas por el usuario (Guerritz, 1985).

Como polímeros del ácido galacturónico, las pectinas tienen muchas propiedades físicas únicas, debidas principalmente al grupo carboxílico presente en las unidades de la cadena.

La pectina en agua forma soluciones viscosas dependiendo de su peso molecular, grado de esterificación, pH y concentración electrolítica de la solución. Las soluciones de

pectina completamente esterificadas no cambian apreciablemente su viscosidad al variar el pH, pero al disminuir el grado de esterificación la pectina viene a ser marcadamente dependiente del pH (Doesburg, 1965; McCready, 1952). Los ácidos pécticos y pectinas de muy baja esterificación son insolubles en agua. A continuación, se enlistan las principales propiedades de la pectina.

**Peso molecular.** Está relacionado con la longitud de la cadena, es una característica muy importante de la que dependen la viscosidad de sus disoluciones y su comportamiento en la gelificación. La determinación cuidadosa del peso molecular es difícil, parcialmente debido a la extrema heterogeneidad de las muestras y parcialmente debido a la tendencia de las pectinas a agregarse, aún bajo condiciones no favorables a la gelación (Multon, 1988).

**Pureza.** Debe tener un mínimo del 78% de ácido anhidroúrnico, así mismo debe estar libre de humedad y cenizas (Multon, 1988).

**pH.** Trazas de ácido mineral que contaminan las pectinas (derivadas de tratamiento de extracción y purificación) pueden afectar el pH. La mayor parte de las cenizas que acompañan las pectinas consisten de carbonatos alcalinos o bases. En general, una alta alcalinidad de ceniza acompaña a una baja acidez y viceversa (Multon, 1988; Quito-Vidal y Zárate-Tacuri, 2011; Pilnik y Voragen, 1970).

**Solubilidad.** Debe ser soluble en 20 partes de agua y formar una solución coloidal opalescente, debe ser soluble al pasar por tamizado e insoluble en alcohol o alcohol diluido y en otros solventes orgánicos

La solubilidad aumenta con un incremento en el grado de esterificación y con un decremento en su peso molecular. Las pectinas con un grado de esterificación del 20% son precipitadas por soluciones de cloruro de sodio, con un grado esterificación del 50% por soluciones de cloruro de calcio, y con un grado del 70% por cloruro de aluminio o cobre (Badui, 2006).

**Grado de esterificación:** Se ha establecido que las pectinas son biosintetizadas y transportadas a la pared celular en una forma altamente esterificada (alto metoxilo).

Una vez integradas en la lámina media, experimentan un proceso de desesterificación enzimática in situ, modificando así sus propiedades funcionales.

El grado de metilación tiene un papel importante en la firmeza y cohesión de los tejidos vegetales. La reducción del grado de metilación tiene como consecuencia un aumento de la cohesión, que es particularmente evidente en los tejidos calentados.

Las pectinas están clasificadas como de alto metoxilo (HM) y bajo metoxilo (LM), dependiendo del grado de esterificación (Van Buren, 1991; Multon, 1988).

**Acidez titulable.** Cuando se titula una solución de pectina con álcali para la determinación de su acidez, se debe tener mucho cuidado, pues un pequeño exceso de álcali podría saponificar algunos de los grupos éster de la pectina. Esto daría por supuesto, valores altos para la acidez titulable (Multon, 1988).

**Características sensoriales.** La pectina debe tener un color blanco amarillento y sin olor, además de presentar una textura de aspecto viscoso o mucilaginoso, así mismo su tamaño de partículas deberá estar comprendido entre la malla de 60 y 80 (Badui, 2006).

**Características fisiológicas.** La pectina tiene la particularidad de retener agua, y se le atribuyen efectos benéficos en caso de diarrea ya que hace más lento el tránsito intestinal.

El principal efecto indeseable del que se ha acusado a las pectinas es el de que inhiben la captación de metales necesarios para el buen funcionamiento del organismo, como el calcio, zinc o hierro.

La ingestión de pectinas tiene varias ventajas claras, como la disminución del cáncer de colon. Se ha comprobado que, en segundo lugar, hacen que la captación por el aparato digestivo de la glucosa procedente de la dieta sea más lenta, con lo que el ascenso de su concentración sanguínea es menos acusado después de una comida.

Esto es claramente favorable para los diabéticos, especialmente para aquellos que no son dependientes de la insulina (Badui, 2006).

#### **1.4.2.-Propiedades funcionales**

**Viscosidad.** Concentraciones diferentes de un azúcar y tipos de azúcares en general afectan la viscosidad de manera diferente. La viscosidad se incrementa marcadamente a medida que la temperatura se acerca a la temperatura de ebullición (Multon, 1988).

**Gelificación.** Los geles consisten en moléculas poliméricas con enlaces entrecruzados para formar una red interconectada y tupida inmersa en un líquido. La pectina forma geles bajo ciertas condiciones. El poder gelificante de un ácido pectínico depende primeramente de su tamaño molecular.

La capacidad de gelificación y características intrínsecas del gel dependen de la pureza y el grado de esterificación de la pectina. Durante mucho tiempo se pensó que el grado de esterificación era la principal medida de su utilidad en la formación de geles. Hoy se sabe que más allá de necesidad de un mínimo de 7% de metoxilo en la práctica, 50% de esterificación y su influencia sobre la velocidad de gelificación, no existe relación alguna entre el contenido de metoxilo y la potencia gelificante de una pectina (Francis y Bel, 1975).

## **1.5. Métodos analíticos aplicados en la pectina obtenida**

### **1.5.1. Determinación del peso equivalente**

El peso equivalente de la pectina extraída se determina por el método de Ranganna. Para ello, se añaden polvo de pectina (0,5 g), etanol (5 mL) y agua destilada (100 mL) a un matraz cónico de 500 mL. Luego, se incorpora cloruro de sodio (1 g) para agudizar el punto de titulación (opcional) y se agregan seis gotas del indicador rojo de fenolftaleína. Finalmente, la mezcla se titula con hidróxido de sodio 0,1 N hasta obtener un color rosado. La solución neutralizada se conserva para la determinación del contenido de metoxilo.

Aplicando el método de valoración ácido-base, se determina el peso equivalente de la pectina, al relacionar los miligramos del componente ácido (pectina) y los miliequivalentes de NaOH gastados en la valoración, tal como se aprecia en la siguiente ecuación:

$$\text{Peso Equivalente} = \frac{(\text{mg}) \text{ Componente ácido}}{(\text{meq}) \text{ NaOH}} \quad \text{Ec. (1-1)}$$

### 1.5.2. Determinación de acidez libre

La acidez libre se determina aplicando la relación de los meq de NaOH consumidos (que representan los carboxilos libres presentes en el componente ácido) y el peso de la pectina en g, de acuerdo a la siguiente ecuación:

$$\text{Acidez libre} = \frac{(\text{meq}) \text{ NaOH}}{(\text{g}) \text{ Componente ácido}} \quad \text{Ec. (1-2)}$$

### 1.5.3. Determinación del porcentaje de metoxilo

Las moléculas de ácido D-galacturónico presentan grupos metoxilo, la cantidad de estos grupos funcionales permiten evaluar la facilidad de la pectina para formar, y así clasificarla como PBM, o de PAM, además de determinar la sensibilidad de la pectina a la presencia de cationes polivalentes.

Este indicador, corresponde al número de grupos metoxilo que se encuentran en los grupos carboxílicos. El método para determinarlo se basa en la neutralización de los grupos carboxílicos con NaOH 0,1 N en presencia de fenolftaleína, agregando exceso medido de NaOH 0,25 N, para saponificar los grupos  $-\text{COOCH}_3$  que pasan a  $-\text{COONa}$  y finalmente se titula el exceso de NaOH. (Hugo Leonel Benitez Cary 2022). El porcentaje de metoxilo se determina partiendo de la solución de la valoración del peso equivalente, la que se coloca en un matraz con tapa esmerilada y se le adiciona 25 ml de NaOH 0,25 N y se agita fuertemente a temperatura ambiente, se deja en reposo unos 30 min, luego se le agrega 25 ml de HCl 0,25 N y se titula el exceso de HCl con NaOH 0,1 N. El porcentaje de metoxilo, se calcula de acuerdo a la siguiente ecuación:

$$\% \text{Metoxilo} = \frac{(\text{meq}) \text{ B} * 31 * 100}{(\text{mg}) \text{ Componente ácido}} \quad \text{Ec. (1-3)}$$

Donde 31 es el peso molecular del metoxilo expresado en mg/meq y meq B son los meq de NaOH gastados en la determinación del contenido de metoxilo.

### 1.5.4. Determinación del grado de esterificación (GE)

El GE relaciona los carboxilos de urónicos esterificados y los carboxilos totales de urónicos el cual se obtiene:

$$\%GE = \frac{(\text{meq})B}{(\text{meq})A + (\text{meq})B} * 100 \quad \text{Ec( 1-4)}$$

Donde los meq A equivalen a los miliequivalentes de NaOH gastados en la de la acidez libre y meq B son los miliequivalentes de NaOH gastados en la determinación del contenido de metoxilo.

#### 1.5.5. Determinación del porcentaje de ácido anhídrido galacturónico (AAG)

El porcentaje de AAG, permite conocer el grado de pureza de la sustancia péctica, debido a que la pectina es un polisacárido constituido no solo por ácido Dgalacturónico, sino también en su estructura el 10 % o más de la cadena pueden representar otros azúcares, como arabinosa, glucosa y ramnosa. Su determinación se fundamenta en el método de valoración descrito para la determinación de la acidez libre y porcentaje de metoxilo, de acuerdo a la siguiente ecuación:

$$\%AAG = \frac{((\text{meq})A + (\text{meq})B) * 0,176}{m \text{ (g) de pectina}} * 100 \quad \text{Ec ( 1-5)}$$

**Donde:**

meqA = meq de NaOH para carboxilos libres

meqB = meq de NaOH para grupos metoxilo

0,176 = peso molecular del ácido galacturónico anhidro (g/mmol)

m = masa de pectina (g)

#### 1.5.6. Grado de gelificación

Expresa la cantidad de azúcar (sacarosa) que gelificará una parte de pectina para obtener una firmeza dada bajo condiciones establecidas, para su determinación se usará el Método SAG (Standardized American Grade) – IFT

$$\% \text{Grado de Gelificación} = \frac{(\text{g}) \text{ de sacarosa}}{(\text{g}) \text{ de pectina} * K} \quad \text{Ec. ( 1-6)}$$

**Donde:**

K = Factor de corrección basado en la fuerza del gel (usualmente 1 para condiciones estándar)

**Condiciones estándar:** Para la formación de un gel estable, se establecen condiciones específicas que incluyen una concentración de sólidos solubles finales de 65 °Brix y un pH ácido en el rango de 2,2 a 2,4. Bajo estas condiciones, y utilizando una concentración de pectina que varía entre el 0,2% y el 1,5%, se logra una temperatura de gelificación de 50 °C.

Para esta prueba, se prepara una escala entre 0,4 y 1,4 g de pectina, éstas se incluyen a vasos de precipitación de 200 ml de capacidad, luego se lleva a ebullición hasta la disolución completa de la pectina, luego se agrega 100 g de sacarosa, se diluye completamente y se agrega agua hasta peso de 150 g, finalmente se adiciona ácido cítrico hasta obtener el pH adecuado (2,2-2,4), estos geles se dejan reposar por 24 h y luego se procede a desmoldar evaluándose las características de cada uno de ellos en forma visual para calcular el grado de gelificación.

**CAPÍTULO II**  
**II.PARTE EXPERIMENTAL**

## 2.1. Metodología de investigación

### 2.1.1. Metodología cualitativa

Se empleó una metodología cualitativa en este proyecto para lograr una comprensión profunda de los procesos, dinámicas y técnicas en la extracción experimental de pectina de la cáscara de sandía. Este enfoque permitió explorar no solo el procedimiento, sino también sus fundamentos, capturando detalles que un análisis puramente numérico no revelaría y enriqueciendo la interpretación de los resultados.

### 2.1.2. Metodología cuantitativa

Adicionalmente, se implementó una metodología cuantitativa para la recolección y el análisis de datos numéricos. Este enfoque permitió la medición precisa de eficiencias, la comparación de resultados y la optimización de los procesos. El uso de herramientas estadísticas fue fundamental para establecer bases sólidas que guiaron la toma de decisiones informadas y la mejora continua de los métodos de extracción, validando así los hallazgos cualitativos y garantizando la reproducibilidad y escalabilidad del procedimiento.

## 2.2. Selección del proceso

A partir de la revisión bibliográfica, se constató la existencia de diversos métodos para la extracción experimental de pectina. Se procedió a analizar cuatro de estos procesos, sistematizando sus ventajas y desventajas en una tabla comparativa, lo que permitió fundamentar la selección de la metodología más adecuada para los objetivos de este trabajo.

**Tabla II-1 Ventajas y desventajas de métodos de extracción**

| Método                              | Ventaja                                                                                                                                               | Desventaja                                                                                                                                               |
|-------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>Hidrólisis ácida tradicional</b> | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Requiere equipamiento básico de laboratorio y reactivos de fácil adquisición en el mercado local.</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Tarda un tiempo moderado (unas horas)</li> <li>• Gasta bastante energía con el calentador y agitador</li> </ul> |

|                                        |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      |
|----------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|                                        | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Es una metodología consolidada y ampliamente referenciada en investigaciones previas.</li> <li>• Presenta bajos costos operativos y una inversión inicial mínima.</li> <li>• Genera un bajo impacto ambiental, permitiendo la recirculación de los residuos (recuperación del alcohol).</li> <li>• Garantiza un rendimiento de extracción competitivo y una adecuada calidad del producto final.</li> </ul> |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      |
| <b>Hidrólisis con enzimas</b>          | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Extrae muy bien la pectina</li> <li>• Mantiene mejor las propiedades de la pectina</li> <li>• Es más ecológico (usa enzimas naturales)</li> <li>• La pectina sale de mejor calidad</li> </ul>                                                                                                                                                                                                               | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Las enzimas son caras y difícil de obtener</li> <li>• Tarda mucho (12 horas o más)</li> <li>• Gasta más energía por el tiempo</li> <li>• Produce menos cantidad que otros métodos</li> </ul>                                                                                |
| <b>Hidrólisis ácida con microondas</b> | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Es más rápido</li> <li>• Gasta menos energía</li> <li>• Los reactivos son fáciles de conseguir</li> <li>• No genera contaminantes</li> <li>• Buen rendimiento</li> </ul>                                                                                                                                                                                                                                    | <ul style="list-style-type: none"> <li>• No tenemos microondas especial en el LOU</li> <li>• Adaptar un microondas normal es complicado</li> <li>• La inversión inicial es alta</li> <li>• Las ondas podrían dañar la pectina</li> <li>• Es un método poco estudiado</li> <li>• Faltan algunos materiales</li> </ul> |
| <b>Extracción por ultrasonido</b>      | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Super rápido (minutos en lugar de horas)</li> <li>• Gasta poca energía</li> <li>• No usa muchos químicos</li> <li>• Mejora la calidad de la pectina</li> <li>• Es ecológico</li> </ul>                                                                                                                                                                                                                      | <ul style="list-style-type: none"> <li>• El equipo de ultrasonido es caro</li> <li>• Hay que calibrarlo bien para no dañar la pectina</li> <li>• Todavía hay pocos estudios sobre este método</li> </ul>                                                                                                             |

**Fuente:** Elaboración propia

Para elegir y evaluar los procesos, sólo consideré dos de ellos, el método de extracción mediante hidrólisis ácida y mediante enzimas, ya que en el Laboratorio de Operaciones Unitarias (LOU) contamos con los equipos y materiales necesarios para llevarlos a cabo, lo cual me llevó a descartar los otros dos métodos. Para decidir cuál era el mejor

proceso para la extracción experimental de pectina de cáscara de sandía, usé el método de los factores ponderados. Este método es bien práctico porque hace un análisis cuantitativo donde comparas las opciones disponibles. Lo que hice fue asignarle un valor a cada factor clave del proceso, según su importancia, y establecer una escala de calificación para evaluarlas.

**Tabla II-2 Escala de calificación del 1 al 10**

| <b>Escala de calificación</b> | <b>Calificación</b> |
|-------------------------------|---------------------|
| <b>Excelente</b>              | 9-10                |
| <b>Muy bueno</b>              | 7-8                 |
| <b>Bueno</b>                  | 5-6                 |
| <b>Regular</b>                | 3-4                 |
| <b>Malo</b>                   | 1-2                 |

**Fuente:** Elaboración propia

Para decidir cómo ponderar los factores que tomé en cuenta, me basé en una revisión de la literatura de varios trabajos de investigación. Lo que hice fue analizar esos estudios para que la importancia de cada factor reflejara bien su relevancia en el contexto de este proyecto.

**Tabla II-3 Ponderación de los factores considerados para la extracción de pectina mediante hidrólisis ácida convencional y enzimática**

| <b>Nº</b> | <b>Factor evaluado</b>            | <b>Porcentaje relativo (%)</b> | <b>Ponderación</b> | <b>Comentario</b>                                                                                                                                                                                                       |
|-----------|-----------------------------------|--------------------------------|--------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 1         | <b>Aplicabilidad del proceso</b>  | 0,25                           | 25                 | Con la extracción por hidrólisis enzimática se obtiene un producto de buena calidad. Pero el tiempo de extracción es más largo que con la hidrólisis ácida convencional, que es más rápida y nos daría más rendimiento. |
| 2         | <b>Generación de subproductos</b> | 0,10                           | 10                 | En los dos procesos se usan cáscara para obtener la pectina y así darle un valor agregado. Nada se desperdicia.                                                                                                         |

|    |                                                                 |      |    |                                                                                                                                                                                                                                                                                            |
|----|-----------------------------------------------------------------|------|----|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 3  | <b>Costo de inversión inicial</b>                               | 0,20 | 20 | La hidrólisis ácida es generalmente más rápida y sale más barata en cuanto a los reactivos. La hidrólisis enzimática, en cambio, puede ser más cara por el costo de las enzimas y el tiempo extra de proceso.                                                                              |
| 4  | <b>Requerimiento energético</b>                                 | 0,05 | 5  | La hidrólisis ácida convencional casi siempre implica calentar una solución, lo que gasta energía para mantener la temperatura. La hidrólisis enzimática se hace a temperaturas más tranquilas, pero necesita unas 12 horas de extracción, ¡así que también consume energía por el tiempo! |
| 5  | <b>Procesos ampliamente probados</b>                            | 0,05 | 5  | Ambos procesos están probados y se usan un montón en la industria. Son confiables                                                                                                                                                                                                          |
| 6  | <b>Confiabilidad del proceso</b>                                | 0,05 | 5  | Según lo que leímos, los dos métodos han demostrado ser súper confiables para obtener pectina. Eso nos da seguridad                                                                                                                                                                        |
| 7  | <b>Impacto ambiental</b>                                        | 0,10 | 10 | En ninguno de los procesos se generan residuos sólidos que molesten ni olores feos. Pero, entre los dos, la hidrólisis enzimática es más amigable con el medio ambiente porque usa enzimas en vez de químicos tan fuertes como la hidrólisis ácida.                                        |
| 8  | <b>Rendimiento de extracción</b>                                | 0,10 | 10 | Queremos sacar la mayor cantidad de pectina posible de la cáscara. Hay que ver cuál método nos da más producto final.                                                                                                                                                                      |
| 9  | <b>Calidad de la pectina obtenida (Grado de Esterificación)</b> | 0,05 | 5  | No solo es cuánta pectina sacamos, sino de qué calidad. El grado de esterificación es importantísimo porque define para qué nos va a servir la pectina (si para mermeladas, lácteos, etc.).                                                                                                |
| 10 | <b>Complejidad operativa</b>                                    | 0,05 | 5  | Tenemos que ver qué tan complicado es llevar a cabo cada proceso en el LOU. Si uno requiere muchos pasos o personal muy especializado, puede que no nos convenga tanto.                                                                                                                    |
| 11 | <b>Disponibilidad y manejo de reactivos/enzimas</b>             | 0,05 | 5  | Algunos reactivos o enzimas pueden ser difíciles de conseguir aquí o de almacenar. Es un punto importante a considerar para la operatividad.                                                                                                                                               |

**Fuente:** Elaboración propia

**Tabla II-4 Matriz de decisión de los métodos para la extracción de pectina**

| Nº           | Factor Evaluado                                          | Porcentaje Relativo (%) | Ponderación | Hidrólisis Ácida Calificación (0-10) | Puntuación Ponderada | Hidrólisis Enzimática Calificación (0-10) | Puntuación Ponderada |
|--------------|----------------------------------------------------------|-------------------------|-------------|--------------------------------------|----------------------|-------------------------------------------|----------------------|
| 2            | Generación de subproductos                               | 0,1                     | 10          | 9                                    | 0,9                  | 9                                         | 0,9                  |
| 3            | Costo de inversión inicial                               | 0,2                     | 20          | 8                                    | 1,6                  | 5                                         | 1                    |
| 4            | Requerimiento energético                                 | 0,05                    | 5           | 5                                    | 0,25                 | 4                                         | 0,2                  |
| 5            | Procesos ampliamente probados                            | 0,05                    | 5           | 9                                    | 0,45                 | 9                                         | 0,45                 |
| 6            | Confiabilidad del proceso                                | 0,05                    | 5           | 9                                    | 0,45                 | 9                                         | 0,45                 |
| 7            | Impacto ambiental                                        | 0,1                     | 10          | 6                                    | 0,6                  | 8                                         | 0,8                  |
| 8            | Rendimiento de extracción                                | 0,1                     | 10          | 7                                    | 0,7                  | 6                                         | 0,6                  |
| 9            | Calidad de la pectina obtenida (Grado de Esterificación) | 0,05                    | 5           | 6                                    | 0,3                  | 9                                         | 0,45                 |
| 10           | Complejidad operativa                                    | 0,05                    | 5           | 8                                    | 0,4                  | 6                                         | 0,3                  |
| 11           | Disponibilidad y manejo de reactivos/enzimas             | 0,05                    | 5           | 9                                    | 0,45                 | 6                                         | 0,3                  |
| <b>TOTAL</b> |                                                          | 1,00                    | 100         | Puntuación Total:                    | <b>8,1</b>           | Puntuación Total:                         | 7,2                  |

**Fuente:** Elaboración propia

Calcule la calificación global de cada alternativa sumando las puntuaciones de cada factor, ponderadas según su valor relativo. De acuerdo con los resultados que obtuve en la tabla, el mejor proceso para la extracción experimental de pectina de cáscara de sandía fue el método de hidrólisis ácida convencional, con una puntuación de 8,10 puntos, el cual difiere del otro método.

Por eso decidí realizar la extracción usando este método, ya que además de contar con bastante información disponible sobre él, es un proceso ampliamente probado, con resultados efectivos y rendimientos aceptables. También tenía a mi disposición las condiciones, equipos y materiales necesarios para llevar a cabo la extracción en el Laboratorio de Operaciones Unitarias (LOU).

### 2.3. Identificación de variables dependientes e independientes a ser estudiadas

Los puntos críticos de control (PPC) en todo el proceso son los siguientes:

- **Hidrólisis ácida:**

**Concentración de ácido:** La concentración o fuerza del ácido utilizado para la hidrólisis, generalmente expresada como porcentaje o concentración molar.

**pH:** El pH es uno de los parámetros más cruciales en el proceso de extracción de pectina y tiene un impacto sustancial en el rendimiento y la calidad de la pectina extraída, Refleja la acidez o alcalinidad de la solución y se puede controlar ajustando la concentración del ácido utilizado. Explorar diferentes niveles de pH puede proporcionar información sobre el rango de pH óptimo para la extracción de pectina.

**Tiempo de hidrólisis:** La duración de la hidrólisis es una variable crítica ya que determina el grado de descomposición y extracción de la pectina. Los tiempos de hidrólisis más prolongados pueden resultar en mayores rendimientos de pectina, pero hay un tiempo óptimo más allá del cual una hidrólisis adicional puede degradar la calidad de la pectina extraída.

**Temperatura:** La temperatura juega un papel en la aceleración de la reacción de hidrólisis y la promoción de la extracción de pectina. Las temperaturas más altas pueden mejorar la velocidad de reacción, pero las temperaturas excesivamente altas pueden provocar la degradación de la pectina u otras reacciones indeseables. La optimización de la temperatura es esencial para equilibrar la eficiencia de extracción y la calidad de la pectina.

**Proporción de sólido a líquido:** la proporción de materia prima a la solución de extracción influye en el proceso de extracción de pectina. Una proporción más alta de sólido a líquido puede conducir a una extracción más eficiente debido al mayor contacto entre la materia prima y la solución ácida. Sin embargo, hay un límite en la relación para garantizar una mezcla y una cinética de reacción adecuadas.

- **Filtración y Separación:**

**Método de filtración:** La técnica utilizada para separar el extracto líquido del residuo sólido, como la filtración al vacío o la centrifugación.

**Tamaño del filtro:** La porosidad o tamaño de poro del medio filtrante seleccionado, influye directamente en la eficiencia de la separación y en la claridad del extracto obtenido.

**Secado:**

**Temperatura de secado:** la temperatura a la que se seca la pectina extraída para eliminar la humedad, normalmente se mantiene en un horno o desecador y se mide en grados Celsius o Fahrenheit.

**Tiempo de secado:** la duración durante la cual la pectina extraída se somete a secado, permitiendo la evaporación de la humedad, generalmente medido en minutos u horas.

La clasificación de las variables dependientes e independientes es la siguiente:

#### **2.3.1. Variables dependientes:**

La variable dependiente en el proceso de extracción de pectina por hidrólisis ácida es el rendimiento o cantidad de pectina extraída.

#### **2.3.1. Variables independientes:**

**Hidrólisis ácida:**

- Concentración de ácido (independiente)
- pH (independiente)
- Tiempo de hidrólisis (independiente)
- Temperatura (independiente)
- Proporción de sólido a líquido (independiente)

**Filtración y Separación:**

- Método de filtración (independiente)
- Tamaño del filtro (independiente)

**Secado:**

- Temperatura de secado (independiente)
- Tiempo de secado (independiente)

Según el punto crítico de control, en todo el proceso está centrado generalmente en la hidrólisis ácida, por lo cual las variables más significativas en este punto son la temperatura, pH y tiempo. Estas variables están estrechamente relacionadas, por lo que su selección y ajuste deben hacerse con mucho cuidado para lograr los mejores resultados. Es fundamental realizar un diseño de experimentos que permita probar diferentes niveles de pH, temperatura y tiempo de extracción, con el objetivo de encontrar las condiciones óptimas para obtener una pectina con las características deseadas. Controlar y entender bien estas variables es clave para asegurar que el proceso sea reproducible y que el producto final tenga la calidad esperada.

Por lo cual se realizaron pruebas preliminares al inicio para determinar los rangos de temperatura, pH y tiempo de hidrólisis.

### **Temperatura**

Para la temperatura de hidrólisis en este trabajo, me basé en un rango de entre 65 y 85°C. Lo que noté es que la temperatura en la hidrólisis ácida fue una variable que marcó la diferencia en el rendimiento de la extracción de pectina, y eso lo confirmé con algunos estudios previos que hice.

Subir la temperatura durante la hidrólisis ácida ayuda mucho porque hace que la pectina y otros componentes de la pared celular se disuelvan mejor, así que el rendimiento mejora bastante, pero también una elevada temperatura puede degradar las propiedades de la pectina. En cambio, si la temperatura está muy baja, no alcanza para romper la protopectina, que es la forma dura e insoluble de la pectina.

### **pH**

El pH es una variable independiente en la extracción de pectina y su valor depende mucho del tipo de materia prima que se utilice. En mi estudio analicé el efecto del pH a dos niveles diferentes, 1,5 y 2,5, para ver cómo influye en el rendimiento de la pectina extraída. En general, noté que a medida que el pH aumenta, el porcentaje de pectina

obtenida disminuye, lo que indica que un pH más alto afecta negativamente la cantidad de pectina que se puede extraer durante la hidrólisis ácida.

Esto sucede porque un pH bajo favorece la ruptura de enlaces en la protopectina, facilitando su solubilización y aumentando el rendimiento. Por el contrario, un pH más alto no es tan efectivo para hidrolizar la protopectina, lo que limita la cantidad de pectina extraída. Por eso, en la mayoría de los procesos industriales y estudios, se recomienda trabajar con pH entre 1,5 y 3 para maximizar el rendimiento sin degradar la pectina.

### **Tiempo**

El tiempo de extracción es una variable clave en la hidrólisis ácida para obtener pectina. En mi investigación se trabajará entre un tiempo de 55 y 75 minutos, observé que un tiempo adecuado permite que la protopectina se hidrolice correctamente y se solubilice, aumentando así el rendimiento de pectina. Sin embargo, si el tiempo es muy corto, la extracción será incompleta y se obtendrá poca pectina. Por otro lado, un tiempo excesivamente largo puede causar la degradación de la pectina, afectando negativamente su calidad y rendimiento. Por eso, es fundamental encontrar un equilibrio en el tiempo de extracción para maximizar la cantidad y calidad de la pectina obtenida.

**Tabla II-5 Factores a estudiar con sus respectivos niveles**

| <b>Variable</b>                       | <b>Rango</b> |
|---------------------------------------|--------------|
| <b>pH (H<sup>+</sup>)</b>             | 1,5 – 2,5    |
| <b>Tiempo de hidrólisis (min)</b>     | 55 - 75      |
| <b>Temperatura de hidrólisis (°C)</b> | 65 - 85      |

**Fuente:** Elaboración propia

La variable respuesta en este trabajo es el rendimiento (% $\eta$ ) de extracción de pectina, es decir, el porcentaje de pectina obtenida respecto a la materia prima utilizada. Para facilitar el trabajo de análisis se usará un rendimiento según la siguiente ecuación:

$$\% \eta = \frac{m \text{ pectina seca}}{m \text{ cascara fresca}} * 100 \quad \text{Ec. (2-1)}$$

Esta variable dependiente permite evaluar qué tan eficiente es el proceso bajo diferentes condiciones de factores como pH, temperatura y tiempo de extracción. Además, el rendimiento es un indicador clave para optimizar el proceso y asegurar la calidad y cantidad del producto final

## 2.4. Diseño experimental

El diseño experimental factorial es un tipo de diseño utilizado en la investigación científica para investigar los efectos de múltiples variables independientes en una variable dependiente. En este diseño, se prueban todas las combinaciones posibles de las variables independientes, lo que permite a los investigadores examinar los efectos principales de cada una. En este caso las variables operativas para la obtención de pectina y obtener conclusiones acerca de la influencia de las variables en la obtención de este producto.

Estas son algunas características clave del diseño experimental factorial:

- Implica manipular dos o más variables independientes simultáneamente.
- Permite a los investigadores examinar los efectos de cada variable independiente sobre la variable dependiente, así como cualquier interacción entre las variables independientes.
- Puede usarse para probar hipótesis sobre los principales efectos e interacciones de múltiples variables independientes en una variable dependiente.
- Se puede representar mediante una tabla de diseño factorial, que muestra todas las combinaciones posibles de las variables independientes y sus niveles correspondientes.

- Se usa comúnmente en la investigación experimental en psicología y otros campos para investigar fenómenos complejos que involucran múltiples factores.

Los factores y los niveles son componentes importantes que permiten a los investigadores manipular y estudiar variables sistemáticamente.

**Factores:** Los factores son las variables independientes en un diseño experimental. Representan las variables que los investigadores están interesados en estudiar y manipular para observar sus efectos sobre la variable dependiente. Los factores pueden ser categóricos o continuos.

- **Factores categóricos:** Los factores categóricos tienen categorías o niveles distintos.
- **Factores continuos:** los factores continuos representan variables que pueden tomar cualquier valor dentro de un rango específico.

**Niveles:** Los niveles son los valores o categorías específicos que puede tomar un factor. Cada factor puede tener uno o más niveles, y la combinación de niveles de diferentes factores crea condiciones de tratamiento en un experimento. Los niveles deben ser distintos y estar bien definidos para garantizar la claridad y evitar la ambigüedad.

En un diseño factorial  $2^2$  ( $k = 2$ ), hay dos factores, cada uno con dos niveles. Esto da como resultado un total de  $2^2 = 4$  combinaciones de tratamientos. Los factores y niveles se pueden representar de la siguiente manera:

Factor 1 (A): Nivel 1 (-1), Nivel 2 (+1) Factor 2 (B): Nivel 1 (-1), Nivel 2 (+1)

Las cuatro combinaciones de tratamiento son: A1B1, A1B2, A2B1, A2B2

En este estudio se realizará un diseño factorial  $2^3$  ( $k = 3$ ), donde hay tres factores, cada uno con dos niveles. Esto da como resultado un total de  $2^3 = 8$  combinaciones de tratamientos o experimentos. Los factores y niveles se pueden representar de la siguiente manera:

Factor 1 (A): Nivel 1 (-1), Nivel 2 (+1)

Factor 2 (B): Nivel 1 (-1), Nivel 2 (+1)

Factor 3 (C): Nivel 1 (-1), Nivel 2 (+1)

Las ocho combinaciones de tratamiento son: A1B1C1, A1B1C2, A1B2C1, A1B2C2, A2B1C1, A2B1C2, A2B2C1, A2B2C.

**Tabla II-6 Matriz de experimentos**

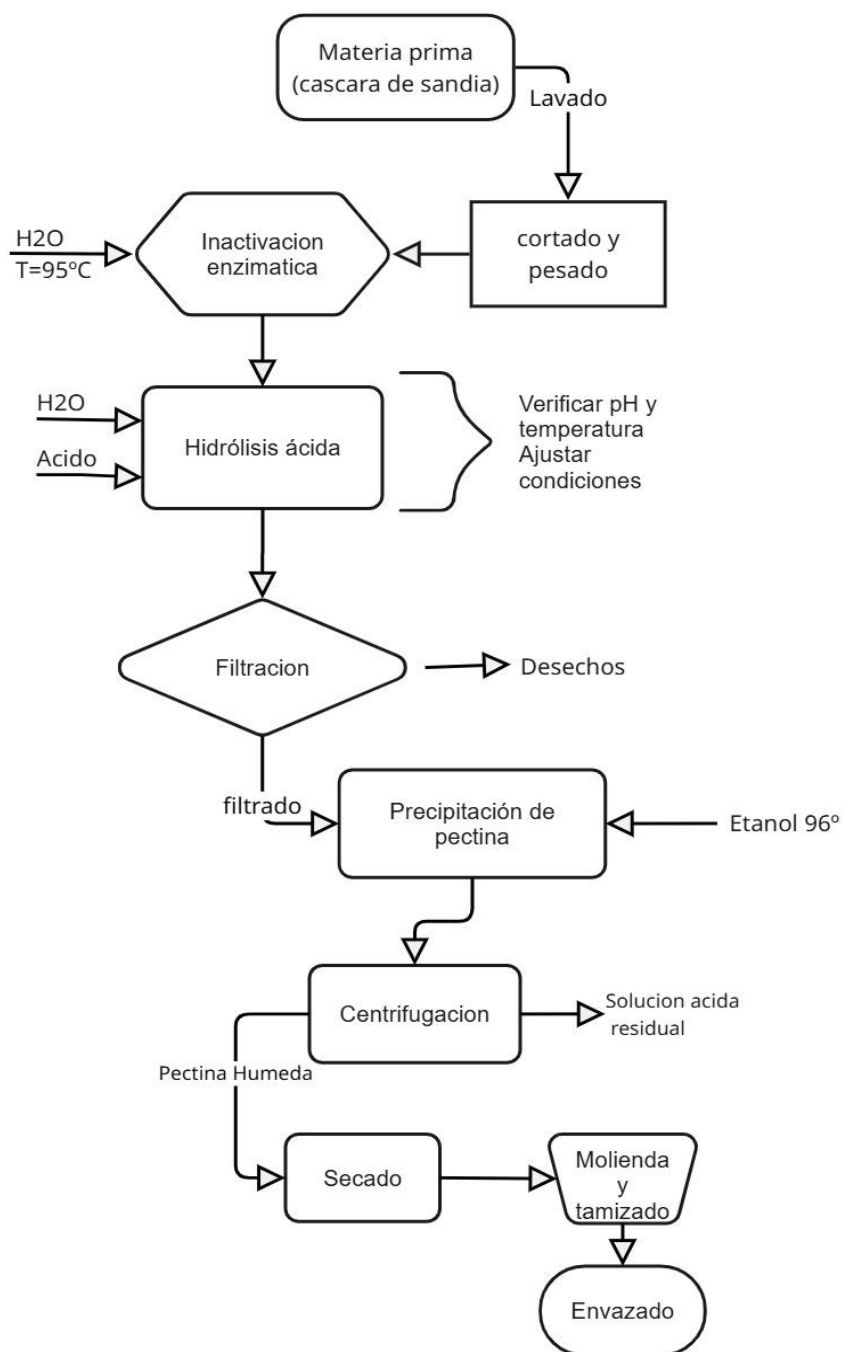
| Experimento | Etiqueta | Variable A (pH) | Variable B (Temp.) | Variable C (Tiempo) | pH (H <sup>+</sup> ) | Temperatura (°C) | Tiempo (min) |
|-------------|----------|-----------------|--------------------|---------------------|----------------------|------------------|--------------|
| 1           | (1)      | -               | -                  | -                   | 1,5                  | 65               | 55           |
| 2           | a        | +               | -                  | -                   | 2,5                  | 65               | 55           |
| 3           | b        | -               | +                  | -                   | 1,5                  | 85               | 55           |
| 4           | ab       | +               | +                  | -                   | 2,5                  | 85               | 55           |
| 5           | c        | -               | -                  | +                   | 1,5                  | 65               | 75           |
| 6           | ac       | +               | -                  | +                   | 2,5                  | 65               | 75           |
| 7           | bc       | -               | +                  | +                   | 1,5                  | 85               | 75           |
| 8           | abc      | +               | +                  | +                   | 2,5                  | 85               | 75           |

**Fuente:** Elaboración propia

El dominio experimental de una variable continua se expresa con los valores mínimo y máximo que puede tomar, y se le asigna la notación codificada: (-) nivel inferior, (+) nivel superior.

## 2.5. Descripción del proceso seleccionado

**Figura 2-1 Diagrama de flujo de hidrólisis ácida para la extracción de pectina de cáscara de sandía**



**Fuente:** Elaboración propia

### 2.5.1. Selección de la materia prima

La materia prima se obtendrá por la técnica de muestreo aleatoria, en este caso se comprará la sandía de comerciantes minoristas del mercado, se seleccionará aleatoriamente sandías individuales del lote de cosecha elegido.

Una vez seleccionadas las sandías, se retirará la cáscara con un cuchillo limpio y estéril, se recolectarán las cáscaras de diferentes partes de cada sandía para capturar cualquier variación potencial, luego se combinarán las cortezas individuales para crear una muestra compuesta.

### **2.5.2. Lavado de la materia prima**

Las cáscaras de sandía se lavan con agua para eliminar impurezas, residuos de suciedad o contaminantes, esto para reducir la carga microbiana presente en la cáscara.

**Fotografía 2-1 Cáscara de sandía**



**Fuente:** Elaboración propia

### **2.5.3. Corte y pesado de la materia prima**

Las cáscaras se cortan en trozos pequeños o se trituran para aumentar la superficie de contacto en las etapas posteriores. En este caso se cortaron las cáscaras en trozos uniformes con un cortador de verduras y se procedió a realizar el pesado en la balanza analítica en el LOU.

**Fotografía 2-2 Cáscara de sandía cortada**



**Fuente:** Elaboración propia

#### **2.5.4. Inactivación Enzimática**

Las cáscaras lavadas se tratan con agua a 95°C. Este paso es crucial para inactivar enzimas naturales (como pectinasas) que podrían degradar la pectina.

Se agregaron 100 gramos de cascara de sandia en un vaso de precipitado y se añadieron 200 ml de agua, posteriormente se calentó hasta el punto de ebullición durante 15 minutos, posteriormente se realiza un escurrido retirando el agua caliente y las cáscaras se enfrían rápidamente para evitar sobrecocción.

**Fotografía 2-3 Inactivación enzimática**



**Fuente:** Elaboración propia

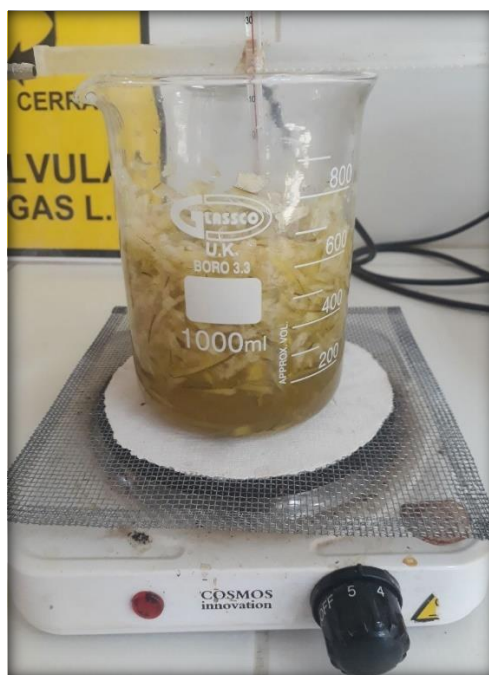
#### **2.5.5. Hidrólisis ácida**

Para obtener pectina a partir de la cáscara de sandia se realizó mediante el método de hidrólisis ácida, las cáscaras se colocaron en una solución de ácido cítrico, con un pH

ajustado entre 1,5 y 2,5 utilizando un pH-metro. Una vez alcanzado el pH deseado, la mezcla se calienta a 65–85°C durante 55–75 minutos bajo agitación suave. Durante esta etapa crítica del proceso, se descomponen las estructuras celulares de la cáscara de sandía, principalmente la pared celular y la lámina media, lo que facilita la liberación y separación eficiente de la pectina contenida en los tejidos de la cáscara.

El calentamiento sostenido permite que los enlaces que mantienen unida la pectina a otros componentes de la matriz celular se debiliten, mientras que el ambiente ácido promueve la hidrólisis de las cadenas de protopectina, convirtiéndolas en pectina soluble. La agitación constante garantiza una distribución uniforme del calor y del ácido, optimizando así el rendimiento de extracción de pectina de alta calidad a partir de este subproducto agroindustrial de la sandía.

#### **Fotografía 2-4 Hidrólisis ácida**



**Fuente:** Elaboración propia

#### **2.5.6. Filtración**

Terminada la hidrólisis ácida se retira del calentador y se deja enfriar por unos 10 min y se procede a realizar una filtración gruesa en la cual se usa un colador o malla para

retirar los residuos fibrosos, posteriormente se realiza una filtración fina de la solución ácida separada anteriormente, para ello se usó el método de filtración al vacío para eliminar partículas pequeñas. El filtrado claro contiene la pectina disuelta.

**Fotografía 2-5 Filtración al vacío de la solución ácida**



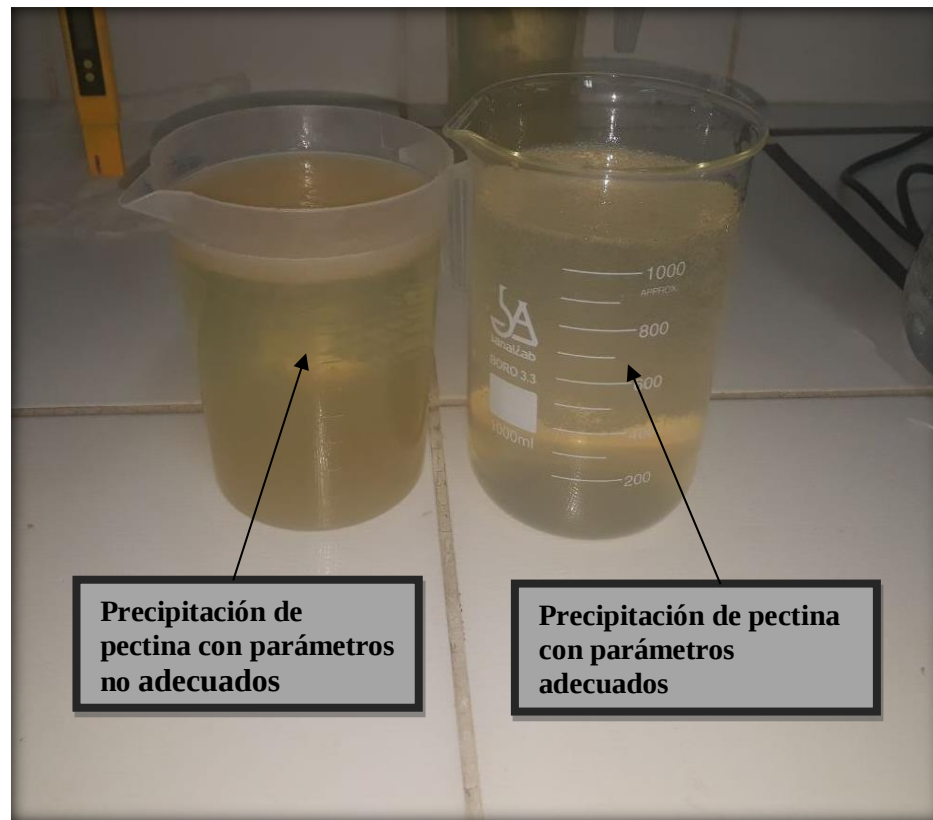
**Fuente:** Elaboración propia

#### **2.5.7. Precipitación de Pectina**

Para la precipitación de la pectina se le añade etanol al 96% a la solución ácida obtenida en el anterior paso en una proporción de 80 % en volumen de la solución, se realiza una agitación suave y se deja reposar por unas 15 horas aproximadamente hasta que se separe la pectina.

El etanol reduce la solubilidad de la pectina, formando un gel o precipitado blanquecino. También ayuda a deshidratar y purificar la pectina.

**Fotografía 2-6 Precipitación de pectina mediante etanol al 96%**



**Fuente:** Elaboración propia

### 2.5.8. Centrifugación

Una vez precipitada la pectina se realizó un proceso de centrifugación para la separación de fase, la muestra se centrifugó a 10.000 rpm durante el tiempo de 10 minutos por cada ciclo, en la centrifugación se sedimenta la pectina húmeda para la separación posteriormente se escurre el sobrenadante, en este caso la solución residual con ácido y etanol, que puede reciclarse o neutralizarse antes de su descarte y la pectina se recibe en unas cajas Petri esterilizadas.

**Fotografía 2-7 Centrifugación de la pectina**



**Fuente:** Elaboración propia

#### 2.5.9. Secado

Para el secado de la pectina extraída se realizó en una incubadora en la cual se colocó las muestras de pectina húmeda y se dejó secar a una temperatura constante de  $45 \pm 5$  hasta que el peso de la pectina seca sea constante.

**Fotografía 2-8 Secado de la pectina en la incubadora**



**Fuente:** Elaboración propia

#### 2.5.10. Molienda y Tamizado

Se realizó la molienda de la pectina seca en un mortero hasta triturar en trozos pequeños y luego se pasó a un molinillo eléctrico donde se pulverizó. Posteriormente se pasó a un tamizador con mallas de diferentes aberturas. El producto final se hizo pasar a través de una malla N°60 ASTM (equivalente a 250 micrones), con el fin de separar grumos y partículas gruesas, los cuales se volvieron a moler hasta obtener un polvo fino y homogéneo. Este paso es fundamental para asegurar la calidad, fluidez y consistencia de la pectina.

**Fotografía 2-9 Tamizado de la pectina obtenida**



**Fuente:** Elaboración propia

#### **2.5.11. Envasado**

La pectina previamente molida se almacenó en bolsas herméticas de polietileno grueso para conservación y evitar contaminación, posteriormente se almacenó en un lugar oscuro, seco y ambiente fresco a temperaturas  $<25^{\circ}\text{C}$ , para luego realizar los análisis fisicoquímicos correspondientes.

**Fotografía 2-10 Pectina obtenida a partir de cáscara de sandía**



**Fuente:** Elaboración propia

#### **2.6. Materiales, equipos y reactivos**

Los materiales, equipos y reactivos necesarios para el proceso de extracción de pectina de la cáscara de sandía, así como también para los diferentes análisis fisicoquímicos del producto se detallan a continuación.

### 2.6.1. Materiales

Los materiales que fueron necesarios para la obtención de pectina y para los análisis realizados se enlistan a continuación.

**Tabla II-7 Materiales usados en la extracción de pectina**

| MATERIAL             | TIPO                | CAPACIDAD/TAMAÑO | CANTIDAD |
|----------------------|---------------------|------------------|----------|
| Vasos de precipitado | Vidrio borosilicato | 1000 ml          | 2        |
| Vasos de precipitado | Vidrio borosilicato | 250 ml           | 2        |
| Probetas             | Vidrio borosilicato | 100 ml           | 1        |
| Probetas             | Vidrio borosilicato | 25 ml            | 1        |
| Probetas             | Polietileno         | 250 ml           | 1        |
| Embudo Büchner       | Porcelana           | Grande           | 1        |
| Espátula             | Metal               | Pequeña          | 1        |
| Matraz Erlenmeyer    | Vidrio borosilicato | 250 ml           | 2        |
| Matraz Kitasato      | Vidrio borosilicato | 1000 ml          | 1        |
| Bureta               | Vidrio borosilicato | 50 ml            | 1        |
| Caja Petri           | Vidrio borosilicato | 100 mm           | 4        |
| Varilla              | Vidrio pyrex        | Mediano          | 1        |
| Mortero              | Porcelana           | Mediano          | 1        |
| Cuchillo             | Acero inoxidable    | Mediano          | 1        |
| Termómetro           | de Hg               | -10 a 100 °C     | 1        |
| Papel filtro         | Algodón Celulosa    | Grande           | 6        |
| Piceta               | Plástico            | 800 ml           | 1        |

**Fuente:** Elaboración propia

### 2.6.2. Equipos e instrumentos

Los equipos e instrumentos necesarios para la extracción de pectina fueron los siguientes.

**Tabla II-8 Equipos e instrumentos**

| Nº | TIPO                    |
|----|-------------------------|
| 1  | Calentador eléctrico    |
| 2  | Balanza analítica       |
| 3  | Centrífuga              |
| 4  | Bomba de vacío          |
| 5  | pH-metro                |
| 6  | Incubadora              |
| 7  | tamizador               |
| 8  | Viscosímetro rotacional |

**Fuente:** Elaboración propia

### 2.6.3. Reactivos

Los reactivos utilizados en la hidrólisis ácida para la obtención de pectina y los usados para la caracterización fisicoquímica de la misma se describen en la siguiente tabla.

**Tabla II-9 Reactivos**

|                                      | REACTIVOS                  |
|--------------------------------------|----------------------------|
| <b>Hidrólisis ácida</b>              | Ácido cítrico              |
|                                      | Agua destilada             |
|                                      | Etanol al 96%              |
| <b>Caracterización fisicoquímica</b> | Indicador fenolftaleína.   |
|                                      | Hidróxido de sodio 0,25 N. |
|                                      | Hidróxido de sodio 0,1 N.  |
|                                      | Ácido clorhídrico 0,25 N.  |

**Fuente:** Elaboración propia

# **CAPÍTULO III**

## **RESULTADOS Y DISCUSIÓN**

### 3.1 Resultados de caracterización fisicoquímica de la cáscara de sandía

Se llevó a cabo la caracterización fisicoquímica de la materia prima en las instalaciones del Centro de Análisis, Investigación y Desarrollo (CEANID) de la UAJMS. Los resultados obtenidos se detallan en la siguiente tabla.

**Tabla III-1 Caracterización fisicoquímica de la cáscara de sandía**

| PARÁMETRO                      | TÉCNICA y/o MÉTODO DE ENSAYO | UNIDAD    | RESULTADO |
|--------------------------------|------------------------------|-----------|-----------|
| <b>Físico Químicos</b>         |                              |           |           |
| <b>Cenizas</b>                 | NB 39034:10                  | g/100g    | 0,88      |
| <b>Fibra</b>                   | Digestión ácida              | g/100g    | 1,43      |
| <b>Grasa</b>                   | NB 313019:06                 | g/100g    | 0,11      |
| <b>Hidratos de carbono</b>     | NB 312031:06                 | g/100g    | 6,10      |
| <b>Humedad</b>                 | NB 313010:05                 | g/100g    | 92,16     |
| <b>Proteína total (Nx6,25)</b> | NB/ISO 8968-1:08             | g/100g    | 0,75      |
| <b>Valor energético</b>        | NB 312032:06                 | Kcal/100g | 28        |

**Fuente:** CEANID, 2024

### 3.2. Resultados de la pectina extraída

De acuerdo con el diseño factorial, se realizó la extracción de pectina a partir de cáscara de sandía utilizando 100 g de materia prima, bajo condiciones de temperatura (65 y 85 °C), pH (1,5 y 2,5) y tiempo de hidrólisis (55 y 75 min). Posteriormente, se cuantificó el rendimiento obtenido y se definieron las condiciones óptimas para el proceso de extracción.

**Tabla III-2 Resultados de rendimiento de la pectina extraída**

| N°<br>Exp | PARÁMETROS |              |                 | RÉPLICAS                                                                     |        |        | Promedio<br>(%) |
|-----------|------------|--------------|-----------------|------------------------------------------------------------------------------|--------|--------|-----------------|
|           |            |              |                 | Rendimiento= $\frac{m \text{ pectina seca}}{m \text{ cascara fresca}} * 100$ |        |        |                 |
|           | pH<br>(H+) | Temp<br>(°C) | Tiempo<br>(min) | R1 (%)                                                                       | R2 (%) | R3 (%) |                 |
| 1         | 1,5        | 65           | 55              | 0,721                                                                        | 0,735  | 0,712  | 0,723           |
| 2         | 2,5        | 65           | 55              | 0,512                                                                        | 0,525  | 0,503  | 0,513           |
| 3         | 1,5        | 85           | 55              | 1,185                                                                        | 1,192  | 1,193  | 1,19            |
| 4         | 2,5        | 85           | 55              | 0,776                                                                        | 0,762  | 0,784  | 0,774           |
| 5         | 1,5        | 65           | 75              | 0,892                                                                        | 0,906  | 0,883  | 0,894           |
| 6         | 2,5        | 65           | 75              | 0,632                                                                        | 0,646  | 0,624  | 0,634           |
| 7         | 1,5        | 85           | 75              | 1,254                                                                        | 1,261  | 1,256  | 1,257           |
| 8         | 2,5        | 85           | 75              | 0,874                                                                        | 0,887  | 0,865  | 0,875           |

**Fuente:** Elaboración propia

La extracción óptima de pectina de cáscara de sandía se obtuvo a pH 1,5, 85°C y 75 min, alcanzando un rendimiento máximo promedio de 1,257%, mientras que la combinación menos eficiente (pH 2,5, 65°C, 55 min) solo produjo 0,513%. El análisis reveló que la temperatura fue el factor más influyente, seguido del pH y el tiempo.

### **3.3. Resultados de la caracterización fisicoquímica de la pectina extraída**

#### **3.3.1. Resultado de análisis fisicoquímico de producto**

Para la obtención de pectina para los análisis correspondientes se realizaron con los parámetros que dieron un mejor rendimiento, la caracterización fisicoquímica en el Centro de Análisis Investigación y Desarrollo (CEANID) de la UAJMS, cuyos resultados se muestran en la siguiente tabla.

**Tabla III-3 Caracterización fisicoquímica de la pectina de la cáscara de sandía**

| PARÁMETRO                            | TÉCNICA y/o MÉTODO DE ENSAYO | UNIDAD | RESULTADO |
|--------------------------------------|------------------------------|--------|-----------|
| <b>Físico Químicos</b>               |                              |        |           |
| <b>Cenizas</b>                       | NB 39034:10                  | g/100g | 3,67      |
| <b>pH</b>                            | Potenciométrico              |        | 3,1       |
| <b>Humedad</b>                       | NB 313010:05                 | g/100g | 8,49      |
| <b>Bacterias aeróbicas mesófilas</b> | NB 32003:02                  | UFC/g  | 100       |
| <b>Coliformes totales</b>            | NB 32003:02                  | UFC/g  | -         |

**Fuente:** CEANID, 2024

### 3.3.2. Resultados de acidez libre y peso equivalente

Para establecer la acidez libre y el peso equivalente de la pectina obtenida de cáscara de sandía, se efectuaron análisis por triplicado mediante titulación ácido-base, para lo cual se utilizó una muestra estándar de 0,5 g de pectina obtenida y NaOH 0,1 N. Durante el proceso de valoración se consumió en promedio 0,596 miliequivalentes de hidróxido de sodio (equivalente a 5,96 ml de solución).

**Tabla III-4 Datos obtenidos de la valoración acido-base**

| N° de ensayo          | Volumen Gastado NaOH (ml) | Normalidad NaOH | Miliequivalentes (meq) |
|-----------------------|---------------------------|-----------------|------------------------|
| Ensayo 1              | 5,6                       | 0,1 N           | 0,56                   |
| Ensayo 2              | 6,3                       | 0,1 N           | 0,63                   |
| Ensayo 3              | 6,0                       | 0,1 N           | 0,60                   |
| <b>Valor promedio</b> | 5,96                      | -               | 0,596                  |

**Fuente:** Elaboración propia

#### Acidez libre (meq/g)

**Muestra 1:**

$$\text{Acidez libre} = \frac{0,56}{0,5} = 1,12 \text{ meq/g}$$

**Muestra 2:**

$$\text{Acidez libre} = \frac{0,63}{0,5} = 1,26 \text{ meq/g}$$

**Muestra 3:**

$$\text{Acidez libre} = \frac{0,60}{0,5} = 1,20 \text{ meq/g}$$

**Peso equivalente (mg/meq)**

Se transforma 0,5 g de pectina a mg, lo cual sería igual 500 mg.

**Muestra 1:**

$$\text{Peso equivalente} = \frac{500}{0,56} = 892,86 \text{ mg/meq}$$

**Muestra 2:**

$$\text{Peso equivalente} = \frac{500}{0,63} = 793,65 \text{ mg/meq}$$

**Muestra 3:**

$$\text{Peso equivalente} = \frac{500}{0,60} = 833,33 \text{ mg/meq}$$

**Tabla III-5 Resultados del análisis de acidez libre y peso equivalente de la pectina obtenida de cáscara de sandía**

| N° de ensayo          | Consumo de NaOH (mili-equivalentes) | Acidez libre (meq NaOH/g de pectina) | Peso equivalente (mg de pectina/meq NaOH) |
|-----------------------|-------------------------------------|--------------------------------------|-------------------------------------------|
| Ensayo 1              | 0,56                                | 1,12                                 | 892,86                                    |
| Ensayo 2              | 0,63                                | 1,26                                 | 793,65                                    |
| Ensayo 3              | 0,60                                | 1,20                                 | 833,33                                    |
| <b>Valor promedio</b> | <b>0,596</b>                        | <b>1,19</b>                          | <b>839.95</b>                             |

**Fuente:** Elaboración propia

Basándose en los resultados obtenidos, la pectina extraída de cáscara de sandía mostró una acidez libre promedio de 1,19 meq NaOH/g de pectina. Este valor indica que, para

neutralizar completamente la acidez contenida en cada gramo de pectina obtenida, se necesitan 1,19 miliequivalentes de hidróxido de sodio.

El valor relativamente bajo de acidez libre observado en la pectina extraída de cáscara de sandía sugiere que el producto obtenido posee características favorables en términos de calidad y grado de purificación. Esta característica resulta especialmente relevante para su potencial aplicación en la industria alimentaria y otros sectores industriales, donde se demanda pectina con elevados estándares de calidad y pureza para garantizar el desempeño óptimo en los procesos de gelificación y espesamiento.

### **3.3.3. Resultados del porcentaje de metoxilo, grado de esterificación y ácido anhídrido galacturónico**

Para establecer el porcentaje de metoxilo, grado de esterificación y contenido de ácido anhídrido galacturónico en la pectina obtenida de cáscara de sandía, se realizaron análisis por triplicado mediante el método de titulación ácido-base. Durante el proceso analítico se consumió en promedio 1,17 miliequivalentes de hidróxido de sodio (equivalente a 11,70 ml de solución).

#### **Cálculos de contenido de metoxilo**

- Para (meq)B=1,14

$$\% \text{ Metoxilo} = \frac{1,14 * 31 * 100}{500} = \frac{3534}{500} = 7,068\%$$

- Para (meq)B=1,22

$$\% \text{ Metoxilo} = \frac{1,22 * 31 * 100}{500} = \frac{3782}{500} = 7,564\%$$

- Para (meq)B=1,15

$$\% \text{ Metoxilo} = \frac{1,15 * 31 * 100}{500} = \frac{3565}{500} = 7,130\%$$

#### **Cálculos de Grado de esterificación**

- **Muestra 1:**

$$\%GE = \frac{1,14}{0,56 + 1,14} * 100 = \frac{1,14}{1,70} * 100 = 67,06\%$$

➤ **Muestra 2:**

$$\%GE = \frac{1,22}{0,63 + 1,22} * 100 = \frac{1,22}{1,85} * 100 = 65,95\%$$

➤ **Muestra 3:**

$$\%GE = \frac{1,15}{0,60 + 1,15} * 100 = \frac{1,15}{1,75} * 100 = 65,71\%$$

### **Cálculos de Ácido anhídrido galacturónico**

➤ **Muestra 1:**

$$\%AAG = \frac{(0,56 + 1,14) * 0,176}{0,5} * 100 = 59,84\%$$

➤ **Muestra 2:**

$$\%AAG = \frac{(0,63 + 1,22) * 0,176}{0,5} * 100 = 65,12\%$$

➤ **Muestra 3:**

$$\%AAG = \frac{(0,60 + 1,15) * 0,176}{0,5} * 100 = 61,60\%$$

**Tabla III-6 Resultados del análisis de porcentaje de metoxilo, grado de esterificación y ácido anhídrido galacturónico de la pectina extraída**

| <b>N° de ensayo</b>   | <b>Consumo de NaOH (miliequivalentes)</b> | <b>Contenido de metoxilo (%)</b> | <b>Grado de esterificación (%)</b> | <b>Ácido anhídrido galacturónico (%)</b> |
|-----------------------|-------------------------------------------|----------------------------------|------------------------------------|------------------------------------------|
| Ensayo 1              | 1,14                                      | 7,068                            | 67,06                              | 59,84                                    |
| Ensayo 2              | 1,22                                      | 7,564                            | 65,95                              | 65,12                                    |
| Ensayo 3              | 1,15                                      | 7,130                            | 65,71                              | 61,60                                    |
| <b>Valor promedio</b> | <b>1,17</b>                               | <b>7,25</b>                      | <b>66,24</b>                       | <b>62,19</b>                             |

**Fuente:** Elaboración propia

### 3.3.4. Resultados de grado de gelificación

Para cuantificar el grado de gelificación (°SAG), se aplicó la Ecuación (1-6) a los datos experimentales derivados de la formulación de los geles.

**Datos:**

**g de sacarosa = 100 g**

**K (Factor de corrección) = 1**

**Muestra 1 (0,6 g de pectina)**

$$^{\circ}\text{SAG} = \frac{100 \text{ g}}{0,6 \text{ g} * 1} = 166,67$$

**Muestra 2 (0,9 g de pectina)**

$$^{\circ}\text{SAG} = \frac{100 \text{ g}}{0,9 \text{ g} * 1} = 111,11$$

**Muestra 3 (1,4 g de pectina)**

$$^{\circ}\text{SAG} = \frac{100 \text{ g}}{1,4 \text{ g} * 1} = 71,42$$

El gel que exhibió las propiedades más favorables determinadas visualmente fue la muestra N°3, la cual presentó mejores características de gelificación (mayor firmeza y consistencia), la muestra N°2 también presentó similares texturas lo que evidencia una gelificación óptima. Por consiguiente, el grado de gelificación de la pectina extraída de cáscara de sandía estaría entre 71,4°SAG y 111,1°SAG.

**Tabla III-7 Resultados del análisis de grado de gelificación y viscosidad de la pectina extraída de cáscara de sandía**

| N° | Cantidad de pectina (g) | Grado de gelificación (°SAG) | Viscosidad a 60°C (cP) |
|----|-------------------------|------------------------------|------------------------|
| 1  | 0,6                     | 166,7                        | 5,25                   |
| 2  | 0,9                     | 111,1                        | 7,92                   |
| 3  | 1,4                     | 71,4                         | 13,89                  |

**Fuente:** Elaboración propia

### 3.3.5. Comparación entre la pectina extraída a partir de la cáscara de sandía (*Citrullus lanatus*) y la pectina estándar

**Tabla III-8 Análisis fisicoquímico de la pectina extraída en comparación con la pectina estándar**

| Parámetro                    | Unidad | Pectina estándar  | Pectina extraída de la cáscara de sandía |
|------------------------------|--------|-------------------|------------------------------------------|
| Acidez libre                 | meq/g  | 0,78 ± 0,46       | 1,19                                     |
| Cenizas                      | %      | 0,37 ± 3,39       | 3,67                                     |
| Humedad                      | %      | 8,51 ± 1,95       | 8,49                                     |
| pH (20°C)                    | H+     | 2,8 - 3,60        | 3,1                                      |
| Peso equivalente             | mg/meq | 1775,46 ± 1143,78 | 839,95                                   |
| Contenido de metoxilo        | %      | 6,93 ± 3,22       | 7,25                                     |
| Grado de esterificación      | %      | 74,71 ± 3,32      | 66,24                                    |
| Ácido galacturónico          | %      | 68,29 ± 13,39     | 62,19                                    |
| Grado de gelificación        | °SAG   | 150 ± 5           | 71,4-111,1                               |
| Color                        | -      | blanco crema      | Amarillo pastel                          |
| Bacterias aerobias mesófilas | UFC/g  | 200               | 150                                      |
| Coliformes totales           | UFC/g  | Ausente           | Ausente                                  |

**Fuente:** Elaboración propia

Los resultados obtenidos en la caracterización fisicoquímica de la pectina extraída de cáscara de sandía fueron contrastados con los parámetros establecidos en la pectina estándar, que cuenta con el respaldo de organizaciones internacionales como FAO, FCC y ECC.

La pectina obtenida presentó valores de pH y contenido de cenizas de 3,1 y 3,67% respectivamente, parámetros que se ajustan satisfactoriamente al intervalo normativo. El valor de pH ácido registrado constituye un factor favorable para el proceso de gelificación, mientras que el contenido de cenizas, definido como el material inorgánico residual que permanece tras la combustión completa de los componentes orgánicos de la muestra, refleja un nivel reducido de contaminantes inorgánicos. Esta

baja concentración de cenizas es indicativa de un elevado grado de pureza en la pectina extraída de cáscara de sandía.

La pectina extraída de cáscara de sandía registró un contenido de humedad de 8,49%, valor que se sitúa dentro de los parámetros establecidos para pectinas de calidad estándar. Este parámetro resulta fundamental dado que el nivel de humedad incide directamente en la estabilidad del producto, sus propiedades texturales y su calidad general.

En cuanto a la acidez libre, la pectina obtenida mostró un valor de 1,19 meq/g, el cual supera ligeramente el intervalo especificado para pectinas estándar. Por su parte, el peso equivalente determinado fue de 839,95 mg/meq, encontrándose este parámetro dentro del rango normativo establecido. La acidez libre corresponde a los grupos carboxilo no esterificados presentes en la estructura lineal de la molécula de pectina, mientras que el peso equivalente se define como la cantidad en miligramos de ácido galacturónico puro que equivale a un miliequivalente de grupos carboxilo libres en la cadena pectínica.

La pectina obtenida de cáscara de sandía presenta características que la sitúan dentro de un nivel de calidad satisfactorio, en cuanto al contenido de Metoxilo (% MeO) = 7,25%. Este valor clasifica a la pectina extraída de cáscara de sandía como de alto metoxilo (HMP). El umbral generalmente se sitúa alrededor del 7%.

Es importante considerar que el contenido de metoxilo desempeña un papel dual: por una parte, regula la cinética del proceso de gelificación y por otra, influye en las características sensoriales de los geles formados por el sistema pectina-azúcar. El ácido galacturónico constituye el indicador más relevante para evaluar la calidad de la pectina, estableciéndose una relación directa entre su concentración porcentual y el grado de pureza del producto obtenido.

La pectina extraída de cáscara de sandía alcanzó un grado de esterificación de 66,24, lo que permite clasificarla como pectina de alto metoxilo. Esta característica implica

que, al presentar un elevado grado de esterificación, el material requiere temperaturas más altas para lograr el proceso de gelificación óptimo.

La pectina presenta un alto grado de esterificación/metoxilación, evidenciado por su capacidad de gelificación rápida (71,4-111,1 °SAG). Esta propiedad le permite formar geles estables en medios ácidos con azúcar.

Respecto al análisis microbiológico, se registró un recuento de bacterias aerobias mesófilas de 150 UFC/g. Es relevante señalar que la detección de estas bacterias en productos alimentarios no implica necesariamente la existencia de microorganismos patógenos, y este valor se mantiene dentro de los límites establecidos para pectinas de calidad estándar. En cuanto a coliformes totales, los resultados mostraron ausencia de estos microorganismos. Cabe mencionar que los coliformes totales constituyen bacterias de origen ambiental, y su detección no representa forzosamente contaminación de origen fecal, sino que puede indicar exposición del producto a contaminación de tipo general durante su procesamiento o manipulación.

### **3.4. Análisis estadístico del diseño factorial**

Para evaluar el impacto y la interacción de las variables clave en nuestro proceso, se llevó a cabo un análisis de diseño factorial con los datos recopilados. Este análisis nos permitió examinar de manera sistemática los efectos principales de cada factor, así como las interacciones entre ellos, sobre la variable de respuesta. El objetivo era identificar qué factores tienen una influencia estadísticamente significativa y determinar la combinación óptima de sus niveles para alcanzar el resultado deseado.

Para el procesamiento e interpretación de los datos experimentales obtenidos en el estudio, se empleó el software estadístico especializado Minitab Versión 22. Esta herramienta fue fundamental para evaluar la significancia de las variables del proceso y entender sus efectos sobre el rendimiento.

#### **3.4.1. Influencia de variables de estudio**

En la extracción de pectina por hidrólisis ácida, las tres variables más influyentes son, sin duda, el pH, la temperatura y el tiempo de extracción. La correcta manipulación de

estas tres condiciones es crucial para maximizar el rendimiento y la calidad de la pectina.

Con el fin de evaluar sistemáticamente su impacto en el rendimiento, se implementó un diseño experimental factorial en el que cada una de estas variables fue estudiada en dos niveles distintos: un valor alto y un valor bajo. Esta metodología no solo permite cuantificar la influencia individual de cada factor, sino que también resulta fundamental para identificar las posibles interacciones significativas entre ellos, ofreciendo así una comprensión más completa y robusta del proceso.

### 3.4.2. Evaluación Estadística del Rendimiento como Variable de Respuesta

A continuación, se presenta el tratamiento estadístico aplicado a la variable de interés, el rendimiento. Esta variable de respuesta se define como la medida cuantitativa de la eficiencia del proceso y sirve como el indicador fundamental para evaluar el efecto de los factores estudiados. El propósito de este análisis es determinar si las variaciones observadas en el rendimiento son significativas y atribuibles a los cambios en los factores. Para lograr esto, se emplea la técnica de Análisis de Varianza (ANOVA), la cual descompone la variabilidad total del rendimiento para cuantificar la influencia de cada factor principal (pH, temperatura, tiempo) y de sus interacciones, permitiendo así identificar cuáles de ellos son estadísticamente significativos, para el estudio se tomó los datos de la tabla.

**Tabla III-9 Resumen del diseño**

|                  |           |                                  |             |
|------------------|-----------|----------------------------------|-------------|
| <b>Factores:</b> | <b>3</b>  | <b>Diseño de la base:</b>        | <b>3; 8</b> |
| <b>Corridas:</b> | <b>24</b> | <b>Réplicas:</b>                 | <b>3</b>    |
| <b>Bloques:</b>  | <b>1</b>  | <b>Puntos centrales (total):</b> | <b>0</b>    |

**Fuente:** Minitab 22

**Tabla III-10 Diseño factorial variable respuesta rendimiento**

| <b>Orden Corrida</b> | <b>Punto Central</b> | <b>Bloques</b> | <b>pH</b> | <b>Temperatura</b> | <b>Tiempo</b> | <b>Rendimiento</b> |
|----------------------|----------------------|----------------|-----------|--------------------|---------------|--------------------|
| 1                    | 1                    | 1              | 1,5       | 65                 | 55            | 0,721              |
| 2                    | 1                    | 1              | 2,5       | 65                 | 55            | 0,512              |

|    |   |   |     |    |    |       |
|----|---|---|-----|----|----|-------|
| 3  | 1 | 1 | 1,5 | 85 | 55 | 1,185 |
| 4  | 1 | 1 | 2,5 | 85 | 55 | 0,776 |
| 5  | 1 | 1 | 1,5 | 65 | 75 | 0,892 |
| 6  | 1 | 1 | 2,5 | 65 | 75 | 0,632 |
| 7  | 1 | 1 | 1,5 | 85 | 75 | 1,254 |
| 8  | 1 | 1 | 2,5 | 85 | 75 | 0,874 |
| 9  | 1 | 1 | 1,5 | 65 | 55 | 0,735 |
| 10 | 1 | 1 | 2,5 | 65 | 55 | 0,525 |
| 11 | 1 | 1 | 1,5 | 85 | 55 | 1,192 |
| 12 | 1 | 1 | 2,5 | 85 | 55 | 0,762 |
| 13 | 1 | 1 | 1,5 | 65 | 75 | 0,906 |
| 14 | 1 | 1 | 2,5 | 65 | 75 | 0,646 |
| 15 | 1 | 1 | 1,5 | 85 | 75 | 1,261 |
| 16 | 1 | 1 | 2,5 | 85 | 75 | 0,887 |
| 17 | 1 | 1 | 1,5 | 65 | 55 | 0,712 |
| 18 | 1 | 1 | 2,5 | 65 | 55 | 0,503 |
| 19 | 1 | 1 | 1,5 | 85 | 55 | 1,193 |
| 20 | 1 | 1 | 2,5 | 85 | 55 | 0,784 |
| 21 | 1 | 1 | 1,5 | 65 | 75 | 0,883 |
| 22 | 1 | 1 | 2,5 | 65 | 75 | 0,624 |
| 23 | 1 | 1 | 1,5 | 85 | 75 | 1,256 |
| 24 | 1 | 1 | 2,5 | 85 | 75 | 0,865 |

Fuente: Minitab 22

### 3.4.2.1. Análisis de varianza (ANOVA)

Tabla III-11 Nomenclatura utilizada en el análisis estadístico

| Variables | Descripción               | Tipo de Efecto |
|-----------|---------------------------|----------------|
| A         | pH                        | Principal      |
| B         | Tiempo de Hidrólisis      | Principal      |
| C         | Temperatura               | Principal      |
| AB        | pH x Tiempo               | Combinado      |
| AC        | pH x Temperatura          | Combinado      |
| BC        | Tiempo x Temperatura      | Combinado      |
| ABC       | pH x Tiempo x Temperatura | Combinado      |

Fuente: Minitab 22

**Tabla III-12 Coeficientes codificados variable respuesta rendimiento**

| <b>Término</b>               | <b>Efecto</b> | <b>Coef</b> | <b>EE del coef.</b> | <b>Valor T</b> | <b>Valor p</b> | <b>FIV</b> |
|------------------------------|---------------|-------------|---------------------|----------------|----------------|------------|
| <b>Constante</b>             |               | 0,85750     | 0,00253             | 338,33         | 0,000          |            |
| <b>pH</b>                    | -0,31667      | -0,15833    | 0,00253             | -62,47         | 0,000          | 1,00       |
| <b>Temperatura</b>           | 0,33333       | 0,16667     | 0,00253             | 65,76          | 0,000          | 1,00       |
| <b>Tiempo</b>                | 0,11500       | 0,05750     | 0,00253             | 22,69          | 0,000          | 1,00       |
| <b>PH*Temperatura</b>        | -0,08167      | -0,04083    | 0,00253             | -16,11         | 0,000          | 1,00       |
| <b>PH*Tiempo</b>             | -0,00333      | -0,00167    | 0,00253             | -0,66          | 0,520          | 1,00       |
| <b>Temperatura*Tiempo</b>    | -0,03000      | -0,01500    | 0,00253             | -5,92          | 0,000          | 1,00       |
| <b>PH*Temperatura*Tiempo</b> | 0,02167       | 0,01083     | 0,00253             | 4,27           | 0,001          | 1,00       |

**Fuente:** Minitab 22

La tabla III-11 Nos dice qué variables realmente afectan el rendimiento, basándonos en el Valor p. Si el Valor p es menor a 0,05, el efecto es estadísticamente significativo, como se puede observar la interacción AC (pH\*Tiempo) tiene un (Valor p = 0,520) lo cual nos indica que no es significativa. Este valor es mucho mayor que 0,05. Significa que el pH y el tiempo actúan de forma independiente; no hay un efecto combinado especial entre ellos.

Para refinar el modelo y mejorar su precisión, es una práctica común realizar un segundo análisis ANOVA. En este paso, se eliminan todos los factores e interacciones que resultaron no ser significativos, y su variabilidad se agrupa ("se manda") con el término del error. Esto permite obtener un modelo final más limpio y potente, centrado únicamente en las variables que tienen un impacto real en la respuesta, el resultado del segundo análisis se presenta en la siguiente tabla.

**Tabla III-13 Coeficientes codificados variable respuesta rendimiento 2**

| <b>Término</b>               | <b>Efecto</b> | <b>Coef</b> | <b>EE del coef.</b> | <b>Valor T</b> | <b>Valor p</b> | <b>FIV</b> |
|------------------------------|---------------|-------------|---------------------|----------------|----------------|------------|
| <b>Constante</b>             |               | 0,85750     | 0,00249             | 344,13         | 0,000          |            |
| <b>pH</b>                    | -0,31667      | -0,15833    | 0,00249             | -63,54         | 0,000          | 1,00       |
| <b>Temperatura</b>           | 0,33333       | 0,16667     | 0,00249             | 66,89          | 0,000          | 1,00       |
| <b>Tiempo</b>                | 0,11500       | 0,05750     | 0,00249             | 23,08          | 0,000          | 1,00       |
| <b>pH*Temperatura</b>        | -0,08167      | -0,04083    | 0,00249             | -16,39         | 0,000          | 1,00       |
| <b>Temperatura*Tiempo</b>    | -0,03000      | -0,01500    | 0,00249             | -6,02          | 0,000          | 1,00       |
| <b>pH*Temperatura*Tiempo</b> | 0,02167       | 0,01083     | 0,00249             | 4,35           | 0,000          | 1,00       |

**Fuente:** Minitab 22

La interpretación de los factores que sí importan sigue siendo la misma, pero ahora con mayor certeza estadística. Todos los términos que quedan en el modelo son altamente significativos (Valor  $p = 0,000$ ).

#### **Efectos Principales (Individuales)**

pH (Valor  $p = 0,000$ ): Es muy significativo. El coeficiente negativo (-0,15833) indica que, a mayor pH, menor es el rendimiento.

Temperatura (Valor  $p = 0,000$ ): Es muy significativa. El coeficiente positivo (0,16667) indica que, a mayor temperatura, mayor es el rendimiento.

Tiempo (Valor  $p = 0,000$ ): Es muy significativo. El coeficiente positivo (0,05750) indica que, a mayor tiempo, mayor es el rendimiento.

#### **Interacciones (Efectos Combinados)**

Las interacciones significativas implican que el efecto de un factor depende del nivel de otro.

Interacción pH\*Temperatura (Valor  $p = 0,000$ ): Es significativa lo que significa que el efecto del pH sobre el rendimiento cambia dependiendo de la temperatura a la que se trabaje y viceversa. No se puede optimizar uno sin pensar en el otro.

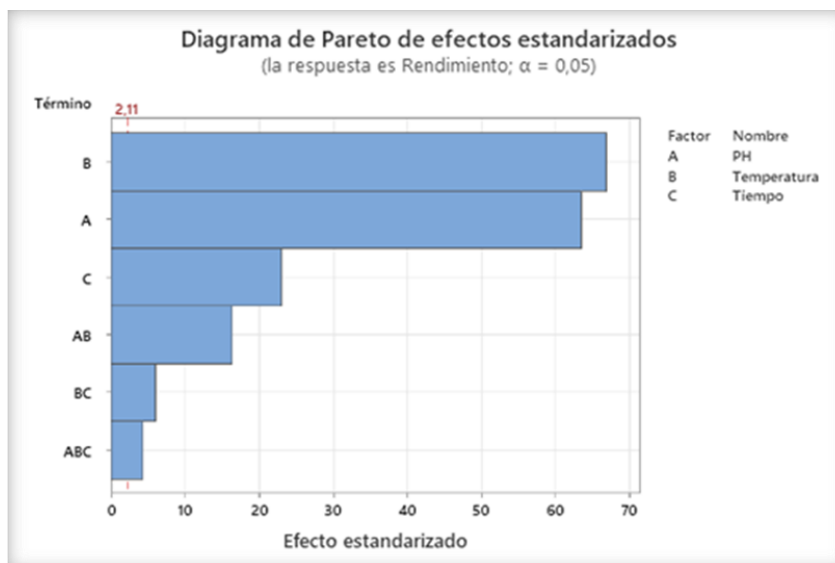
Interacción Temperatura\*Tiempo (Valor  $p = 0,000$ ): Es significativa lo que indica que el efecto de la temperatura depende de cuánto tiempo dure el proceso.

Interacción pH\*Temperatura\*Tiempo (Valor  $p = 0,000$ ): La interacción de los tres factores es significativa, esta es la conclusión más compleja. Significa que la relación entre dos factores, pH y temperatura es diferente según el nivel del tercer factor tiempo.

El FIV (Factor de Inflación de la Varianza) = 1,00 para todos los términos: Esto es ideal. Indica que no hay multicolinealidad, es decir, los factores son independientes entre sí y sus efectos pueden estimarse con precisión.

#### **3.4.2.2. Diagrama de Pareto**

**Figura 3-1 Diagrama de Pareto del proceso de extracción de pectina**



**Fuente:** Minitab 22

Este Diagrama de Pareto muestra de forma visual cuáles son los factores más importantes en tu experimento. La línea roja vertical en 2,11 es el umbral de significancia; cualquier efecto cuya barra cruce esta línea es estadísticamente significativo.

Todas las barras del gráfico cruzan la línea roja (2,11). Esto significa que todos los factores principales (A, B, C) y todas las interacciones (AB, BC, ABC) tienen un efecto estadísticamente significativo sobre el rendimiento.

El diagrama confirma de manera gráfica lo que las tablas de ANOVA y coeficientes indicaron por lo cual todos los factores y sus interacciones son importantes. Sin embargo, la Temperatura (B) es claramente el factor dominante que gobierna el rendimiento en el proceso, seguido de cerca por el pH (A). La presencia de interacciones significativas (AB, BC, ABC) refuerza la idea de que el proceso es complejo y los factores no deben analizarse de forma aislada.

**Tabla III-14 Resumen del modelo**

| S         | R-cuadrado | R-cuadrado(ajustado) | R-cuadrado (pred) |
|-----------|------------|----------------------|-------------------|
| 0,0122074 | 99,82%     | 99,75%               | 99,64%            |

Fuente: Minitab 22

Este bloque te dice qué tan bien se ajustan tus datos al modelo matemático.

S = 0,0124164 esto representa la desviación estándar de los residuos. Un valor tan bajo indica que las predicciones del modelo están muy cerca de los valores reales observados.

El R-cuadrado (R-squared) es 99,82%, es alto lo que significa que el 99,82% de la variabilidad en el rendimiento es explicada por el pH, la temperatura, el tiempo y sus interacciones. El modelo se ajusta casi perfectamente a los datos.

El R-cuadrado (ajustado) y (pred): Ambos valores (99,75% y 99,64%) son muy cercanos al R-cuadrado normal. Esto es una gran señal, pues confirma que el modelo no solo es bueno para explicar los datos que ya tienes, sino que también tiene una excelente capacidad para predecir nuevos resultados.

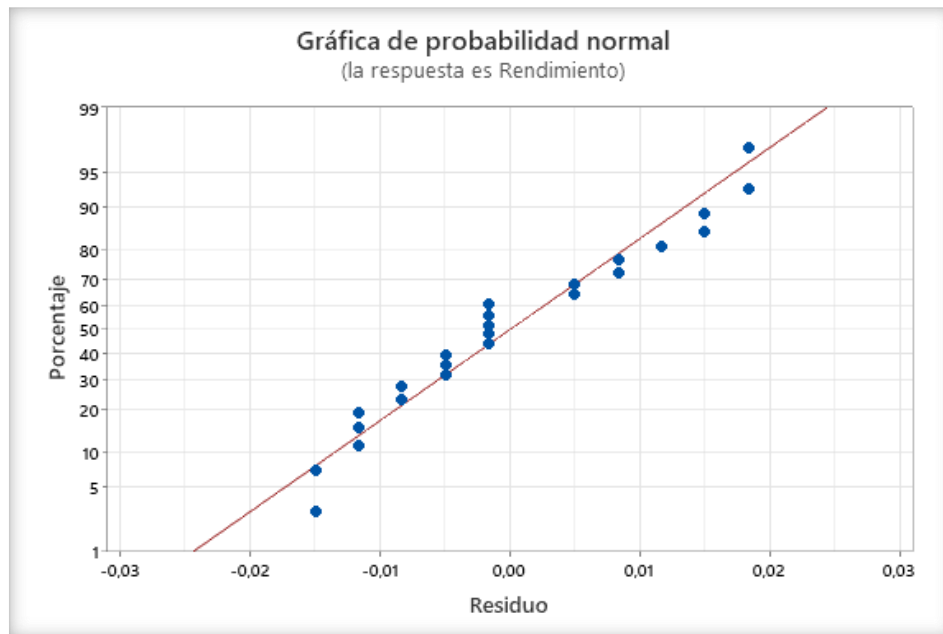
**Tabla III-15 Análisis de varianza (ANOVA) para el rendimiento de pectina con un nivel de significancia de 5 %**

| Fuente                      | GL | SC Ajust. | MC Ajust. | Valor F | Valor p |
|-----------------------------|----|-----------|-----------|---------|---------|
| Modelo                      | 6  | 1,39592   | 0,232653  | 1561,22 | 0,000   |
| Lineal                      | 3  | 1,34768   | 0,449228  | 3014,55 | 0,000   |
| pH                          | 1  | 0,60167   | 0,601667  | 4037,50 | 0,000   |
| Temperatura                 | 1  | 0,66667   | 0,666667  | 4473,68 | 0,000   |
| Tiempo                      | 1  | 0,07935   | 0,079350  | 532,48  | 0,000   |
| Interacciones de 2 términos | 2  | 0,04542   | 0,022708  | 152,38  | 0,000   |
| pH*Temperatura              | 1  | 0,04002   | 0,040017  | 268,53  | 0,000   |
| Temperatura*Tiempo          | 1  | 0,00540   | 0,005400  | 36,24   | 0,000   |
| Interacciones de 3 términos | 1  | 0,00282   | 0,002817  | 18,90   | 0,000   |
| pH*Temperatura*Tiempo       | 1  | 0,00282   | 0,002817  | 18,90   | 0,000   |
| Error                       | 17 | 0,00253   | 0,000149  |         |         |
| Falta de ajuste             | 1  | 0,00007   | 0,000067  | 0,43    | 0,520   |
| Error puro                  | 16 | 0,00247   | 0,000154  |         |         |
| Total                       | 23 | 1,39845   |           |         |         |

Fuente: Minitab 22

Con una confianza del 95%, el análisis ANOVA demuestra de manera contundente que los factores pH, temperatura y tiempo, así como sus complejas interacciones, son determinantes en el rendimiento del proceso. Además, se valida que el modelo estadístico refinado es robusto, preciso y se ajusta adecuadamente a los datos observados.

**Figura 3-2 Gráfica de probabilidad normal**



**Fuente:** Minitab 22

Esta gráfica de probabilidad normal se utiliza para verificar si los residuos (los errores entre los valores predichos por tu modelo y los valores reales) siguen una distribución normal. Esta es una suposición clave para que tu análisis (como el ANOVA) sea válido.

Como los puntos siguen de cerca la línea recta, se puede concluir que los residuos se distribuyen de manera normal. Esto cumple con uno de los supuestos fundamentales del análisis de varianza y le da mayor validez y confianza al modelo estadístico.

#### 3.4.2.3. Ecuación de regresión en unidades codificadas

$$\begin{aligned} \text{Rendimiento} = & 0,85750 - 0,15833 \text{ pH} + 0,16667 \text{ Temperatura} + 0,05750 \text{ Tiempo} \\ & - 0,04083 \text{ pH} * \text{Temperatura} - 0,01500 \text{ Temperatura} * \text{Tiempo} \\ & + 0,01083 \text{ pH} * \text{Temperatura} * \text{Tiempo} \quad \text{Ec. (3-1)} \end{aligned}$$

Esta ecuación es el modelo matemático que describe cómo los factores (pH, temperatura y tiempo) influyen en el rendimiento. El propósito principal de esta ecuación es la predicción. Se puede reemplazar los términos pH, Temperatura y Tiempo con sus valores codificados (-1 para el nivel bajo, +1 para el nivel alto) para calcular el rendimiento esperado en cualquiera de las esquinas del diseño experimental. Esto permite identificar matemáticamente cuál es la combinación de niveles que produce el rendimiento máximo.

Por ejemplo, en (+ 0,16667 Temperatura) de la ecuación, por cada unidad que se aumenta de temperatura, el rendimiento aumenta en 0,16667. Lo cual confirma que una temperatura alta es mejor.

**Tabla III-16 Resultados de la variable respuesta rendimiento**

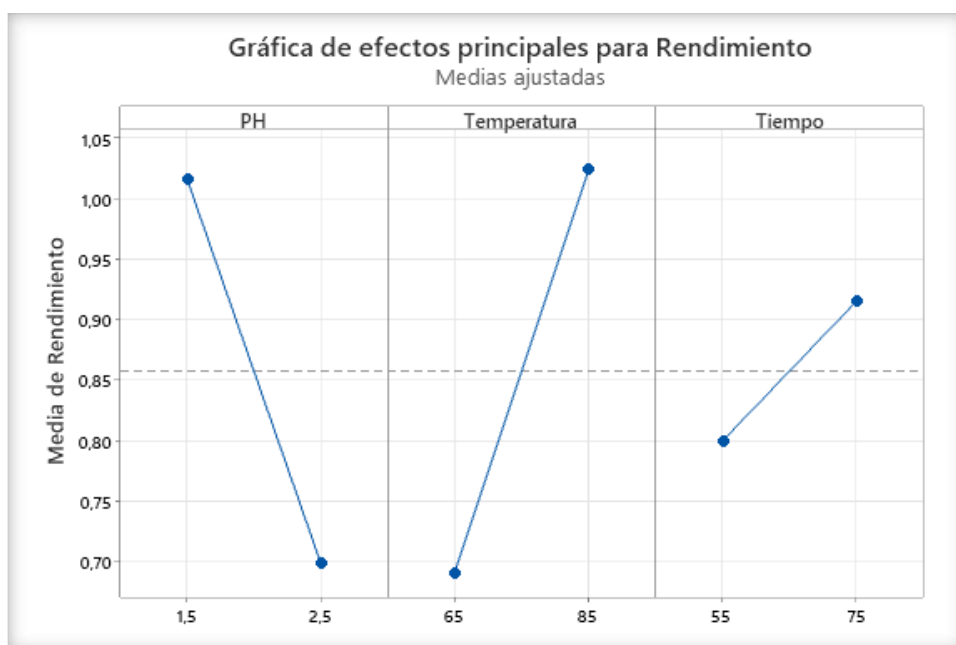
| Muestra | Rendimiento experimental | Rendimiento Ajustado | Residuos |
|---------|--------------------------|----------------------|----------|
| 1       | 0,721                    | 0,725                | -0,00500 |
| 2       | 0,512                    | 0,51                 | -0,00167 |
| 3       | 1,185                    | 1,19                 | -0,00167 |
| 4       | 0,776                    | 0,77                 | 0,00833  |
| 5       | 0,892                    | 0,89                 | -0,00167 |
| 6       | 0,632                    | 0,64                 | -0,00500 |
| 7       | 1,254                    | 1,26                 | -0,00500 |
| 8       | 0,874                    | 0,88                 | -0,00833 |
| 9       | 0,735                    | 0,73                 | 0,01500  |
| 10      | 0,525                    | 0,51                 | 0,01833  |
| 11      | 1,192                    | 1,19                 | -0,00167 |
| 12      | 0,762                    | 0,77                 | -0,01167 |
| 13      | 0,906                    | 0,89                 | 0,01833  |
| 14      | 0,646                    | 0,64                 | 0,01500  |
| 15      | 1,261                    | 1,26                 | 0,00500  |
| 16      | 0,887                    | 0,88                 | 0,01167  |
| 17      | 0,712                    | 0,73                 | -0,01500 |

|    |       |      |          |
|----|-------|------|----------|
| 18 | 0,503 | 0,51 | -0,01167 |
| 19 | 1,193 | 1,19 | -0,00167 |
| 20 | 0,784 | 0,77 | 0,00833  |
| 21 | 0,883 | 0,89 | -0,01167 |
| 22 | 0,624 | 0,64 | -0,01500 |
| 23 | 1,256 | 1,26 | 0,00500  |
| 24 | 0,865 | 0,88 | -0,00833 |

**Fuente:** Minitab 22

#### 3.4.2.4 Gráficas factoriales para el rendimiento

**Figura 3-3 Efectos principales para rendimiento**



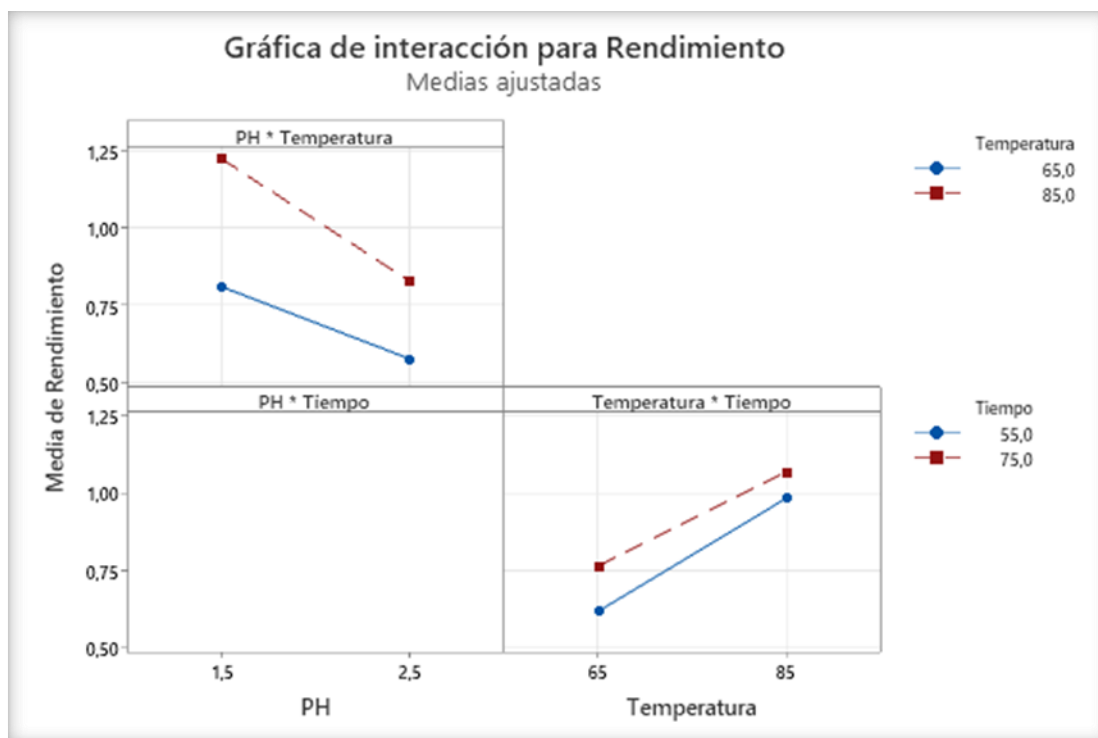
**Fuente:** Minitab 22

Esta gráfica de efectos principales, muestra el impacto individual de cada factor (pH, temperatura y tiempo) sobre el rendimiento promedio.

Se observa que para el pH existe un efecto muy fuerte y negativo. Al pasar de un pH de 1,5 a 2,5, el rendimiento promedio cae drásticamente. Esto confirma que un pH bajo es crucial para un alto rendimiento, al contrario, la temperatura tiene el efecto positivo más fuerte. Al aumentar la temperatura de 65 a 85, el rendimiento promedio aumenta significativamente. La pendiente pronunciada de la línea indica que la temperatura es

un factor dominante, el tiempo también tiene un efecto positivo. Al incrementar el tiempo de 55 a 75, el rendimiento promedio aumenta, aunque el efecto es más moderado en comparación con el pH y la temperatura.

**Figura 3-4 Gráfica de interacción AB y BC**



**Fuente:** Minitab 22

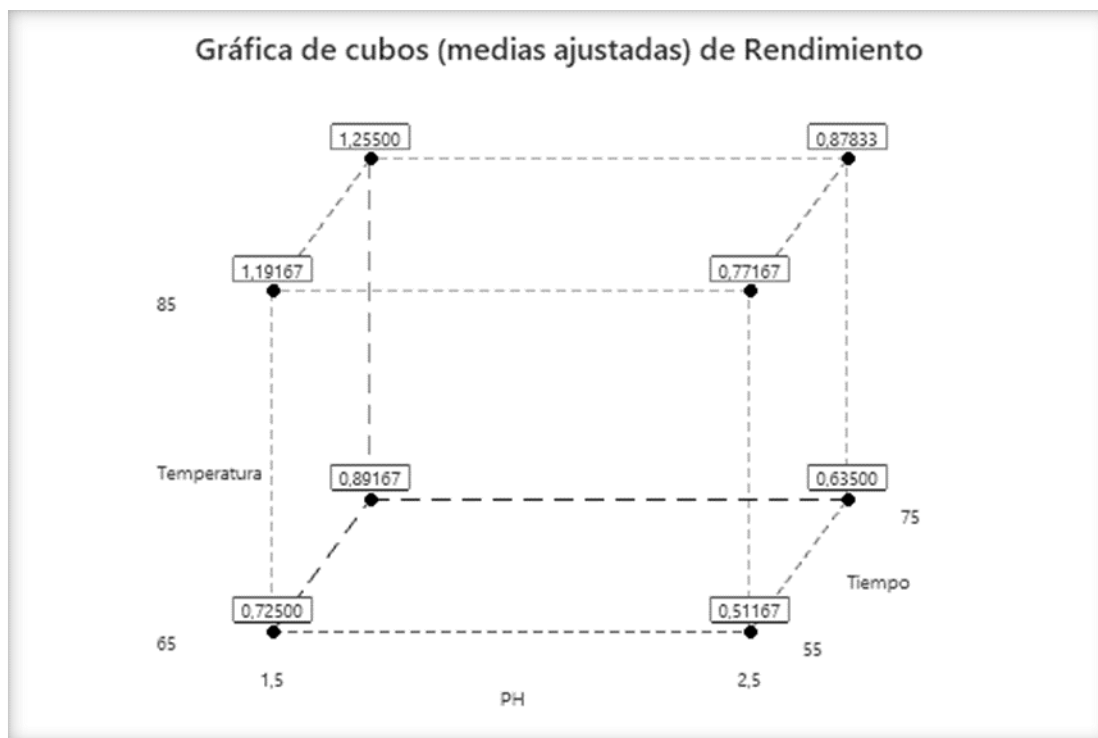
Esta gráfica de interacción es una de las más importantes, ya que muestra cómo los efectos de los factores se combinan. La clave para interpretarla es observar si las líneas son paralelas o no.

La gráfica de interacción pH \* Temperatura (Panel Superior Izquierdo), se observa que las líneas no son paralelas, lo que confirma visualmente que esta interacción es significativa, el efecto del pH sobre el rendimiento depende de la temperatura. A la temperatura más alta (85, línea roja punteada), la caída del rendimiento al aumentar el

pH es más pronunciada. Además, la temperatura alta siempre da un rendimiento mayor, pero la ventaja es mucho más grande a un pH bajo (1,5).

La gráfica de interacción Temperatura \* Tiempo (Panel Inferior Derecho), las líneas no son paralelas, lo que indica que esta interacción es significativa, el efecto de la temperatura depende del tiempo. Ambas líneas suben (mayor temperatura = mayor rendimiento), pero la línea para el tiempo más largo (75, línea roja punteada) está consistentemente por encima y tiene una pendiente ligeramente diferente. Esto sugiere que, para maximizar el rendimiento, se necesita tanto una temperatura alta como un tiempo de extracción largo.

**Figura 3-5 Gráfica de cubos (medias ajustadas) del rendimiento**



**Fuente:** Minitab 22

Esta gráfica de cubos es la mejor herramienta visual para resumir los resultados, ya que muestra el rendimiento promedio para cada una de las 8 combinaciones de tus factores.

La gráfica te permite identificar de manera instantánea las mejores y peores condiciones para tu proceso, en este caso la condición Óptima (Máximo Rendimiento) se observa en el valor más alto en el cubo el cual es 1,255. Este punto corresponde a la combinación de: pH = 1,5 (nivel bajo), Temperatura = 85 (nivel alto) y Tiempo = 75 (nivel alto).

La peor condición (Mínimo Rendimiento) es el valor más bajo en el cubo que es 0,51167. Este se encuentra en la esquina opuesta y corresponde a: pH = 2,5 (nivel alto), Temperatura = 65 (nivel bajo) y Tiempo = 55 (nivel bajo).

Se puede ver cómo al moverse de izquierda a derecha (aumentando el pH) el rendimiento siempre baja y al moverse de adelante hacia atrás (aumentando la temperatura) el rendimiento siempre sube drásticamente.

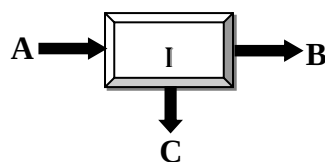
En resumen, esta gráfica es la recomendación final del estudio que nos demuestra que, para maximizar el rendimiento de la extracción, se debe trabajar a un pH de 1,5, una temperatura de 85°C y un tiempo de 75 min.

### **3.5. Balance de materia para el proceso de extracción de pectina a partir de la cáscara de sandía**

Se llevó a cabo un balance de materia por etapas, tomando como punto de partida 100 g de cáscara de sandía para la extracción de pectina. Este cálculo se basó en los parámetros que dieron el mayor rendimiento durante el proceso: una temperatura de hidrólisis de 85 °C, un pH de 1,5 y un tiempo de hidrólisis de 75 minutos.

#### **3.5.1. Descortezado**

El balance general para el bloque I se elaboró basándose en los datos recolectados durante los experimentos. Según esto, se partió de 2,442 g de sandía, de los cuales 653 g corresponden a la cáscara es decir un 26,74 %; por lo tanto, realizando una regla de 3, se necesitan 373,96 g de sandia para conseguir 100 g de cáscara.



**Donde:**

A = Masa de sandía 373,96 g

B = Pulpa de la sandía

C = Cáscara de sandía 100 g

**Balance para I**

$$A = B + C \quad \text{Ec. (3-2)}$$

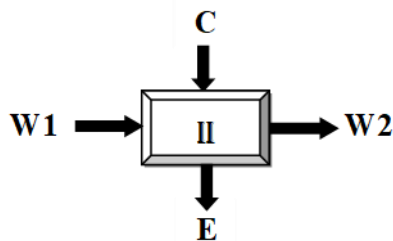
$$B = 373,96 \text{ g} - 100 \text{ g}$$

De la ecuación

$$B = 273,96 \text{ g}$$

### 3.5.2. Lavado

Para el lavado, se empleó una proporción de 1000 ml de agua por cada 600 g de cáscara de sandía, así que para 100 g de cáscara se requieren 166,6 ml de agua. Dado que la densidad del agua es 1 g/ml, se utilizaron exactamente 166,6 ml de agua para realizar el lavado correspondiente. La cantidad de agua residual se toma como equivalente al volumen empleado en el lavado.



**Donde:**

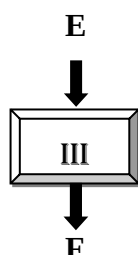
W1 = Cantidad de agua para lavado 166,6 g

W2 = Cantidad de agua residual 166,6 g

E = Cantidad de cáscara lavada 100 g

### 3.5.3. Corte

Se corta la cáscara de sandía previamente lavada en trozos pequeños, esto ayuda a que la superficie de contacto sea mayor, facilitando que el agua y el ácido penetren bien durante la hidrólisis y liberen la pectina más eficientemente.

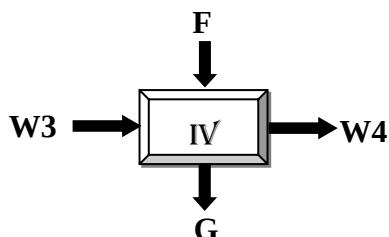


**Donde:**

F = Cantidad de cáscara cortada 100 g

### 3.5.4. Inactivación enzimática

Para la inactivación enzimática se utilizó 200g de agua destilada.



**Donde:**

W3= Cantidad de agua para la inactivación enzimática 200 g

W4= Cantidad de agua residual de la inactivación 195 g

G = Cantidad de cáscara tratada húmeda

$$F + W3 = G + W4 \quad \text{Ec. (3-3)}$$

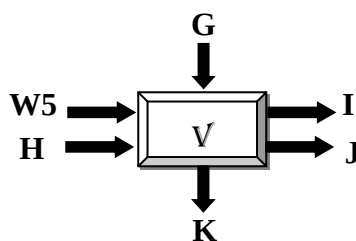
$$G = F + W3 - W4$$

$$G = 100 + 200 - 195$$

$$G = 105g$$

### 3.5.5. Hidrólisis ácida

En esta etapa, se empleó la misma cantidad de agua destilada que en el proceso de inactivación enzimática. Se añadió ácido cítrico al agua destilada que contenía la cáscara tratada húmeda, con el objetivo de ajustar el pH inicial de 5,23. Para alcanzar un pH de 1,5, fue necesario agregar 12 gramos de ácido cítrico.



Donde:

G = Cantidad de cáscara tratada húmeda 105g

W5 = Cantidad de agua para la hidrólisis ácida 200 g

H = Cantidad de ácido cítrico 17 g

I = Bagazo 53,7 g

J = Masa de solución evaporada

K = Solución de pectina diluida 229,6 g

$$W5 + H + G = I + J + K \quad \text{Ec. (3-4)}$$

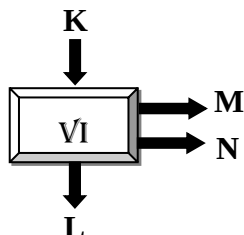
$$J = W5 + H + G - I - K$$

$$J = 200 + 17 + 105 - 53,7 - 229,6$$

$$J = 38,7 \text{ g}$$

### 3.5.6. Filtración

En la filtración al vacío se separa los restos de bagazo de cáscara de sandía dejando libre la solución diluida de pectina.



**Donde:**

**K** = Solución de pectina diluida 229,6 g

**M** = Restos de bagazo 3,27 g

**N** = Masa de pérdida por filtración

**L** = Solución de pectina diluida filtrada 224,8 g

$$\mathbf{K = M + N + L} \quad \mathbf{Ec. (3-5)}$$

$$\mathbf{N = K - M - L}$$

$$\mathbf{N = 229,6 - 3,27 - 224,8}$$

$$\mathbf{N = 1,53 \text{ g}}$$

### **3.5.7. Precipitación**

La pectina disuelta se separó añadiendo etanol al 96%, utilizando una proporción equivalente al 80% del volumen total de la solución obtenida. Se calculó que el volumen de la solución de pectina era de 224,8 ml, así que el volumen de etanol al 96% necesario sería:

$$\mathbf{V \text{ etanol} = V \text{ solución} * 0,8}$$

$$\mathbf{V \text{ etanol} = 224,8 \text{ ml} * 0,8}$$

$$\mathbf{V \text{ etanol} = 179,84 \text{ ml}}$$

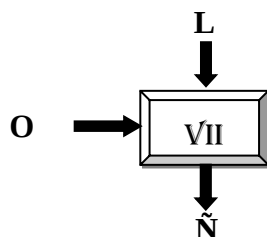
Basándome en la información de la bibliografía, se tomó una densidad del etanol al 96% de 0,805 g/ml a 20°C, de modo que la masa empleada en esta fase sería

$$\mathbf{\rho = \frac{m \text{ etanol}}{V \text{ etanol}}} \quad \mathbf{Ec. (3-6)}$$

$$m_{\text{etanol}} = \rho * V_{\text{etanol}}$$

$$m_{\text{etanol}} = 0,805 \text{ g/ml} * 179,84 \text{ ml}$$

$$m_{\text{etanol}} = 144,77 \text{ g}$$



**Donde:**

O = Cantidad de etanol para precipitación 144,77 g

L = Solución de pectina diluida filtrada 224,8 g

Ñ = Pectina húmeda + solución ácida residual

$$L + O = \tilde{N} \quad \text{Ec. (3-7)}$$

$$\tilde{N} = 224,8 + 144,77$$

$$\tilde{N} = 369,57 \text{ g}$$

### 3.5.8. Centrifugación

En este paso, se aisló la pectina húmeda de la solución ácida sobrante. El volumen de la solución ácida separada fue de 274,27 ml, y para convertirlo a masa, se calculó la densidad de esa solución en el laboratorio. Para ello, se tomaron 10 ml de la solución y se pesaron cuidadosamente.

Cálculo de la densidad de la solución ácida residual:

$$\rho_{\text{solución ácida}} = \frac{m_{\text{solución ácida}}}{V_{\text{solución ácida}}} \quad \text{Ec. (3-8)}$$

Masa solución ácida = 9,32 g

Volumen solución ácida = 10 ml

$$\rho \text{ solución ácida} = \frac{9,32 \text{ g}}{10 \text{ ml}}$$

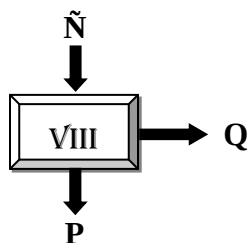
$$\rho \text{ solución ácida} = 0,932 \frac{\text{g}}{\text{ml}}$$

Cálculo de la masa de la corriente de solución acida residual “Q”

$$Q = V \text{ solución ácida} * \rho \text{ solución ácida} \quad \text{Ec. (3-9)}$$

$$Q = 274,27 \text{ ml} * 0,932 \frac{\text{g}}{\text{ml}}$$

$$Q = 255,62 \text{ g}$$



**Donde:**

Q = Solución acida residual + pérdida por centrifugación 255,62 g

Ñ = Pectina húmeda + solución ácida residual 369,57 g

P = Pectina húmeda

$$\tilde{N} = P + Q \quad \text{Ec. (3-10)}$$

$$P = \tilde{N} - Q$$

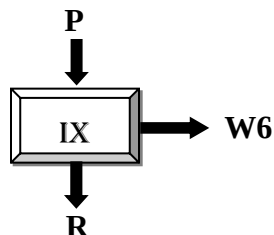
$$P = 369,57 - 255,62$$

$$P = 113,95 \text{ g}$$


---

### 3.5.9. Secado

En esta etapa se eliminó el agua hasta obtener un peso constante de pectina seca.



**Donde:**

**P** = Pectina húmeda                      113,95 g

**W6** = Cantidad de agua evaporada

**R** = Pectina seca                                      1,261 g

$$P = R + W6 \quad \text{Ec. (3-11)}$$

$$W6 = P - R$$

$$W6 = 113,95 - 1,261$$

$$W6 = 112,69 \text{ g}$$

Se elaboró una gráfica de secado para la pectina húmeda, donde se anotó el peso a intervalos de una hora hasta que el producto alcanzó un peso estable. En la tabla siguiente se presentan los datos específicos sobre la pérdida de peso de la pectina obtenida durante el proceso de secado a una temperatura fija.

**Tabla III-17 Datos de secado de pectina húmeda extraída**

| Tiempo (h) | Peso de la pectina (g) |
|------------|------------------------|
| 0          | 113,95                 |
| 1          | 98,95                  |
| 2          | 84,95                  |
| 3          | 71,95                  |
| 4          | 59,95                  |
| 5          | 48,95                  |
| 6          | 38,95                  |
| 7          | 29,95                  |
| 8          | 21,95                  |
| 9          | 14,95                  |
| 10         | 8,95                   |
| 11         | 4,95                   |
| 12         | 2,95                   |
| 13         | 1,95                   |
| 14         | 1,45                   |
| 15         | 1,35                   |
| 16         | 1,3                    |
| 17         | 1,261                  |
| 18         | 1,261                  |

**Fuente:** Elaboración propia

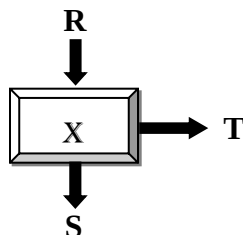
**Figura 3-6 Curva de secado de la pectina extraída**



**Fuente:** Elaboración propia

### 3.5.10. Molienda

En la molienda se registró una pérdida de pectina par una muestra de 100 g de un 0,15 % por lo que se toma como referencia para la pérdida en 1,261 gr:



Donde:

R= Pectina seca 1,261 g

T = Cantidad de pectina perdida en la molienda 0,0019 g

S= Pectina seca molida

$$R = S + T \quad \text{Ec. (3-12)}$$

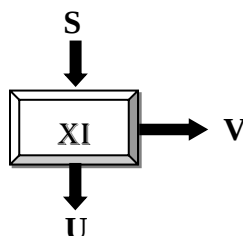
$$S = R - T$$

$$S = 1,261 - 0,0019$$

$$S = 1,259 \text{ g}$$

### 3.5.11. Tamizado y envasado

En el tamizado se registró una pérdida de 0,1 % de pectina para una muestra de 100 gr lo cual haciendo los cálculos nos da una pérdida de:



Donde:

V = Cantidad de pectina perdida en el tamizado 0,001259 g

U = Pectina seca tamizada

$$S = V + U \quad \text{Ec. (3-13)}$$

$$U = S - V$$

$$U = 1,259 - 0,001259$$

|                       |
|-----------------------|
| $U = 1,257 \text{ g}$ |
|-----------------------|

Se extrajeron 1,257g de pectina utilizando 100 g de cáscara de sandía como materia prima. Posteriormente, el producto fue envasado en una bolsa hermética de polietileno de alta densidad apta para alimentos.

### **3.6. Balance de energía para el proceso de extracción de pectina de cáscara de sandía**

Para determinar la energía necesaria utilizada se hará uso de la ecuación de energía eléctrica que describe la cantidad de energía que consume un dispositivo durante un período de tiempo. La fórmula más fundamental es:

$$E = P * t \quad \text{Ec. (3-14)}$$

**Donde:**

- E: Energía consumida (en Joules, kWh, etc.).
- P: Potencia del dispositivo (en Watts, kW, etc.).
- t: Tiempo que el dispositivo está en funcionamiento.

#### **3.6.1. Etapa de inactivación enzimática**

El tratamiento para la inactivación de las enzimas consistió en someter 100 g de materia prima a un calentamiento controlado. El proceso se realizó en un calentador con agitación constante a una temperatura de 90-95 °C durante un periodo de 15 minutos.

$$E_{\text{Calentador}} = P_c * t \quad \text{Ec. (3-15)}$$

Donde:

$$\underline{E \text{ Calentador} = \text{Energía del calentador}}$$

$$\underline{t = 15 \text{ min} = 0,25 \text{ h} \quad \text{Tiempo de uso}}$$

$$\underline{Pc = 0,64 \text{ kW} \quad \text{Potencia del calentador}}$$

$$E \text{ Calentador} = 0,64 \text{ kW} * 0,25 \text{ h}$$

$$E \text{ Calentador} = 0,16 \text{ kWh}$$

La energía consumida en la etapa de inactivación enzimática en kJ es de:

$$E \text{ Calentador} = 0,16 \text{ kWh} * 3600 \frac{\text{kJ}}{\text{kWh}}$$

$$E \text{ Calentador} = 576 \text{ kJ}$$

### 3.6.2. Etapa de hidrólisis ácida

Esta etapa se llevó a cabo en un calentador con agitación constante de la mezcla a una temperatura de 85 °C por un periodo de tiempo de 75 min.

$$E \text{ Calentador} = Pc * t \quad \text{Ec. (3-16)}$$

Donde:

$$\underline{E \text{ Calentador} = \text{Energía del calentador}}$$

$$\underline{t = 75 \text{ min} = 1,25 \text{ h} \quad \text{Tiempo de uso}}$$

$$\underline{Pc = 0,64 \text{ kW} \quad \text{Potencia del calentador}}$$

$$E \text{ Calentador} = 0,64 \text{ kW} * 1,25 \text{ h}$$

$$E \text{ Calentador} = 0,8 \text{ kWh}$$

La energía consumida en la etapa de Hidrólisis en kJ es de:

$$E \text{ Calentador} = 0,8 \text{ kWh} * 3600 \frac{\text{kJ}}{\text{kWh}}$$

$$E \text{ Calentador} = 2880 \text{ kJ}$$

### 3.6.3. Etapa de filtración

Antes de la filtración con la bomba de vacío se separa el bagazo mediante una malla milimétrica para posteriormente realizar la filtración empleando una bomba de vacío conectada a un matraz Kitasato con un embudo Büchner por un periodo de tiempo de 30 min.

$$E \text{ Bomba} = P_b * t \quad \text{Ec. (3-17)}$$

Donde:

$$E \text{ Bomba} = \text{Energía de la bomba}$$

$$t = 30 \text{ min} = 0,5 \text{ h} \quad \text{Tiempo de uso}$$

$$P_b = 0,23 \text{ kW} \quad \text{Potencia de la bomba}$$

$$E \text{ Bomba} = 0,23 \text{ kW} * 0,5 \text{ h}$$

$$E \text{ Bomba} = 0,115 \text{ kWh}$$

La energía consumida en la etapa de filtración en kJ es de:

$$E \text{ Bomba} = 0,115 \text{ kWh} * 3600 \frac{\text{kJ}}{\text{kWh}}$$

$$E \text{ Bomba} = 414 \text{ kJ}$$

### 3.6.4. Etapa de centrifugación

En esta etapa se utilizó la centrifugadora por un periodo de 30 min para separar la solución ácida residual de la pectina húmeda.

$$E \text{ Centrifuga} = P_{ce} * t \quad \text{Ec. (3-18)}$$

**Donde:**

$$\underline{E_{\text{Centrifuga}} = \text{Energía de la centrifuga}}$$

$$\underline{t = 30 \text{ min} = 0,5 \text{ h} \quad \text{Tiempo de uso}}$$

$$\underline{P_{ce} = 0,52 \text{ kW} \quad \text{Potencia de la centrifuga}}$$

$$E_{\text{Centrifuga}} = 0,52 \text{ kW} * 0,5 \text{ h}$$

$$E_{\text{Centrifuga}} = 0,26 \text{ kWh}$$

La energía consumida en la etapa de centrifugación en kJ es de:

$$E_{\text{Centrifuga}} = 0,26 \text{ kWh} * 3600 \frac{\text{kJ}}{\text{kWh}}$$

$$E_{\text{Centrifuga}} = 936 \text{ kJ}$$

### 3.6.5. Etapa de secado

Para el secado se utilizó una incubadora programada a una temperatura de  $45 \pm 2^\circ\text{C}$  por un periodo de 18 h, el secado se llevó a cabo hasta obtener un peso constante de la pectina.

$$E_{\text{Incubadora}} = P_i * t \quad \text{Ec. (3-19)}$$

**Donde:**

$$\underline{E_{\text{Incubadora}} = \text{Energía de la Incubadora}}$$

$$\underline{t = 18 \text{ h} \quad \text{Tiempo de uso}}$$

$$\underline{P_i = 0,12 \text{ kW} \quad \text{Potencia de la Incubadora}}$$

$$E_{\text{Incubadora}} = 0,12 \text{ kW} * 18 \text{ h}$$

$$E_{\text{Incubadora}} = 2,16 \text{ kWh}$$

La energía consumida en la etapa de secado en kJ es de:

$$E_{\text{Incubadora}} = 2,16 \text{ kWh} * 3600 \frac{\text{kJ}}{\text{kWh}}$$

$$E_{\text{Incubadora}} = 7776 \text{ kJ}$$


---

### 3.6.6. Etapa de molienda

Para la molienda se usó un molinillo eléctrico por un tiempo de 10 minutos

$$E_{\text{Molinillo}} = P_m * t \quad \text{Ec. (3-20)}$$

Donde:

$$E_{\text{Molinillo}} = \frac{\text{Energía del Molinillo}}{t}$$

$$t = 10 \text{ min} = 0,16 \text{ h} \quad \text{Tiempo de uso}$$

$$P_m = 0,2 \text{ kW} \quad \text{Potencia del Molinillo}$$

$$E_{\text{Molinillo}} = 0,2 \text{ kW} * 0,16 \text{ h}$$

$$E_{\text{Molinillo}} = 0,032 \text{ kWh}$$

La energía consumida en la etapa de molienda en kJ es de:

$$E_{\text{Molinillo}} = 0,032 \text{ kWh} * 3600 \frac{\text{kJ}}{\text{kWh}}$$

$$E_{\text{Molinillo}} = 115,2 \text{ kJ}$$


---

### 3.6.7. Etapa de tamizado

El proceso de tamizado se empleó para clasificar el material según el tamaño de partícula. Durante un periodo de 10 minutos, las partículas de menor granulometría pasaron a través de la abertura del tamiz, separándose así de las partículas más grandes que fueron retenidas.

$$E_{\text{Tamizador}} = P_t * t \quad \text{Ec. (3-21)}$$

Donde:

$$E_{\text{Tamizador}} = \frac{\text{Energía del Tamizador}}{t}$$

$$t = 10 \text{ min} = 0,16 \text{ h} \quad \text{Tiempo de uso}$$

$$P_t = 0,12 \text{ kW} \quad \text{Potencia del Tamizador}$$

$$E_{\text{Tamizador}} = 0,12 \text{ kW} \cdot 0,16 \text{ h}$$

$$E_{\text{Tamizador}} = 0,0192 \text{ kWh}$$

La energía consumida en la etapa de Tamizado en kJ es de:

$$E_{\text{Tamizador}} = 0,0192 \text{ kWh} \cdot 3600 \frac{\text{kJ}}{\text{kWh}}$$

$$E_{\text{Tamizador}} = 69,12 \text{ kJ}$$

### 3.6.8. Resumen del balance de energía del proceso de extracción de pectina de la cáscara de sandía

Tabla III-18 Resumen del balance de energía del proceso de extracción de pectina

| Etapa                          | Equipo u/o dispositivo | tiempo de uso (h) | potencia (kw) | Potencia consumida (kwh) | Energía eléctrica consumida(kj) |
|--------------------------------|------------------------|-------------------|---------------|--------------------------|---------------------------------|
| <b>Inactivación enzimática</b> | Calentador             | 0,25              | 0,64          | 0,16                     | 576                             |
| <b>Hidrólisis ácida</b>        | Calentador             | 1,25              | 0,64          | 0,8                      | 2880                            |
| <b>Filtración</b>              | Bomba                  | 0,5               | 0,23          | 0,115                    | 414                             |
| <b>Centrifugación</b>          | Centrífuga             | 0,5               | 0,52          | 0,26                     | 936                             |
| <b>Secado</b>                  | Incubadora             | 18                | 0,12          | 2,16                     | 7776                            |
| <b>Molienda</b>                | Molinillo              | 0,16              | 0,2           | 0,032                    | 115,2                           |
| <b>Tamizado</b>                | Tamizador              | 0,16              | 0,12          | 0,0192                   | 69,12                           |
|                                |                        |                   | Total         |                          | 12766,32                        |

**Fuente:** Elaboración propia

La energía total necesaria para la obtención de 1,257 gr de pectina a partir de 100 gr de cáscara de sandía es 12766,32 Kj.

### 3.7. Determinación del rendimiento del proceso

La determinación del rendimiento en la obtención de pectina a partir de la cáscara de sandía es un cálculo porcentual que expresa la eficiencia del proceso de extracción. En esencia, indica qué cantidad de pectina se logra obtener en relación con la cantidad de materia prima que se utilizó.

El rendimiento se basa en la relación entre el producto final obtenido (pectina seca) y la materia prima inicial (cáscara de sandía seca). Fórmula para el cálculo del rendimiento es la siguiente:

$$\text{Rendimiento(\%)} = \frac{\text{Peso de la pectina seca (g)}}{\text{Peso de la cascara seca (g)}} * 100 \quad \text{Ec. (3-22)}$$

Como se utilizó materia prima fresca se partirá del porcentaje de humedad que nos arrojó el análisis realizado a la cascara de sandia en CEANID, el cual nos dio un porcentaje de humedad del 92,16%, entonces para calcular el "Peso Seco Equivalente" de la materia prima total:

$$\text{Peso Seco Equivalente} = \text{Peso fresco} * \frac{\% \text{ de Materia Seca}}{100} \quad \text{Ec. (3-23)}$$

El porcentaje de materia seca se determina mediante:

$$\% \text{ de Materia Seca} = 100 - \% \text{ de Humedad} \quad \text{Ec. (3-24)}$$

$$\% \text{ de Materia Seca} = 100 - 92,16$$

$$\% \text{ de Materia Seca} = 7,84$$

Entonces:

Peso total fresco = 100 gr de cáscara

$$\text{Peso Seco Equivalente} = 100 \text{ g} * \frac{7,84}{100}$$

$$\text{Peso Seco Equivalente} = 7,84 \text{ g}$$

Se tiene que:

**Peso de la pectina seca obtenida = 1,257 g**

**Peso de la cascara de sandia seca = 7,84 g**

$$\text{Rendimiento(\%)} = \frac{1,257 \text{ g}}{7,84 \text{ g}} * 100$$

$$\text{Rendimiento(\%)} = 16,03\%$$

Dando un resultado de rendimiento de 16,03% lo significa que el método de extracción fue eficiente comparado con otros autores que están entre un porcentaje de 9% a 25% en rendimiento.

### 3.8. Evaluación de costos

Se implementó un análisis detallado para determinar su costo total. La metodología se centró en la evaluación rigurosa de los costos directos, los cuales abarcan todos aquellos gastos explícitamente vinculados a la ejecución y desarrollo de cada etapa del proyecto con el fin de ofrecer una visión completa y transparente, las tablas que se presentan a continuación desglosan tanto los costos directos como los costos indirectos asociados.

**Tabla III-19 Detalle de costos de materias primas y reactivos**

| Nº | Ítem                       | Descripción               | Unidad | Valor unitario (bs) | Cantidad | Costo (bs) |
|----|----------------------------|---------------------------|--------|---------------------|----------|------------|
| 1  | Materia prima              | Sandia                    | c/u    | 15                  | 12       | 180        |
| 2  | Reactivos para el proceso  | Ácido Cítrico             | kg     | 35                  | 0,45     | 15,75      |
| 3  |                            | Etanol al 96 %            | l      | 10                  | 25       | 250        |
| 4  |                            | Agua destilada            | l      | 4                   | 60       | 240        |
| 5  | Reactivos para el análisis | Hidróxido de sodio 0,1 N  | l      | 80                  | 0,1      | 8          |
| 6  |                            | Hidróxido de sodio 0,25 N | l      | 80                  | 0,1      | 8          |
| 7  |                            | Ácido clorhídrico 0,25 N  | l      | 65                  | 0,01     | 0,65       |
| 8  |                            | Sacarosa                  | kg     | 7                   | 0,5      | 3,5        |
|    |                            |                           |        |                     | Total    | 705,9      |

**Fuente:** Elaboración propia

**Tabla III-20 Detalle de costos de materiales empleados en la extracción de Pectina**

| Nº | Ítem                        | Descripción                         | Capacidad/<br>tamaño | Valor<br>unitario<br>(bs) | Cantidad     | Costo (bs) |
|----|-----------------------------|-------------------------------------|----------------------|---------------------------|--------------|------------|
| 1  | <b>Vasos de precipitado</b> | Vidrio borosilicato                 | 1000 ml              | 80                        | 2            | 160        |
| 2  |                             | Vidrio borosilicato                 | 250 ml               | 35                        | 1            | 35         |
| 3  | <b>Envase graduado</b>      | Polietileno                         | 1500 ml              | 10                        | 2            | 20         |
| 4  | <b>Probetas</b>             | Vidrio borosilicato                 | 100 ml               | 50                        | 1            | 50         |
| 5  |                             | Vidrio borosilicato                 | 25 ml                | 40                        | 1            | 40         |
| 6  |                             | Polietileno                         | 250 ml               | 42                        | 1            | 42         |
| 7  | <b>Embudo Büchner</b>       | Porcelana                           | Grande               | Disponible en el LOU      | 1            | —          |
| 8  | <b>Espátula</b>             | Metal                               | pequeña              | 20                        | 1            | 20         |
| 9  | <b>Matraz Erlenmeyer</b>    | Vidrio borosilicato                 | 250 ml               | Disponible en el LOU      | 2            | —          |
| 10 | <b>Matraz Kitasato</b>      | Vidrio borosilicato                 | 1000 ml              | Disponible en el LOU      | 1            | —          |
| 11 | <b>Bureta</b>               | Vidrio borosilicato                 | 50 ml                | Disponible en el LOU      | 1            | —          |
| 12 | <b>Caja Petri</b>           | Polietileno                         | 100 mm               | 5                         | 8            | 40         |
| 13 | <b>Varilla</b>              | Vidrio pyrex                        | Mediano              | 30                        | 1            | 30         |
| 14 | <b>Mortero</b>              | Porcelana                           | Mediano              | 60                        | 1            | 60         |
| 15 | <b>Cuchillo</b>             | Acero inoxidable                    | Mediano              | 10                        | 1            | 10         |
| 16 | <b>Termómetro</b>           | de Hg                               | -10 a 100 °C         | 60                        | 1            | 60         |
| 17 | <b>Papel filtro</b>         | celulosa de algodón de alta calidad | pliegue              | 6                         | 17           | 102        |
| 18 | <b>Frasco lavador</b>       | Plástico                            | 800 ml               | 12                        | 1            | 12         |
|    |                             |                                     |                      |                           | <b>Total</b> | 681        |

**Fuente:** Elaboración propia

**Tabla III-21 Detalle de costos de análisis fisicoquímico de la materia prima y pectina extraída**

| N° | Ítem          | Descripción                  | Valor unitario (bs) | Cantidad | Costo (bs) |
|----|---------------|------------------------------|---------------------|----------|------------|
| 1  | Materia prima | Fibra                        | 8                   | 1        | 8          |
| 2  |               | Cenizas                      | 28                  | 1        | 28         |
| 3  |               | Humedad                      | 16                  | 1        | 16         |
| 4  |               | Grasa                        | 8                   | 1        | 8          |
| 5  |               | Hidratos de carbono          | 16                  | 1        | 16         |
| 6  |               | Proteína total               | 20                  | 1        | 20         |
| 7  |               | Valor energético             | 16                  | 1        | 16         |
| 8  |               | pH (20°)                     | 8                   | 1        | 8          |
| 9  | Producto      | Cenizas                      | 28                  | 1        | 28         |
| 10 |               | Humedad                      | 16                  | 1        | 16         |
| 11 |               | pH (20°)                     | 8                   | 1        | 8          |
| 12 |               | Bacterias aerobias mesófilas | 40                  | 1        | 40         |
| 13 |               | Coliformes totales           | 40                  | 1        | 40         |
|    |               |                              |                     | Total    | 252        |

**Fuente:** Elaboración propia

**Tabla III-22 Detalle de costos de servicios y materiales directos e indirectos**

| N° | Ítem                    | Unidad    | Valor unitario (bs) | Cantidad     | Costo (bs)  |
|----|-------------------------|-----------|---------------------|--------------|-------------|
| 1  | <b>Investigación</b>    | mes       | 100                 | 6            | 600         |
| 2  | <b>Impresión</b>        | hoja      | 0.5                 | 800          | 400         |
| 3  | <b>Anillados</b>        | anillado  | 10                  | 4            | 40          |
| 4  | <b>Empastados</b>       | empastado | 50                  | 3            | 150         |
| 5  | <b>Trasporte diario</b> | día       | 4                   | 60           | 240         |
|    |                         |           |                     | <b>Total</b> | <b>1430</b> |

**Fuente:** Elaboración propia

El resumen y evaluación de los costos totales se muestra en la siguiente tabla:

**Tabla III-23 Resumen de costos directos e indirectos**

| N° | DESCRIPCIÓN                                                           | TOTAL  |
|----|-----------------------------------------------------------------------|--------|
| 1  | Detalle de costos de materia prima y reactivos                        | 749.25 |
| 2  | Detalle de costos de materiales empleados en la extracción de pectina | 681    |
| 3  | Detalle de costos de análisis fisicoquímico de la pectina extraída    | 252    |
| 4  | Detalle de costos de servicios y materiales directos e indirectos     | 1430   |
|    | <b>Total</b>                                                          | 3068,9 |

**Fuente:** Elaboración propia

### 3.8.1. Determinación del costo de producción de pectina a escala laboratorio

El costo de producción para la extracción de pectina de la cáscara de sandía a escala de laboratorio fue estimado a partir de los balances de materia y energía. Se determinó que de 100 g de cáscara se obtiene un rendimiento aproximado de 1,257g de pectina.

**Tabla III-24 Detalle de costos de materia prima y reactivos**

| N° | Descripción                                 | Unidad | Valor unitario (bs) | Cantidad     | Costo (bs) |
|----|---------------------------------------------|--------|---------------------|--------------|------------|
| 1  | Sandia                                      | c/u    | 15                  | 0,250        | 3,75       |
| 2  | Agua destilada para inactivación enzimática | l      | 4                   | 0,200        | 0,8        |
| 3  | Agua destilada para hidrólisis ácida        | l      | 4                   | 0,200        | 0,8        |
| 4  | Ácido cítrico                               | kg     | 35                  | 0,017        | 0,595      |
| 5  | Etanol al 96 %                              | l      | 10                  | 0,200        | 2          |
|    |                                             |        |                     | <b>Total</b> | 7,95       |

**Fuente:** Elaboración propia

Para el cálculo de los costos energéticos, aunque el pliego tarifario exacto vigente puede tener ligeras variaciones, una referencia de las tarifas para SETAR muestra los

siguientes valores aproximados de acuerdo al consumo de energía: De 101 a 200 kWh se cobra 0.764 Bs/kWh.

**Tabla III-25 Detalle de costos de requerimiento energético**

| N° | Etapa                   | Equipos        | Energía (kW-h) | Costo global (Bs) |
|----|-------------------------|----------------|----------------|-------------------|
| 1  | Inactivación enzimática | Calentador     | 0,160          | 0,122             |
| 2  | Hidrólisis ácida        | Calentador     | 0,800          | 0,611             |
| 3  | Filtración              | Bomba de vacío | 0,115          | 0,088             |
| 4  | Centrifugación          | Centrifugadora | 0,260          | 0,199             |
| 5  | Secado                  | Incubadora     | 2,16           | 1,65              |
| 6  | Molienda                | Molinillo      | 0,032          | 0,024             |
| 7  | Tamizado                | Tamizador      | 0,019          | 0,015             |
|    |                         |                | <b>Total</b>   | 2,709             |

**Fuente:** Elaboración propia

El costo de producción para la extracción de pectina a partir de 100 g de cáscara de sandía es el siguiente:

**Tabla III-26 Detalle de costos de producción**

| N°           | DESCRIPCIÓN                                    | TOTAL (Bs) |
|--------------|------------------------------------------------|------------|
| 1            | Detalle de costos de materia prima y reactivos | 7,95       |
| 2            | Detalle de costos de requerimiento energético  | 2,709      |
| <b>Total</b> |                                                | 10.65      |

**Fuente:** Elaboración propia

## **CAPÍTULO IV**

### **CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES**

#### 4.1. Conclusiones

1. Este estudio valida exitosamente el aprovechamiento de la cáscara de sandía (*Citrullus lanatus*), un residuo agroindustrial, como una fuente alternativa a los cítricos para la obtención de pectina, obteniéndose 1,257 g a partir de 100 g de cáscara fresca de sandia producida en el departamento de Tarija.
2. La evaluación de diversos métodos de extracción de pectina desde la cáscara de sandía determinó que la técnica más adecuada es la hidrólisis ácida convencional. La eficacia de este proceso depende críticamente de tres factores: la Temperatura siendo esta la más significativa seguido por el PH y el tiempo, aunque su efecto depende de las anteriores mencionadas, según el diseño factorial los parámetros adecuados para la extracción sería a una temperatura de 85°C, un PH de 1,5 y tiempo de 77 min, siendo los valores altos de temperatura y el tiempo, en cuanto al PH bajo.
3. El análisis fisicoquímico de la cáscara de sandía, realizado por el CEANID, permitió establecer su perfil característico. Los resultados revelaron una cantidad de carbohidratos totales del 6,1 % en la cáscara fresca, siendo un aproximado en materia seca de 70 a 75%, inicialmente nos indica que es posible obtener pectina de la cascara de sandia ya que en los cítricos la mayor fuente de pectina, ronda entre los 70 a 80%. El análisis también determinó un alto contenido de humedad (92,16%), junto con un 0,8% de cenizas y un 1,43% de fibra, valores que definen las propiedades fundamentales de la cáscara de sandía.
4. La ejecución de la fase experimental, realizada bajo condiciones controladas a escala de laboratorio, se realizó con éxito. Los resultados obtenidos en la extracción de pectina a partir de la cáscara de sandía son positivos, Los datos recopilados confirman de manera contundente el notable potencial de la cáscara de sandía como una excelente fuente para la obtención de pectina.
5. De acuerdo con los análisis realizados por el CEANID, la pectina extraída de la cáscara de sandía cumple con los estándares de calidad que caracterizan a una pectina comercial, tanto el PH de 3,1, el contenido de cenizas 3,67 % y humedad 8,49% se

encuentran entre los rangos establecidos. En cuanto a los resultados, revelaron que se trata de una pectina de alto metoxilo con un 7,25% siendo un valor aproximado a otros autores, se determinó un grado de esterificación del 66,24%. Esta propiedad se correlaciona directamente con su excelente capacidad de gelificación, la cual fue cuantificada de entre 71,4°SAG y 111,1°SAG. lo que se traduce en una gelificación rápida que se completa en menos de cinco minutos, el rendimiento que se obtuvo usando cáscara de sandia fresca es de 1,257 % y el rendimiento en base seca es 16,03%, usar la base seca es el estándar científico y técnico porque elimina la variable más grande e incontrolable (el agua), siendo el valor obtenido importante ya que está entre los rangos de otros autores que son de entre 9 a 25%.

6. A escala de laboratorio, el costo calculado para obtener 1,257 g de pectina a partir de 100 g de cáscara de sandía fresca es de 10,65 Bs. Esta cifra representa el costo base para la producción de pectina bajo las condiciones experimentales establecidas.

#### **4.2 Recomendaciones**

1. Se recomienda realizar estudio completo en el tema de secado de la cascara de sandia sin que pierda sus propiedades, según unas pruebas que realice requiere bastante control, por lo cual la pectina obtenida presenta degradación, al usar cáscara seca se reduciría bastante el uso de reactivos como el etanol.
2. Explorar otros usos que se le pueda dar a este residuo de cáscara de sandia, tales como la obtención de compuestos bioactivos como ser citrulina, elaboración de ingredientes alimenticios, biosorción o en lugar de elegir una sola aplicación, diseñar un proceso secuencial para extraer el máximo valor.
3. Se recomienda realizar estudios adicionales para optimizar la etapa de precipitación de la pectina. Evaluar el uso de diferentes tipos de alcoholes (como isopropanol o metanol) y distintas proporciones alcohol-extracto, podría mejorar la pureza y el rendimiento final del producto. Una precipitación más eficiente puede reducir costos y simplificar el proceso de purificación posterior.

4. Aunque la hidrólisis ácida es efectiva, se sugiere investigar métodos de extracción asistida por tecnologías emergentes como ultrasonido o microondas. Estas técnicas pueden reducir significativamente los tiempos de extracción y la temperatura requerida, lo que podría disminuir el consumo energético y minimizar la degradación térmica de la pectina.
5. Se recomienda investigar el aprovechamiento de la biomasa de la cáscara de sandía que queda después de la extracción de la pectina. Este residuo, rico en celulosa y otros compuestos, podría ser valorizado para la producción de bioetanol, compostaje o como fuente de fibra dietética para la formulación de alimentos para animales. Crear valor a partir de este subproducto mejoraría la sostenibilidad y la rentabilidad global del proceso.
6. Para validar el potencial comercial de la pectina obtenida, es fundamental evaluar su comportamiento en aplicaciones alimentarias específicas. Se recomienda realizar pruebas de formulación para la elaboración de productos como mermeladas, jaleas o yogures. Esto permitiría determinar de manera práctica su capacidad de gelificación, estabilidad y efecto sobre la textura del producto final, comparándola directamente con las pectinas comerciales.
7. Basado en los resultados a escala de laboratorio, se recomienda desarrollar un análisis tecno-económico detallado para un posible escalado a nivel piloto o industrial. Este estudio debería considerar el costo y la disponibilidad estacional de la cáscara de sandía, los costos de inversión en equipos, los gastos operativos y el precio de mercado de la pectina para determinar la viabilidad económica y la rentabilidad del proceso a mayor escala.

