

INTRODUCCIÓN

ANTECEDENTES

De acuerdo al diccionario de la Real Academia Española (RAE), se define al papel como una hoja delgada hecha con pasta de fibras vegetales obtenidas de trapos, madera, paja, etc., molidas, blanqueadas y desleídas en agua, que se hace secar y endurecer por procedimientos especiales.

El papel puede ser fabricado de forma artesanal o industrial, su origen remonta al antiguo Egipto con la creación del papiro y a la China del primer milenio, donde el papel como hoy lo conocemos se produjo a partir de trapos. (Anna G., 2014)

Posteriormente se fueron utilizando otras fibras, como la paja de arroz o los tallos de trigo, en el siglo IX se usó por primera vez la fibra de bambú. (Anna G., 2014)

El uso de papel aumentó consecuentemente hasta que en los siglos XVII y XVIII provocó una escasez de trapos, que la única materia prima conocida por los impresores europeos, por lo que se buscaban sustituto sin que ninguno tuviera interés comercial hasta que en 1840 se inventó la primera máquina para triturar madera y fabricar pulpa. 4 años más tarde, Fiedrich Gottlob Keller consiguió mediante procedimientos mecánicos obtener la pasta de madera y en 1852 Meiller descubrió la celulosa y Tilghman patentó el procedimiento mediante el cual se podía obtener celulosa de la madera utilizando bisulfito de calcio. (Anna G., 2014)

Desde la fabricación del papel, su uso aumentó en forma gradual, de acuerdo a un análisis de Allianz Research, Euler Hermes, la producción de papel y cartón en todo el mundo ha crecido más o menos alrededor de 415 millones de toneladas desde el 2015 al 2021. Además, al incrementarse la producción de papel también se incrementó la tala de árboles a nivel mundial afectando directamente al medio ambiente, debido a que para la fabricación de 1 tonelada de papel se necesitan 17 árboles adultos, casi 30000 litros de agua y unos 1500 litros de aceite.

Es por este motivo por el cual se realizaron distintas investigaciones con el fin de dar una alternativa no maderable para la manufactura de papel y cartón.

Según estadísticas provenientes de la Organización de las Naciones Unidas para la agricultura y la alimentación (FAO, 2020), para el año 2019 se produjeron 6.134.000 toneladas de pulpa a partir de fibras no maderables como se observa en la siguiente tabla:

Tabla 1: Producción de pulpa a partir de fibras no maderables (2019)

País	Toneladas de pulpa
China	5.877.000
Argentina	130.000
Tailandia	118.000
Japón	5.000
República Checa	4.000
TOTAL	6.134.000

Fuente: Enzo Muñoz, 2022

Otra alternativa para la fabricación de pulpa a partir de fibras no maderables es la cáscara de naranja.

En Bolivia, de acuerdo al artículo publicado por (Bolivia.com), se reportó 50000 hectáreas productivas de cultivos frutales de naranja, toronja, limón, lima y mandarina. De acuerdo con Desarrollo Rural, la mandarina tiene el mayor uso territorial con 26763 hectáreas, seguidas por la naranja con 22930 hectáreas, limón con 3384 hectáreas, lima con 945 hectáreas y la toronja con 440 hectáreas.

Además, en Tarija según datos del MDyT (Ministerio de desarrollo y tierras), la superficie cultivada de 917 hectáreas de naranja con una producción de 5764 toneladas. Constituyéndose Padcaya y Bermejo como los mayores productores de naranja, mandarina y limón.

El INE (Instituto Nacional de Estadísticas) realizó un censo agropecuario y presentó una actualización de datos en 2017, situando a Padcaya como el municipio que ocupa

el primer lugar en cuanto a la producción de naranja en el departamento con más de 67540 quintales al año. (El Pais, 2023)

Los residuos generados de la naranja son la cascara y el bagazo, el cual se genera cuando se obtiene el jugo de la fruta, en caso de que se ingiera el fruto completo no hay bagazo como desecho, de tal modo que la cascara es el principal residuo aprovechable de la naranja, es un desecho rico en aceites esenciales, azúcares y pigmentos. (Moncayo, 2018)

El presente trabajo propone el uso de las cascara de naranjas para producción de papel, de este modo ayudar a reducir el uso de madera y reducir el impacto ambiental y el volumen de residuos orgánicos provenientes de las juguerías.

En Bolivia, la Empresa Pública Nacional Estratégica de Bolivia (PAPELBOL) fue creada mediante el DS N° 29255 de 5 de septiembre de 2007 con una capacidad de 15200 toneladas por año, que empezó produciendo 80 toneladas en su primer año. En 2015 dio un giro a la producción ecológica. PAPELBOL tuvo como material base los residuos ya utilizados. Con la recolección de papel en desuso no se alienta la tala de árboles, para obtener la celulosa y se evita que el papel se convierta en una de las fuentes de contaminación, actualmente PAPELBOL produce 600 toneladas de papel en un mes. (Tancara, 2019). Por otro lado, también se tiene una investigación realizada en el Instituto de Investigaciones Amazónicas dependiente de la facultad de ingeniería de la Universidad Mayor de San Andrés sobre la elaboración de papel con pinzote de banano.

En Tarija, no se cuenta con industrias productoras de papel a partir de fibras no maderables, sin embargo, se tiene la investigación realizada en la Universidad Autónoma Juan Misael Saracho como ser la obtención de pulpa de celulosa para producir papel a escala laboratorio a partir de pinzote de plátano (*Musa Balbisiana*) cultivado en el trópico boliviano, en el cual aplicó el proceso a la sosa logrando obtener un rendimiento del 28,24% en base seca, es decir que por cada 100 g de pinzote de plátano seco se obtiene 28,24 g de pulpa seca.

OBJETIVOS

Objetivo General

Obtener papel a escala laboratorio a partir de la cáscara de naranja.

Objetivos Específicos

- Caracterizar la materia prima (cáscara de naranja) mediante análisis fisicoquímico.
- Determinar el proceso adecuado para la obtención a escala laboratorio.
- Determinar las variables de operación para el estudio.
- Caracterizar el papel obtenido a partir de la cáscara de naranja.
- Determinar el rendimiento del proceso de producción de papel a partir de cáscara de naranja a escala laboratorio.
- Realizar el estudio de costos del proyecto.

JUSTIFICACIÓN

Justificación Tecnológica

El desarrollo del presente proyecto tiene como objetivo el uso de desechos como la cáscara de naranja para uso alternativo en la producción de pulpa de celulosa el cual involucra en sus diferentes etapas de elaboración tecnologías estudiadas, conocidas y accesibles. Los materiales y equipos necesarios para cada operación del proceso se encuentran disponibles en el laboratorio de operaciones unitarias de la carrera de Ingeniería Química o mercado local, garantizando así la viabilidad del proyecto.

Justificación Económica

De acuerdo a datos del INE (Instituto nacional de estadísticas), Bolivia importó hasta el 2021, 164.442,2 toneladas de pulpa y papel de países como Brasil, Argentina, China, Perú entre otros, lo que indica un costo de 192,3 millones de dólares. (INE, 2021)

Con el presente proyecto se pretende contribuir al desarrollo de tecnología sostenible usando un recurso renovable, de fácil acceso y, además, transformándolo para darle un valor agregado, lo que permitirá generar ingresos adicionales en la agroindustria y

mejorar las condiciones de vida mediante la generación de empleos en especial para las personas ubicadas en la zona donde se localice una planta procesadora para la producción de pulpa de celulosa. Como también se pretende contribuir a la disminución de gastos en importación de dicho producto.

Justificación Social

Con el presente proyecto se busca generar un impacto social en el departamento de Tarija, aprovechando el residuo de la naranja (cáscara de naranja) como materia prima dándole el valor agregado, de esta forma generar ingresos extra y fuentes de empleo que contribuyan a la mejora de la calidad de vida de aquellas personas involucradas en la producción de naranja y en la generación de desechos de naranja.

Además, el papel obtenido puede ser destinado a la elaboración de artículos de escritorio, productos educativos o artísticos, donde pueden ser aprovechados por instituciones, escuelas o emprendedores y de esta forma incentivar al consumo de productos ecológicos y locales.

Justificación Ambiental

La fabricación de papel a partir de la pulpa de la madera ha evolucionado desde sus comienzos, hace 150 años. Si bien el perfeccionamiento de la técnica ha aumentado la producción, también ha degradado el medio ambiente.

Mediante el proyecto se plantea una alternativa eco amigable para la producción de papel mediante la utilización de fibras no maderables y de esta manera disminuir la tala de árboles y contribuir a la recuperación del equilibrio medio ambiental. Por otro lado, también se pretende contribuir al aprovechamiento de residuos generados por diferentes actividades realizadas por la población, los cuales son mínimamente aprovechados o en su caso son depositados en contenedores causando problemas de contaminación ambiental.

Justificación Personal

Con el presente proyecto se pretende contribuir con la sociedad aplicando y demostrando los conocimientos adquiridos en la formación universitaria realizando un

estudio de investigación sobre la elaboración de pulpa de papel a partir de cáscara de naranja con lo cual se dará alternativas más amigables con el medio ambiente.

CAPÍTULO I

MARCO TEÓRICO

1. MARCO TEÓRICO

1.1. Biomasa

De acuerdo al portal de la Comisión Europea plataforma Energía Renovable, la biomasa se refiere a materia orgánica de origen vegetal o animal, incluyendo a los árboles, plantas y residuos agrícolas y urbanos que pueden ser aprovechados como fuentes de energía y para reducir las emisiones de gases que causan el efecto invernadero mediante su tratamiento efectivo y sostenible. (Unión Europea, 2018)

1.1.1. Tipos de biomasa residual

La biomasa se clasifica de acuerdo a su origen y naturaleza que considera la forma en la que se encuentra el compuesto o grupo de compuestos presentes en la biomasa vegetal que en su mayoría son los carbohidratos. (Fernández et al., 2015)

Tabla I-1: Tipos de biomasa residual

Clasificación	Tipo	Descripción	Ejemplos
Origen	Madera virgen	Obtenida de los bosques o de la explotación forestal	Troncos, ramas y cortezas
	Cultivos energéticos	Plantas cultivadas con fines energéticos considerando las condiciones del suelo y los climas	Algas, caña gigante, centeno y césped
	Residuos agrícolas	Residuos de cultivos y procesos agrícolas. También se considera al material orgánico de producción excesiva.	Tallos, paja o cascaras
	Residuos sólidos urbanos	Residuos que se producen por la actual forma de vida. Se utilizan para generar	Papel y cartón

		energía a través de combustión, pirólisis o gasificación.	
	Residuos industriales	Residuos generados a nivel industrial que pueden proporcionar poder calorífico considerable.	Residuos de industria textil alimenticia, madera y lodos
Naturaleza	Biomasa lignocelulósica	Predomina la celulosa, hemicelulosa y la lignina	Paja, madera o leña
	Biomasa amilácea	Los carbohidratos más representativos son los polisacáridos de reserva	Almidón, inulina o cereales
	Biomasa azucarada	Los carbohidratos más representativos son los monosacáridos o disacáridos	Remolacha o tallo de la caña de azúcar

Fuente: Cabezas, T. 2019

1.1.2. Residuos agrícolas

Puede considerarse un residuo agrícola aquella parte de la planta que no es aprovechada para ser comercializada o aquella parte que no cumple los estándares de calidad porque presenta características físicas o químicas inferiores o su apariencia se ve afectada por enfermedades. Por lo tanto, los residuos pueden ser las partes de la planta correspondientes a: tallos, hojas, raíces, frutos no aprovechados, restos de podas y pajas de cereales. (Morenos, Moral, García, Pascual & Bernal, 2014)

La producción de papel y cartón a nivel mundial depende en gran porcentaje de la madera. Sin embargo, en muchos países los bosques son un recurso escaso, por lo tanto, los residuos agrícolas que son los residuos de las cosechas de plantas se han convertido en una materia prima alternativa en esta industria, ya que tanto la madera como los recursos no madereros están compuestos por fibras. Es por esta razón que los residuos agrícolas se denominan “fibras no madereras”. (Cabezas, T. 2019)

1.2. Fibras para elaborar papel

Las fibras vegetales son la base para la fabricación de papel. Dentro de estas fibras se tiene las fibras madereras que han sido la principal fuente. Sin embargo, las fibras no madereras propias de cada región como el bagazo, el bambú, algodón, etc., se consideran como nuevas materias primas para evitar el consumo de madera. (Roberts, 1996)

1.2.1. Fibra maderera

Las fibras de madera son fibras celulósicas y se subdividen en maderas duras y maderas blandas. (Sridach, 2010)

Las maderas blandas corresponden a las plantas gimnospermas que se conocen como coníferas mientras que las maderas duras corresponden a las plantas angiospermas conocidas como de hoja ancha o caduca. Las maderas duras tienen una estructura más compleja en comparación a las blandas. Además, al presentar una longitud menor en sus fibras con respecto a las coníferas produce un papel mas suave y de menor resistencia. (Biermann, J. 1996)

1.2.2. Fibra no maderera

La deforestación ha hecho que la tendencia del uso de la madera para elaborar papel cambie y sea necesario buscar otros recursos. Entre los cuales se encuentran los materiales no madereros como: residuos de cultivos agrícolas, hojas de árboles, cascaras de frutas, pastos entre otros (Kamoga, Byaruhanga & Kirabira, 2013).

1.3. Composición química de las fibras para elaborar papel

Las paredes celulares en las plantas están constituidas por polímeros. Tanto las fibras madereras como las no madereras están compuestas principalmente por celulosa, hemicelulosa y lignina. (Jones, Ormondroyd, Curling, Popescu & Popescu, 2017)

1.3.1. Celulosa

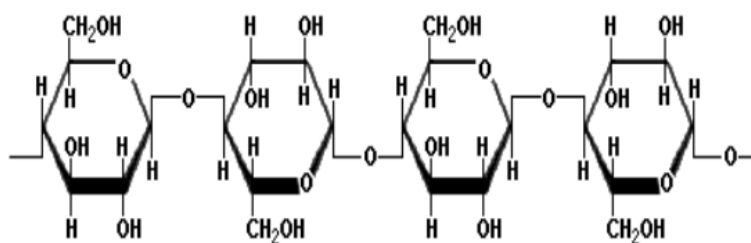
Se trata de uno de los componentes mayoritarios de la pared celular representando generalmente un 35 o 50% dependiendo del tipo de planta. Se trata de un polisacárido de cadenas lineales sin ramificaciones, donde la unidad monomérica es la D-glucosa, los cuales están unidas mediante enlaces glucosídicos β -1,4. Dichos enlaces pueden ser hidrolizados de forma química, enzimática o por microorganismos celulolíticos y hemicelulolíticos, estos últimos residen en el sistema digestivos de algunos insectos y rumiantes; cuyo proceso es mediado por enzimas del tipo de celulasas. (Marquez F., 2017)

La celulosa contiene elementos como: carbono, hidrógeno y oxígeno dando lugar a la formula química $(C_6H_{10}O_5)_n$, (Moon et al., 2011), siendo n el grado de polimerización, que indica las unidades de glucosa en el polímero.

Técnicamente se da el nombre de celulosa a las fibras blancas que se obtienen cuando se somete la materia vegetal a tratamientos de purificación mediante los cuales se extraen casi totalmente los demás componentes de la planta, especialmente la lignina.

En cuanto a su solubilidad, es insoluble en agua o soluciones diluidas de ácido o base a condiciones normales de temperatura. La celulosa se encuentra rodeada por hemicelulosa y lignina. Siendo necesario separarla para utilizarla como materia prima en las industrias de pulpa, papel y textil. (Chen, 2014)

Figura 1-1: Estructura química de la celulosa



Fuente: Marquez F., 2017

1.3.1.1. Clasificación de la celulosa

Se clasifican en tres tipos: Alfa celulosa (α celulosa), Beta celulosa (β celulosa) y Gamma celulosa (γ celulosa), de orientación levógira y dextrógira.

- **Alfa celulosa (α celulosa):** La alfa celulosa es abundante, es considerada como una celulosa pura que no se degrada por procesos de blanqueo o cocción, proviene de las capas internas de las paredes celulares de las plantas lo cual que por su pureza se lo utiliza en la producción de papel, textilería, productos químicos entre otros.
- **Beta celulosa (β celulosa):** La Beta celulosa se la puede encontrar en la capa intermedia de las paredes celulares de la planta.
- **Gamma celulosa (γ celulosa):** La Gamma celulosa se la puede encontrar en la capa externa de las paredes celulares de las plantas.

1.3.2. Hemicelulosa

La hemicelulosa es un heteropolisacárido, es el segundo hidrato de carbono más abundante debido a que su existencia varía en la biomasa del planeta.

Es la estructura que envuelve y resguarda a la celulosa. Es un polisacárido formado por más de un tipo de monómeros, está formado por un conjunto heterogéneo de polisacáridos, a su vez formados por un solo tipo de monosacáridos unidos por enlaces β (1-4) los cuales forman una cadena lineal ramificada. Entre estos monosacáridos destacan más la glucosa, galactosa o fructosa. Forma parte de las células vegetales, recubriendo la superficie de las fibras de celulosa y permitiendo el enlace de pectina. (QUIMICA.ES, 2021)

1.3.3. Holocelulosa

Es difícil establecer una barrera que separe celulosas de hemicelulosas, pues no se trata de unos productos definidos en cuanto a su grado de polimerización. Existe una fracción de auténtica celulosa (la α -celulosa), otra algo más débil (β -celulosa) y, por último, otra fácilmente atacable (γ -celulosa). Pero la separación entre ambas no es

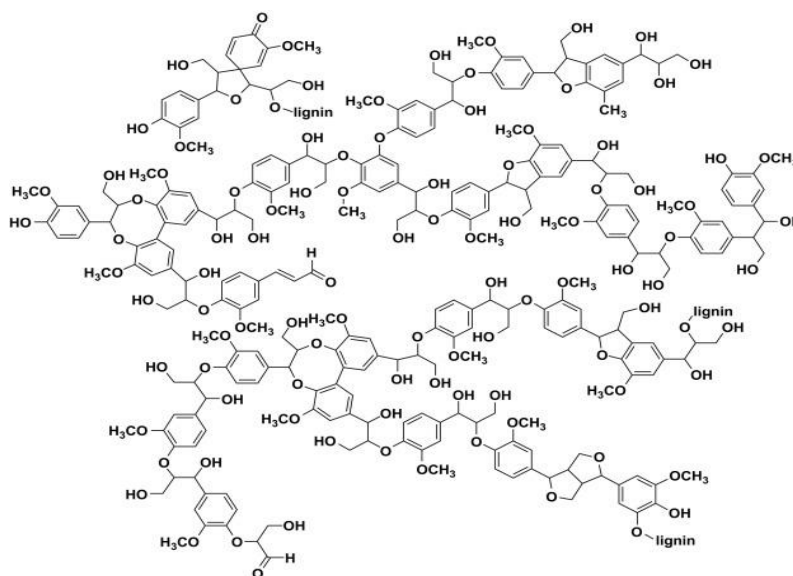
tajante. Por tanto, se entiende por holocelulosa como el conjunto de todas las celulosas y hemicelulosas contenidas en una pasta. (Rodríguez Jiménez, 1970)

1.3.4. Lignina

La lignina es un material orgánico como también es un polímero tridimensional altamente ramificado con una gran variedad de grupos funcionales que proporcionan centros activos para interacciones químicas y biológicas. Es importante destacar que la lignina es la única fibra no polisacárido que se conoce. Realiza múltiples funciones que son esenciales para la vida de las plantas, como el transporte interno de agua, nutrientes y metabolitos. Es la encargada de proporcionar rigidez a la pared celular y actúa como puente de unión entre las células de la madera, creando un material notablemente resistente a los impactos, compresiones y flexiones. (Gutiérrez, Guirola, Martínez, Albernas & Villanueva, 2020)

La lignina disponible en el mercado procede de una serie de procesos, mayoritariamente de la obtención de papel, lo cual provoca que en su caracterización pueden aparecer grupos funcionales distintos. (Nour-Edidine – 2006)

Figura 1-2: Estructura de la lignina



Fuente: Chaves y Domine, 2013

1.4. La naranja

Es una fruta cítrica obtenida del naranjo dulce (*Citrus x senensis*), del naranjo amargo (*Citrus x aurantium*) y de naranjos de otras variedades o híbridos de origen asiático. Es un hesperidio carnoso de cascara más o menos gruesa y endurecida, su pulpa está formada típicamente por once gajos u hollejos llenos de jugo el cual contiene mucha vitamina C, flavonoides y aceites esenciales. Se cultiva como un antiguo árbol ornamental y para obtener fragancias de sus frutos, es mas pequeña y dulce que el pomelo o toronja, aunque menos perfumada que la mandarina. Existen numerosas variedades de naranjas, siendo la mayoría híbridos producidos a especies citrus máxima (pamplemusa), *citrus reticulata* (mandarina) y *citrus médica* (cidro).

En Bolivia los mayores productores de naranja son los departamentos de La Paz (Yungas), Cochabamba (Chapare), Santa Cruz y Tarija, las variedades que son mayormente cultivadas a nivel nacional son: Criolla, Navel, Bahía Thompson, Washington Navel, Hamlin, Jaffa, Pera Bahianiana, Valencias, Late, Lue, Gin.

En el departamento de Tarija existen diferentes variedades de naranja.

Tabla I- 2: Variedades que existen en mayor cantidad por zonas

Río Bermejo	Criolla, criolla injertada, valencia tardía y tanjarina
Río Tarija	Criolla, jaffa, valencia temprana
Yacuiba	Criolla, criolla injertada, pupula, Valencia temprana y tardía
Tariquia	Criolla
Villa Montes	Criolla, criolla injertada
O'Connor	Criolla, criolla injertada

Fuente: Valle, 2016

1.4.1. Variedades de naranja

1.4.1.1. Valencia tardía

Pulpa dura y color naranja oscuro, semillas medianas y anchas, tamaño y color externo de la cascara variado, forma más redondeada.

De acuerdo a la investigación de Valle (2016), es la variedad de naranja que tiene mayor demanda a nivel mundial y una de las más cultivadas en el país. Da frutos de tamaño mediano, corteza un tanto gruesa, dura y coriácea. Superficie lisa, ligeramente áspera, jugo abundante y menos de seis semillas por fruto. Se mantiene bien en el árbol después de madurar y si se riega puede llegar a reverdecer. Es de madures tardía y excelente para la industria de jugos. De todas las variedades comerciales, es la que posee el mayor rango de adaptación climática.

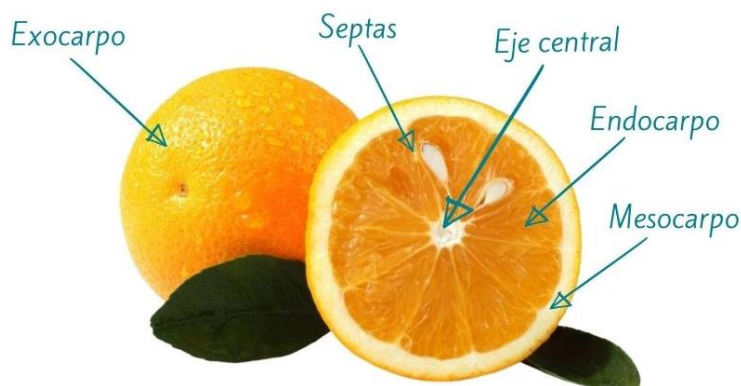
1.4.1.2. Criolla injertada

Pulpa blanda de color naranja oscuro, al apretar la cascara esta se desarma fácilmente, semillas medianas y delgadas, tamaño y color externo de la cascara casi uniforme. (Valle, 2016)

1.4.1.3. Criolla

Semillas largas terminan en punta, tamaño muy variado, color externo de la cascara casi uniforme, pulpa más dura que la criolla injertada, se caracteriza por tener la cascara más gruesa que las demás variedades. (Valle, 2016)

Figura 1-3: Partes de la naranja



Fuente: hilfe Agrothecnical, 2020

De acuerdo a la figura 1-3, los cítricos están compuestos por:

Septas o membranas, que son finas paredes celulares que separan los gajos de las naranjas

Exocarpo o flavedo, es lo más visible de la naranja, es decir la corteza o la parte de afuera, está formado por la epidermis e hipodermis que son de color verde cuando no está madura y color naranja cuando está en su punto de maduración.

Mesocarpo o albedo, se trata de la capa que une la parte interior y exterior de la naranja, posee un aspecto esponjoso y de color blanco, es muy rica en pectina, celulosa y hemicelulosa. (Cardozo, J. Y., 2003)

Endocarpo, es la parte comestible de la naranja que está formada por los carpelos o gajos compuesto por vesículas en forma de huso que contiene jugo y están separados por la membrana intercarpelares. (Cardozo, J. Y., 2003)

1.5. Cáscara de naranja

La cáscara de los cítricos está compuesta de dos partes, el flavedo o exocarpo, y el albedo o mesocarpo. El flavedo es una capa delgada que posee los pigmentos que cambian de color durante la maduración de verde a amarillo, de gran aroma debido a los compuestos terpenicos que componen a los aceites esenciales que allí se encuentran.

El albedo es la parte blanca que contiene pectina que es la encargada de otorgar firmeza a la corteza. A medida que el fruto madura, el albedo empieza a degradarse por acción enzimática. (Marquez F., 2017)

Figura 1-4: Cáscara de naranja



Fuente: AUGISTI, M., 2003

A continuación, se presenta la composición proximal de la cascara de naranja, en donde indica que el contenido de humedad corresponde a 29,6% que significa que casi un tercio de la cascara es agua y posee un bajo contenido en grasas con 2,42%.

Tabla I-3: Composición proximal de la cáscara de naranja

Humedad %	Proteína %	Grasas %	Cenizas %
29,6	7,78	2,42	5,17

Fuente: Martines et al., 2017

1.5.1. Usos de la cáscara de naranja

La cáscara de naranja se usa industrialmente para la producción de:

- **Biogás y bioetanol**, ya que la cascara de naranja es rica en carbohidratos lo que permite su uso como materia prima.
- **Pectina**, la cascara de naranja también es considerada una fuente de pectina, que es utilizado para la elaboración de mermeladas y jaleas.

- **Extractos y compuestos bioactivos**, se puede extraer antioxidantes y otros compuestos fenólicos con capacidad para prolongar la vida útil de los alimentos y mejorar la salud.
- **Bioplásticos y papel**, por su alto contenido en celulosa, la cascara de naranja es posible utilizarla como materia prima para la elaboración de bioplásticos y papel, ofreciendo una alternativa sostenible.

1.6. Pulpa y papel

La pulpa de celulosa es el material fibroso para la fabricación de papel. Las fibras de pulpa son normalmente de origen vegetal, pero para algunas aplicaciones especiales se usan también fibras animales, minerales o sintéticas. Las pulpas utilizadas para su conversión química en otros productos se denominan pulpas para disolver. (Smook, 1990)

1.6.1. Procedimientos para la obtención de pulpa de celulosa

La pulpa de celulosa se obtiene por la separación de las fibras de madera u otros materiales fibrosos; es un producto intermedio en la manufactura del papel y cartón. La industria del papel tiene como propósito separar la celulosa de cualquier otro componente del cual este constituido un material vegetal, en especial la lignina. Por lo tanto, para el productor de pulpa, la lignina es el ingrediente indeseable que se debe eliminar durante la elaboración de pulpa.

Las propiedades de los productos terminales dependerán de las propiedades de las pulpas utilizadas en su manufactura. Estas variaran a su vez con las especies de fibras de distintas maderas o de plantas no leñosas, utilizadas, así como el proceso empleado en la obtención de pulpa. (Casey, 1990)

Es posible producir pulpa mediante procesos mecánicos, químicos o mediante la combinación de los dos procesos, los cuales se detallan a continuación:

1.6.1.1. Procesos mecánicos

De acuerdo a Biermann (1996) el pulpeo mecánico involucra el uso de una fuerza mecánica para pulpear los materiales lignocelulósicos, no se utilizan químicos, solo el

agua y el vapor; como fuente de fibras las correspondientes a maderas suaves de colores claros y no resinosas y algunas maderas duras. La lignina es retenida en la pulpa, por lo que, se obtienen altos rendimientos entre el 90% y el 98%. Estas pulpas caracterizan por su elevado volumen, alta rigidez, y bajo costo; además de que presentan una baja resistencia mecánica, dado que la lignina interfiere con los enlaces de hidrogeno entre las fibras cuando se hace el papel. La lignina provoca que la pulpa tienda a cambiar a color amarillo al ser expuesta al aire y a la luz. (Solano Hernández, 2010)

1.6.1.2. Procesos químicos

En el pulpeo químico, la lignina se solubiliza mediante reacciones químicas a temperaturas elevadas, aproximadamente de 130°C a 180°C. el rendimiento total varía del 45% al 55% dependiendo de la materia prima utilizada y del proceso de pulpeo aplicado. Estas pulpas presentan alta resistencia mecánica y contienen aproximadamente del 3% al 5% de lignina. (Solano Hernández, 2010)

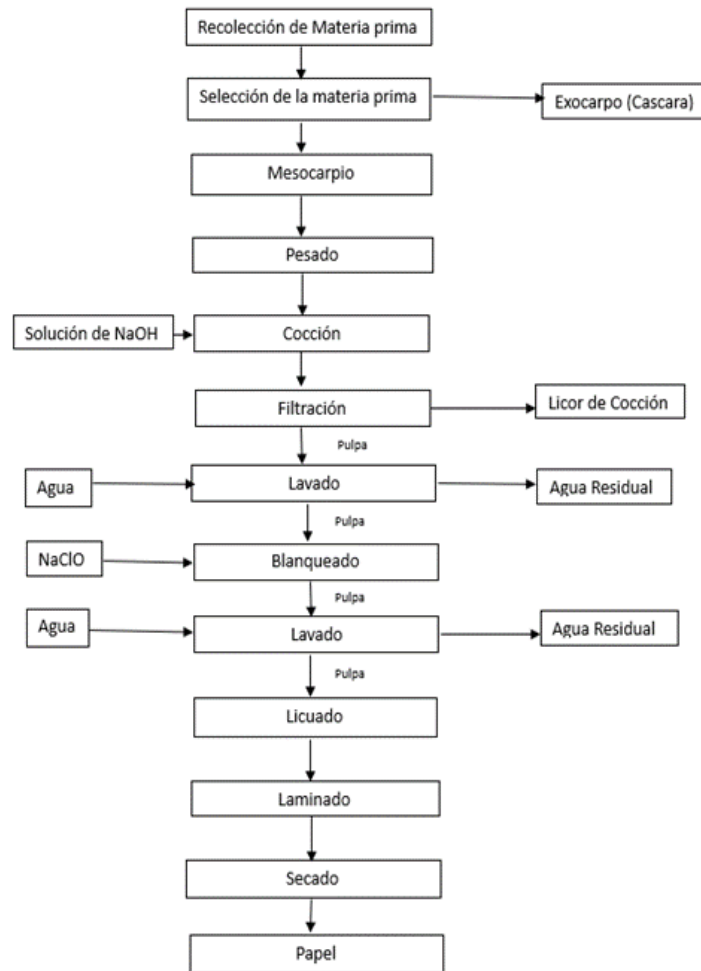
En la investigación de Solano Hernández (2010) señala que, a nivel mundial, la mayoría de las fábricas que utilizan fibras no maderables hacen uso de los procesos químicos como sosa, Kraft y sulfito, pero el método más usado a nivel comercial para pulpear especies no maderables sigue siendo el método a la sosa. Este se debe a que deja una mayor cantidad de carbohidratos insolubles en la pulpa y se obtiene un mejor rendimiento que para el método Kraft. Sin embargo, las propiedades de resistencia mecánica y el contenido de lignina son similares en las pulpas producidas por ambos métodos.

1.6.1.2.1. Proceso a la sosa

Este es el proceso más antiguo que se conoce y consiste en someter la materia prima, troceada y acondicionada a un digestor con una concentración de hidróxido de sodio, a una temperatura y tiempo de cocción determinados, según la calidad de las pulpas que se deseen obtener (químicas o semiquímicas) y las características de la materia prima utilizada. Se cargan la materia prima y el licor al digestor bien sea intermitente o continuo. El licor blanco se carga para dar la relación correcta de productos químicos

a la materia prima, y, en el caso de los digestores intermitentes, el licor negro recirculado procedente de los lavadores se agrega también para alcanzar la relación deseada licor/materia prima. El digestor se calienta por vaporización directa o indirecta hasta llegar a una temperatura alta, en el margen de 160°C a 180°C, y se mantiene allí hasta alcanzar el grado deseado de cocción. Después de terminar la digestión, la materia prima cocida y el licor gastado se descargan en un tanque de soplado. Las partículas no cocidas de mayor tamaño (nudos) se eliminan entonces utilizando cribas perforadas (nuderás) y separa de la pulpa mediante un lavado en contracorriente. La pulpa se diluye hasta llegar a una consistencia baja, y se eliminan los contaminantes de pequeño tamaño mediante cribas finas, bien sea el tipo centrífugo o por presión, lo que en algunos casos se prosigue mediante limpiadores centrífugos. Finalmente, el material ya limpio se espesa y se almacena para subsecuente procesado. (Delgado & Uribe, 2017)

Figura 1-5: Diagrama de flujo del proceso de pulpeado a la sosa



Fuente: Smook, 1990

De acuerdo con Casey (1990), una de las ventajas de este proceso es que el licor blanco es fácil de separar, llegando a obtenerse una pulpa de color claro lo que la harán buenas para impresión. Sin embargo, la desventaja de este proceso es que puede deteriorar las fibras de la celulosa, la lignina en cambio se transforma en sustancias solubles en álcali. Este proceso puede producir jabones con las grasas encontradas en la materia prima, por lo que el lavado debe hacerse inmediatamente. El rendimiento obtenido mediante este proceso es de 45% a 50%.

1.6.1.2.2. Proceso Kraft

El desarrollo del proceso de Kraft se atribuye usualmente a C.F. Dahl. En un esfuerzo por encontrar un sustituto para el costoso carbonato de sodio, experimento con la adición de sulfato de sodio a la caldera de recuperación para reponer las pérdidas de productos químicos ocurridas durante las operaciones de cocción a la sosa. El sulfato fue químicamente reducido a sulfuro en la caldera, que de esta forma fue introducido en el licor del sistema, Dahl observo que el sulfuro aceleraba significativamente la deslignificación llegando a producir una pulpa mucho más resistente.

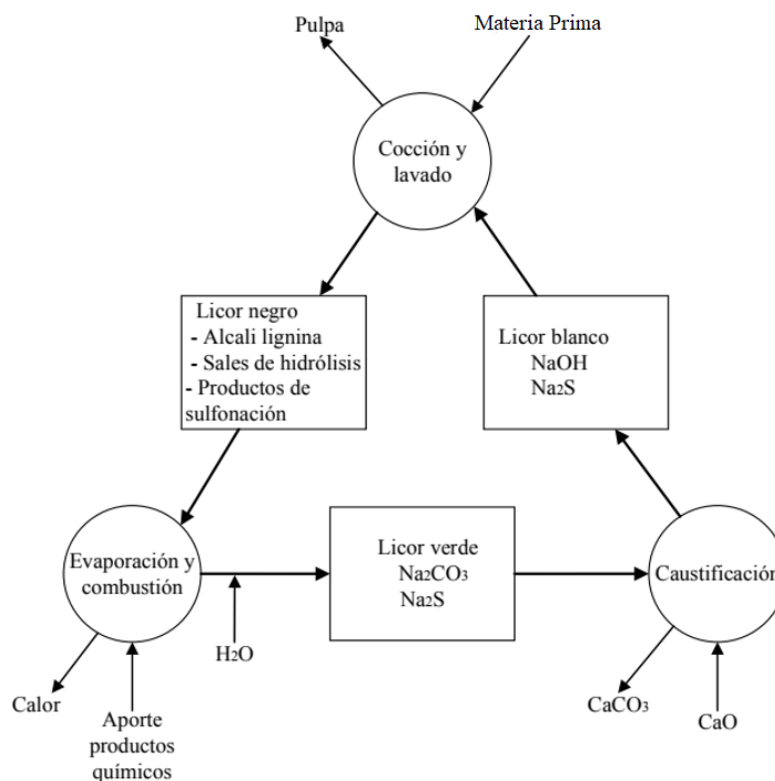
Luego de la etapa de cocción o digestión, el licor negro residual es extraído por lavado de la pulpa y tratado en una serie de etapas para recuperar los productos químicos y regenerar el licor de cocción. El proceso de cocción puede ser continuo o discontinuo, en la cocción discontinua, el digestor se llena de materia prima y se adiciona suficiente licor para cubrirlas. Después, el contenido se calienta de acuerdo a un programa predeterminado, normalmente por circulación forzada del licor de cocción a través de un intercambiador de calor. Por la parte superior del reactor se desgasan aire y otros gases no condensables por medio de una válvula de control de presión. La temperatura máxima se suele alcanzar después de 1 a 1,5 hr, que permite al licor de cocción impregnar a la materia prima.

La cocción se mantiene entonces a temperatura máxima (usualmente en torno a 170°C) durante 1 a 2 hr para completar las reacciones de cocción. Después de la digestión, el contenido se descarga en un tanque de soplado donde la materia prima ablandada se desintegra en fibras; el vapor se condensa en un intercambiador de calor para proporcionar agua caliente para el lavado de la pulpa. (Smook, 1990)

Las variables más influyentes en las reacciones de pulpeado Kraft son:

- Concentración de álcali (medida por el álcali activo o álcali efectivo)
- Temperatura. Dentro del intervalo de temperatura normal de cocción (155 a 175°C), la velocidad de deslignificación crece más del doble para cada incremento de 10°C.

Figura 1-6: Esquema del ciclo de licores Kraft



Fuente: Smook, 1990

1.6.1.2.3. Proceso al sulfito

Primero se prepara el licor de cocción mediante combustión de azufre para producir SO_2 gas, posterior a la absorción del SO_2 en una solución alcalina de la base. Antiguamente, en las fabricas se utilizaba exclusivamente caliza en la torre de absorción de gas, que servía como material de relleno y como fuente de calcio para producir bisulfito de calcio. En cambio, en las fábricas más modernas, se usa una de las bases solubles, en forma de NH_4OH , $Mg(OH)_2$ o Na_2CO_3 para absorber el SO_2 ; para proporcionar una mayor área de contacto en la torre de absorción, se utilizan rellenos inertes tales como las sillas berl. (Smook, 1990)

La cocción se realiza de manera intermitente haciendo el uso de un recipiente a presión, recubierto de acero o acero inoxidable con revestimiento resistente al ácido. El digestor

se carga primero con la materia prima, se tapa y se adiciona después ácido caliente, procedente del acumulador de alta presión, para casi llenar el digestor.

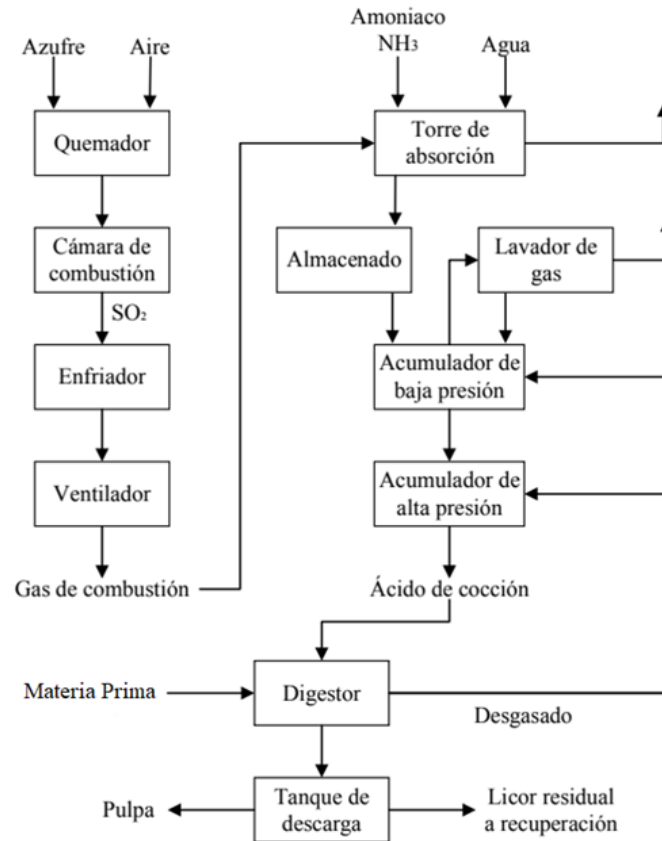
Cuando la temperatura y la presión se incrementan, el ácido caliente es absorbido rápidamente por las astillas. La reacción química no progresa en ningún momento hasta que la temperatura sobrepasa los 110°C, pero es importante que en esta etapa las fibras estén bien impregnadas con los reactivos de cocción. Una lenta subida de temperatura (130 a 140°C), y un largo tiempo global de cocción (6 a 8 hr) son condiciones típicas para evitar reacciones de policondensación de la lignina no deseables. Mediante este proceso se tiene la posibilidad de obtener pulpas de mayor blancura y resistencia, sin embargo, la velocidad es pausada haciéndose necesaria una cantidad elevada de reactivos. (Enzo Muñoz, 2021)

En este proceso las variables mas influyentes en la cocción del sulfito son:

- El pH
- La concentración de SO_2 libre
- Temperatura

El pH se desplaza desde el nivel correspondiente a la cocción al sulfito ácido (pH 1,5 a 2,0) al nivel de la cocción al bisulfito (pH 4,0 a 5,0), la velocidad de cocción se puede mantener utilizando temperaturas mas altas, normalmente a 140°C es el nivel máximo considerado en la cocción al sulfito acido de calcio, debido a las reacciones de policondensación que pueden ocurrir a temperaturas mas elevadas. Cuando se utilizan bases monovalentes (pH mas altos), la temperatura se puede incrementar hasta 160°C o más. (Smook, 1990)

Figura 1-7: Diagrama de flujo del proceso de pulpeado al sulfito con base amonio



Fuente: Smook, 1990

1.6.2. Factores a tomar en cuenta para la producción de la pulpa

Las principales variables de trabajo durante el proceso de pulpeo y que pueden ser aplicadas a fibras no maderables, de acuerdo a Stephenson (1950) citado en Enzo Muñoz (2022) son:

- **Especie y calidad de la materia prima**

La diferencia más marcada entre materias primas duras y suaves se encuentran en la longitud de sus fibras, así como el contenido de celulosa, pentosas y lignina, dando como resultado una variación en cuanto a las propiedades de la pulpa obtenida. La

materia prima de diferente densidad requiere distintos tratamientos de cocción. (Enzo Muñoz, 2022)

- **Tiempo de cocción**

Este tiempo está relacionado con otras variables, tales como la temperatura, cantidad y la concentración del licor. Un aumento en cualquiera de estas variables disminuirá el tiempo para obtener la pulpa con el mismo rendimiento y calidad.

- **Temperatura de cocción**

La temperatura y el tiempo de cocción son variables dependientes, ya que mientras mas alta sea la temperatura, menor será el tiempo de digestión. Una temperatura por debajo de los 170°C no aporta en el rendimiento ni en la calidad de la pulpa obtenida. Mientras que, por encima de los 180°C, la celulosa es muy susceptible a degradarse, particularmente a una temperatura de 200°C.

- **Relación de los productos químicos con la materia prima**

La relación entre los productos químicos y la materia prima que se agreguen al reactor debe mantenerse por encima de un tiempo determinado, con el fin de producir pulpa mediante la eliminación de suficiente lignina para separar las fibras. (Enzo Muñoz, 2022)

- **Concentración de los reactivos en el licor**

La concentración de los reactivos en el licor de cocción está estrechamente relacionada con la relación de los productos químicos a la materia prima; la velocidad de la reacción química está determinada por la concentración de los reactivos de cocción. (Enzo Muñoz, 2022)

1.6.3. Índices de calidad de pulpa

- **Rendimiento porcentual**

Es la cantidad de pulpa obtenida para la cantidad de materia prima seca que ingresó multiplicado por cien.

- **Alfacelulosa**

La alfacelulosa se define como la fracción de celulosa no degradada o insoluble que se obtiene al someter una pasta química a una solución de NaOH al 17,5%. Esta fracción es considerada como la celulosa en su forma más pura, y su cantidad nos da una referencia a propiedades como la capacidad a no degradarse por envejecimiento y conservar su resistencia. (Grant, 1996)

CAPÍTULO II
PARTE EXPERIMENTAL

2. METODOLOGÍA DE ESTUDIO

2.1. Caracterización de la materia prima

Las cáscaras de naranja con las que se desarrolló el proceso corresponden a descartes de la naranja de la variedad naranja, citrus sinensis (Valencia Tardía), la cual está formada por la piel o cascara que está compuesta principalmente por materia lignocelulósica, se eligió esta variedad porque es una de las naranjas más comercializadas y consumidas en el departamento de Tarija. Son considerados subproductos provenientes de actividades humanas tales como el comercio interno, el consumo directo en domicilios y especialmente en el sector industrial.

La caracterización de la cáscara de naranja se realizó mediante la determinación de propiedades fisicoquímicas, dichos análisis se realizaron en el Centro de Análisis, Instigación y Desarrollo (CEANID), ubicado en la ciudad de Tarija, en Laboratorio CBO ubicado en Brasil y en Instituto de Investigaciones Químicas IIQ ubicado en la ciudad de La Paz.

2.2. Selección del proceso experimental

Con el objetivo de definir el método más apropiado para la obtención del papel, se recurre al método cualitativo por puntos, para el cual se tomaron en cuenta diferentes características similares o diferentes que poseen cada uno de los procesos anteriormente descritos. De acuerdo a bibliografía, los principales métodos para la producción de papel son: el proceso a la sosa, Kraft y sulfito.

Tabla II-1: Escala de puntuación

Calificación	
Escala de puntuación	Puntuación
Malo	1-2
Regular	3-4
Bueno	5-6
Muy bueno	7-8
Excelente	9-10

Fuente: Rensis Likert, 1932

Tabla II-2: Selección del proceso de obtención de papel a partir de cáscara de naranja

Nº	Actividades de proceso	Peso relativo	Proceso a la sosa		Proceso Kraft		Proceso al Sulfito	
			Calificación	Valor ponderado	Calificación	Valor ponderado	Calificación	Valor ponderado
1	Aplicabilidad del metodo y disponibilidad de equipamiento	0,25	8	2	6	1,5	5	1,25
2	Calidad de producto obtenido	0,25	8	2	6	1,5	9	2,25
3	Tiempo de obtención del producto	0,15	7	1,05	8	1,2	6	1,2
4	Preparación del licor blanco	0,15	10	1,5	7	1,05	5	0,75
5	Requerimientos de reactivos	0,2	9	1,8	7	1,4	5	1
TOTAL		1		8,35		6,65		6,45

Fuente: Elaboración propia, 2024

La tabla II-2, de selección del proceso de obtención de papel, arrojó una puntuación para cada proceso, de este modo el proceso con mayor puntuación es el proceso a la sosa con una puntuación de 8,35, esto debido a la aplicabilidad del proceso y la disponibilidad de los equipos en el laboratorio de operaciones unitarias lo que conlleva un costo menor, también se tiene un fácil acceso a la materia prima, el hidróxido de sodio es una sustancia controlada, sin embargo, es posible obtener a través de empresas constituidas para adquirir el reactivo. También se observa que, mediante este proceso, es posible obtener papel de buena calidad.

2.3. Diseño factorial

Los diseños experimentales son un conjunto de métodos y procedimientos utilizados para analizar medidas de variables específicas en una investigación. Existen varios casos especiales del diseño factorial general que resultan importantes porque se usan ampliamente en el trabajo de investigación.

Uno de los más importantes de estos casos especiales ocurre cuando se tienen k factores, cada uno con dos niveles, los cuales pueden ser cuantitativos como por ejemplo dos valores de temperatura, presión, tiempo, etc., pero también pueden ser cualitativos como el de dos máquinas, dos operadores, etc., los niveles “superior” e “inferior” de un factor, o quizás, la ausencia o presencia de un factor. Una réplica completa de tal diseño requiere que se recopilen $2 \times 2 \times \dots \times 2 = 2^k$ observaciones y se conoce como diseño general 2^k .

El número de tratamientos o corridas a realizarse en el experimento es 2^k por número de replicas. Cuando el factor está en su nivel bajo su exponente es 0 y cuando está en el nivel alto su exponente es 1.

En un diseño factorial 2^k resulta sencillo expresar los resultados del experimento en términos de un modelo de regresión, aunque se pueden utilizar modelos de efectos como de promedios. El modelo de regresión es mucho más natural e intuitivo. La ecuación del modelo de regresión sería:

$$y = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \beta_{12} x_1 x_2 + \varepsilon$$

Donde x_1 y x_2 representan a los niveles codificados de los factores (-1 y +1), y la variable respuesta y ε el error aleatorio.

Para el desarrollo de la presente investigación se planteó un diseño factorial para el proceso de obtención de papel a partir de cáscara de naranja.

2.3.1. Selección de variables del proceso experimental

El diseño factorial para la obtención de papel a partir de cáscara de naranja se realizó tomando en cuenta la investigación de “*Obtención de pulpa de celulosa para producir papel a escala laboratorio a partir de pinzote de plátano (Musa balbisiana) cultivado en el trópico boliviano*” por Enzo Leonardo Muñoz Estrada, 2022. Para determinar las variables significativas se planteó un diseño factorial 2^3 , es decir, dos niveles y tres variables haciendo un total de 8 experimentos, además que se realizó una réplica a cada experimento, por lo que se realizó un total de 16 experimentos, lo que permitió hacer un mayor número de combinaciones de variables.

Las variables que se determinaron para la obtención de papel en base a referencia bibliográfica y pruebas preliminares son porcentaje de Sosa, tiempo de cocción y temperatura de cocción.

Tabla II-3: Variables de proceso para la obtención de papel a partir de cáscara de naranja

Variable independiente	Unidad	Variable dependiente	Unidad
Porcentaje de sosa	%	Rendimiento	%
Tiempo de cocción	Min	-	-
Temperatura de cocción	°C	-	-

Fuente: Elaboración propia, 2025

$$N^{\circ} \text{ variables} = 3$$

$$\text{Niveles} = 2$$

$$N^{\circ} \text{ experimentos} = (2^3) \times 2 = 16$$

Tabla II-4: Niveles de variación de factores

Variables	Niveles	
	Inferior	Superior
Porcentaje de sosa (%)	8	12
Tiempo de cocción (min)	60	90
Temperatura de cocción (°C)	100	120

Fuente: Elaboración propia, 2025

Para facilitar el tratamiento de datos, se codificó las variables por (-1) para representar el nivel bajo y (+1) que representa al nivel alto como se observa en la tabla II-4.

Tabla II-5: Matriz de experimentos

N°	Matriz de experimentos			Plan de experimentación			
	A	B	C	Porcentaje a la sosa (%)	Tiempo de cocción (min)	Temperatura de cocción (°C)	Rendimiento (%)
1	-1	-1	-1	8	60	100	y ₁
2	1	-1	-1	12	60	100	y ₂
3	-1	1	-1	8	90	100	y ₃
4	1	1	-1	12	90	100	y ₄
5	-1	-1	1	8	60	120	y ₅
6	1	-1	1	12	60	120	y ₆
7	-1	1	1	8	90	120	y ₇
8	1	1	1	12	90	120	y ₈
9	-1	-1	-1	8	60	100	y ₉
10	1	-1	-1	12	60	100	y ₁₀
11	-1	1	-1	8	90	100	y ₁₁
12	1	1	-1	12	90	100	y ₁₂
13	-1	-1	1	8	60	120	y ₁₃
14	1	-1	1	12	60	120	y ₁₄
15	-1	1	1	8	90	120	y ₁₅
16	1	1	1	12	90	120	y ₁₆

Fuente: Elaboración propia, 2025

2.4. Equipos, materiales y reactivos e insumos empleados para el desarrollo del diseño experimental

2.4.1. Equipos

Los equipos utilizados para la obtención de papel a partir de cáscara de naranja fueron los siguientes:

- Licuadora
- Balanza digital
- Calentador

Las especificaciones de los equipos mencionados se encuentran detallados en el Anexo 1.

2.4.2. Materiales

Tabla II-6: Materiales utilizados en la utilizados para la obtención de papel a partir de cascara de naranja

Material	Descripción	Especificación	Cantidad
Probeta	Recipiente de vidrio utilizado para medir volúmenes.	Capacidad: 50 ml y 100 ml	2
Vasos de precipitado	Empleado para contener muestras líquidas.	Capacidad: 500 ml y 1000 ml	2
Espátula	Empleado para levantar muestras sólidas.	-	1
Vidrio de reloj	Recipiente de vidrio empleado para depositar sólidos.	Diámetro: 10 cm	1

Varilla de vidrio	Cilindro macizo de vidrio, utilizado para agitar disoluciones.	Longitud: 25 cm.	1
Termómetro	Instrumento utilizado para medir temperatura de una muestra.	Rango de temperatura entre - 50°C - +300 °C	1
Olla	Recipiente de acero inoxidable.	6 litros	1
Cuchillo	Instrumento de acero inoxidable.	-	1
Tela	Filtro	-	1
Marcos de madera	Madera	-	1
Colador	Plástico utilizado para separar sólidos y líquidos.	-	1
Balde	Recipiente de plástico.	6 litros	1
Jarra	Recipiente de plástico utilizado para contener líquido.	1 litro	1

Fuente: Elaboración propia, 2025

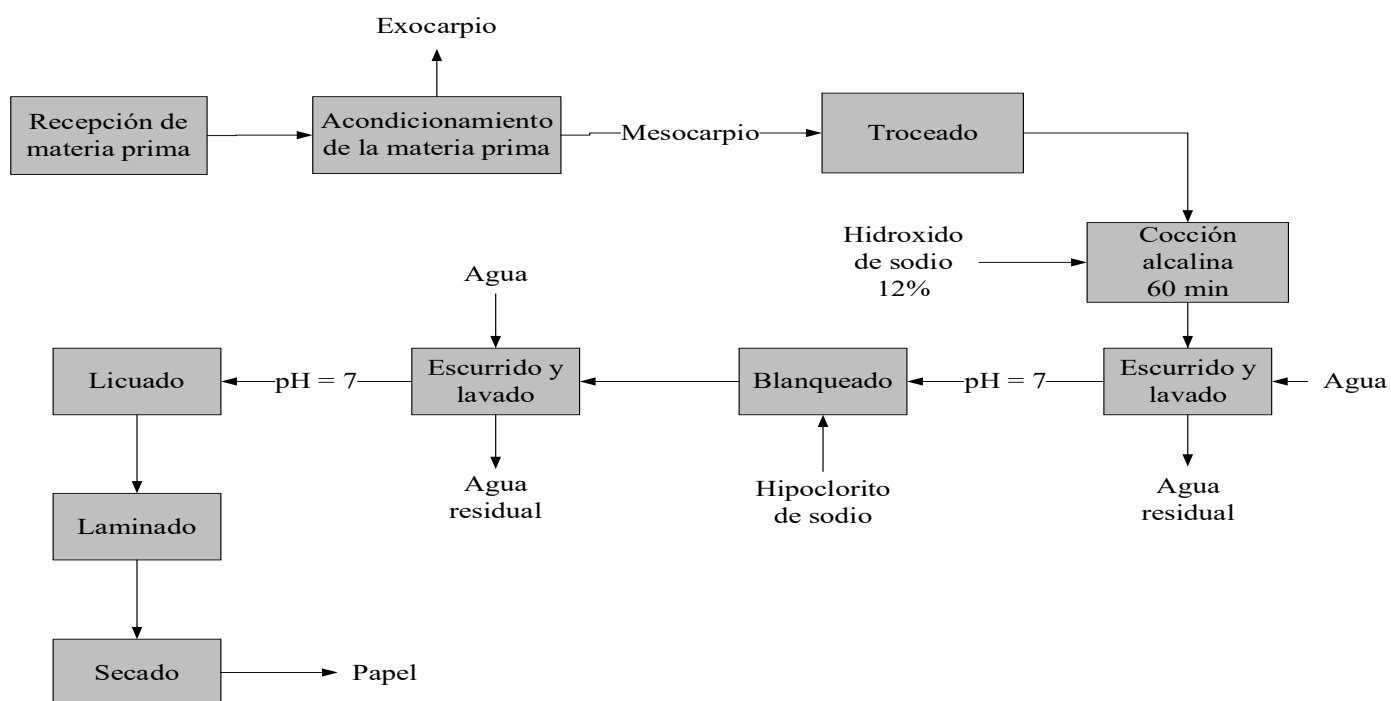
2.4.3. Reactivos e insumos

- Hidróxido de sodio
- Agua destilada
- Hipoclorito de sodio
- Cáscara de naranja

2.5. Descripción del proceso de obtención de papel a partir de cáscara de naranja

2.5.1. Diagrama del proceso de obtención de papel a partir de cáscara de naranja.

Figura 2-1: Diagrama de obtención del papel a partir de cáscara de naranja a escala laboratorio



Fuente: Elaboración propia, 2025

2.5.2. Descripción del proceso de obtención de papel a partir de cáscara de naranja

A continuación, se describe cada una de las etapas del proceso de obtención de papel a partir de cáscara de naranja.

2.5.2.1. Recepción y lavado de materia prima

Se recolectó la cáscara de naranja de los desechos de la población de la ciudad de Tarija. Posteriormente se realizó el lavado de la misma para eliminar impurezas que pudieran existir en la cáscara de naranja.

Figura 2-2: Cáscara de naranja



Fuente: Elaboración propia, 2025

2.5.2.2. Acondicionamiento de materia prima

Una vez obtenida la cáscara de naranja, se realizó la separación del exocarpio y mesocarpio, y se utilizó ésta última, ya que es la que contiene fibra celulósica. Este proceso se realizó con mucha precisión con la ayuda de un rallador de cáscara.

Figura 2-3: Mesocarpio de la cáscara de naranja



Fuente: Elaboración propia, 2025

2.5.2.3. Troceado y pesado

Una vez realizado el acondicionamiento de la cascara de naranja, con la ayuda de un cuchillo se procedió a trocear de tal manera que estuvieran uniformes, posteriormente se procedió a pesar 100 gramos con la ayuda de una balanza.

Figura 2-4: Troceado de cáscara de naranja



Fuente: Elaboración propia, 2025

2.5.2.4. Cocción alcalina

Este proceso es importante debido a que ayuda a romper y eliminar los compuestos no celulósicos de la cáscara de naranja (lignina) la cual se encuentra como parte de su biomasa lignocelulósica juntamente con la celulosa y la hemicelulosa.

Dicho proceso se logró mediante cocción con solución alcalina de hidróxido de sodio (NaOH) al 12%, en función a base seca de la casara de naranja, en una olla por un tiempo de 60 minutos a una temperatura igual a 100°C.

Figura 2-5: Cocción alcalina



Fuente: Elaboración propia, 2025

2.5.2.5. Ecurrido y lavado

Una vez concluida la cocción de la cáscara de naranja, se escurrió y exprimió por medio de un colador hasta retirar todo el licor negro, posteriormente se realizó el lavado con agua destilada para terminar de eliminar lignina restante y la solución alcalina hasta dejar un pH neutro.

Figura 2-6: Escurreido y lavado



Fuente: Elaboración propia, 2025

2.5.2.6. Blanqueado

Luego de haber obtenido la pulpa de celulosa, se procedió a aclararla haciendo uso del hipoclorito de sodio al 5% durante un tiempo de 24 horas, de esta manera la Pulpa de celulosa obtenida tomó un color claro.

Figura 2-7: Blanqueado de la pulpa de celulosa



Fuente: Elaboración propia, 2025

2.5.2.7. Escurrido y lavado

Luego de blanquear la pulpa de celulosa, se procedió a escurrirlo con ayuda de un filtro de tela y posteriormente se realizaron distintos lavados con abundante agua para neutralizar el pH.

Figura 2-8: Escurrido y lavado de la pulpa blanqueada



Fuente: Elaboración propia, 2025

2.5.2.8. Licuado

Luego de haber obtenido la pulpa blanqueada, se procedió con el desfibrado con la ayuda de una licuadora, esto se realizó con el objetivo de romper tejidos del mesocarpio de la cáscara de naranja y liberar las fibras celulósicas permitiendo la formación de microfibrillas que mejora la adhesión entre ellas y formar un papel resistente y uniforme.

Figura 2-9: Licuado de pulpa de celulosa

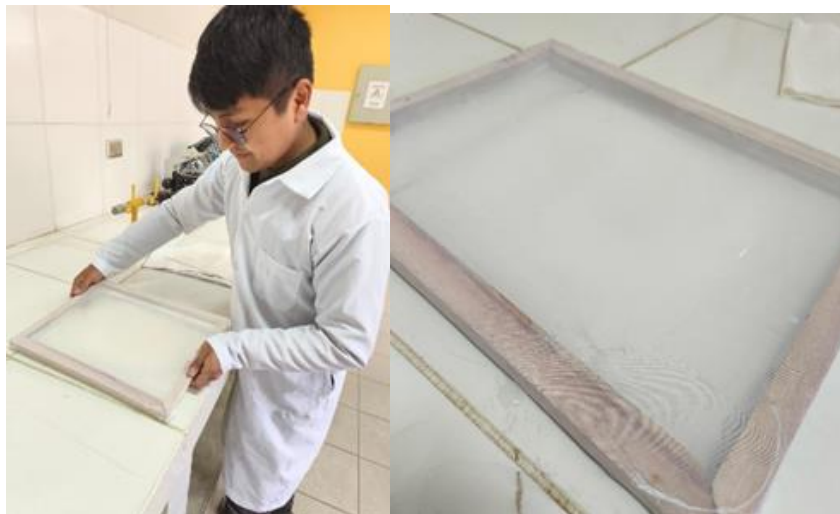


Fuente: Elaboración propia, 2025

2.5.2.9. Laminado

Posteriormente, se procedió a obtener el papel para lo cual se usó un tamiz al cual se depositó la pulpa de celulosa con agua y se esperó hasta que drene el agua.

Figura 2-10: Laminado del papel



Fuente: Elaboración propia, 2025

2.5.2.10. Secado

Una vez que escurrió el agua del tamiz con la pulpa de celulosa se procedió a prensarlo para extraer la mayor cantidad de agua posible, posteriormente se dejó secar a temperatura ambiente y finalmente se obtuvo el producto.

Figura 2-11: Secado del papel a partir de cascara de naranja



Fuente: Elaboración propia, 2025

2.5. Caracterización del papel a partir de cascara de naranja

Los análisis fisicoquímicos del producto final (papel a partir de cascara de naranja) fueron realizados en CBO Análises Laboratoriais Ltda., ubicado en Brasil.

Tabla II-7: Análisis fisicoquímico de la cascara de naranja

Ensayo	Unidad	Código
Lignina	%	MA-073 R0
Cenizas	%	MA-105 R5

Fuente: Laboratorio CBO, 2025

También se realizaron análisis en el Instituto de Investigaciones Químicas IIQ de la Universidad Mayor de San Andrés ubicado en la ciudad de La Paz.

**Tabla II-8: Análisis fisicoquímico de la cáscara de
naranja**

Parámetro	Unidad	Método de ensayo
Humedad	%	Gravimétrico
Alfa celulosa	%	-
Beta celulosa	%	-
Gamma celulosa	%	-

Fuente: Instituto de Investigaciones Químicas, 2025

2.5.1. Resistencia a la tracción del papel

La determinación de la resistencia a la tracción se realizó de acuerdo a la norma ISO 1924, la cual hace referencia a láminas de papel.

Para realizar dicha determinación se trabajó con 1 probeta de 10 mm de ancho y 20 mm de largo por cada muestra, las cuales fueron sometidas a diferentes fuerzas de tracción añadiendo peso hasta notar la ruptura del material.

Este análisis se realizó en el laboratorio de física perteneciente a la Universidad Juan Misael Saracho.

El esfuerzo máximo se determinó mediante la siguiente ecuación. (Tubón, 2013)

$$\sigma = \frac{f}{a}$$

Donde:

σ = Esfuerzo máximo (N/cm²)

f = Fuerza (N)

a = Área (cm²)

CAPÍTULO III

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1. Caracterización de la materia prima

A continuación, se detallan los análisis realizados a la cáscara de naranja.

3.1.1. Propiedades fisicoquímicas

Los análisis fisicoquímicos de la cáscara de naranja fueron realizados en diferentes laboratorios.

En la tabla III-1, se muestran los resultados de los análisis fisicoquímicos de la materia prima (cáscara de naranja) realizado en el CEANID.

Tabla III-1: Análisis fisicoquímicos de la cáscara de naranja

Parámetro	Técnica y/o método de ensayo	Unidad	Resultado
Ceniza	NB 39034:10	g/100g	2,26
Densidad	NB 36001:02	g/ml	0,95
Humedad	NB 313010:05	g/100g	58,34
pH (20°C)	Potenciometrico	**	5,26

Fuente: CEANID, 2025

Como se puede observar, la cáscara de naranja presentó un contenido de ceniza de 2,26% el cual no es alto y que indica que no existe interferencia al proceso de cocción alcalina o reducir la blancura del papel, una densidad de 0,95 g/ml indica la porosidad de la materia prima, sugiere una fibra relativamente ligera pero no tan porosa lo que facilita el manejo y cocción. La cáscara de naranja también presentó una humedad de 58,34% lo que indica que tiene gran cantidad de agua presente. Por último, el pH ligeramente ácido influye en la cantidad de sosa necesaria para la obtención de papel.

En la tabla III-2, se muestran los resultados de los análisis fisicoquímicos realizados a la materia prima en Laboratorio CBO.

Tabla III-2: Análisis fisicoquímico de la cáscara de naranja

Ensayo	Resultado	Unidad	Código
Lignina	2,99	%	MA-073 R0

Fuente: Laboratorio CBO, 2025

Como se puede observar, la cáscara de naranja posee un contenido de lignina de 2,99% lo que es favorable para la elaboración de papel porque reduce el consumo de NaOH y facilita el blanqueo.

En la tabla III-3, se muestran los resultados de los análisis fisicoquímicos realizados a la materia prima en el Instituto de Investigaciones Químicas IIQ.

Tabla III-3: Análisis fisicoquímico de la cáscara de naranja

Parámetro	Muestra materia prima	Unidad	Método de ensayo
Celulosa Total	3,01	%	-
Hemicelulosa	2,70	%	-

Fuente: Elaboración propia, 2025

Como se observa, se realizó análisis a la cáscara de naranja de celulosa total que es la que representa la cantidad de fibras estructurales principales presentes en la cáscara y dio como resultado 3,01% que indica que la cáscara tiene bajo contenido de celulosa en comparación con otros materiales fibrosos como la madera o el bagazo de caña. Además, también se analizó hemicelulosa que son conjunto de polisacáridos que rodean la celulosa y ayudan a unirla con la lignina en la pared celular, el contenido de hemicelulosa fue de 2,70% que sugiere que la cáscara de naranja tiene una estructura débil en comparación a fibras vegetales tradicionales, sin embargo, la presencia de hemicelulosa contribuye a la formación de la hoja de papel y su capacidad de retener agua durante el moldeo.

3.2. Resultados del proceso de obtención de papel a partir de cáscara de naranja

Los resultados del proceso de obtención de papel a partir de la cáscara de naranja de acuerdo al diseño factorial propuesto en el cual se tomó en cuenta como variable dependiente el rendimiento se encuentra plasmados en la tabla III-4.

Para la determinación del rendimiento se basó en la relación de la cantidad de papel seco obtenido y la cantidad cáscara de naranja utilizada.

$$\text{Rendimiento \%} = \frac{m_{\text{papel seco}}}{m_{\text{cáscara de naranja}}} \times 100$$

Tabla III-4: Rendimiento del proceso de obtención de papel a partir de cáscara de naranja

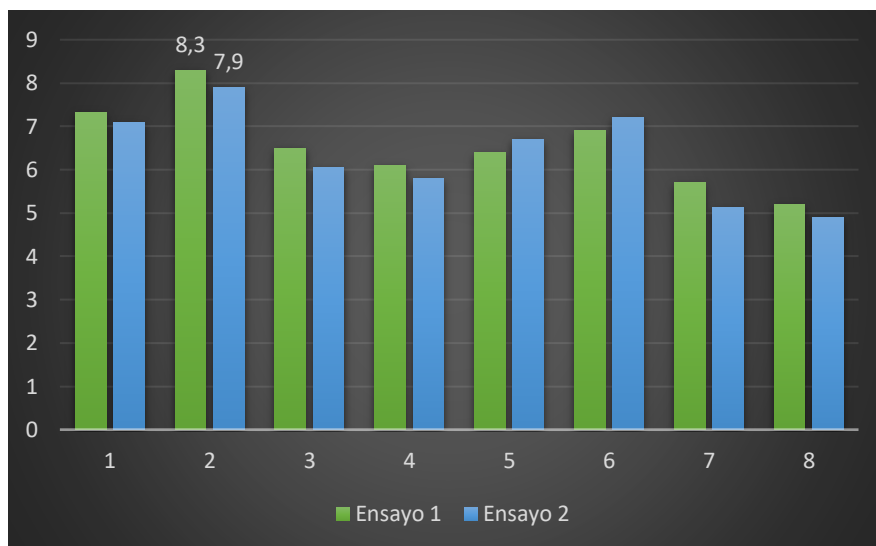
N°	Porcentaje a la Sosa (%)	Tiempo de cocción (min)	Temperatura de cocción (°C)	Rendimiento (%)	
				Ensayo 1	Ensayo 2
1	8	60	100	7,32	7,1
2	12	60	100	8,3	7,9
3	8	90	100	6,5	6,06
4	12	90	100	6,1	5,8
5	8	60	120	6,4	6,7
6	12	60	120	6,9	7,2
7	8	90	120	5,7	5,13
8	12	90	120	5,2	4,9

Fuente: Elaboración propia, 2025

En la tabla III-4 se pueden observar los resultados de los rendimientos de cada uno de los 8 experimentos más su réplica los cuales oscilan entre 4,90% y 8,30%, de los cuales la muestra número 2 y su réplica son las que presentaron un mejor rendimiento con 8,30% y su réplica 7,9%, lo que indica que las condiciones ideales para obtener un buen rendimiento del proceso de obtención de papel a partir de cáscara de naranja son: 12%

de porcentaje de sosa, 60 minutos de tiempo de cocción y 100°C de Temperatura de cocción.

Figura 3-1: Rendimiento de muestras de papel a partir de cáscara de naranja



Fuente: Elaboración propia, 2025

3.3. Análisis estadístico del diseño factorial en el proceso de obtención de papel a partir de cáscara de naranja

El análisis estadístico se realizó en el programa IBM SPSS (Statistical Package for the Social Sciences) versión 26.0 para Windows ya que permite el tratamiento integrado de todas las fases de análisis de datos obteniendo resultados significativos.

De tal modo, el diseño factorial tiene como objetivo determinar si las variables porcentaje de sosa, tiempo de cocción y temperatura de cocción tiene influencia en el rendimiento del proceso de obtención de papel a partir de cáscara de naranja.

Las variables que son significativas poseen un nivel de confianza del 95% y tienen una cola de significancia del 5%, por lo que cualquier valor menor a 0,05 es la columna de significancia indica que la variable no es significativa en el proceso.

3.3.1. Análisis de varianza del diseño factorial

A continuación, en la tabla III-5 se muestran los datos introducidos al programa de acuerdo al diseño factorial planteado con sus respectivas réplicas.

Tabla III-5: Matriz de experimentos

Nº	Variables independientes			Variable dependiente
	Porcentaje a la sosa (%)	Tiempo de cocción (min)	Temperatura de cocción (°C)	Rendimiento (%)
1	-1	-1	-1	7,32
2	1	-1	-1	8,30
3	-1	1	-1	6,50
4	1	1	-1	6,10
5	-1	-1	1	6,40
6	1	-1	1	6,90
7	-1	1	1	5,70
8	1	1	1	5,20
9	-1	-1	-1	7,10
10	1	-1	-1	7,90
11	-1	1	-1	6,06
12	1	1	-1	5,80
13	-1	-1	1	6,70
14	1	-1	1	7,20
15	-1	1	1	5,13
16	1	1	1	4,90

Fuente: Elaboración propia, 2025

Posteriormente, se realizó el modelo lineal general univariado para analizar la relación entre las variables independientes y la variable dependiente, y de esta manera identificar las variables que tengan un efecto sobre la variable dependiente.

En la tabla III-6, se observan los resultados del análisis preliminar mediante el modelo lineal general univariado, en donde las variables tiempo de cocción, temperatura de cocción y la interacción porcentajealasosa*tiempodecocción son significativas ya que poseen un nivel de significancia menor a 0,05, mientras que la variable porcentaje Sosa y las interacciones porcentajealasosa* temperaturadecocción, tiempodecocción* temperaturadecocción y porcentajealasosa*tiempodecocción*temperaturadecocción no son significativas debido a que se obtuvieron un nivel de significancia mayor a 0,05. Es de este modo que se toma en cuenta solo las variables significativas para realizar el análisis de regresión lineal ya que esta son las que tienen un efecto sobre la variable dependiente.

Tabla III-6: Pruebas de efectos inter-sujetos

Variable dependiente: Rendimiento					
Origen	Tipo III de suma de cuadrados	Gl	Media cuadrática	F	Sig.
Modelo corregido	13,960 ^a	7	1,994	29,358	0,000
Intersección	665,769	1	665,769	9800,629	0,000
Porcentaje a la Sosa	0,121	1	0,121	1,778	0,219
Tiempo de cocción	9,657	1	9,657	142,152	0,000
Temperatura de cocción	3,019	1	3,019	44,441	0,000
Porcentaje a la sosa * Tiempo de cocción	1,087	1	1,087	15,999	0,004
Porcentaje a la sosa * Temperatura de cocción	0,045	1	0,045	0,665	0,438
Tiempo de cocción * Temperatura de cocción	0,001	1	0,001	0,011	0,919
PorcentajealaSosa * Tiempodecocción * Temperaturadecocción	0,032	1	0,032	0,464	0,515
Error	0,543	8	0,068		
Total	680,273	16			
Total corregido	14,504	15			

a. R al cuadrado = ,963 (R al cuadrado ajustada = ,930)

Fuente: SPSS Statistic 26, 2025

3.3.2. Regresión lineal del diseño factorial

La regresión lineal permite predecir el comportamiento de las variables sobre la variable dependiente que es el rendimiento. Para ello, primero se calculó la variable interacción (porcentajealasosa*tiempodecocción) multiplicando las variables existentes, posteriormente se realizó la regresión lineal tomando en cuenta solo las variables significativas y la variable dependiente.

En la tabla III-7, se muestra el resumen del modelo dando como resultado R (correlación múltiple) de 0,974 que indica una correlación positiva y significativa entre las variables predictoras y la variable dependiente, también nos muestra R cuadrado igual a 0,949 lo que sugiere un buen ajuste a los datos y un modelo confiable. Por último, el modelo presentó un error estándar de 0,24860 que indica que los valores predichos poseen un error de $\pm 0,24860$ respecto a rendimiento real.

Tabla III-7: Resumen del modelo^b

Modelo	R	R cuadrado	R cuadrado ajustado	Error estándar de la estimación
1	,974 ^a	0,949	0,936	0,24860
a. Predictores: (Constante), Porcentaje a la Sosa*Tiempo de cocción, Temperatura de cocción, Tiempo de cocción.				
b. Variable dependiente: Rendimiento				

Fuente: SPSS Statistic 26, 2025

En la tabla III-8, se observa el análisis de varianza ANOVA que muestra el nivel de significancia del modelo de regresión.

Como se puede observar los resultados indican que el modelo de regresión lineal es estadísticamente significativo ya que posee un valor de F igual a 74,228 que indica que el modelo explica una parte muy importante de la variabilidad, también posee un nivel de significancia menor a 0,05.

Tabla III-8: ANOVA^a

Modelo		Suma de cuadrados	gl	Media cuadrática	F	Sig.
1	Regresión	13,762	3	4,587	74,228	,000 ^b
	Residuo	0,742	12	0,062		
	Total	14,504	15			
a. Variable dependiente: Rendimiento						
b. Predictores: (Constante), Porcentaje a la Sosa*Tiempo de cocción, Temperatura de cocción, Tiempo de cocción						

Fuente: SPSS Statistic 26, 2025

En la tabla III-9, se observan los coeficientes del modelo de regresión lineal en función a las variables independientes. La constante del modelo es de 6,451 lo que indica que cuando las variables independientes se encuentran en su valor más bajo cercano a cero el rendimiento estimado es de aproximadamente 6,451%. Además, el tiempo de cocción tiene un coeficiente de -0,777 tiene un efecto negativo con un nivel de significancia menor a 0,05, lo que indica que al aumentar el tiempo de cocción manteniendo todas las demás variables constantes, baja el rendimiento. La temperatura de cocción con un coeficiente de -0,434 también con un efecto negativo con un nivel de significancia menor a 0,05, lo cual indica que al aumentar la temperatura de cocción manteniendo todas las variables constantes disminuye el rendimiento y por último la interacción porcentajealasosa*tiempodecocción con un coeficiente -0,261 indica un efecto negativo con un nivel de significancia menor a 0,05, es decir que una mala combinación de la interacción reduce el rendimiento.

Tabla III-9: Coeficientes^a

Modelo		Coeficientes no estandarizados		Coeficientes estandarizados	T	Sig.	95,0% intervalo de confianza para B	
		B	Desv. Error	Beta			Límite inferior	Límite superior
1	(Constante)	6,451	0,062		103,791	0,000	6,315	6,586
	Tiempo de cocción	-0,777	0,062	-0,816	-12,500	0,000	-0,912	-0,641
	Temperatura de cocción	-0,434	0,062	-0,456	-6,989	0,000	-0,570	-0,299
	Porcentaje a la sosa*Tiempo de cocción	-0,261	0,062	-0,274	-4,193	0,001	-0,396	-0,125
a. Variable dependiente: Rendimiento								

Fuente: SPSS Statistic 26, 2025

Con los valores numéricos de B es posible tener el modelo matemático de la regresión lineal para el rendimiento, dichos valores son:

Constante = 6,451

Tiempo de cocción= -0,777

Temperatura de cocción = -0,434

Porcentajelasosa*tiempodecocción = -0,261

De este modo, el modelo matemático queda de la siguiente manera:

$$\text{Rendimiento} = 6,451 - 0,777 * X_1 - 0,434 * X_2 - 0,261 * X_3$$

Donde:

X_1 = Tiempo de cocción

X_2 = Temperatura de cocción

X_3 = Porcentajelasosa*tiempodecocción

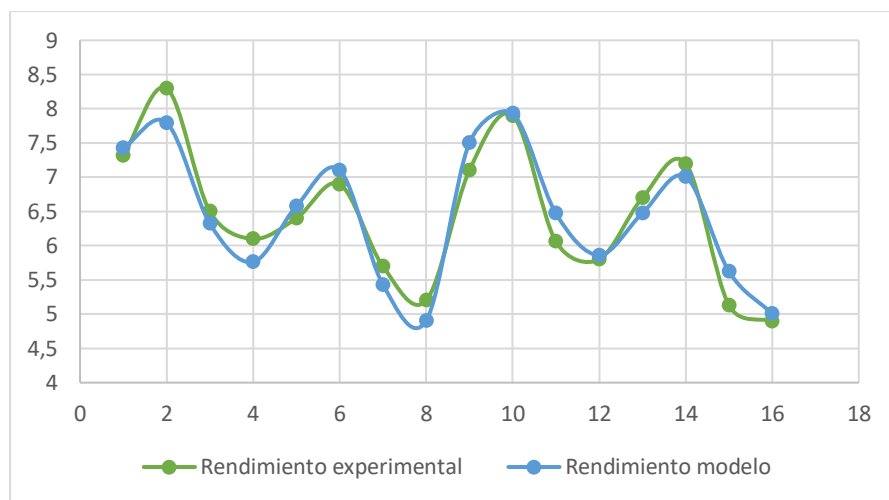
En la tabla III-10, se muestran los datos del rendimiento obtenido experimentalmente y el rendimiento del modelo en el cual se puede observar que no existe una variación significativa.

Tabla III-10: Comparación del rendimiento experimental y rendimiento del modelo

Muestras	Rendimiento experimental	Rendimiento modelo
1	7,32	7,47833
2	8,3	7,79667
3	6,5	6,375
4	6,1	5,76333
5	6,4	6,57667
6	6,9	7,155
7	5,7	5,43333
8	5,2	4,855
9	7,1	7,55167
10	7,9	8,03
11	6,06	6,52167
12	5,8	5,86333
13	6,7	6,47667
14	7,2	7,055
15	5,13	5,62333
16	4,9	4,955

Fuente: Elaboración propia, 2025

En la figura 3-2, se muestra gráficamente el rendimiento experimental y rendimiento del modelo, en el cual se observa que las dos lineal tienen una similitud en su trayectoria lo que significa que no presenta un error muy significativo.

Figura 3-2: Comparación rendimiento experimental y rendimiento modelo

Fuente: Elaboración propia, 2025

3.4. Resultados de la caracterización del papel

Los análisis fisicoquímicos del producto final (papel a partir de cáscara de naranja) fueron realizados en CBO Análises Laboratoriais Ltda., ubicado en Brasil.

Tabla III-11: Análisis fisicoquímico del papel

Ensayo	Resultado	Unidad	Código
Lignina	0,50	%	MA-073 R0
Cenizas	4,02	%	MA-105 R5

Fuente: Laboratorio CBO, 2025

En la tabla III-11, se puede observar que el papel obtenido contiene 0,50% de lignina que es un valor bajo lo cual es muy bueno ya que indica que el proceso de cocción alcalina fue eficiente ya que se logró eliminar la lignina. En cambio, también posee 4,02% de cenizas que es un valor aceptable para papeles a partir de materiales no maderables.

Por otro lado, también se enviaron muestras de papel al instituto de Investigaciones Químicas IIQ de la ciudad de La Paz para la determinación de humedad, alfa celulosa, beta y gamma celulosa.

Tabla III-12: Análisis fisicoquímico del papel

Parámetro	Resultado	Unidad	Método de ensayo
Humedad	10,60	%	Gravimétrico
Alfa celulosa	47,40	%	-
Beta celulosa	19,94	%	-
Gamma celulosa	15,80	%	-

Fuente: Instituto de Investigaciones Químicas, 2025

En la tabla III-12, se puede observar que dicho análisis dio como resultado una humedad de 10,60% el cual es un resultado aceptable ya que esto permite flexibilidad y almacenamiento aceptable. Alfa celulosa de 47,40%, es el componente mas deseado en la pulpa ya que aporta resistencia y estabilidad, el resultado obtenido es muy bueno ya que indica que la cáscara de naranja posee una fracción celulósica importante. Beta celulosa 19,94%, la cual aporta flexibilidad al papel, pero en exceso puede reducir la resistencia mecánica, el resultado obtenido es aceptable ya que permite conservar cierta flexibilidad al papel. Por último, Gamma celulosa 15,80%, encargada de mejorar la formación de la hoja de papel y retención de agua, sin embargo, en exceso reduce la resistencia al agua, el resultado obtenido favorece a la cohesión de las fibras durante el moldeado sin afectar la resistencia.

3.4.1. Determinación de la resistencia a la tracción

Tomando en cuenta los resultados del rendimiento en la cual la muestra 2 fue la que obtuvo mayor porcentaje, se realizó la resistencia a la tracción de dicha muestra en el laboratorio de Física de la Universidad Juan Misael Saracho. Para ello se preparó probetas de papel de 1 cm de ancho y 2 cm de largo. Esto con el objetivo de saber la capacidad del papel para resistir fuerzas de estiramiento sin romperse.

Tabla III-13: Resistencia a la tracción del papel

N° Muestra	Espesor (cm)	Ancho (cm)	Área (cm ²)	Resistencia a la tracción (N/cm ²)		
				Ensayo 1	Ensayo 2	Promedio
Muestra 2	0,019	1	0,019	557,105	635,068	596,087

Fuente: Elaboración propia, 2025

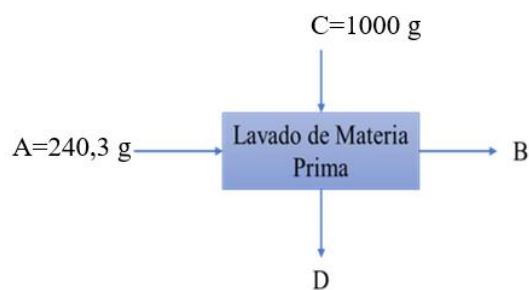
En la tabla III-13, se observa los resultados de la resistencia a la tracción del papel con un promedio de 596,087 N/cm², el cual indica buena resistencia a la tracción, su uso es comparable a hojas bond.

3.5. Balance de materia del proceso de obtención de papel a partir de cáscara de naranja

3.5.1. Etapa de lavado de materia prima

En la figura 3-3, se muestra la operación de lavado de materia prima (cáscara de naranja), para el cual se utilizó 240,3 g de cáscara, la cual contiene 1% de impurezas como pequeños restos de pulpa y se utilizó 1000 g de agua para su lavado, de los cuales 0,5% de agua se fue contenida juntamente con la cáscara a la salida de la corriente B.

Figura 3-3: Etapa de lavado de materia prima



Donde:

A = Peso inicial de cáscara de naranja = 240,3 g

B = Peso cáscara de naranja lavada

$C = \text{Peso de cantidad de agua utilizada} = 1000 \text{ ml}$

$D = \text{Agua residual mas impurezas (considerándose 1\% de impurezas)}$

Considerando $\rho_{\text{agua}} = 1 \text{ g/ml}$

$$A + C = B + D \quad \text{Ec. N°3-1}$$

$$D = (C \times 0,995) + (A \times 0,01) \quad \text{Ec. N° 3-2}$$

$$D = (1000 \text{ g} \times 0,995) + (240,3 \text{ g} \times 0,01)$$

$$D = 997,403 \text{ g}$$

$$240,3 \text{ g} + 1000 \text{ g} = B + 997,403 \text{ g}$$

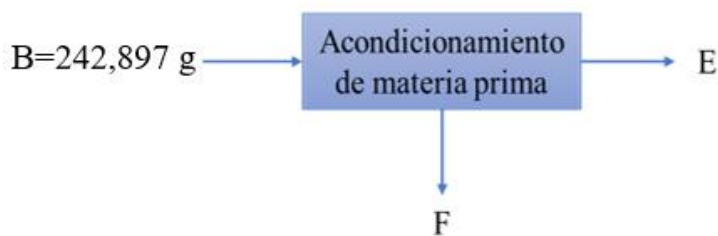
$$B = 240,3 \text{ g} + 1000 \text{ g} - 997,403 \text{ g}$$

$$B = 242,897 \text{ g}$$

3.5.2. Etapa de acondicionamiento de materia prima

En la figura 3-4, se muestra la etapa de acondicionamiento de materia prima, en esta etapa se separó el exocarpio del mesocarpio, que es la parte que se utilizó para la obtención de papel.

Figura 3-4: Etapa de acondicionamiento de materia prima



Donde:

$E = \text{Peso de mesocarpio (Se obtuvo al separarlo del exocarpio)} = 100,8 \text{ g}$

$F = \text{Peso de exocarpio}$

$$B = E + F$$

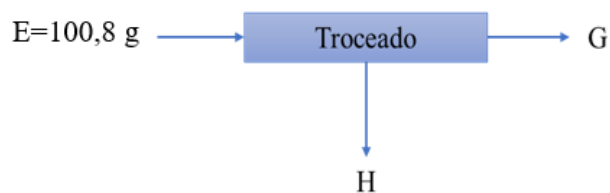
Ec. N° 3-3

$$F = 242,897 \text{ g} - 100,8 \text{ g}$$

$$F = 142,097 \text{ g}$$

3.5.3. Etapa de troceado

Figura 3-5: Etapa de troceado



Donde:

G = Peso de cáscara de naranja troceada

H = Peso de pérdidas (Considerándose 0,1% de pérdidas)

$$H = E \times 0,1\%$$

Ec. N° 3-4

$$H = 100,8 \text{ g} \times 0,1\%$$

$$H = 0,1008 \text{ g}$$

$$E = G + H$$

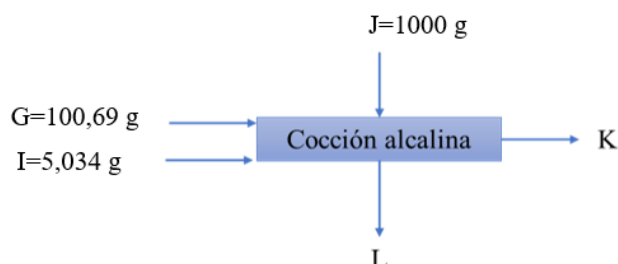
Ec. N° 3-5

$$G = 100,8 \text{ g} - 0,1008 \text{ g}$$

$$G = 100,69 \text{ g}$$

3.5.4. Etapa de cocción alcalina

Figura 3-6: Etapa de cocción alcalina



% Humedad de la cáscara de naranja = $58,34\% = 0,5834$

% de parte seca de la cáscara de naranja = $1 - 0,5834 = 0,4166$

Peso de la cáscara de naranja seca = $41,95 \text{ g}$

Para la cocción alcalina se empleó 12% de hidróxido de sodio en base a la materia prima seca.

Peso de hidróxido de sodio = $0,12 \times 41,95 \text{ g} = 5,034 \text{ g}$ de NaOH

Entonces:

$I = \text{Peso de NaOH} = 5,034 \text{ g}$

$J = \text{Peso de agua destilada} = 1000 \text{ g}$

$K = \text{Peso licor negro mas pulpa} = 985,7 \text{ g}$

$L = \text{Agua evaporada}$

$$G + I + J = K + L$$

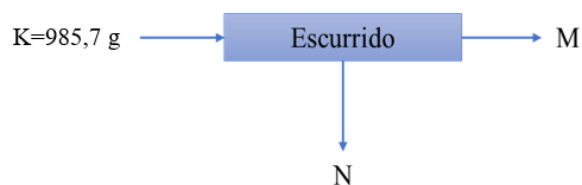
Ec. N° 3-6

$$100,69 \text{ g} + 5,034 \text{ g} + 1000 \text{ g} = 985,7 \text{ g} + L$$

$$L = 120,024 \text{ g}$$

3.5.5. Etapa de escurrido

Figura 3-7: Etapa de escurrido



Donde:

M = Peso de pulpa escurrida = 60,7 g

N = Peso licor negro

$$K = M + N$$

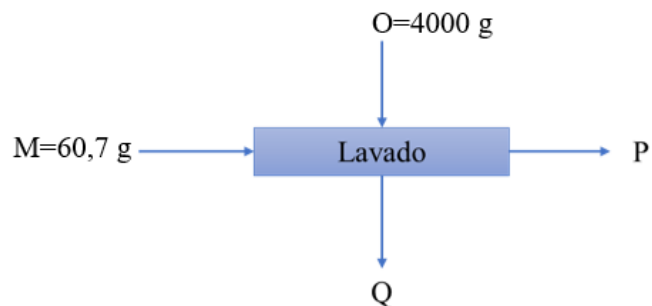
Ec. N° 3-7

$$985,7 \text{ g} = 60,7 \text{ g} + N$$

$$N = 925 \text{ g}$$

3.5.6. Etapa de lavado

Figura 3-8: Etapa de lavado



Donde:

O = Agua destilada = 4000 g

Q = Agua residual

P = Pulpa lavada = 51,6 g

$$M + O = P + Q$$

Ec. N° 3-8

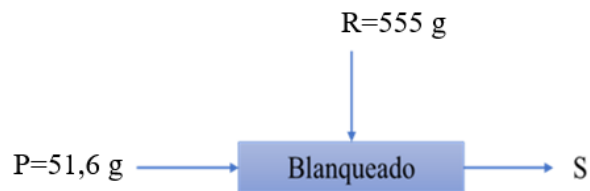
$$60,7 \text{ g} + 4000 \text{ g} = 51,6 \text{ g} + Q$$

$$Q = 4060,7 \text{ g} - 51,6 \text{ g}$$

$$Q = 4009,1 \text{ g}$$

3.5.7. Etapa de blanqueado

Figura 3-9: Etapa de blanqueado



R = Peso de Hipoclorito de sodio = 500 ml

S = Peso pulpa blanqueada más hipoclorito

Siendo la $\rho_{\text{hipoclorito}} = 1,11 \text{ g/ml}$

$$R = 500 \text{ ml} \times \frac{1,11 \text{ g}}{1 \text{ ml}} = 555 \text{ g}$$

$$P + R = S$$

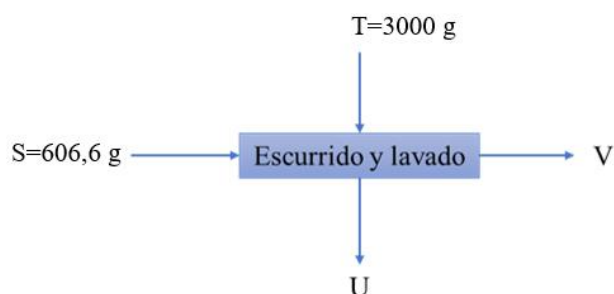
Ec. N°3-8

$$S = 51,6 \text{ g} + 555 \text{ g}$$

$$S = 606,6 \text{ g}$$

3.5.8. Etapa de escurrido y lavado

Figura 3-10: Etapa de escurrido y lavado



Donde:

$T = \text{Agua destilada} = 3000 \text{ g}$

$V = \text{Pulpa blanqueada} = 48,5 \text{ g}$

$U = \text{Agua residual más pérdidas (considerándose pérdidas de 1,5\%)}$

$$S + T = V + U$$

Ec. N° 3-9

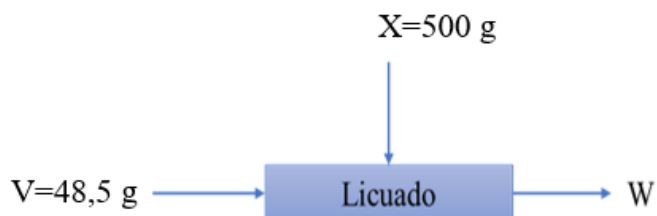
$$606,6 \text{ g} + 3000 = 48,5 + U$$

$$U = 3606,6 \text{ g} - 48,5 \text{ g}$$

$$U = 3558,1 \text{ g}$$

3.5.9. Etapa de licuado

Figura 3-11: Etapa de licuado



Donde:

W = Peso de pulpa desfibrada más agua

X = Agua destilada = 500 g

$$V + X = W$$

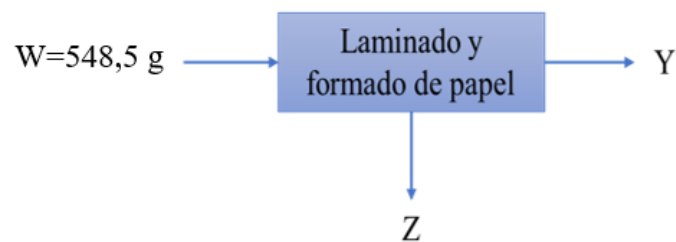
Ec. N° 3-10

$$W = 48,5 \text{ g} + 500 \text{ g}$$

$$W = 548,5 \text{ g}$$

3.5.10. Etapa de laminado y formado de papel

Figura 3-12: Etapa de laminado y formado de papel



Donde:

Z = peso de agua más pérdidas

Y = Peso de papel seco = 20,05 g

$$W = Y + Z$$

Ec. N° 3-11

$$548,5 \text{ g} = Z + 20,05 \text{ g}$$

$$Z = 528,45 \text{ g}$$

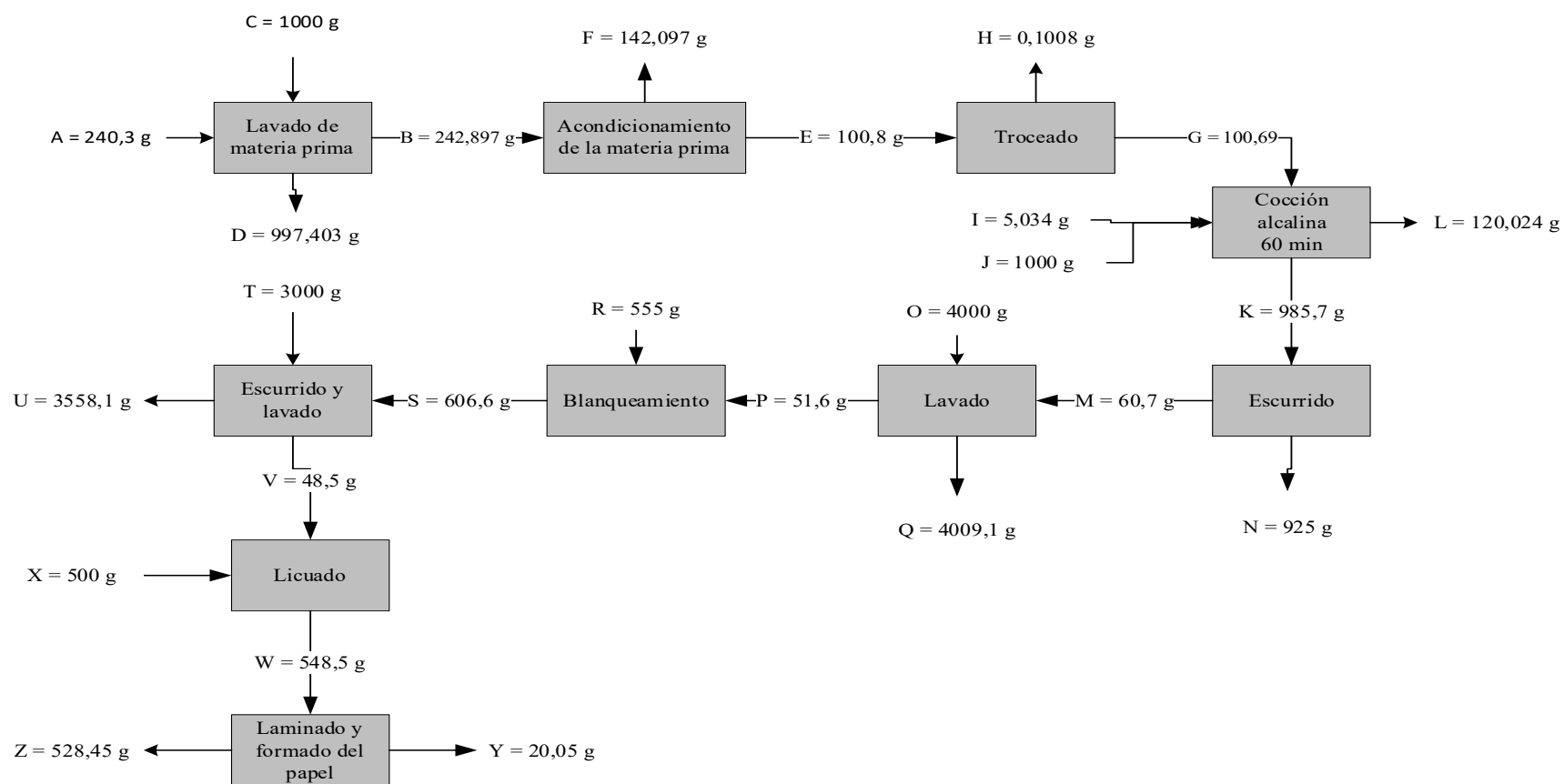
A continuación, se encuentra el cálculo del rendimiento

$$\text{Rendimiento \%} = \frac{m_{\text{papel seco}}}{m_{\text{cáscara de naranja}}} \times 100$$

$$\text{Rendimiento \%} = \frac{20,05 \text{ g}}{240,3 \text{ g}} \times 100$$

$$\text{Rendimiento \%} = 8,3 \%$$

Figura 3-13: Resumen del balance de materia del proceso de obtención de papel a partir de cáscara de naranja



Fuente: Elaboración propia, 2025

Tabla III-14: Resumen de balance de materia de cáscara de naranja

N°	Entrada			Proceso	Salida		
	Nombre	Flujo masico	Cantidad (g)		Nombre	Flujo masico	Cantidad (g)
1	Peso inicial (Cáscara de naranja)	A	240,3	Lavado de materia prima	Peso de cáscara de naranja lavada	B	242,897
2	Peso de cáscara de naranja lavada	B	242,897	Acondicionamiento de materia prima	Peso de mesocarpio	E	100,8
3	Peso de mesocarpio	E	100,8	Troceado	Peso de cáscara troceada	G	100,69
4	Peso de cáscara troceada	G	100,69	Cocción alcalina	Peso de licor negro más pulpa	K	985,7
5	Peso de licor negro más pulpa	K	985,7	Escurreido	Peso de pulpa escurrida	M	60,7
6	Peso de pulpa escurrida	M	60,7	Lavado	Peso de pulpa lavada	P	51,6
7	Peso de pulpa lavada	P	51,6	Blanqueado	Peso pulpa blanqueada más hipoclorito	S	606,6
8	Peso de pulpa blanqueada más hipoclorito	S	606,6	Escurreido y lavado	Peso de pulpa blanqueada	V	48,5
9	Peso de pulpa blanqueada	V	48,5	Licuado	Peso de pulpa desfibrada más agua	W	548,5
10	Peso de pulpa desfibrada más agua	W	548,5	Laminado y formado de papel	Peso de papel seco	Y	20,05

Fuente: Elaboración propia, 2025

3.6. Balance de energía del proceso de obtención de papel a partir de cáscara de naranja

3.6.1. Balance de energía en la etapa de cocción

Para esta etapa se utilizó una cocina eléctrica por un tiempo de 60 minutos a una temperatura de 100°C

$$E = P_{cocina\ electrica} \times t$$

Donde:

E = Energía eléctrica suministrada

P_{cocina} = Potencia de la cocina eléctrica

t = tiempo de uso

$$P_{cocina} = 1500\text{ W} = 1,5\text{ kW}$$

$$t = 60\text{ minutos} = 1\text{ h}$$

$$E = 1,5\text{ kW} \times 1\text{ h}$$

$$E = 1,5\text{ kWh}$$

$$E = 1,5\text{ kWh} \times \frac{3600\text{ kJ}}{1\text{ kWh}}$$

$$E = 5400\text{ kJ}$$

La energía consumida en la etapa de cocción es 5400 kJ.

3.6.2. Balance de energía en la etapa de licuado

Para esta etapa se utilizó una licuadora por un tiempo de 2 minutos a temperatura ambiente.

$$E = P_{licuadora} \times t$$

Donde:

E = Energía eléctrica suministrada

P_{licuadora} = Potencia de licuadora

t = tiempo de uso

$$P_{licuadora} = 500\text{ W} = 0,5\text{ kW}$$

$$t = 2 \text{ minutos} = 0,03 \text{ h}$$

$$E = 0,5 \text{ kW} \times 0,03 \text{ h}$$

$$E = 0.015 \text{ kWh}$$

$$E = 0.015 \text{ kWh} \times \frac{3600 \text{ kJ}}{1 \text{ kWh}}$$

$$E = 54 \text{ kJ}$$

La energía consumida en la etapa de licuado fue de 54 kJ.

Tabla III-15: Resumen del balance de energía

Equipo	Proceso	Consumo energético (kWh)
Cocina eléctrica	Cocción	1,5
Licuada	Licuado	0,015

Fuente: Elaboración propia, 2025

CAPÍTULO IV
COSTOS DEL PRODUCTO

4. COSTOS DE PRODUCTO

4.1. Costos de materiales

A continuación, en la tabla IV-1 se detallan los costos de los materiales utilizados para la obtención de papel a partir de cáscara de naranja.

Tabla IV-1: Costos de materiales

Nº	Materiales	Capacidad/Tamaño	Cantidad	Costo (Bs)
1	Olla	7 litros	1	350
2	Cuchillo	Mediano	2	50
3	Papel filtro	Pliegue	1	6
4	Termómetro	-10 a 300 °C	1	150
5	Espátula	Pequeño	1	20
6	Tabla	30 x 30 cm	1	0
7	Tela	1 m	4	56
8	Colador	Mediano	1	15
9	Balde	10 l	2	18
10	Jarra	1 l	1	10
11	Desecador	Mediano	1	10
12	Marco	22 x 28 cm	1	40
13	Ph metro	-	1	170
Total				895

Fuente: Elaboración propia, 2025

4.2. Costos de reactivos y materia prima

En la tabla IV-2, se encuentran los costos de materia prima y reactivos de acuerdo al balance de materia del proceso de obtención de papel a partir de cáscara de naranja.

Tabla IV-2: Costos de materia prima y reactivos

N°	Detalle	Cantidad	Unidad	Costo unitario (Bs.)	Costo (Bs.)
1	Cáscara de naranja	0,24	kg	0	0
2	Hidróxido de sodio	0,00503	kg	120	0,6036
3	Hipoclorito de sodio	0,500	L	17	8,5
Total					9,1036

Fuente: Elaboración propia, 2025

4.3. Costos de análisis fisicoquímicos

En la tabla IV-3, se detallan los costos de cada uno de los análisis fisicoquímicos realizados a la materia prima y al producto final, los cuales fueron realizados en distintos laboratorios.

Tabla IV-3: Costos de análisis fisicoquímicos

N°	Detalle		Costo (Bs.)
1	Cáscara de naranja	Humedad	40
2		Ceniza	70
3		Densidad	50
4		pH	25
5		Lignina	1255
6		Celulosa total	400
7		Hemicelulosa	200
8	Papel a partir de cáscara de naranja	Lignina	1255
9		Ceniza	100
10		Humedad	50
11		Alfa celulosa	300
12		Beta celulosa	300
13		Gamma celulosa	300
Total			4345

Fuente: Elaboración propia, 2025

4.4. Costos de consumo energético

En la tabla IV-4, se detalla el costo del consumo energético utilizado en el proceso de obtención de papel a partir de cáscara de naranja.

Tabla IV-4: Costos de consumo energético

Nº	Proceso	Consumo energético (kWh)	Costo total (Bs.)
1	Cocción	1,5	1,35
2	Licuada	0,015	0,0135
Total			1,3635

Fuente: Elaboración propia, 2025

En la tabla IV-5, se tiene detalles sobre los costos adicionales como investigación, transporte, impresiones, etc.

Tabla IV-5: Costos de material de apoyo y mano de obra

N°	Detalle	Precio unitario (Bs.)	Unidades	Cantidad	Costo (Bs.)
1	Investigación en internet	189	Mes	8	1512
2	Transporte	2,5	Pasaje	400	1000
3	Impresión	0,35	Hoja	1350	472,5
4	Empastado	4	Empastado	50	200
4	Mano de obra como investigador	17	Hora	600	10200
Total					13384,5

Fuente: Elaboración propia, 2025

Para calcular el valor del costo del producto (papel a partir de cáscara de naranja) a escala laboratorio se tomó en cuenta los costos de materia prima, reactivos y costos de consumo energético.

$$\text{Costo total de producto} = (9,1036 + 1,3635)\text{Bs.}$$

$$\text{Costo total de producto} = 10,4671 \text{ Bs.}$$

Por último, se tiene la tabla del costo total del proyecto.

Tabla IV-6: Costos total del proyecto

N°	Detalle	Costo (Bs.)
1	Costo de materiales	895
2	Costo de materia prima y reactivos	9,1036
3	Costo de análisis físicoquímicos	4345
4	Costo de consumo energético	1,3635
5	Costo de material de apoyo y mano de obra	13384,5
Total		18634,9671

Fuente: Elaboración propia, 2025

CAPÍTULO V

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1. Conclusiones

De acuerdo a lo propuesto en el presente trabajo de investigación, se logró la obtención de papel a escala laboratorio a partir de cáscara de naranja. De tal modo se concluye que:

- La cáscara de naranja usada como materia prima presentó las siguientes propiedades fisicoquímicas: 2,26% de Ceniza, 0,95 g/ml de densidad, 58,34% de humedad, un pH de 5,26, dichos análisis fueron realizados en el C.E.A.N.I.D., por otro lado, también se realizaron análisis en el Instituto de Investigaciones Químicas IIQ que dieron como resultado 3,01% de celulosa total y 2,70% de hemicelulosa, y por último, también se analizó el contenido de lignina en la cáscara de naranja en el Laboratorio CBO el cual determinó que la cascara de naranja posee 2,99% de lignina.
- Se determinó el proceso adecuado para la obtención de papel a escala laboratorio mediante el método cualitativo por puntos que dio como resultado que el proceso a la sosa debido a la aplicabilidad del proceso y la disponibilidad de los equipos en el Laboratorio de Operaciones Unitarias lo que conlleva un costo menor, también tiene un fácil acceso a la materia prima.
- Una vez determinado el proceso de obtención de cáscara de naranja se seleccionó las variables del proceso, esto se realizó en base a referencias bibliográficas, dichas variables son: Porcentaje de Sosa, Tiempo de cocción y Temperatura de cocción.
- El papel obtenido a partir de la cáscara de naranja presento las siguiente propiedades fisicoquímicas: 0,50% de Lignina, 4,02% de Ceniza, dichos análisis fueron realizados en el Laboratorio CBO, además, también se realizaron análisis en el Instituto de Investigaciones Químicas IIQ que dieron como resultado 10,60% de Humedad, 47,40% de Alfa celulosa, 19,94% de Beta celulosa, 15,80% de Gamma celulosa.

- Se determinó el rendimiento del proceso de producción de papel a partir de cascara de naranja a escala laboratorio y se logró obtener 8,3% de rendimiento con 12% Porcentaje de sosa, 60 minutos de cocción a una temperatura de 100°C.
- El costo estimado de obtención del producto a escala laboratorio fue de 10,4671 Bs. para obtener 20,05 g de papel.

5.2. Recomendaciones

A continuación, se encuentran las recomendaciones posteriores a la realización del presente trabajo de investigación:

- Se recomienda a estudiar distintos procesos de obtención de celulosa con el objeto de incorporar nuevos procesos para obtener papel con mejores características.
- Se recomienda a realizar investigaciones orientadas al aprovechamiento del licor negro generado durante la cocción alcalina, a través de la evaporación donde se transforma el subproducto en el principal motor de energía, con el fin de reducir el impacto ambiental.
- Se recomienda realizar el proyecto en un lugar ventilado, contando con todas las medidas de seguridad.
- Se recomienda realizar cuidadosamente el cambio de etapa para no perder la pulpa de papel.
- Realizar investigaciones considerando alternativas sostenibles para el blanqueo de la pulpa y de esta manera evitar el cloro.
- Evaluar la incorporación de aditivos naturales como el almidón para mejorar la resistencia del papel.

INTRODUCCIÓN

ANTECEDENTES

De acuerdo al diccionario de la Real Academia Española (RAE), se define al papel como una hoja delgada hecha con pasta de fibras vegetales obtenidas de trapos, madera, paja, etc., molidas, blanqueadas y desleídas en agua, que se hace secar y endurecer por procedimientos especiales.

El papel puede ser fabricado de forma artesanal o industrial, su origen remonta al antiguo Egipto con la creación del papiro y a la China del primer milenio, donde el papel como hoy lo conocemos se produjo a partir de trapos. (Anna G., 2014)

Posteriormente se fueron utilizando otras fibras, como la paja de arroz o los tallos de trigo, en el siglo IX se usó por primera vez la fibra de bambú. (Anna G., 2014)

El uso de papel aumentó consecuentemente hasta que en los siglos XVII y XVIII provocó una escasez de trapos, que la única materia prima conocida por los impresores europeos, por lo que se buscaban sustituto sin que ninguno tuviera interés comercial hasta que en 1840 se inventó la primera máquina para triturar madera y fabricar pulpa. 4 años más tarde, Fiedrich Gottlob Keller consiguió mediante procedimientos mecánicos obtener la pasta de madera y en 1852 Meiller descubrió la celulosa y Tilghman patentó el procedimiento mediante el cual se podía obtener celulosa de la madera utilizando bisulfito de calcio. (Anna G., 2014)

Desde la fabricación del papel, su uso aumentó en forma gradual, de acuerdo a un análisis de Allianz Research, Euler Hermes, la producción de papel y cartón en todo el mundo ha crecido más o menos alrededor de 415 millones de toneladas desde el 2015 al 2021. Además, al incrementarse la producción de papel también se incrementó la tala de árboles a nivel mundial afectando directamente al medio ambiente, debido a que para la fabricación de 1 tonelada de papel se necesitan 17 árboles adultos, casi 30000 litros de agua y unos 1500 litros de aceite.

Es por este motivo por el cual se realizaron distintas investigaciones con el fin de dar una alternativa no maderable para la manufactura de papel y cartón.

Según estadísticas provenientes de la Organización de las Naciones Unidas para la agricultura y la alimentación (FAO, 2020), para el año 2019 se produjeron 6.134.000 toneladas de pulpa a partir de fibras no maderables como se observa en la siguiente tabla:

Tabla 1: Producción de pulpa a partir de fibras no maderables (2019)

País	Toneladas de pulpa
China	5.877.000
Argentina	130.000
Tailandia	118.000
Japón	5.000
República Checa	4.000
TOTAL	6.134.000

Fuente: Enzo Muñoz, 2022

Otra alternativa para la fabricación de pulpa a partir de fibras no maderables es la cáscara de naranja.

En Bolivia, de acuerdo al artículo publicado por (Bolivia.com), se reportó 50000 hectáreas productivas de cultivos frutales de naranja, toronja, limón, lima y mandarina. De acuerdo con Desarrollo Rural, la mandarina tiene el mayor uso territorial con 26763 hectáreas, seguidas por la naranja con 22930 hectáreas, limón con 3384 hectáreas, lima con 945 hectáreas y la toronja con 440 hectáreas.

Además, en Tarija según datos del MDyT (Ministerio de desarrollo y tierras), la superficie cultivada de 917 hectáreas de naranja con una producción de 5764 toneladas. Constituyéndose Padcaya y Bermejo como los mayores productores de naranja, mandarina y limón.

El INE (Instituto Nacional de Estadísticas) realizó un censo agropecuario y presentó una actualización de datos en 2017, situando a Padcaya como el municipio que ocupa

el primer lugar en cuanto a la producción de naranja en el departamento con más de 67540 quintales al año. (El Pais, 2023)

Los residuos generados de la naranja son la cascara y el bagazo, el cual se genera cuando se obtiene el jugo de la fruta, en caso de que se ingiera el fruto completo no hay bagazo como desecho, de tal modo que la cascara es el principal residuo aprovechable de la naranja, es un desecho rico en aceites esenciales, azúcares y pigmentos. (Moncayo, 2018)

El presente trabajo propone el uso de las cascara de naranjas para producción de papel, de este modo ayudar a reducir el uso de madera y reducir el impacto ambiental y el volumen de residuos orgánicos provenientes de las juguerías.

En Bolivia, la Empresa Pública Nacional Estratégica de Bolivia (PAPELBOL) fue creada mediante el DS N° 29255 de 5 de septiembre de 2007 con una capacidad de 15200 toneladas por año, que empezó produciendo 80 toneladas en su primer año. En 2015 dio un giro a la producción ecológica. PAPELBOL tuvo como material base los residuos ya utilizados. Con la recolección de papel en desuso no se alienta la tala de árboles, para obtener la celulosa y se evita que el papel se convierta en una de las fuentes de contaminación, actualmente PAPELBOL produce 600 toneladas de papel en un mes. (Tancara, 2019). Por otro lado, también se tiene una investigación realizada en el Instituto de Investigaciones Amazónicas dependiente de la facultad de ingeniería de la Universidad Mayor de San Andrés sobre la elaboración de papel con pinzote de banano.

En Tarija, no se cuenta con industrias productoras de papel a partir de fibras no maderables, sin embargo, se tiene la investigación realizada en la Universidad Autónoma Juan Misael Saracho como ser la obtención de pulpa de celulosa para producir papel a escala laboratorio a partir de pinzote de plátano (*Musa Balbisiana*) cultivado en el trópico boliviano, en el cual aplicó el proceso a la sosa logrando obtener un rendimiento del 28,24% en base seca, es decir que por cada 100 g de pinzote de plátano seco se obtiene 28,24 g de pulpa seca.

OBJETIVOS

Objetivo General

Obtener papel a escala laboratorio a partir de la cáscara de naranja.

Objetivos Específicos

- Caracterizar la materia prima (cáscara de naranja) mediante análisis fisicoquímico.
- Determinar el proceso adecuado para la obtención a escala laboratorio.
- Determinar las variables de operación para el estudio.
- Caracterizar el papel obtenido a partir de la cáscara de naranja.
- Determinar el rendimiento del proceso de producción de papel a partir de cáscara de naranja a escala laboratorio.
- Realizar el estudio de costos del proyecto.

JUSTIFICACIÓN

Justificación Tecnológica

El desarrollo del presente proyecto tiene como objetivo el uso de desechos como la cáscara de naranja para uso alternativo en la producción de pulpa de celulosa el cual involucra en sus diferentes etapas de elaboración tecnologías estudiadas, conocidas y accesibles. Los materiales y equipos necesarios para cada operación del proceso se encuentran disponibles en el laboratorio de operaciones unitarias de la carrera de Ingeniería Química o mercado local, garantizando así la viabilidad del proyecto.

Justificación Económica

De acuerdo a datos del INE (Instituto nacional de estadísticas), Bolivia importó hasta el 2021, 164.442,2 toneladas de pulpa y papel de países como Brasil, Argentina, China, Perú entre otros, lo que indica un costo de 192,3 millones de dólares. (INE, 2021)

Con el presente proyecto se pretende contribuir al desarrollo de tecnología sostenible usando un recurso renovable, de fácil acceso y, además, transformándolo para darle un valor agregado, lo que permitirá generar ingresos adicionales en la agroindustria y

mejorar las condiciones de vida mediante la generación de empleos en especial para las personas ubicadas en la zona donde se localice una planta procesadora para la producción de pulpa de celulosa. Como también se pretende contribuir a la disminución de gastos en importación de dicho producto.

Justificación Social

Con el presente proyecto se busca generar un impacto social en el departamento de Tarija, aprovechando el residuo de la naranja (cáscara de naranja) como materia prima dándole el valor agregado, de esta forma generar ingresos extra y fuentes de empleo que contribuyan a la mejora de la calidad de vida de aquellas personas involucradas en la producción de naranja y en la generación de desechos de naranja.

Además, el papel obtenido puede ser destinado a la elaboración de artículos de escritorio, productos educativos o artísticos, donde pueden ser aprovechados por instituciones, escuelas o emprendedores y de esta forma incentivar al consumo de productos ecológicos y locales.

Justificación Ambiental

La fabricación de papel a partir de la pulpa de la madera ha evolucionado desde sus comienzos, hace 150 años. Si bien el perfeccionamiento de la técnica ha aumentado la producción, también ha degradado el medio ambiente.

Mediante el proyecto se plantea una alternativa eco amigable para la producción de papel mediante la utilización de fibras no maderables y de esta manera disminuir la tala de árboles y contribuir a la recuperación del equilibrio medio ambiental. Por otro lado, también se pretende contribuir al aprovechamiento de residuos generados por diferentes actividades realizadas por la población, los cuales son mínimamente aprovechados o en su caso son depositados en contenedores causando problemas de contaminación ambiental.

Justificación Personal

Con el presente proyecto se pretende contribuir con la sociedad aplicando y demostrando los conocimientos adquiridos en la formación universitaria realizando un

estudio de investigación sobre la elaboración de pulpa de papel a partir de cáscara de naranja con lo cual se dará alternativas más amigables con el medio ambiente.

CAPÍTULO I

MARCO TEÓRICO

1. MARCO TEÓRICO

1.1. Biomasa

De acuerdo al portal de la Comisión Europea plataforma Energía Renovable, la biomasa se refiere a materia orgánica de origen vegetal o animal, incluyendo a los árboles, plantas y residuos agrícolas y urbanos que pueden ser aprovechados como fuentes de energía y para reducir las emisiones de gases que causan el efecto invernadero mediante su tratamiento efectivo y sostenible. (Unión Europea, 2018)

1.1.1. Tipos de biomasa residual

La biomasa se clasifica de acuerdo a su origen y naturaleza que considera la forma en la que se encuentra el compuesto o grupo de compuestos presentes en la biomasa vegetal que en su mayoría son los carbohidratos. (Fernández et al., 2015)

Tabla I-1: Tipos de biomasa residual

Clasificación	Tipo	Descripción	Ejemplos
Origen	Madera virgen	Obtenida de los bosques o de la explotación forestal	Troncos, ramas y cortezas
	Cultivos energéticos	Plantas cultivadas con fines energéticos considerando las condiciones del suelo y los climas	Algas, caña gigante, centeno y césped
	Residuos agrícolas	Residuos de cultivos y procesos agrícolas. También se considera al material orgánico de producción excesiva.	Tallos, paja o cascaras
	Residuos sólidos urbanos	Residuos que se producen por la actual forma de vida. Se utilizan para generar	Papel y cartón

		energía a través de combustión, pirólisis o gasificación.	
	Residuos industriales	Residuos generados a nivel industrial que pueden proporcionar poder calorífico considerable.	Residuos de industria textil alimenticia, madera y lodos
Naturaleza	Biomasa lignocelulósica	Predomina la celulosa, hemicelulosa y la lignina	Paja, madera o leña
	Biomasa amilácea	Los carbohidratos más representativos son los polisacáridos de reserva	Almidón, inulina o cereales
	Biomasa azucarada	Los carbohidratos más representativos son los monosacáridos o disacáridos	Remolacha o tallo de la caña de azúcar

Fuente: Cabezas, T. 2019

1.1.2. Residuos agrícolas

Puede considerarse un residuo agrícola aquella parte de la planta que no es aprovechada para ser comercializada o aquella parte que no cumple los estándares de calidad porque presenta características físicas o químicas inferiores o su apariencia se ve afectada por enfermedades. Por lo tanto, los residuos pueden ser las partes de la planta correspondientes a: tallos, hojas, raíces, frutos no aprovechados, restos de podas y pajas de cereales. (Morenos, Moral, García, Pascual & Bernal, 2014)

La producción de papel y cartón a nivel mundial depende en gran porcentaje de la madera. Sin embargo, en muchos países los bosques son un recurso escaso, por lo tanto, los residuos agrícolas que son los residuos de las cosechas de plantas se han convertido en una materia prima alternativa en esta industria, ya que tanto la madera como los recursos no madereros están compuestos por fibras. Es por esta razón que los residuos agrícolas se denominan “fibras no madereras”. (Cabezas, T. 2019)

1.2. Fibras para elaborar papel

Las fibras vegetales son la base para la fabricación de papel. Dentro de estas fibras se tiene las fibras madereras que han sido la principal fuente. Sin embargo, las fibras no madereras propias de cada región como el bagazo, el bambú, algodón, etc., se consideran como nuevas materias primas para evitar el consumo de madera. (Roberts, 1996)

1.2.1. Fibra maderera

Las fibras de madera son fibras celulósicas y se subdividen en maderas duras y maderas blandas. (Sridach, 2010)

Las maderas blandas corresponden a las plantas gimnospermas que se conocen como coníferas mientras que las maderas duras corresponden a las plantas angiospermas conocidas como de hoja ancha o caduca. Las maderas duras tienen una estructura más compleja en comparación a las blandas. Además, al presentar una longitud menor en sus fibras con respecto a las coníferas produce un papel mas suave y de menor resistencia. (Biermann, J. 1996)

1.2.2. Fibra no maderera

La deforestación ha hecho que la tendencia del uso de la madera para elaborar papel cambie y sea necesario buscar otros recursos. Entre los cuales se encuentran los materiales no madereros como: residuos de cultivos agrícolas, hojas de árboles, cascaras de frutas, pastos entre otros (Kamoga, Byaruhanga & Kirabira, 2013).

1.3. Composición química de las fibras para elaborar papel

Las paredes celulares en las plantas están constituidas por polímeros. Tanto las fibras madereras como las no madereras están compuestas principalmente por celulosa, hemicelulosa y lignina. (Jones, Ormondroyd, Curling, Popescu & Popescu, 2017)

1.3.1. Celulosa

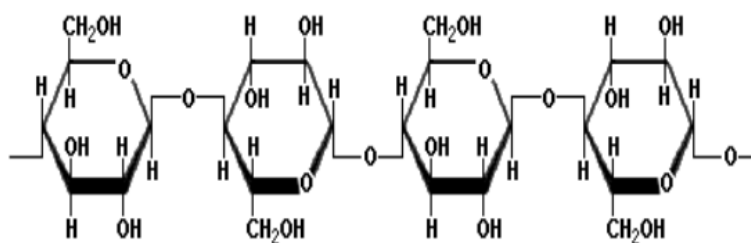
Se trata de uno de los componentes mayoritarios de la pared celular representando generalmente un 35 o 50% dependiendo del tipo de planta. Se trata de un polisacárido de cadenas lineales sin ramificaciones, donde la unidad monomérica es la D-glucosa, los cuales están unidas mediante enlaces glucosídicos β -1,4. Dichos enlaces pueden ser hidrolizados de forma química, enzimática o por microorganismos celulolíticos y hemicelulolíticos, estos últimos residen en el sistema digestivos de algunos insectos y rumiantes; cuyo proceso es mediado por enzimas del tipo de celulasas. (Marquez F., 2017)

La celulosa contiene elementos como: carbono, hidrógeno y oxígeno dando lugar a la formula química $(C_6H_{10}O_5)_n$, (Moon et al., 2011), siendo n el grado de polimerización, que indica las unidades de glucosa en el polímero.

Técnicamente se da el nombre de celulosa a las fibras blancas que se obtienen cuando se somete la materia vegetal a tratamientos de purificación mediante los cuales se extraen casi totalmente los demás componentes de la planta, especialmente la lignina.

En cuanto a su solubilidad, es insoluble en agua o soluciones diluidas de ácido o base a condiciones normales de temperatura. La celulosa se encuentra rodeada por hemicelulosa y lignina. Siendo necesario separarla para utilizarla como materia prima en las industrias de pulpa, papel y textil. (Chen, 2014)

Figura 1-1: Estructura química de la celulosa



Fuente: Marquez F., 2017

1.3.1.1. Clasificación de la celulosa

Se clasifican en tres tipos: Alfa celulosa (α celulosa), Beta celulosa (β celulosa) y Gamma celulosa (γ celulosa), de orientación levógira y dextrógira.

- **Alfa celulosa (α celulosa):** La alfa celulosa es abundante, es considerada como una celulosa pura que no se degrada por procesos de blanqueo o cocción, proviene de las capas internas de las paredes celulares de las plantas lo cual que por su pureza se lo utiliza en la producción de papel, textilería, productos químicos entre otros.
- **Beta celulosa (β celulosa):** La Beta celulosa se la puede encontrar en la capa intermedia de las paredes celulares de la planta.
- **Gamma celulosa (γ celulosa):** La Gamma celulosa se la puede encontrar en la capa externa de las paredes celulares de las plantas.

1.3.2. Hemicelulosa

La hemicelulosa es un heteropolisacárido, es el segundo hidrato de carbono más abundante debido a que su existencia varía en la biomasa del planeta.

Es la estructura que envuelve y resguarda a la celulosa. Es un polisacárido formado por más de un tipo de monómeros, está formado por un conjunto heterogéneo de polisacáridos, a su vez formados por un solo tipo de monosacáridos unidos por enlaces β (1-4) los cuales forman una cadena lineal ramificada. Entre estos monosacáridos destacan más la glucosa, galactosa o fructosa. Forma parte de las células vegetales, recubriendo la superficie de las fibras de celulosa y permitiendo el enlace de pectina. (QUIMICA.ES, 2021)

1.3.3. Holocelulosa

Es difícil establecer una barrera que separe celulosas de hemicelulosas, pues no se trata de unos productos definidos en cuanto a su grado de polimerización. Existe una fracción de auténtica celulosa (la α -celulosa), otra algo más débil (β -celulosa) y, por último, otra fácilmente atacable (γ -celulosa). Pero la separación entre ambas no es

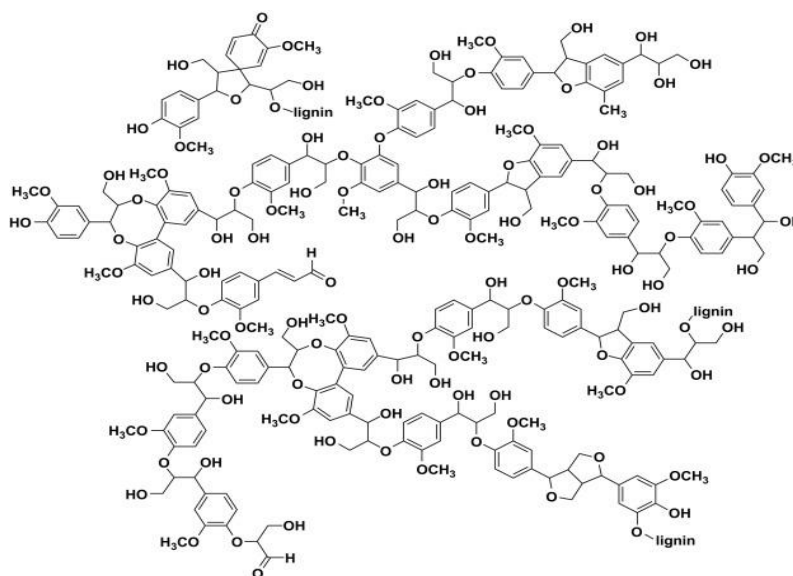
tajante. Por tanto, se entiende por holocelulosa como el conjunto de todas las celulosas y hemicelulosas contenidas en una pasta. (Rodríguez Jiménez, 1970)

1.3.4. Lignina

La lignina es un material orgánico como también es un polímero tridimensional altamente ramificado con una gran variedad de grupos funcionales que proporcionan centros activos para interacciones químicas y biológicas. Es importante destacar que la lignina es la única fibra no polisacárido que se conoce. Realiza múltiples funciones que son esenciales para la vida de las plantas, como el transporte interno de agua, nutrientes y metabolitos. Es la encargada de proporcionar rigidez a la pared celular y actúa como puente de unión entre las células de la madera, creando un material notablemente resistente a los impactos, compresiones y flexiones. (Gutiérrez, Guirola, Martínez, Albernas & Villanueva, 2020)

La lignina disponible en el mercado procede de una serie de procesos, mayoritariamente de la obtención de papel, lo cual provoca que en su caracterización pueden aparecer grupos funcionales distintos. (Nour-Edidine – 2006)

Figura 1-2: Estructura de la lignina



Fuente: Chaves y Domine, 2013

1.4. La naranja

Es una fruta cítrica obtenida del naranjo dulce (*Citrus x senensis*), del naranjo amargo (*Citrus x aurantium*) y de naranjos de otras variedades o híbridos de origen asiático. Es un hesperidio carnoso de cascara más o menos gruesa y endurecida, su pulpa está formada típicamente por once gajos u hollejos llenos de jugo el cual contiene mucha vitamina C, flavonoides y aceites esenciales. Se cultiva como un antiguo árbol ornamental y para obtener fragancias de sus frutos, es mas pequeña y dulce que el pomelo o toronja, aunque menos perfumada que la mandarina. Existen numerosas variedades de naranjas, siendo la mayoría híbridos producidos a especies citrus máxima (pamplemusa), *citrus reticulata* (mandarina) y *citrus médica* (cidro).

En Bolivia los mayores productores de naranja son los departamentos de La Paz (Yungas), Cochabamba (Chapare), Santa Cruz y Tarija, las variedades que son mayormente cultivadas a nivel nacional son: Criolla, Navel, Bahía Thompson, Washington Navel, Hamlin, Jaffa, Pera Bahianiana, Valencias, Late, Lue, Gin.

En el departamento de Tarija existen diferentes variedades de naranja.

Tabla I- 2: Variedades que existen en mayor cantidad por zonas

Río Bermejo	Criolla, criolla injertada, valencia tardía y tanjarina
Río Tarija	Criolla, jaffa, valencia temprana
Yacuiba	Criolla, criolla injertada, pupula, Valencia temprana y tardía
Tariquia	Criolla
Villa Montes	Criolla, criolla injertada
O'Connor	Criolla, criolla injertada

Fuente: Valle, 2016

1.4.1. Variedades de naranja

1.4.1.1. Valencia tardía

Pulpa dura y color naranja oscuro, semillas medianas y anchas, tamaño y color externo de la cascara variado, forma más redondeada.

De acuerdo a la investigación de Valle (2016), es la variedad de naranja que tiene mayor demanda a nivel mundial y una de las más cultivadas en el país. Da frutos de tamaño mediano, corteza un tanto gruesa, dura y coriácea. Superficie lisa, ligeramente áspera, jugo abundante y menos de seis semillas por fruto. Se mantiene bien en el árbol después de madurar y si se riega puede llegar a reverdecer. Es de madures tardía y excelente para la industria de jugos. De todas las variedades comerciales, es la que posee el mayor rango de adaptación climática.

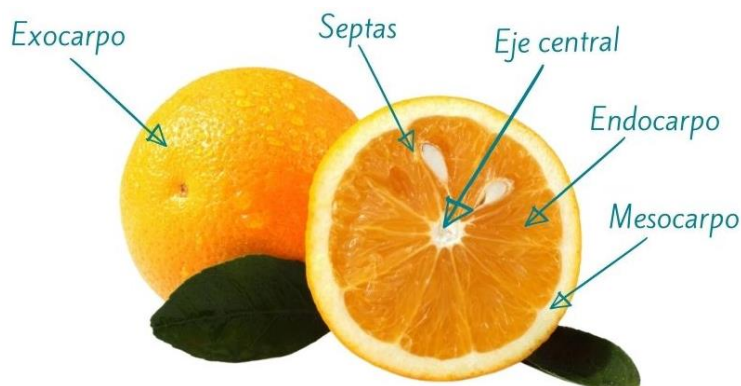
1.4.1.2. Criolla injertada

Pulpa blanda de color naranja oscuro, al apretar la cascara esta se desarma fácilmente, semillas medianas y delgadas, tamaño y color externo de la cascara casi uniforme. (Valle, 2016)

1.4.1.3. Criolla

Semillas largas terminan en punta, tamaño muy variado, color externo de la cascara casi uniforme, pulpa más dura que la criolla injertada, se caracteriza por tener la cascara más gruesa que las demás variedades. (Valle, 2016)

Figura 1-3: Partes de la naranja



Fuente: hilfe Agrothecnical, 2020

De acuerdo a la figura 1-3, los cítricos están compuestos por:

Septas o membranas, que son finas paredes celulares que separan los gajos de las naranjas

Exocarpo o flavedo, es lo más visible de la naranja, es decir la corteza o la parte de afuera, está formado por la epidermis e hipodermis que son de color verde cuando no está madura y color naranja cuando está en su punto de maduración.

Mesocarpo o albedo, se trata de la capa que une la parte interior y exterior de la naranja, posee un aspecto esponjoso y de color blanco, es muy rica en pectina, celulosa y hemicelulosa. (Cardozo, J. Y., 2003)

Endocarpo, es la parte comestible de la naranja que está formada por los carpelos o gajos compuesto por vesículas en forma de huso que contiene jugo y están separados por la membrana intercarpelaes. (Cardozo, J. Y., 2003)

1.5. Cáscara de naranja

La cáscara de los cítricos está compuesta de dos partes, el flavedo o exocarpio, y el albedo o mesocarpio. El flavedo es una capa delgada que posee los pigmentos que cambian de color durante la maduración de verde a amarillo, de gran aroma debido a los compuestos terpenicos que componen a los aceites esenciales que allí se encuentran.

El albedo es la parte blanca que contiene pectina que es la encargada de otorgar firmeza a la corteza. A medida que el fruto madura, el albedo empieza a degradarse por acción enzimática. (Marquez F., 2017)

Figura 1-4: Cáscara de naranja



Fuente: AUGISTI, M., 2003

A continuación, se presenta la composición proximal de la cascara de naranja, en donde indica que el contenido de humedad corresponde a 29,6% que significa que casi un tercio de la cascara es agua y posee un bajo contenido en grasas con 2,42%.

Tabla I-3: Composición proximal de la cáscara de naranja

Humedad %	Proteína %	Grasas %	Cenizas %
29,6	7,78	2,42	5,17

Fuente: Martines et al., 2017

1.5.1. Usos de la cáscara de naranja

La cáscara de naranja se usa industrialmente para la producción de:

- **Biogás y bioetanol**, ya que la cascara de naranja es rica en carbohidratos lo que permite su uso como materia prima.
- **Pectina**, la cascara de naranja también es considerada una fuente de pectina, que es utilizado para la elaboración de mermeladas y jaleas.

- **Extractos y compuestos bioactivos**, se puede extraer antioxidantes y otros compuestos fenólicos con capacidad para prolongar la vida útil de los alimentos y mejorar la salud.
- **Bioplásticos y papel**, por su alto contenido en celulosa, la cascara de naranja es posible utilizarla como materia prima para la elaboración de bioplásticos y papel, ofreciendo una alternativa sostenible.

1.6. Pulpa y papel

La pulpa de celulosa es el material fibroso para la fabricación de papel. Las fibras de pulpa son normalmente de origen vegetal, pero para algunas aplicaciones especiales se usan también fibras animales, minerales o sintéticas. Las pulpas utilizadas para su conversión química en otros productos se denominan pulpas para disolver. (Smook, 1990)

1.6.1. Procedimientos para la obtención de pulpa de celulosa

La pulpa de celulosa se obtiene por la separación de las fibras de madera u otros materiales fibrosos; es un producto intermedio en la manufactura del papel y cartón. La industria del papel tiene como propósito separar la celulosa de cualquier otro componente del cual este constituido un material vegetal, en especial la lignina. Por lo tanto, para el productor de pulpa, la lignina es el ingrediente indeseable que se debe eliminar durante la elaboración de pulpa.

Las propiedades de los productos terminales dependerán de las propiedades de las pulpas utilizadas en su manufactura. Estas variaran a su vez con las especies de fibras de distintas maderas o de plantas no leñosas, utilizadas, así como el proceso empleado en la obtención de pulpa. (Casey, 1990)

Es posible producir pulpa mediante procesos mecánicos, químicos o mediante la combinación de los dos procesos, los cuales se detallan a continuación:

1.6.1.1. Procesos mecánicos

De acuerdo a Biermann (1996) el pulpeo mecánico involucra el uso de una fuerza mecánica para pulpear los materiales lignocelulósicos, no se utilizan químicos, solo el

agua y el vapor; como fuente de fibras las correspondientes a maderas suaves de colores claros y no resinosas y algunas maderas duras. La lignina es retenida en la pulpa, por lo que, se obtienen altos rendimientos entre el 90% y el 98%. Estas pulpas caracterizan por su elevado volumen, alta rigidez, y bajo costo; además de que presentan una baja resistencia mecánica, dado que la lignina interfiere con los enlaces de hidrogeno entre las fibras cuando se hace el papel. La lignina provoca que la pulpa tienda a cambiar a color amarillo al ser expuesta al aire y a la luz. (Solano Hernández, 2010)

1.6.1.2. Procesos químicos

En el pulpeo químico, la lignina se solubiliza mediante reacciones químicas a temperaturas elevadas, aproximadamente de 130°C a 180°C. el rendimiento total varía del 45% al 55% dependiendo de la materia prima utilizada y del proceso de pulpeo aplicado. Estas pulpas presentan alta resistencia mecánica y contienen aproximadamente del 3% al 5% de lignina. (Solano Hernández, 2010)

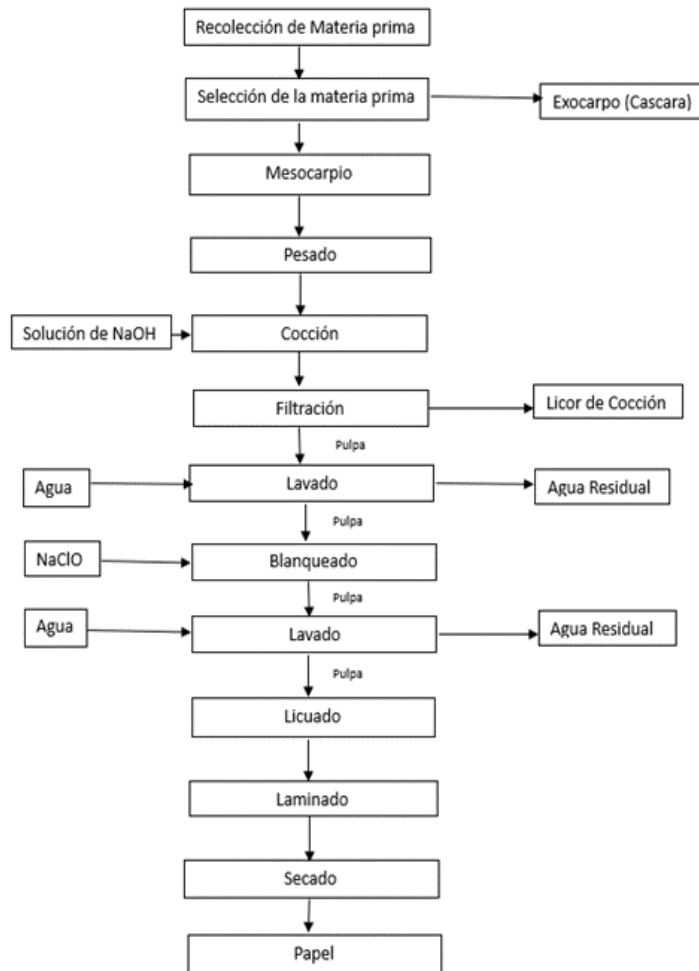
En la investigación de Solano Hernández (2010) señala que, a nivel mundial, la mayoría de las fábricas que utilizan fibras no maderables hacen uso de los procesos químicos como sosa, Kraft y sulfito, pero el método más usado a nivel comercial para pulpear especies no maderables sigue siendo el método a la sosa. Este se debe a que deja una mayor cantidad de carbohidratos insolubles en la pulpa y se obtiene un mejor rendimiento que para el método Kraft. Sin embargo, las propiedades de resistencia mecánica y el contenido de lignina son similares en las pulpas producidas por ambos métodos.

1.6.1.2.1. Proceso a la sosa

Este es el proceso más antiguo que se conoce y consiste en someter la materia prima, troceada y acondicionada a un digestor con una concentración de hidróxido de sodio, a una temperatura y tiempo de cocción determinados, según la calidad de las pulpas que se deseen obtener (químicas o semiquímicas) y las características de la materia prima utilizada. Se cargan la materia prima y el licor al digestor bien sea intermitente o continuo. El licor blanco se carga para dar la relación correcta de productos químicos

a la materia prima, y, en el caso de los digestores intermitentes, el licor negro recirculado procedente de los lavadores se agrega también para alcanzar la relación deseada licor/materia prima. El digestor se calienta por vaporización directa o indirecta hasta llegar a una temperatura alta, en el margen de 160°C a 180°C, y se mantiene allí hasta alcanzar el grado deseado de cocción. Después de terminar la digestión, la materia prima cocida y el licor gastado se descargan en un tanque de soplado. Las partículas no cocidas de mayor tamaño (nudos) se eliminan entonces utilizando cribas perforadas (nuderás) y separa de la pulpa mediante un lavado en contracorriente. La pulpa se diluye hasta llegar a una consistencia baja, y se eliminan los contaminantes de pequeño tamaño mediante cribas finas, bien sea el tipo centrífugo o por presión, lo que en algunos casos se prosigue mediante limpiadores centrífugos. Finalmente, el material ya limpio se espesa y se almacena para subsecuente procesado. (Delgado & Uribe, 2017)

Figura 1-5: Diagrama de flujo del proceso de pulpeado a la sosa



Fuente: Smook, 1990

De acuerdo con Casey (1990), una de las ventajas de este proceso es que el licor blanco es fácil de separar, llegando a obtenerse una pulpa de color claro lo que la harán buenas para impresión. Sin embargo, la desventaja de este proceso es que puede deteriorar las fibras de la celulosa, la lignina en cambio se transforma en sustancias solubles en álcali. Este proceso puede producir jabones con las grasas encontradas en la materia prima, por lo que el lavado debe hacerse inmediatamente. El rendimiento obtenido mediante este proceso es de 45% a 50%.

1.6.1.2.2. Proceso Kraft

El desarrollo del proceso de Kraft se atribuye usualmente a C.F. Dahl. En un esfuerzo por encontrar un sustituto para el costoso carbonato de sodio, experimento con la adición de sulfato de sodio a la caldera de recuperación para reponer las pérdidas de productos químicos ocurridas durante las operaciones de cocción a la sosa. El sulfato fue químicamente reducido a sulfuro en la caldera, que de esta forma fue introducido en el licor del sistema, Dahl observo que el sulfuro aceleraba significativamente la deslignificación llegando a producir una pulpa mucho más resistente.

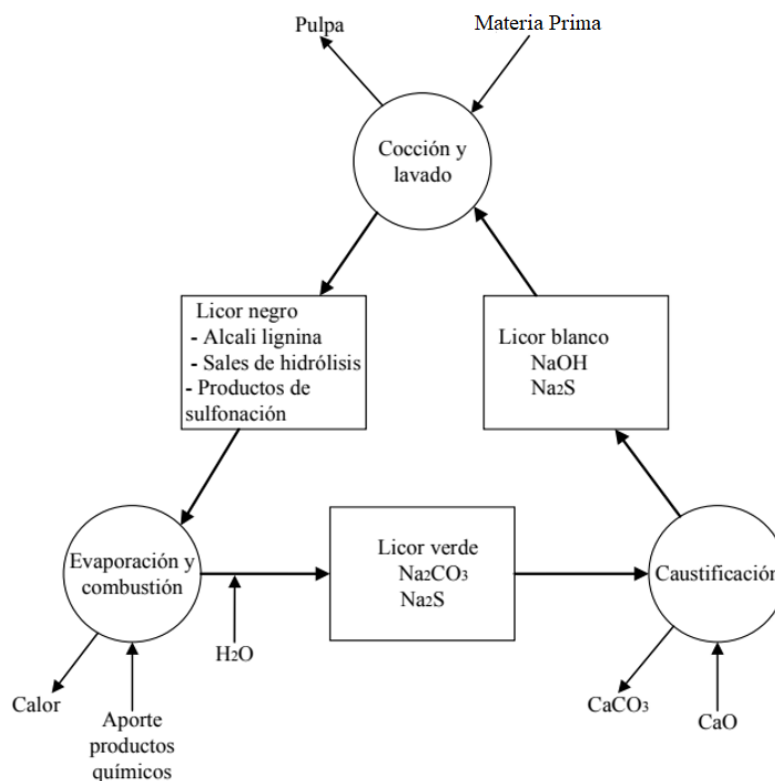
Luego de la etapa de cocción o digestión, el licor negro residual es extraído por lavado de la pulpa y tratado en una serie de etapas para recuperar los productos químicos y regenerar el licor de cocción. El proceso de cocción puede ser continuo o discontinuo, en la cocción discontinua, el digestor se llena de materia prima y se adiciona suficiente licor para cubrirlas. Después, el contenido se calienta de acuerdo a un programa predeterminado, normalmente por circulación forzada del licor de cocción a través de un intercambiador de calor. Por la parte superior del reactor se desgasan aire y otros gases no condensables por medio de una válvula de control de presión. La temperatura máxima se suele alcanzar después de 1 a 1,5 hr, que permite al licor de cocción impregnar a la materia prima.

La cocción se mantiene entonces a temperatura máxima (usualmente en torno a 170°C) durante 1 a 2 hr para completar las reacciones de cocción. Después de la digestión, el contenido se descarga en un tanque de soplado donde la materia prima ablandada se desintegra en fibras; el vapor se condensa en un intercambiador de calor para proporcionar agua caliente para el lavado de la pulpa. (Smook, 1990)

Las variables más influyentes en las reacciones de pulpeado Kraft son:

- Concentración de álcali (medida por el álcali activo o álcali efectivo)
- Temperatura. Dentro del intervalo de temperatura normal de cocción (155 a 175°C), la velocidad de deslignificación crece más del doble para cada incremento de 10°C.

Figura 1-6: Esquema del ciclo de licores Kraft



Fuente: Smook, 1990

1.6.1.2.3. Proceso al sulfito

Primero se prepara el licor de cocción mediante combustión de azufre para producir SO_2 gas, posterior a la absorción del SO_2 en una solución alcalina de la base. Antiguamente, en las fabricas se utilizaba exclusivamente caliza en la torre de absorción de gas, que servía como material de relleno y como fuente de calcio para producir bisulfito de calcio. En cambio, en las fábricas más modernas, se usa una de las bases solubles, en forma de NH_4OH , $Mg(OH)_2$ o Na_2CO_3 para absorber el SO_2 ; para proporcionar una mayor área de contacto en la torre de absorción, se utilizan rellenos inertes tales como las sillas berl. (Smook, 1990)

La cocción se realiza de manera intermitente haciendo el uso de un recipiente a presión, recubierto de acero o acero inoxidable con revestimiento resistente al ácido. El digestor

se carga primero con la materia prima, se tapa y se adiciona después ácido caliente, procedente del acumulador de alta presión, para casi llenar el digestor.

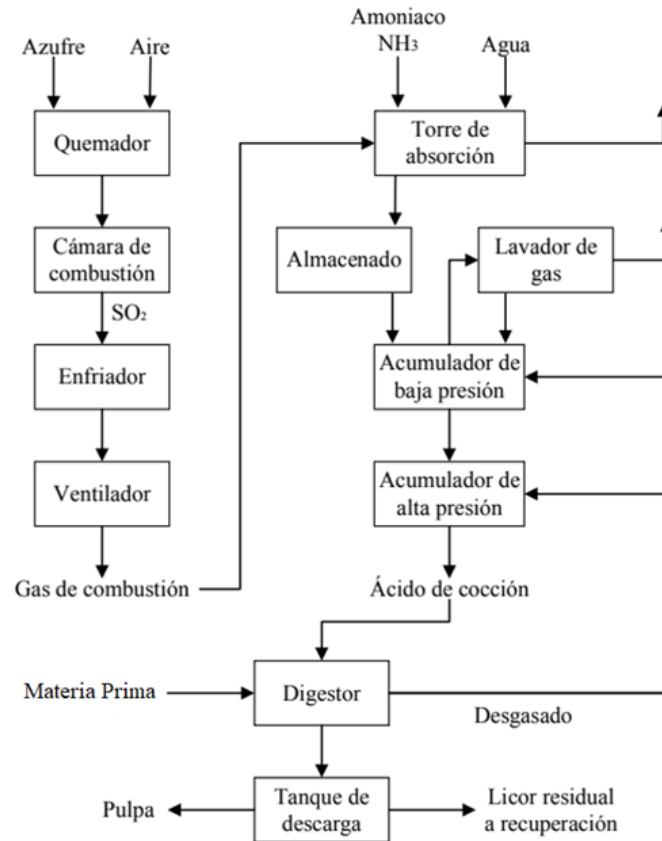
Cuando la temperatura y la presión se incrementan, el ácido caliente es absorbido rápidamente por las astillas. La reacción química no progresa en ningún momento hasta que la temperatura sobrepasa los 110°C, pero es importante que en esta etapa las fibras estén bien impregnadas con los reactivos de cocción. Una lenta subida de temperatura (130 a 140°C), y un largo tiempo global de cocción (6 a 8 hr) son condiciones típicas para evitar reacciones de policondensación de la lignina no deseables. Mediante este proceso se tiene la posibilidad de obtener pulpas de mayor blancura y resistencia, sin embargo, la velocidad es pausada haciéndose necesaria una cantidad elevada de reactivos. (Enzo Muñoz, 2021)

En este proceso las variables mas influyentes en la cocción del sulfito son:

- El pH
- La concentración de SO_2 libre
- Temperatura

El pH se desplaza desde el nivel correspondiente a la cocción al sulfito ácido (pH 1,5 a 2,0) al nivel de la cocción al bisulfito (pH 4,0 a 5,0), la velocidad de cocción se puede mantener utilizando temperaturas mas altas, normalmente a 140°C es el nivel máximo considerado en la cocción al sulfito ácido de calcio, debido a las reacciones de policondensación que pueden ocurrir a temperaturas mas elevadas. Cuando se utilizan bases monovalentes (pH mas altos), la temperatura se puede incrementar hasta 160°C o más. (Smook, 1990)

Figura 1-7: Diagrama de flujo del proceso de pulpeado al sulfito con base amonio



Fuente: Smook, 1990

1.6.2. Factores a tomar en cuenta para la producción de la pulpa

Las principales variables de trabajo durante el proceso de pulpeo y que pueden ser aplicadas a fibras no maderables, de acuerdo a Stephenson (1950) citado en Enzo Muñoz (2022) son:

- **Especie y calidad de la materia prima**

La diferencia más marcada entre materias primas duras y suaves se encuentran en la longitud de sus fibras, así como el contenido de celulosa, pentosas y lignina, dando como resultado una variación en cuanto a las propiedades de la pulpa obtenida. La

materia prima de diferente densidad requiere distintos tratamientos de cocción. (Enzo Muñoz, 2022)

- **Tiempo de cocción**

Este tiempo está relacionado con otras variables, tales como la temperatura, cantidad y la concentración del licor. Un aumento en cualquiera de estas variables disminuirá el tiempo para obtener la pulpa con el mismo rendimiento y calidad.

- **Temperatura de cocción**

La temperatura y el tiempo de cocción son variables dependientes, ya que mientras mas alta sea la temperatura, menor será el tiempo de digestión. Una temperatura por debajo de los 170°C no aporta en el rendimiento ni en la calidad de la pulpa obtenida. Mientras que, por encima de los 180°C, la celulosa es muy susceptible a degradarse, particularmente a una temperatura de 200°C.

- **Relación de los productos químicos con la materia prima**

La relación entre los productos químicos y la materia prima que se agreguen al reactor debe mantenerse por encima de un tiempo determinado, con el fin de producir pulpa mediante la eliminación de suficiente lignina para separar las fibras. (Enzo Muñoz, 2022)

- **Concentración de los reactivos en el licor**

La concentración de los reactivos en el licor de cocción está estrechamente relacionada con la relación de los productos químicos a la materia prima; la velocidad de la reacción química está determinada por la concentración de los reactivos de cocción. (Enzo Muñoz, 2022)

1.6.3. Índices de calidad de pulpa

- **Rendimiento porcentual**

Es la cantidad de pulpa obtenida para la cantidad de materia prima seca que ingresó multiplicado por cien.

- **Alfacelulosa**

La alfacelulosa se define como la fracción de celulosa no degradada o insoluble que se obtiene al someter una pasta química a una solución de NaOH al 17,5%. Esta fracción es considerada como la celulosa en su forma más pura, y su cantidad nos da una referencia a propiedades como la capacidad a no degradarse por envejecimiento y conservar su resistencia. (Grant, 1996)

CAPÍTULO II
PARTE EXPERIMENTAL

2. METODOLOGÍA DE ESTUDIO

2.1. Caracterización de la materia prima

Las cáscaras de naranja con las que se desarrolló el proceso corresponden a descartes de la naranja de la variedad naranja, citrus sinensis (Valencia Tardía), la cual está formada por la piel o cascara que está compuesta principalmente por materia lignocelulósica, se eligió esta variedad porque es una de las naranjas más comercializadas y consumidas en el departamento de Tarija. Son considerados subproductos provenientes de actividades humanas tales como el comercio interno, el consumo directo en domicilios y especialmente en el sector industrial.

La caracterización de la cáscara de naranja se realizó mediante la determinación de propiedades fisicoquímicas, dichos análisis se realizaron en el Centro de Análisis, Instigación y Desarrollo (CEANID), ubicado en la ciudad de Tarija, en Laboratorio CBO ubicado en Brasil y en Instituto de Investigaciones Químicas IIQ ubicado en la ciudad de La Paz.

2.2. Selección del proceso experimental

Con el objetivo de definir el método más apropiado para la obtención del papel, se recurre al método cualitativo por puntos, para el cual se tomaron en cuenta diferentes características similares o diferentes que poseen cada uno de los procesos anteriormente descritos. De acuerdo a bibliografía, los principales métodos para la producción de papel son: el proceso a la sosa, Kraft y sulfito.

Tabla II-1: Escala de puntuación

Calificación	
Escala de puntuación	Puntuación
Malo	1-2
Regular	3-4
Bueno	5-6
Muy bueno	7-8
Excelente	9-10

Fuente: Rensis Likert, 1932

Tabla II-2: Selección del proceso de obtención de papel a partir de cáscara de naranja

Nº	Actividades de proceso	Peso relativo	Proceso a la sosa		Proceso Kraft		Proceso al Sulfito	
			Calificación	Valor ponderado	Calificación	Valor ponderado	Calificación	Valor ponderado
1	Aplicabilidad del metodo y disponibilidad de equipamiento	0,25	8	2	6	1,5	5	1,25
2	Calidad de producto obtenido	0,25	8	2	6	1,5	9	2,25
3	Tiempo de obtención del producto	0,15	7	1,05	8	1,2	6	1,2
4	Preparación del licor blanco	0,15	10	1,5	7	1,05	5	0,75
5	Requerimientos de reactivos	0,2	9	1,8	7	1,4	5	1
TOTAL		1		8,35		6,65		6,45

Fuente: Elaboración propia, 2024

La tabla II-2, de selección del proceso de obtención de papel, arrojó una puntuación para cada proceso, de este modo el proceso con mayor puntuación es el proceso a la sosa con una puntuación de 8,35, esto debido a la aplicabilidad del proceso y la disponibilidad de los equipos en el laboratorio de operaciones unitarias lo que conlleva un costo menor, también se tiene un fácil acceso a la materia prima, el hidróxido de sodio es una sustancia controlada, sin embargo, es posible obtener a través de empresas constituidas para adquirir el reactivo. También se observa que, mediante este proceso, es posible obtener papel de buena calidad.

2.3. Diseño factorial

Los diseños experimentales son un conjunto de métodos y procedimientos utilizados para analizar medidas de variables específicas en una investigación. Existen varios casos especiales del diseño factorial general que resultan importantes porque se usan ampliamente en el trabajo de investigación.

Uno de los más importantes de estos casos especiales ocurre cuando se tienen k factores, cada uno con dos niveles, los cuales pueden ser cuantitativos como por ejemplo dos valores de temperatura, presión, tiempo, etc., pero también pueden ser cualitativos como el de dos máquinas, dos operadores, etc., los niveles “superior” e “inferior” de un factor, o quizás, la ausencia o presencia de un factor. Una réplica completa de tal diseño requiere que se recopilen $2 \times 2 \times \dots \times 2 = 2^k$ observaciones y se conoce como diseño general 2^k .

El número de tratamientos o corridas a realizarse en el experimento es 2^k por número de replicas. Cuando el factor está en su nivel bajo su exponente es 0 y cuando está en el nivel alto su exponente es 1.

En un diseño factorial 2^k resulta sencillo expresar los resultados del experimento en términos de un modelo de regresión, aunque se pueden utilizar modelos de efectos como de promedios. El modelo de regresión es mucho más natural e intuitivo. La ecuación del modelo de regresión sería:

$$y = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \beta_{12} x_1 x_2 + \varepsilon$$

Donde x_1 y x_2 representan a los niveles codificados de los factores (-1 y +1), y la variable respuesta y ε el error aleatorio.

Para el desarrollo de la presente investigación se planteó un diseño factorial para el proceso de obtención de papel a partir de cáscara de naranja.

2.3.1. Selección de variables del proceso experimental

El diseño factorial para la obtención de papel a partir de cáscara de naranja se realizó tomando en cuenta la investigación de “*Obtención de pulpa de celulosa para producir papel a escala laboratorio a partir de pinzote de plátano (Musa balbisiana) cultivado en el trópico boliviano*” por Enzo Leonardo Muñoz Estrada, 2022. Para determinar las variables significativas se planteó un diseño factorial 2^3 , es decir, dos niveles y tres variables haciendo un total de 8 experimentos, además que se realizó una réplica a cada experimento, por lo que se realizó un total de 16 experimentos, lo que permitió hacer un mayor número de combinaciones de variables.

Las variables que se determinaron para la obtención de papel en base a referencia bibliográfica y pruebas preliminares son porcentaje de Sosa, tiempo de cocción y temperatura de cocción.

Tabla II-3: Variables de proceso para la obtención de papel a partir de cáscara de naranja

Variable independiente	Unidad	Variable dependiente	Unidad
Porcentaje de sosa	%	Rendimiento	%
Tiempo de cocción	Min	-	-
Temperatura de cocción	°C	-	-

Fuente: Elaboración propia, 2025

$$N^{\circ} \text{ variables} = 3$$

$$\text{Niveles} = 2$$

$$N^{\circ} \text{ experimentos} = (2^3) \times 2 = 16$$

Tabla II-4: Niveles de variación de factores

Variables	Niveles	
	Inferior	Superior
Porcentaje de sosa (%)	8	12
Tiempo de cocción (min)	60	90
Temperatura de cocción (°C)	100	120

Fuente: Elaboración propia, 2025

Para facilitar el tratamiento de datos, se codificó las variables por (-1) para representar el nivel bajo y (+1) que representa al nivel alto como se observa en la tabla II-4.

Tabla II-5: Matriz de experimentos

N°	Matriz de experimentos			Plan de experimentación			
	A	B	C	Porcentaje a la sosa (%)	Tiempo de cocción (min)	Temperatura de cocción (°C)	Rendimiento (%)
1	-1	-1	-1	8	60	100	y ₁
2	1	-1	-1	12	60	100	y ₂
3	-1	1	-1	8	90	100	y ₃
4	1	1	-1	12	90	100	y ₄
5	-1	-1	1	8	60	120	y ₅
6	1	-1	1	12	60	120	y ₆
7	-1	1	1	8	90	120	y ₇
8	1	1	1	12	90	120	y ₈
9	-1	-1	-1	8	60	100	y ₉
10	1	-1	-1	12	60	100	y ₁₀
11	-1	1	-1	8	90	100	y ₁₁
12	1	1	-1	12	90	100	y ₁₂
13	-1	-1	1	8	60	120	y ₁₃
14	1	-1	1	12	60	120	y ₁₄
15	-1	1	1	8	90	120	y ₁₅
16	1	1	1	12	90	120	y ₁₆

Fuente: Elaboración propia, 2025

2.4. Equipos, materiales y reactivos e insumos empleados para el desarrollo del diseño experimental

2.4.1. Equipos

Los equipos utilizados para la obtención de papel a partir de cáscara de naranja fueron los siguientes:

- Licuadora
- Balanza digital
- Calentador

Las especificaciones de los equipos mencionados se encuentran detallados en el Anexo 1.

2.4.2. Materiales

Tabla II-6: Materiales utilizados en la utilizados para la obtención de papel a partir de cascara de naranja

Material	Descripción	Especificación	Cantidad
Probeta	Recipiente de vidrio utilizado para medir volúmenes.	Capacidad: 50 ml y 100 ml	2
Vasos de precipitado	Empleado para contener muestras líquidas.	Capacidad: 500 ml y 1000 ml	2
Espátula	Empleado para levantar muestras sólidas.	-	1
Vidrio de reloj	Recipiente de vidrio empleado para depositar sólidos.	Diámetro: 10 cm	1

Varilla de vidrio	Cilindro macizo de vidrio, utilizado para agitar disoluciones.	Longitud: 25 cm.	1
Termómetro	Instrumento utilizado para medir temperatura de una muestra.	Rango de temperatura entre - 50°C - +300 °C	1
Olla	Recipiente de acero inoxidable.	6 litros	1
Cuchillo	Instrumento de acero inoxidable.	-	1
Tela	Filtro	-	1
Marcos de madera	Madera	-	1
Colador	Plástico utilizado para separar sólidos y líquidos.	-	1
Balde	Recipiente de plástico.	6 litros	1
Jarra	Recipiente de plástico utilizado para contener líquido.	1 litro	1

Fuente: Elaboración propia, 2025

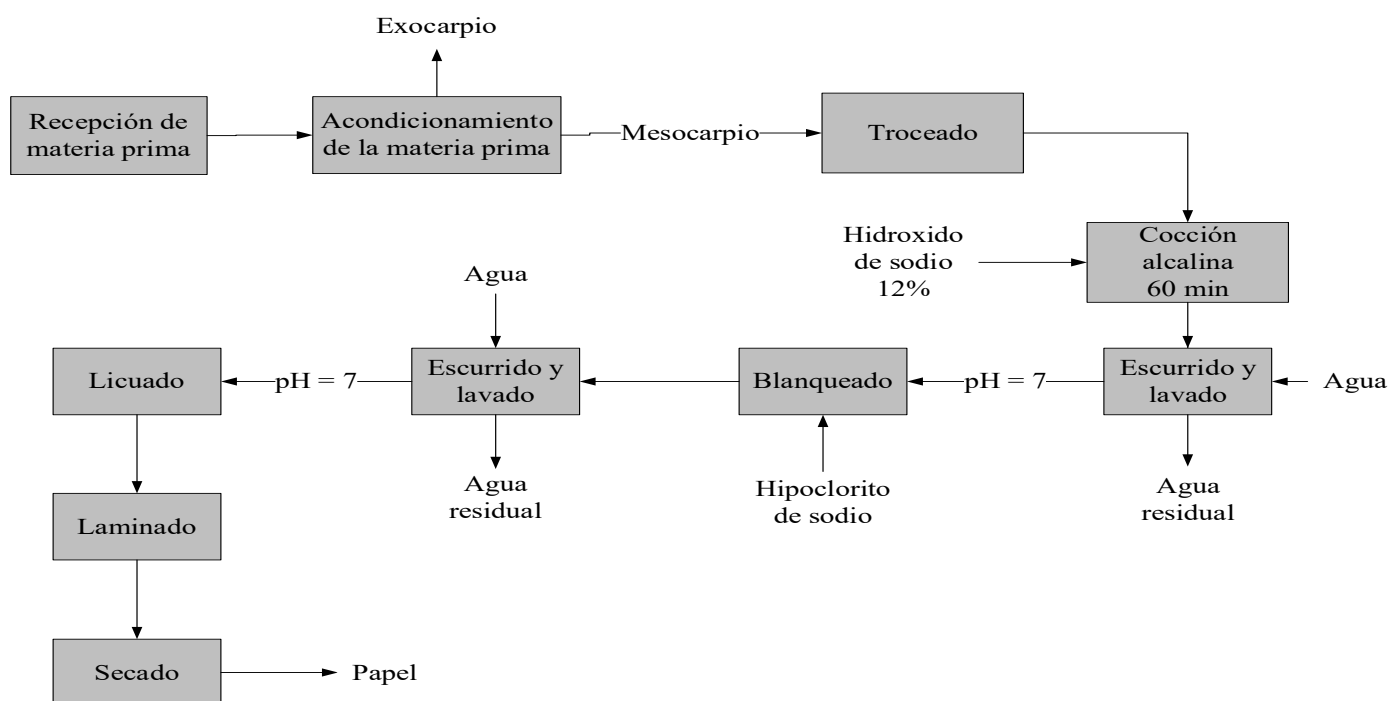
2.4.3. Reactivos e insumos

- Hidróxido de sodio
- Agua destilada
- Hipoclorito de sodio
- Cáscara de naranja

2.5. Descripción del proceso de obtención de papel a partir de cáscara de naranja

2.5.1. Diagrama del proceso de obtención de papel a partir de cáscara de naranja.

Figura 2-1: Diagrama de obtención del papel a partir de cáscara de naranja a escala laboratorio



Fuente: Elaboración propia, 2025

2.5.2. Descripción del proceso de obtención de papel a partir de cáscara de naranja

A continuación, se describe cada una de las etapas del proceso de obtención de papel a partir de cáscara de naranja.

2.5.2.1. Recepción y lavado de materia prima

Se recolectó la cáscara de naranja de los desechos de la población de la ciudad de Tarija. Posteriormente se realizó el lavado de la misma para eliminar impurezas que pudieran existir en la cáscara de naranja.

Figura 2-2: Cáscara de naranja



Fuente: Elaboración propia, 2025

2.5.2.2. Acondicionamiento de materia prima

Una vez obtenida la cáscara de naranja, se realizó la separación del exocarpio y mesocarpio, y se utilizó ésta última, ya que es la que contiene fibra celulósica. Este proceso se realizó con mucha precisión con la ayuda de un rallador de cáscara.

Figura 2-3: Mesocarpio de la cáscara de naranja



Fuente: Elaboración propia, 2025

2.5.2.3. Troceado y pesado

Una vez realizado el acondicionamiento de la cascara de naranja, con la ayuda de un cuchillo se procedió a trocear de tal manera que estuvieran uniformes, posteriormente se procedió a pesar 100 gramos con la ayuda de una balanza.

Figura 2-4: Troceado de cáscara de naranja



Fuente: Elaboración propia, 2025

2.5.2.4. Cocción alcalina

Este proceso es importante debido a que ayuda a romper y eliminar los compuestos no celulósicos de la cáscara de naranja (lignina) la cual se encuentra como parte de su biomasa lignocelulósica juntamente con la celulosa y la hemicelulosa.

Dicho proceso se logró mediante cocción con solución alcalina de hidróxido de sodio (NaOH) al 12%, en función a base seca de la casara de naranja, en una olla por un tiempo de 60 minutos a una temperatura igual a 100°C.

Figura 2-5: Cocción alcalina



Fuente: Elaboración propia, 2025

2.5.2.5. Ecurrido y lavado

Una vez concluida la cocción de la cáscara de naranja, se escurrió y exprimió por medio de un colador hasta retirar todo el licor negro, posteriormente se realizó el lavado con agua destilada para terminar de eliminar lignina restante y la solución alcalina hasta dejar un pH neutro.

Figura 2-6: Escurreido y lavado



Fuente: Elaboración propia, 2025

2.5.2.6. Blanqueado

Luego de haber obtenido la pulpa de celulosa, se procedió a aclararla haciendo uso del hipoclorito de sodio al 5% durante un tiempo de 24 horas, de esta manera la Pulpa de celulosa obtenida tomó un color claro.

Figura 2-7: Blanqueado de la pulpa de celulosa



Fuente: Elaboración propia, 2025

2.5.2.7. Escurrido y lavado

Luego de blanquear la pulpa de celulosa, se procedió a escurrirlo con ayuda de un filtro de tela y posteriormente se realizaron distintos lavados con abundante agua para neutralizar el pH.

Figura 2-8: Escurrido y lavado de la pulpa blanqueada



Fuente: Elaboración propia, 2025

2.5.2.8. Licuado

Luego de haber obtenido la pulpa blanqueada, se procedió con el desfibrado con la ayuda de una licuadora, esto se realizó con el objetivo de romper tejidos del mesocarpio de la cáscara de naranja y liberar las fibras celulósicas permitiendo la formación de microfibrillas que mejora la adhesión entre ellas y formar un papel resistente y uniforme.

Figura 2-9: Licuado de pulpa de celulosa

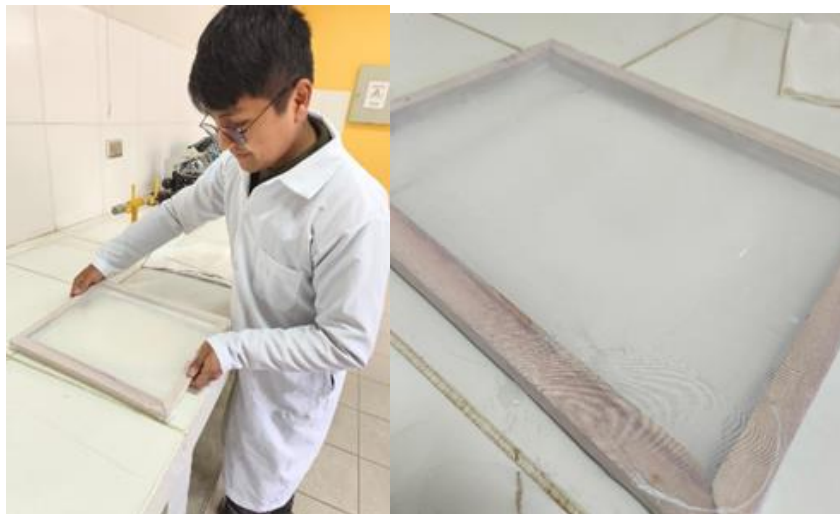


Fuente: Elaboración propia, 2025

2.5.2.9. Laminado

Posteriormente, se procedió a obtener el papel para lo cual se usó un tamiz al cual se depositó la pulpa de celulosa con agua y se esperó hasta que drene el agua.

Figura 2-10: Laminado del papel



Fuente: Elaboración propia, 2025

2.5.2.10. Secado

Una vez que escurrió el agua del tamiz con la pulpa de celulosa se procedió a prensarlo para extraer la mayor cantidad de agua posible, posteriormente se dejó secar a temperatura ambiente y finalmente se obtuvo el producto.

Figura 2-11: Secado del papel a partir de cascara de naranja



Fuente: Elaboración propia, 2025

2.5. Caracterización del papel a partir de cascara de naranja

Los análisis fisicoquímicos del producto final (papel a partir de cascara de naranja) fueron realizados en CBO Análises Laboratoriais Ltda., ubicado en Brasil.

Tabla II-7: Análisis fisicoquímico de la cascara de naranja

Ensayo	Unidad	Código
Lignina	%	MA-073 R0
Cenizas	%	MA-105 R5

Fuente: Laboratorio CBO, 2025

También se realizaron análisis en el Instituto de Investigaciones Químicas IIQ de la Universidad Mayor de San Andrés ubicado en la ciudad de La Paz.

**Tabla II-8: Análisis fisicoquímico de la cáscara de
naranja**

Parámetro	Unidad	Método de ensayo
Humedad	%	Gravimétrico
Alfa celulosa	%	-
Beta celulosa	%	-
Gamma celulosa	%	-

Fuente: Instituto de Investigaciones Químicas, 2025

2.5.1. Resistencia a la tracción del papel

La determinación de la resistencia a la tracción se realizó de acuerdo a la norma ISO 1924, la cual hace referencia a láminas de papel.

Para realizar dicha determinación se trabajó con 1 probeta de 10 mm de ancho y 20 mm de largo por cada muestra, las cuales fueron sometidas a diferentes fuerzas de tracción añadiendo peso hasta notar la ruptura del material.

Este análisis se realizó en el laboratorio de física perteneciente a la Universidad Juan Misael Saracho.

El esfuerzo máximo se determinó mediante la siguiente ecuación. (Tubón, 2013)

$$\sigma = \frac{f}{a}$$

Donde:

σ = Esfuerzo máximo (N/cm²)

f = Fuerza (N)

a = Área (cm²)

CAPÍTULO III

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1. Caracterización de la materia prima

A continuación, se detallan los análisis realizados a la cáscara de naranja.

3.1.1. Propiedades fisicoquímicas

Los análisis fisicoquímicos de la cáscara de naranja fueron realizados en diferentes laboratorios.

En la tabla III-1, se muestran los resultados de los análisis fisicoquímicos de la materia prima (cáscara de naranja) realizado en el CEANID.

Tabla III-1: Análisis fisicoquímicos de la cáscara de naranja

Parámetro	Técnica y/o método de ensayo	Unidad	Resultado
Ceniza	NB 39034:10	g/100g	2,26
Densidad	NB 36001:02	g/ml	0,95
Humedad	NB 313010:05	g/100g	58,34
pH (20°C)	Potenciometrico	**	5,26

Fuente: CEANID, 2025

Como se puede observar, la cáscara de naranja presentó un contenido de ceniza de 2,26% el cual no es alto y que indica que no existe interferencia al proceso de cocción alcalina o reducir la blancura del papel, una densidad de 0,95 g/ml indica la porosidad de la materia prima, sugiere una fibra relativamente ligera pero no tan porosa lo que facilita el manejo y cocción. La cáscara de naranja también presentó una humedad de 58,34% lo que indica que tiene gran cantidad de agua presente. Por último, el pH ligeramente ácido influye en la cantidad de sosa necesaria para la obtención de papel.

En la tabla III-2, se muestran los resultados de los análisis fisicoquímicos realizados a la materia prima en Laboratorio CBO.

Tabla III-2: Análisis fisicoquímico de la cáscara de naranja

Ensayo	Resultado	Unidad	Código
Lignina	2,99	%	MA-073 R0

Fuente: Laboratorio CBO, 2025

Como se puede observar, la cáscara de naranja posee un contenido de lignina de 2,99% lo que es favorable para la elaboración de papel porque reduce el consumo de NaOH y facilita el blanqueo.

En la tabla III-3, se muestran los resultados de los análisis fisicoquímicos realizados a la materia prima en el Instituto de Investigaciones Químicas IIQ.

Tabla III-3: Análisis fisicoquímico de la cáscara de naranja

Parámetro	Muestra materia prima	Unidad	Método de ensayo
Celulosa Total	3,01	%	-
Hemicelulosa	2,70	%	-

Fuente: Elaboración propia, 2025

Como se observa, se realizó análisis a la cáscara de naranja de celulosa total que es la que representa la cantidad de fibras estructurales principales presentes en la cáscara y dio como resultado 3,01% que indica que la cáscara tiene bajo contenido de celulosa en comparación con otros materiales fibrosos como la madera o el bagazo de caña. Además, también se analizó hemicelulosa que son conjunto de polisacáridos que rodean la celulosa y ayudan a unirla con la lignina en la pared celular, el contenido de hemicelulosa fue de 2,70% que sugiere que la cáscara de naranja tiene una estructura débil en comparación a fibras vegetales tradicionales, sin embargo, la presencia de hemicelulosa contribuye a la formación de la hoja de papel y su capacidad de retener agua durante el moldeo.

3.2. Resultados del proceso de obtención de papel a partir de cáscara de naranja

Los resultados del proceso de obtención de papel a partir de la cáscara de naranja de acuerdo al diseño factorial propuesto en el cual se tomó en cuenta como variable dependiente el rendimiento se encuentra plasmados en la tabla III-4.

Para la determinación del rendimiento se basó en la relación de la cantidad de papel seco obtenido y la cantidad cáscara de naranja utilizada.

$$\text{Rendimiento \%} = \frac{m_{\text{papel seco}}}{m_{\text{cáscara de naranja}}} \times 100$$

Tabla III-4: Rendimiento del proceso de obtención de papel a partir de cáscara de naranja

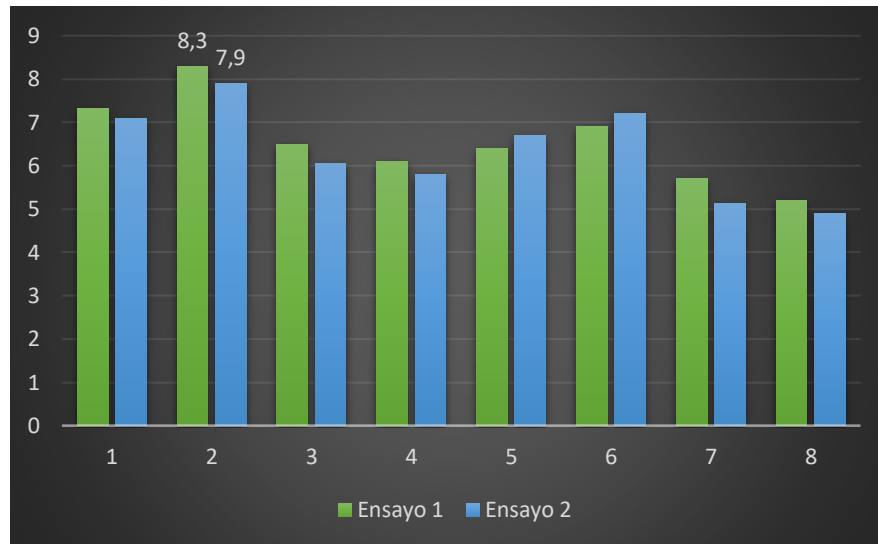
N°	Porcentaje a la Sosa (%)	Tiempo de cocción (min)	Temperatura de cocción (°C)	Rendimiento (%)	
				Ensayo 1	Ensayo 2
1	8	60	100	7,32	7,1
2	12	60	100	8,3	7,9
3	8	90	100	6,5	6,06
4	12	90	100	6,1	5,8
5	8	60	120	6,4	6,7
6	12	60	120	6,9	7,2
7	8	90	120	5,7	5,13
8	12	90	120	5,2	4,9

Fuente: Elaboración propia, 2025

En la tabla III-4 se pueden observar los resultados de los rendimientos de cada uno de los 8 experimentos más su réplica los cuales oscilan entre 4,90% y 8,30%, de los cuales la muestra número 2 y su réplica son las que presentaron un mejor rendimiento con 8,30% y su réplica 7,9%, lo que indica que las condiciones ideales para obtener un buen rendimiento del proceso de obtención de papel a partir de cáscara de naranja son: 12%

de porcentaje de sosa, 60 minutos de tiempo de cocción y 100°C de Temperatura de cocción.

Figura 3-1: Rendimiento de muestras de papel a partir de cáscara de naranja



Fuente: Elaboración propia, 2025

3.3. Análisis estadístico del diseño factorial en el proceso de obtención de papel a partir de cáscara de naranja

El análisis estadístico se realizó en el programa IBM SPSS (Statistical Package for the Social Sciences) versión 26.0 para Windows ya que permite el tratamiento integrado de todas las fases de análisis de datos obteniendo resultados significativos.

De tal modo, el diseño factorial tiene como objetivo determinar si las variables porcentaje de sosa, tiempo de cocción y temperatura de cocción tiene influencia en el rendimiento del proceso de obtención de papel a partir de cáscara de naranja.

Las variables que son significativas poseen un nivel de confianza del 95% y tienen una cola de significancia del 5%, por lo que cualquier valor menor a 0,05 es la columna de significancia indica que la variable no es significativa en el proceso.

3.3.1. Análisis de varianza del diseño factorial

A continuación, en la tabla III-5 se muestran los datos introducidos al programa de acuerdo al diseño factorial planteado con sus respectivas réplicas.

Tabla III-5: Matriz de experimentos

Nº	Variables independientes			Variable dependiente
	Porcentaje a la sosa (%)	Tiempo de cocción (min)	Temperatura de cocción (°C)	Rendimiento (%)
1	-1	-1	-1	7,32
2	1	-1	-1	8,30
3	-1	1	-1	6,50
4	1	1	-1	6,10
5	-1	-1	1	6,40
6	1	-1	1	6,90
7	-1	1	1	5,70
8	1	1	1	5,20
9	-1	-1	-1	7,10
10	1	-1	-1	7,90
11	-1	1	-1	6,06
12	1	1	-1	5,80
13	-1	-1	1	6,70
14	1	-1	1	7,20
15	-1	1	1	5,13
16	1	1	1	4,90

Fuente: Elaboración propia, 2025

Posteriormente, se realizó el modelo lineal general univariado para analizar la relación entre las variables independientes y la variable dependiente, y de esta manera identificar las variables que tengan un efecto sobre la variable dependiente.

En la tabla III-6, se observan los resultados del análisis preliminar mediante el modelo lineal general univariado, en donde las variables tiempo de cocción, temperatura de cocción y la interacción porcentajealasosa*tiempodecocción son significativas ya que poseen un nivel de significancia menor a 0,05, mientras que la variable porcentaje Sosa y las interacciones porcentajealasosa* temperaturadecocción, tiempodecocción* temperaturadecocción y porcentajealasosa*tiempodecocción*temperaturadecocción no son significativas debido a que se obtuvieron un nivel de significancia mayor a 0,05. Es de este modo que se toma en cuenta solo las variables significativas para realizar el análisis de regresión lineal ya que esta son las que tienen un efecto sobre la variable dependiente.

Tabla III-6: Pruebas de efectos inter-sujetos

Variable dependiente: Rendimiento					
Origen	Tipo III de suma de cuadrados	Gl	Media cuadrática	F	Sig.
Modelo corregido	13,960 ^a	7	1,994	29,358	0,000
Intersección	665,769	1	665,769	9800,629	0,000
Porcentaje a la Sosa	0,121	1	0,121	1,778	0,219
Tiempo de cocción	9,657	1	9,657	142,152	0,000
Temperatura de cocción	3,019	1	3,019	44,441	0,000
Porcentaje a la sosa * Tiempo de cocción	1,087	1	1,087	15,999	0,004
Porcentaje a la sosa * Temperatura de cocción	0,045	1	0,045	0,665	0,438
Tiempo de cocción * Temperatura de cocción	0,001	1	0,001	0,011	0,919
PorcentajealaSosa * Tiempodecocción * Temperaturadecocción	0,032	1	0,032	0,464	0,515
Error	0,543	8	0,068		
Total	680,273	16			
Total corregido	14,504	15			

a. R al cuadrado = ,963 (R al cuadrado ajustada = ,930)

Fuente: SPSS Statistic 26, 2025

3.3.2. Regresión lineal del diseño factorial

La regresión lineal permite predecir el comportamiento de las variables sobre la variable dependiente que es el rendimiento. Para ello, primero se calculó la variable interacción (porcentajealasosa*tiempodecocción) multiplicando las variables existentes, posteriormente se realizó la regresión lineal tomando en cuenta solo las variables significativas y la variable dependiente.

En la tabla III-7, se muestra el resumen del modelo dando como resultado R (correlación múltiple) de 0,974 que indica una correlación positiva y significativa entre las variables predictoras y la variable dependiente, también nos muestra R cuadrado igual a 0,949 lo que sugiere un buen ajuste a los datos y un modelo confiable. Por último, el modelo presentó un error estándar de 0,24860 que indica que los valores predichos poseen un error de $\pm 0,24860$ respecto a rendimiento real.

Tabla III-7: Resumen del modelo^b

Modelo	R	R cuadrado	R cuadrado ajustado	Error estándar de la estimación
1	,974 ^a	0,949	0,936	0,24860
a. Predictores: (Constante), Porcentaje a la Sosa*Tiempo de cocción, Temperatura de cocción, Tiempo de cocción.				
b. Variable dependiente: Rendimiento				

Fuente: SPSS Statistic 26, 2025

En la tabla III-8, se observa el análisis de varianza ANOVA que muestra el nivel de significancia del modelo de regresión.

Como se puede observar los resultados indican que el modelo de regresión lineal es estadísticamente significativo ya que posee un valor de F igual a 74,228 que indica que el modelo explica una parte muy importante de la variabilidad, también posee un nivel de significancia menor a 0,05.

Tabla III-8: ANOVA^a

Modelo		Suma de cuadrados	gl	Media cuadrática	F	Sig.
1	Regresión	13,762	3	4,587	74,228	,000 ^b
	Residuo	0,742	12	0,062		
	Total	14,504	15			
a. Variable dependiente: Rendimiento						
b. Predictores: (Constante), Porcentaje a la Sosa*Tiempo de cocción, Temperatura de cocción, Tiempo de cocción						

Fuente: SPSS Statistic 26, 2025

En la tabla III-9, se observan los coeficientes del modelo de regresión lineal en función a las variables independientes. La constante del modelo es de 6,451 lo que indica que cuando las variables independientes se encuentran en su valor más bajo cercano a cero el rendimiento estimado es de aproximadamente 6,451%. Además, el tiempo de cocción tiene un coeficiente de -0,777 tiene un efecto negativo con un nivel de significancia menor a 0,05, lo que indica que al aumentar el tiempo de cocción manteniendo todas las demás variables constantes, baja el rendimiento. La temperatura de cocción con un coeficiente de -0,434 también con un efecto negativo con un nivel de significancia menor a 0,05, lo cual indica que al aumentar la temperatura de cocción manteniendo todas las variables constantes disminuye el rendimiento y por último la interacción porcentajealasosa*tiempodecocción con un coeficiente -0,261 indica un efecto negativo con un nivel de significancia menor a 0,05, es decir que una mala combinación de la interacción reduce el rendimiento.

Tabla III-9: Coeficientes^a

Modelo		Coeficientes no estandarizados		Coeficientes estandarizados	T	Sig.	95,0% intervalo de confianza para B	
		B	Desv. Error	Beta			Límite inferior	Límite superior
1	(Constante)	6,451	0,062		103,791	0,000	6,315	6,586
	Tiempo de cocción	-0,777	0,062	-0,816	-12,500	0,000	-0,912	-0,641
	Temperatura de cocción	-0,434	0,062	-0,456	-6,989	0,000	-0,570	-0,299
	Porcentaje a la sosa*Tiempo de cocción	-0,261	0,062	-0,274	-4,193	0,001	-0,396	-0,125
a. Variable dependiente: Rendimiento								

Fuente: SPSS Statistic 26, 2025

Con los valores numéricos de B es posible tener el modelo matemático de la regresión lineal para el rendimiento, dichos valores son:

Constante = 6,451

Tiempo de cocción= -0,777

Temperatura de cocción = -0,434

Porcentajelasosa*tiempodecocción = -0,261

De este modo, el modelo matemático queda de la siguiente manera:

$$\text{Rendimiento} = 6,451 - 0,777 * X_1 - 0,434 * X_2 - 0,261 * X_3$$

Donde:

X_1 = Tiempo de cocción

X_2 = Temperatura de cocción

X_3 = Porcentajelasosa*tiempodecocción

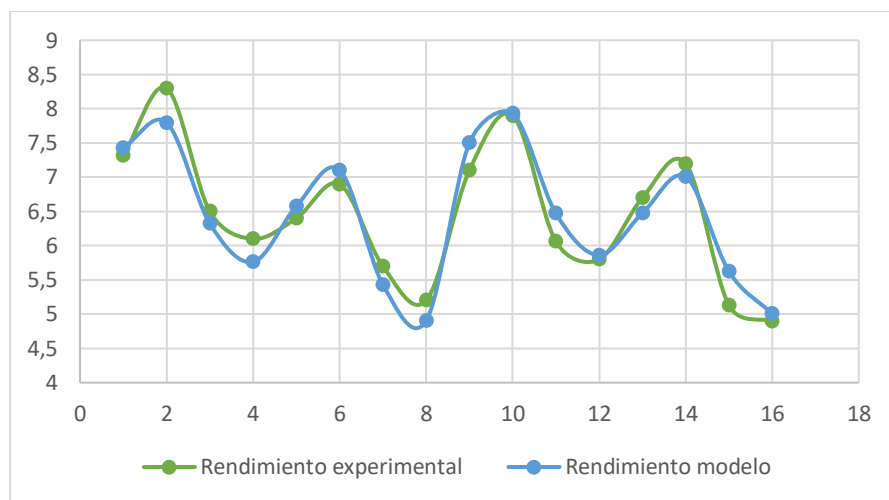
En la tabla III-10, se muestran los datos del rendimiento obtenido experimentalmente y el rendimiento del modelo en el cual se puede observar que no existe una variación significativa.

Tabla III-10: Comparación del rendimiento experimental y rendimiento del modelo

Muestras	Rendimiento experimental	Rendimiento modelo
1	7,32	7,47833
2	8,3	7,79667
3	6,5	6,375
4	6,1	5,76333
5	6,4	6,57667
6	6,9	7,155
7	5,7	5,43333
8	5,2	4,855
9	7,1	7,55167
10	7,9	8,03
11	6,06	6,52167
12	5,8	5,86333
13	6,7	6,47667
14	7,2	7,055
15	5,13	5,62333
16	4,9	4,955

Fuente: Elaboración propia, 2025

En la figura 3-2, se muestra gráficamente el rendimiento experimental y rendimiento del modelo, en el cual se observa que las dos lineal tienen una similitud en su trayectoria lo que significa que no presenta un error muy significativo.

Figura 3-2: Comparación rendimiento experimental y rendimiento modelo

Fuente: Elaboración propia, 2025

3.4. Resultados de la caracterización del papel

Los análisis fisicoquímicos del producto final (papel a partir de cáscara de naranja) fueron realizados en CBO Análises Laboratoriais Ltda., ubicado en Brasil.

Tabla III-11: Análisis fisicoquímico del papel

Ensayo	Resultado	Unidad	Código
Lignina	0,50	%	MA-073 R0
Cenizas	4,02	%	MA-105 R5

Fuente: Laboratorio CBO, 2025

En la tabla III-11, se puede observar que el papel obtenido contiene 0,50% de lignina que es un valor bajo lo cual es muy bueno ya que indica que el proceso de cocción alcalina fue eficiente ya que se logró eliminar la lignina. En cambio, también posee 4,02% de cenizas que es un valor aceptable para papeles a partir de materiales no maderables.

Por otro lado, también se enviaron muestras de papel al instituto de Investigaciones Químicas IIQ de la ciudad de La Paz para la determinación de humedad, alfa celulosa, beta y gamma celulosa.

Tabla III-12: Análisis fisicoquímico del papel

Parámetro	Resultado	Unidad	Método de ensayo
Humedad	10,60	%	Gravimétrico
Alfa celulosa	47,40	%	-
Beta celulosa	19,94	%	-
Gamma celulosa	15,80	%	-

Fuente: Instituto de Investigaciones Químicas, 2025

En la tabla III-12, se puede observar que dicho análisis dio como resultado una humedad de 10,60% el cual es un resultado aceptable ya que esto permite flexibilidad y almacenamiento aceptable. Alfa celulosa de 47,40%, es el componente mas deseado en la pulpa ya que aporta resistencia y estabilidad, el resultado obtenido es muy bueno ya que indica que la cáscara de naranja posee una fracción celulósica importante. Beta celulosa 19,94%, la cual aporta flexibilidad al papel, pero en exceso puede reducir la resistencia mecánica, el resultado obtenido es aceptable ya que permite conservar cierta flexibilidad al papel. Por último, Gamma celulosa 15,80%, encargada de mejorar la formación de la hoja de papel y retención de agua, sin embargo, en exceso reduce la resistencia al agua, el resultado obtenido favorece a la cohesión de las fibras durante el moldeado sin afectar la resistencia.

3.4.1. Determinación de la resistencia a la tracción

Tomando en cuenta los resultados del rendimiento en la cual la muestra 2 fue la que obtuvo mayor porcentaje, se realizó la resistencia a la tracción de dicha muestra en el laboratorio de Física de la Universidad Juan Misael Saracho. Para ello se preparó probetas de papel de 1 cm de ancho y 2 cm de largo. Esto con el objetivo de saber la capacidad del papel para resistir fuerzas de estiramiento sin romperse.

Tabla III-13: Resistencia a la tracción del papel

N° Muestra	Espesor (cm)	Ancho (cm)	Área (cm ²)	Resistencia a la tracción (N/cm ²)		
				Ensayo 1	Ensayo 2	Promedio
Muestra 2	0,019	1	0,019	557,105	635,068	596,087

Fuente: Elaboración propia, 2025

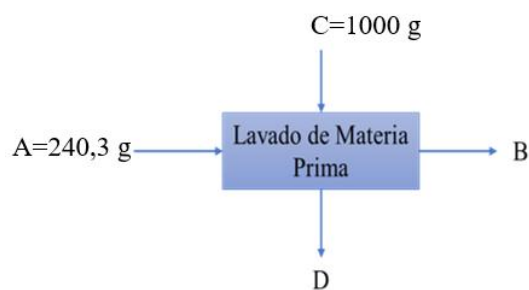
En la tabla III-13, se observa los resultados de la resistencia a la tracción del papel con un promedio de 596,087 N/cm², el cual indica buena resistencia a la tracción, su uso es comparable a hojas bond.

3.5. Balance de materia del proceso de obtención de papel a partir de cáscara de naranja

3.5.1. Etapa de lavado de materia prima

En la figura 3-3, se muestra la operación de lavado de materia prima (cáscara de naranja), para el cual se utilizó 240,3 g de cáscara, la cual contiene 1% de impurezas como pequeños restos de pulpa y se utilizó 1000 g de agua para su lavado, de los cuales 0,5% de agua se fue contenida juntamente con la cáscara a la salida de la corriente B.

Figura 3-3: Etapa de lavado de materia prima



Donde:

A = Peso inicial de cáscara de naranja = 240,3 g

B = Peso cáscara de naranja lavada

$C = \text{Peso de cantidad de agua utilizada} = 1000 \text{ ml}$

$D = \text{Agua residual mas impurezas (considerándose 1\% de impurezas)}$

Considerando $\rho_{\text{agua}} = 1 \text{ g/ml}$

$$A + C = B + D \quad \text{Ec. N°3-1}$$

$$D = (C \times 0,995) + (A \times 0,01) \quad \text{Ec. N° 3-2}$$

$$D = (1000 \text{ g} \times 0,995) + (240,3 \text{ g} \times 0,01)$$

$$D = 997,403 \text{ g}$$

$$240,3 \text{ g} + 1000 \text{ g} = B + 997,403 \text{ g}$$

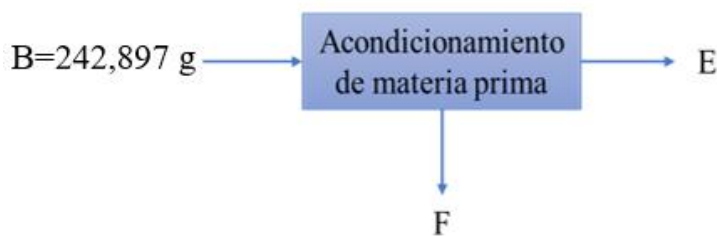
$$B = 240,3 \text{ g} + 1000 \text{ g} - 997,403 \text{ g}$$

$$B = 242,897 \text{ g}$$

3.5.2. Etapa de acondicionamiento de materia prima

En la figura 3-4, se muestra la etapa de acondicionamiento de materia prima, en esta etapa se separó el exocarpio del mesocarpio, que es la parte que se utilizó para la obtención de papel.

Figura 3-4: Etapa de acondicionamiento de materia prima



Donde:

$E = \text{Peso de mesocarpio (Se obtuvo al separarlo del exocarpio)} = 100,8 \text{ g}$

$F = \text{Peso de exocarpio}$

$$B = E + F$$

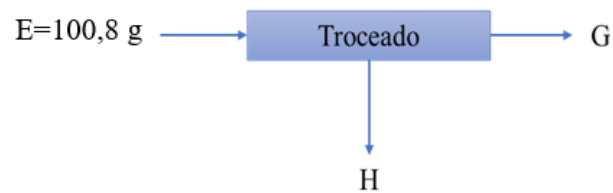
Ec. N° 3-3

$$F = 242,897 \text{ g} - 100,8 \text{ g}$$

$$F = 142,097 \text{ g}$$

3.5.3. Etapa de troceado

Figura 3-5: Etapa de troceado



Donde:

G = Peso de cáscara de naranja troceada

H = Peso de pérdidas (Considerándose 0,1% de pérdidas)

$$H = E \times 0,1\%$$

Ec. N° 3-4

$$H = 100,8 \text{ g} \times 0,1\%$$

$$H = 0,1008 \text{ g}$$

$$E = G + H$$

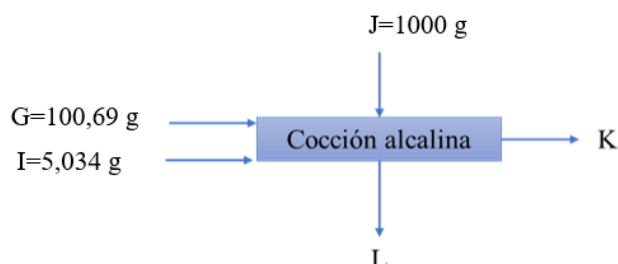
Ec. N° 3-5

$$G = 100,8 \text{ g} - 0,1008 \text{ g}$$

$$G = 100,69 \text{ g}$$

3.5.4. Etapa de cocción alcalina

Figura 3-6: Etapa de cocción alcalina



% Humedad de la cáscara de naranja = $58,34\% = 0,5834$

% de parte seca de la cáscara de naranja = $1 - 0,5834 = 0,4166$

Peso de la cáscara de naranja seca = $41,95 \text{ g}$

Para la cocción alcalina se empleó 12% de hidróxido de sodio en base a la materia prima seca.

Peso de hidróxido de sodio = $0,12 \times 41,95 \text{ g} = 5,034 \text{ g}$ de NaOH

Entonces:

$I = \text{Peso de NaOH} = 5,034 \text{ g}$

$J = \text{Peso de agua destilada} = 1000 \text{ g}$

$K = \text{Peso licor negro mas pulpa} = 985,7 \text{ g}$

$L = \text{Agua evaporada}$

$$G + I + J = K + L$$

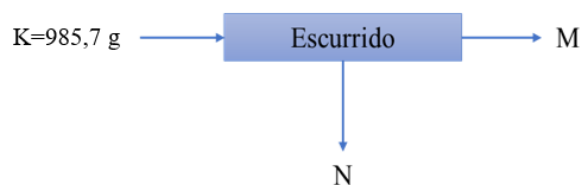
Ec. N° 3-6

$$100,69 \text{ g} + 5,034 \text{ g} + 1000 \text{ g} = 985,7 \text{ g} + L$$

$$L = 120,024 \text{ g}$$

3.5.5. Etapa de escurrido

Figura 3-7: Etapa de escurrido



Donde:

M = Peso de pulpa escurrida = 60,7 g

N = Peso licor negro

$$K = M + N$$

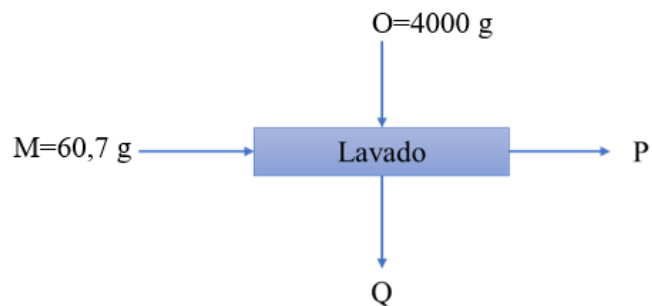
Ec. N° 3-7

$$985,7 \text{ g} = 60,7 \text{ g} + N$$

$$N = 925 \text{ g}$$

3.5.6. Etapa de lavado

Figura 3-8: Etapa de lavado



Donde:

O = Agua destilada = 4000 g

Q = Agua residual

P = Pulpa lavada = 51,6 g

$$M + O = P + Q$$

Ec. N° 3-8

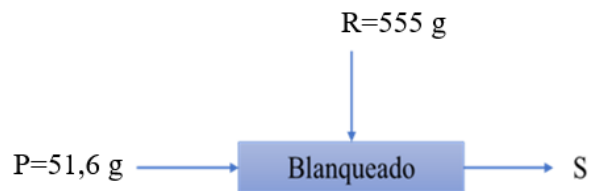
$$60,7 \text{ g} + 4000 \text{ g} = 51,6 \text{ g} + Q$$

$$Q = 4060,7 \text{ g} - 51,6 \text{ g}$$

$$Q = 4009,1 \text{ g}$$

3.5.7. Etapa de blanqueado

Figura 3-9: Etapa de blanqueado



R = Peso de Hipoclorito de sodio = 500 ml

S = Peso pulpa blanqueada más hipoclorito

Siendo la $\rho_{\text{hipoclorito}} = 1,11 \text{ g/ml}$

$$R = 500 \text{ ml} \times \frac{1,11 \text{ g}}{1 \text{ ml}} = 555 \text{ g}$$

$$P + R = S$$

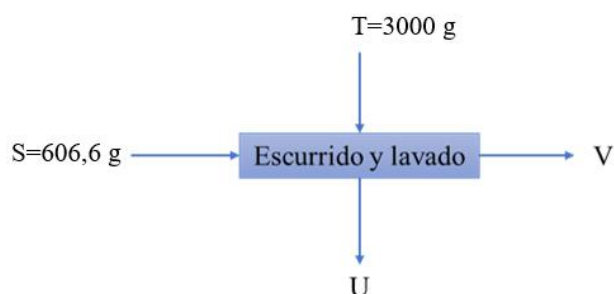
Ec. N°3-8

$$S = 51,6 \text{ g} + 555 \text{ g}$$

$$S = 606,6 \text{ g}$$

3.5.8. Etapa de escurrido y lavado

Figura 3-10: Etapa de escurrido y lavado



Donde:

$T = \text{Agua destilada} = 3000 \text{ g}$

$V = \text{Pulpa blanqueada} = 48,5 \text{ g}$

$U = \text{Agua residual más pérdidas (considerándose pérdidas de 1,5\%)}$

$$S + T = V + U$$

Ec. N° 3-9

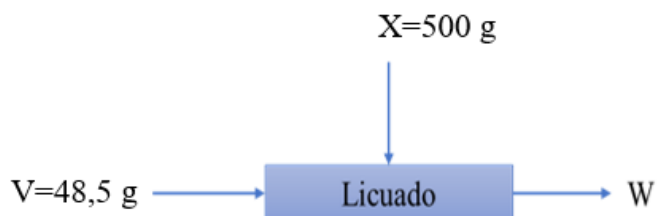
$$606,6 \text{ g} + 3000 = 48,5 + U$$

$$U = 3606,6 \text{ g} - 48,5 \text{ g}$$

$$U = 3558,1 \text{ g}$$

3.5.9. Etapa de licuado

Figura 3-11: Etapa de licuado



Donde:

W = Peso de pulpa desfibrada más agua

X = Agua destilada = 500 g

$$V + X = W$$

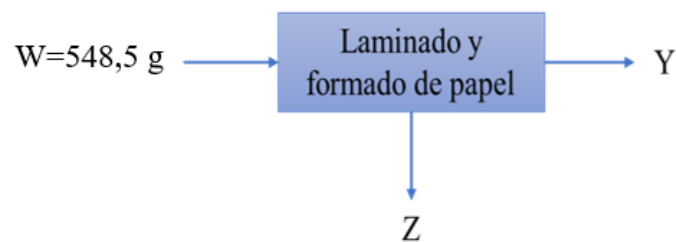
Ec. N° 3-10

$$W = 48,5 \text{ g} + 500 \text{ g}$$

$$W = 548,5 \text{ g}$$

3.5.10. Etapa de laminado y formado de papel

Figura 3-12: Etapa de laminado y formado de papel



Donde:

Z = peso de agua más pérdidas

Y = Peso de papel seco = 20,05 g

$$W = Y + Z$$

Ec. N° 3-11

$$548,5 \text{ g} = Z + 20,05 \text{ g}$$

$$Z = 528,45 \text{ g}$$

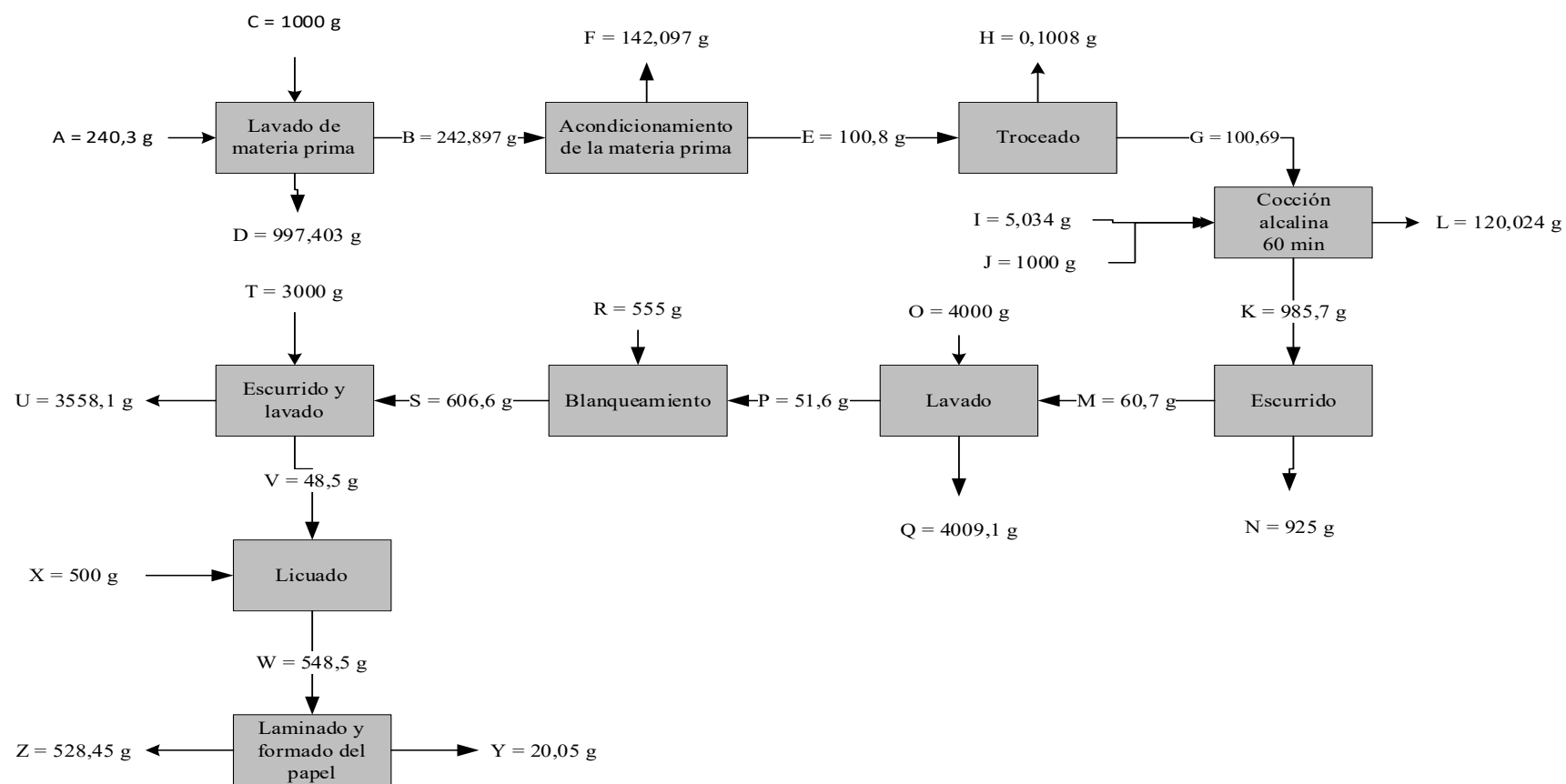
A continuación, se encuentra el cálculo del rendimiento

$$\text{Rendimiento \%} = \frac{m_{\text{papel seco}}}{m_{\text{cáscara de naranja}}} \times 100$$

$$\text{Rendimiento \%} = \frac{20,05 \text{ g}}{240,3 \text{ g}} \times 100$$

$$\text{Rendimiento \%} = 8,3 \%$$

Figura 3-13: Resumen del balance de materia del proceso de obtención de papel a partir de cáscara de naranja



Fuente: Elaboración propia, 2025

Tabla III-14: Resumen de balance de materia de cáscara de naranja

N°	Entrada			Proceso	Salida		
	Nombre	Flujo masico	Cantidad (g)		Nombre	Flujo masico	Cantidad (g)
1	Peso inicial (Cáscara de naranja)	A	240,3	Lavado de materia prima	Peso de cáscara de naranja lavada	B	242,897
2	Peso de cáscara de naranja lavada	B	242,897	Acondicionamiento de materia prima	Peso de mesocarpio	E	100,8
3	Peso de mesocarpio	E	100,8	Troceado	Peso de cáscara troceada	G	100,69
4	Peso de cáscara troceada	G	100,69	Cocción alcalina	Peso de licor negro más pulpa	K	985,7
5	Peso de licor negro más pulpa	K	985,7	Escurreido	Peso de pulpa escurrida	M	60,7
6	Peso de pulpa escurrida	M	60,7	Lavado	Peso de pulpa lavada	P	51,6
7	Peso de pulpa lavada	P	51,6	Blanqueado	Peso pulpa blanqueada más hipoclorito	S	606,6
8	Peso de pulpa blanqueada más hipoclorito	S	606,6	Escurreido y lavado	Peso de pulpa blanqueada	V	48,5
9	Peso de pulpa blanqueada	V	48,5	Licuado	Peso de pulpa desfibrada más agua	W	548,5
10	Peso de pulpa desfibrada más agua	W	548,5	Laminado y formado de papel	Peso de papel seco	Y	20,05

Fuente: Elaboración propia, 2025

3.6. Balance de energía del proceso de obtención de papel a partir de cáscara de naranja

3.6.1. Balance de energía en la etapa de cocción

Para esta etapa se utilizó una cocina eléctrica por un tiempo de 60 minutos a una temperatura de 100°C

$$E = P_{cocina\ electrica} \times t$$

Donde:

E = Energía eléctrica suministrada

P_{cocina} = Potencia de la cocina eléctrica

t = tiempo de uso

$$P_{cocina} = 1500\text{ W} = 1,5\text{ kW}$$

$$t = 60\text{ minutos} = 1\text{ h}$$

$$E = 1,5\text{ kW} \times 1\text{ h}$$

$$E = 1,5\text{ kWh}$$

$$E = 1,5\text{ kWh} \times \frac{3600\text{ kJ}}{1\text{ kWh}}$$

$$E = 5400\text{ kJ}$$

La energía consumida en la etapa de cocción es 5400 kJ.

3.6.2. Balance de energía en la etapa de licuado

Para esta etapa se utilizó una licuadora por un tiempo de 2 minutos a temperatura ambiente.

$$E = P_{licuadora} \times t$$

Donde:

E = Energía eléctrica suministrada

P_{licuadora} = Potencia de licuadora

t = tiempo de uso

$$P_{licuadora} = 500\text{ W} = 0,5\text{ kW}$$

$$t = 2 \text{ minutos} = 0,03 \text{ h}$$

$$E = 0,5 \text{ kW} \times 0,03 \text{ h}$$

$$E = 0.015 \text{ kWh}$$

$$E = 0.015 \text{ kWh} \times \frac{3600 \text{ kJ}}{1 \text{ kWh}}$$

$$E = 54 \text{ kJ}$$

La energía consumida en la etapa de licuado fue de 54 kJ.

Tabla III-15: Resumen del balance de energía

Equipo	Proceso	Consumo energético (kWh)
Cocina eléctrica	Cocción	1,5
Licuada	Licuado	0,015

Fuente: Elaboración propia, 2025

CAPÍTULO IV
COSTOS DEL PRODUCTO

4. COSTOS DE PRODUCTO

4.1. Costos de materiales

A continuación, en la tabla IV-1 se detallan los costos de los materiales utilizados para la obtención de papel a partir de cáscara de naranja.

Tabla IV-1: Costos de materiales

Nº	Materiales	Capacidad/Tamaño	Cantidad	Costo (Bs)
1	Olla	7 litros	1	350
2	Cuchillo	Mediano	2	50
3	Papel filtro	Pliegue	1	6
4	Termómetro	-10 a 300 °C	1	150
5	Espátula	Pequeño	1	20
6	Tabla	30 x 30 cm	1	0
7	Tela	1 m	4	56
8	Colador	Mediano	1	15
9	Balde	10 l	2	18
10	Jarra	1 l	1	10
11	Desecador	Mediano	1	10
12	Marco	22 x 28 cm	1	40
13	Ph metro	-	1	170
Total				895

Fuente: Elaboración propia, 2025

4.2. Costos de reactivos y materia prima

En la tabla IV-2, se encuentran los costos de materia prima y reactivos de acuerdo al balance de materia del proceso de obtención de papel a partir de cáscara de naranja.

Tabla IV-2: Costos de materia prima y reactivos

N°	Detalle	Cantidad	Unidad	Costo unitario (Bs.)	Costo (Bs.)
1	Cáscara de naranja	0,24	kg	0	0
2	Hidróxido de sodio	0,00503	kg	120	0,6036
3	Hipoclorito de sodio	0,500	L	17	8,5
Total					9,1036

Fuente: Elaboración propia, 2025

4.3. Costos de análisis fisicoquímicos

En la tabla IV-3, se detallan los costos de cada uno de los análisis fisicoquímicos realizados a la materia prima y al producto final, los cuales fueron realizados en distintos laboratorios.

Tabla IV-3: Costos de análisis fisicoquímicos

N°	Detalle		Costo (Bs.)
1	Cáscara de naranja	Humedad	40
2		Ceniza	70
3		Densidad	50
4		pH	25
5		Lignina	1255
6		Celulosa total	400
7		Hemicelulosa	200
8	Papel a partir de cáscara de naranja	Lignina	1255
9		Ceniza	100
10		Humedad	50
11		Alfa celulosa	300
12		Beta celulosa	300
13		Gamma celulosa	300
Total			4345

Fuente: Elaboración propia, 2025

4.4. Costos de consumo energético

En la tabla IV-4, se detalla el costo del consumo energético utilizado en el proceso de obtención de papel a partir de cáscara de naranja.

Tabla IV-4: Costos de consumo energético

Nº	Proceso	Consumo energético (kWh)	Costo total (Bs.)
1	Cocción	1,5	1,35
2	Licuada	0,015	0,0135
Total			1,3635

Fuente: Elaboración propia, 2025

En la tabla IV-5, se tiene detalles sobre los costos adicionales como investigación, transporte, impresiones, etc.

Tabla IV-5: Costos de material de apoyo y mano de obra

N°	Detalle	Precio unitario (Bs.)	Unidades	Cantidad	Costo (Bs.)
1	Investigación en internet	189	Mes	8	1512
2	Transporte	2,5	Pasaje	400	1000
3	Impresión	0,35	Hoja	1350	472,5
4	Empastado	4	Empastado	50	200
4	Mano de obra como investigador	17	Hora	600	10200
Total					13384,5

Fuente: Elaboración propia, 2025

Para calcular el valor del costo del producto (papel a partir de cáscara de naranja) a escala laboratorio se tomó en cuenta los costos de materia prima, reactivos y costos de consumo energético.

$$\text{Costo total de producto} = (9,1036 + 1,3635)\text{Bs.}$$

$$\text{Costo total de producto} = 10,4671 \text{ Bs.}$$

Por último, se tiene la tabla del costo total del proyecto.

Tabla IV-6: Costos total del proyecto

N°	Detalle	Costo (Bs.)
1	Costo de materiales	895
2	Costo de materia prima y reactivos	9,1036
3	Costo de análisis físicoquímicos	4345
4	Costo de consumo energético	1,3635
5	Costo de material de apoyo y mano de obra	13384,5
Total		18634,9671

Fuente: Elaboración propia, 2025

CAPÍTULO V

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1. Conclusiones

De acuerdo a lo propuesto en el presente trabajo de investigación, se logró la obtención de papel a escala laboratorio a partir de cáscara de naranja. De tal modo se concluye que:

- La cáscara de naranja usada como materia prima presentó las siguientes propiedades fisicoquímicas: 2,26% de Ceniza, 0,95 g/ml de densidad, 58,34% de humedad, un pH de 5,26, dichos análisis fueron realizados en el C.E.A.N.I.D., por otro lado, también se realizaron análisis en el Instituto de Investigaciones Químicas IIQ que dieron como resultado 3,01% de celulosa total y 2,70% de hemicelulosa, y por último, también se analizó el contenido de lignina en la cáscara de naranja en el Laboratorio CBO el cual determinó que la cascara de naranja posee 2,99% de lignina.
- Se determinó el proceso adecuado para la obtención de papel a escala laboratorio mediante el método cualitativo por puntos que dio como resultado que el proceso a la sosa debido a la aplicabilidad del proceso y la disponibilidad de los equipos en el Laboratorio de Operaciones Unitarias lo que conlleva un costo menor, también tiene un fácil acceso a la materia prima.
- Una vez determinado el proceso de obtención de cáscara de naranja se seleccionó las variables del proceso, esto se realizó en base a referencias bibliográficas, dichas variables son: Porcentaje de Sosa, Tiempo de cocción y Temperatura de cocción.
- El papel obtenido a partir de la cáscara de naranja presento las siguiente propiedades fisicoquímicas: 0,50% de Lignina, 4,02% de Ceniza, dichos análisis fueron realizados en el Laboratorio CBO, además, también se realizaron análisis en el Instituto de Investigaciones Químicas IIQ que dieron como resultado 10,60% de Humedad, 47,40% de Alfa celulosa, 19,94% de Beta celulosa, 15,80% de Gamma celulosa.

- Se determinó el rendimiento del proceso de producción de papel a partir de cascara de naranja a escala laboratorio y se logró obtener 8,3% de rendimiento con 12% Porcentaje de sosa, 60 minutos de cocción a una temperatura de 100°C.
- El costo estimado de obtención del producto a escala laboratorio fue de 10,4671 Bs. para obtener 20,05 g de papel.

5.2. Recomendaciones

A continuación, se encuentran las recomendaciones posteriores a la realización del presente trabajo de investigación:

- Se recomienda a estudiar distintos procesos de obtención de celulosa con el objeto de incorporar nuevos procesos para obtener papel con mejores características.
- Se recomienda a realizar investigaciones orientadas al aprovechamiento del licor negro generado durante la cocción alcalina, a través de la evaporación donde se transforma el subproducto en el principal motor de energía, con el fin de reducir el impacto ambiental.
- Se recomienda realizar el proyecto en un lugar ventilado, contando con todas las medidas de seguridad.
- Se recomienda realizar cuidadosamente el cambio de etapa para no perder la pulpa de papel.
- Realizar investigaciones considerando alternativas sostenibles para el blanqueo de la pulpa y de esta manera evitar el cloro.
- Evaluar la incorporación de aditivos naturales como el almidón para mejorar la resistencia del papel.