

**PREFACTIBILIDAD TECNO-ECONÓMICA DEL USO DE AGUA SUBCRÍTICA
PARA LA OBTENCIÓN DE COMPUESTOS DE VALOR AGREGADO A PARTIR
DE LA PIEL Y SEMILLAS DE LA UVA ISABELLA**

**MARÍA ISABEL GALVIS MENESES
SARAH SOFIA RESTREPO POTES**

**UNIVERSIDAD DEL VALLE
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA
SANTIAGO DE CALI**

2024

**PREFACTIBILIDAD TECNO-ECONÓMICA DEL USO DE AGUA SUBCRÍTICA
PARA LA OBTENCIÓN DE COMPUESTOS DE VALOR AGREGADO A PARTIR
DE LA PIEL Y SEMILLAS DE LA UVA ISABELLA**

**MARÍA ISABEL GALVIS MENESES
SARAH SOFIA RESTREPO POTES**

**PROYECTO DE GRADO PRESENTADO PARA OPTAR AL TÍTULO DE
INGENIERA QUÍMICA**

DIRECTOR:

VICTOR FERNANDO MARULANDA CARDONA, Ph.D.

**UNIVERSIDAD DEL VALLE
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA
SANTIAGO DE CALI**

2024

DEDICATORIA

Dedicado a mis padres, por ser siempre la luz en mi camino.

Maria Isabel Galvis Meneses

A mí mamá, que estuvo ahí para cada llanto y victoria.

Sarah Sofía Restrepo Potes

AGRADECIMIENTOS

Quiero agradecer a Dios por guiarnos en cada paso, a mis padres Víctor y Nubia por ser mi soporte y motivación desde el primer día, ellos son el pilar de mi vida. Agradezco a Carolina, Veronica y Sarah, por haber sido un gran apoyo en el desarrollo de mí como estudiante, sin ellas hubiera sido imposible.

Agradezco a la Universidad del Valle por ser mi segundo hogar por años, por darme la oportunidad de formarme como profesional y en donde viví muchas experiencias que hicieron la persona que soy ahora. Gracias a Víctor Marulanda, director del proyecto, por guiarnos en la materia y por su paciencia.

Maria Isabel Galvis Meneses

Quiero agradecer inicialmente a Dios por permitirme llegar hasta aquí a pesar de todos los obstáculos, por la sabiduría y el entendimiento con el que me llenó cada día. Gracias a mi mamá, mi abuela, mi tía y Félix por haberme acompañado a lo largo de estos años con su apoyo y amor incondicional, sin ellas nunca lo hubiera logrado. También a Juanjo, que está en el cielo acompañándome en cada momento del día.

Así mismo quiero agradecer a mi alma máter, la Universidad del Valle, por permitirme ser la profesional que soy el día de hoy. No me puedo imaginar haber pasado los mejores años de mi vida en otro lugar que no fuera aquel que me vio crecer, formarme y encontrar a tantas personas que marcaron mi vida.

También quiero agradecer a mi compañera Maria Isabel Galvis por sus aportes y acompañamiento a lo largo de todo este año. Gracias por permitirme realizar con ella este maravilloso trabajo, en el que pusimos todo nuestro esfuerzo, dedicación y entrega. Al profesor Nilson Marriaga, por sus enseñanzas acerca del diseño de procesos, que fue lo que más motivó mi interés por la Ingeniería Química. A mí director de tesis, el profesor Víctor Marulanda por sus enseñanzas acerca del tema estudiado. De igual forma, a todos los amigos y compañeros que me acompañaron en este camino.

Sarah Sofia Restrepo Potes

RESUMEN

La uva Isabella (*Vitis Labrusca L.*) contiene una considerable cantidad de compuestos fenólicos distribuidos en las semillas (8.11 %) y en la piel (0.75 %). Estos son reconocidos por tener actividad antioxidante mayor a la de la catequina estándar. Así mismo, el material se encuentra constituido por ácidos grasos (8.26 % en semillas y 0.35 % en piel) y polímeros (71.77 %) que se pueden hidrolizar en azúcares reductores. Dichos componentes son beneficiosos para la ingesta humana y pueden ser altamente valorizables.

Por esta razón, se propuso un diseño conceptual en *Aspen Plus* que implementó agua subcrítica tanto en la extracción de 0.76 t/año-operativo de compuestos fenólicos y 19.95 t/año-operativo de aceites vegetales, como en la hidrólisis para la obtención de 519.91 t/año-operativo de azúcares reductores, empleando como materia prima 978.30 toneladas al año de piel y semillas de la uva Isabella procesada en la industria vinícola del Valle del Cauca.

La extracción se realizó según lo reportado en literatura en una columna de destilación semicontinua a 130 °C y 30 bar, puesto que el simulador no contaba con columnas de extracción que operaran de ese modo, obteniendo así un rendimiento de 2.79 % para compuestos fenólicos y 80.21 % para aceites. Por su lado, la hidrólisis se realizó partiendo de lo registrado en la bibliografía en un reactor semicontinuo a 210 °C y 100 bar para un rendimiento del 61.5 % en la obtención de azúcares reductores.

Finalmente, se definieron tres escenarios diferentes para determinar la prefactibilidad del proyecto: en el primero se consideró incorporarlo en una destilería existente, por lo que no se cotizaron equipos auxiliares. En el segundo, se asumió que este se lleva a cabo en una planta independiente. Y en el tercero, se realizó un análisis de sensibilidad estimando que costo de logística y transporte de la materia prima lo hacía no preliminarmente viable. De esta manera, se estableció que el proyecto es prefactible tecno-económicamente y atrayente a inversionistas con un periodo de retorno previo a los 5 años en los dos primeros escenarios. Por su lado, en el tercero los costos en logística y transporte debían ser elevados (2 292 USD/t) para así obtener un retorno a la inversión posterior a dicho periodo.

Palabras clave: *Diseño conceptual, prefactibilidad tecno-económica, agua subcrítica, hidrólisis, extracción, uva Isabella, potencial bioactivo, compuestos fenólicos, aceites vegetales y azúcares reductores.*

ABSTRACT

Isabel grape (*Vitis Labrusca L.*) contains a significant amount of phenolic compounds distributed in the seeds (8.11%) and in the skin (0.75%). These are recognized for having a higher antioxidant activity than standard catechin. Additionally, the material is composed of fatty acids (8.26% in seeds and 0.35% in the skin) and polymers (71.77%) that can be hydrolyzed into reducing sugars. These components are beneficial for human consumption and can be highly valuable.

For this reason, a conceptual design was proposed in Aspen Plus that implemented subcritical water both in the extraction of 0.76 t/year of phenolic compounds and 19.95 t/year of vegetable oils, as well as in the hydrolysis to obtain 519.91 t/year of reducing sugars, using 978.30 tons per year of Isabella grape skin and seeds processed in the wine industry of the Valle del Cauca as raw material. The extraction was carried out as reported in the literature in a semi-continuous distillation column at 130°C and 30 bar since the simulator did not have extraction columns operating in that manner, resulting in a yield of 2.79% for phenolic compounds and 80.21% for oils. On the other hand, hydrolysis was performed based on literature data in a semi-batch reactor at 210°C and 100 bar, achieving a yield of 61.5% in the production of reducing sugars.

Finally, three different scenarios were defined to determine the pre-feasibility of the project: in the first scenario, it was considered to incorporate it into an existing distillery, so no auxiliary equipment was quoted. In the second scenario, it was assumed that this would be carried out in an independent plant. In the third scenario, a sensitivity analysis was conducted, estimating that the cost of logistics and transportation of raw materials would make it not preliminarily viable. In this way, it was established that the project is technically and economically feasible and attractive to investors with a payback period of less than 5 years in the first two scenarios. On the other hand, in the third scenario, logistics and transportation costs would have to be high (2 292 USD/t) to achieve a return on investment beyond that period.

Key Words: *Conceptual design, technical-economic prefeasibility, subcritical water, hydrolysis, extraction, Isabel grape, bioactive potential, phenolic compounds, vegetable oils, reducing sugars.*

TABLA DE CONTENIDO

	Pág.
DEDICATORIA.....	III
AGRADECIMIENTOS	IV
RESUMEN.....	V
ABSTRACT.....	VI
1. INTRODUCCIÓN	1
2. MARCO CONCEPTUAL.....	3
2.1 COMPUESTOS VALORIZABLES PRESENTES EN LA PIEL Y SEMILLAS DE LA UVA ISABELLA.....	3
2.2 EXTRACCIÓN E HIDRÓLISIS CON AGUA SUBCRÍTICA	3
3. METODOLOGÍA	5
3.1 CONSULTA BIBLIOGRÁFICA	5
3.2 ESTIMACIÓN DE LA BASE DE DISEÑO	9
3.3 SELECCIÓN DE LA RUTA DE OPERACIÓN.....	11
3.3.1 EXTRACCIÓN DE COMPUESTOS FENÓLICOS Y ACEITES VEGETALES	11
3.4 SIMULACIÓN DEL PROCESO EN <i>ASPEN PLUS</i>	12
3.4.1 MÉTODO TERMODINÁMICO Y CARACTERÍSTICAS DE LOS COMPUESTOS SÓLIDOS	12
3.4.2 EQUIPOS PRINCIPALES	12
3.4.3 VALIDACIÓN CINÉTICA DE LA EXTRACCIÓN E HIDRÓLISIS.....	14
3.4.4 DISEÑO CONCEPTUAL.....	15
3.4.5 EVALUACIÓN ECONÓMICA	16
4. RESULTADOS Y ANÁLISIS.....	17
4.1 POTENCIAL BIOACTIVO DE LA PIEL Y SEMILLAS DE LA UVA ISABELLA	17
4.1.1 PIEL	17
4.1.2 SEMILLAS	19
4.2 COMPOSICIÓN DE LA MATERIA PRIMA.....	24
4.3 CONDICIONES DE OPERACIÓN DEL USO DE AGUA SUBCRÍTICA.....	27
4.3.1 EXTRACCIÓN DE COMPUESTOS FENÓLICOS Y ACEITES VEGETALES	27
4.3.2 HIDRÓLISIS CON AGUA SUBCRÍTICA PARA LA OBTENCIÓN DE AZÚCARES REDUCTORES	28
4.4 FORMULACIÓN DEL DIAGRAMA DE FLUJO	29

4.5	BASE DE DISEÑO	29
4.6	SIMULACIÓN DEL PROCESO EN <i>ASPEN PLUS</i>	30
4.6.1	INGRESO DE COMPUESTOS Y MÉTODO TERMODINÁMICO	30
4.6.2	DISTRIBUCIÓN DEL TAMAÑO DE PARTÍCULA	31
4.6.3	VALIDACIÓN DE LOS PERFILES DE EXTRACCIÓN.....	32
4.6.4	DESCRIPCIÓN DEL DISEÑO CONCEPTUAL PROPUESTO.....	36
4.6.5	INTEGRACIÓN TÉRMICA	46
4.6.6	PROCESO OPERATIVO	47
4.7	PREFACTIBILIDAD DEL DISEÑO CONCEPTUAL	52
5.	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	56
6.	ANEXOS.....	58
7.	REFERENCIAS	70

LISTA DE TABLAS

Tabla 1.	Parámetros independientes del tiempo para el cálculo de la base de diseño	11
Tabla 2.	Perfil fenólico individual de la piel de la uva Isabella (mg/100 peso base seca)	18
Tabla 3.	Capacidad antioxidante (por métodos DPPH, CUPRAC y HRSA) de la piel de uva Isabella	19
Tabla 4.	Capacidad antioxidante, compuestos fenólicos y flavonoides totales de las semillas de la uva Isabella tras su vinificación.....	20
Tabla 5.	Compuestos fenólicos en la semilla de la uva Isabella tras su vinificación.....	21
Tabla 6.	Concentraciones necesarias para la inhibición del 50% de DPPH (IC50) de extractos de la semilla de la uva Isabella.....	22
Tabla 7.	Concentración de compuestos fenólicos y trans-resveratrol en la semilla de la uva Isabella.....	22
Tabla 8.	Composición de ácidos grasos en las semillas de la uva Isabella.....	22
Tabla 9.	Contenido de polifenoles totales (mg/L equivalente de catequina) y compuestos mayoritarios (mg/L) en los extractos de semillas de la uva Isabella tras vinificación.	23
Tabla 10.	Composición de las semillas y la piel de la uva Isabella	24
Tabla 11.	Datos de literatura sobre la composición de la piel de la uva Isabella.	25
Tabla 12.	Identificación de los compuestos presentes y composición total de la piel de la uva Isabella.	25
Tabla 13.	Datos de literatura sobre la composición de las semillas de la uva Isabella.....	26
Tabla 14.	Identificación de los compuestos presentes y composición total en la semilla de la uva Isabella.	26
Tabla 15.	Estimación de la base de diseño.....	30
Tabla 16.	Distribución de diámetro de partícula de la piel de la uva Isabella.	31
Tabla 17.	Distribución de diámetro de partícula de las semillas de la uva Isabella.....	32
Tabla 18.	Condiciones de operación de la columna semicontinua para validar perfiles de extracción	33
Tabla 19.	Condiciones de operación del reactor semicontinuo para validación cinética. .	34
Tabla 20.	Parámetros cinéticos de la hidrólisis validados.	35
Tabla 21.	Pasos operativos de la columna de destilación semicontinua.....	37
Tabla 22.	Densidades de los compuestos que se separan en el decantador.	45
Tabla 23.	Generalidades del proceso.	48
Tabla 24.	Equipos con más de una función involucrados en el proceso.....	48
Tabla 25.	Costo de instalación de equipos.....	52
Tabla 26.	Costos de servicios industriales.	53

Tabla 27.	Valores requeridos para calcular el WACC.....	54
Tabla 28.	Parámetros de entrada para el análisis económico.....	55
Tabla 29.	Precio de materia prima y productos.	55
Tabla 30.	Resumen del análisis económico.	55

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.	Representación gráfica de las palabras claves del potencial bioactivo de la piel de la uva Isabella.	6
Figura 2.	Representación gráfica de las palabras claves del potencial bioactivo de la semilla de la uva Isabella.	6
Figura 3.	Representación gráfica de las palabras claves para la extracción con agua subcrítica de aceites vegetales y compuestos fenólicos.	8
Figura 4.	Representación gráfica de las palabras clave en la consulta de la hidrólisis con agua subcrítica para la obtención de azúcares reductores	8
Figura 5.	Área cultivada de uva en Colombia entre 2007 y 2017.	9
Figura 6.	Panorama de la producción de uva en Colombia: área sembrada del cultivo de uva entre el 2015 y 2019.	10
Figura 7.	Diagrama general de la estructura de la columna semicontinua.	13
Figura 8.	Diagrama general de la estructura del reactor semicontinuo.	14
Figura 9.	Diagrama de la formulación general del proceso.	29
Figura 10.	Comparación de los perfiles de extracción con agua subcrítica de compuestos fenólicos.	33
Figura 11.	Comparación de los perfiles de extracción con agua subcrítica de aceites vegetales.	34
Figura 12.	Validación del perfil de rendimiento de hidrólisis con agua subcrítica para obtención de azúcares reductores.	35
Figura 13.	Perfil de temperatura de las columnas T-200A y T-200B	38
Figura 14.	Perfil de presión de las columnas T-200A y T-200B	39
Figura 15.	Perfil de composición de vapor del agua en las columnas T-200A y T-200B ..	39
Figura 16.	Perfil de composición de los aceites en las columnas T-200A y T-200B	40
Figura 17.	Perfil de composición de compuestos fenólicos las columnas T-200A y T200B.....	40
Figura 18.	Perfil de composición de c. fenólicos las columnas T-200A y T-200B	41
Figura 19.	Composición de compuestos fenólicos en el recibidor 1	41
Figura 20.	Perfil de temperatura de los reactores R-200A y R-200B	43
Figura 21.	Perfil de composición molar de los azúcares mayoritarios en los reactores R-200A y R-200B.....	43
Figura 22.	Perfil de composición molar de los azúcares minoritarios en los reactores R-200A y R-200B	44
Figura 23.	Perfil de composición de compuestos mayoritarios en los acumuladores de los reactores R-200A y R-200B	44
Figura 24.	Perfil de composición de compuestos minoritarios en los acumuladores de los reactores R-200A y R-200B	45

Figura 25.	Diagrama de rejillas.	47
Figura 26.	Curvas compuestas.....	47
Figura 27.	Diagrama de Gantt del proceso operativo.....	49
Figura 28.	PFD del proceso de extracción con la columna T-200A.	49
Figura 29.	PFD del proceso de extracción con la columna T-200B.....	50
Figura 30.	PFD del proceso de hidrólisis con el reactor R-200A.....	50
Figura 31.	PFD del proceso de hidrólisis con el reactor R-200B.....	51
Figura 32.	Flujo de caja en valor presente neto del proyecto.....	54

1. INTRODUCCIÓN

La industria vinícola produce una gran cantidad de residuos a lo largo de sus procesos (23.27 millones de t/año) (Rojas, 2022), que pueden ser altamente valorizables. En el caso de la uva Isabella, que es la especie más cultivada en el Valle del Cauca con 1 788.30 hectáreas (González, 2021), se reporta que la piel y semillas son un material rico en compuestos fenólicos, con un porcentaje de 0.75 % y 8.11 %, respectivamente (Shi et al., 2004). Estos tienen diversos beneficios para la salud y aplicaciones en la industria.

La piel de la uva se conoce por contener antioxidantes como el ácido gálico, que se ha relacionado con la protección contra enfermedades cardiovasculares y el envejecimiento celular. Además, las semillas de uva son una fuente de aceites ricos en ácidos grasos (8.26 % p/p). Estos compuestos se utilizan ampliamente en las industrias alimentaria, farmacéutica y cosmética. (Yedro et al., 2015).

Sin embargo, el aprovechamiento de este material no ha sido un tema de mayor atención, puesto que las empresas dedicadas a la producción de vino no realizan un tratamiento diferente a la producción de compostaje, incineración o disposición en vertederos. El desecho inadecuado de material lignocelulósico de la industria vinícola puede tener un impacto ambiental negativo al contribuir a la contaminación del agua debido a la presencia de pesticidas y productos de fermentación con los que tiene contacto directo en el proceso de vinificación (Prado et al., 2014).

Actualmente, se cuenta con alternativas de aprovechamiento de residuos como la hidrólisis ácida y enzimática, donde los azúcares se liberan mediante la acción del catalizador. No obstante, su utilización a gran escala genera preocupaciones ambientales, bajos rendimientos (< 1 %), problemas de corrosión, altos costos de insumos y utilidades en los equipos involucrados en el proceso, tiempos de operación prolongados y degradación de los azúcares que impide su posterior utilización (B. M. Pedras et al., 2019).

No obstante, el uso de agua subcrítica ha generado interés en los últimos años a fin de extraer compuestos de valor a partir de distintos tipos de biomasa sin recurrir a ningún tipo de catalizador y sin degradar los productos (Álvarez-Viñas et al., 1947). El agua en estado subcrítico es un medio prometedor para la extracción de compuestos fenólicos y aceites, y para la descomposición de la materia orgánica mediante la hidrólisis a fin de obtener azúcares fermentables (Duba et al., 2015a).

Esto presenta ventajas por encima de los métodos tradicionales, puesto que no es un solvente agresivo con el medio ambiente y su uso no requiere de pretratamiento de la biomasa. Así mismo, la degradación de los compuestos a obtener es baja y es de poca generación de residuos (Prado et al., 2014). Sin embargo, se desconoce la magnitud de los indicadores financieros, las dimensiones preliminares de los equipos y el estimativo inicial de servicios industriales requeridos por un diseño conceptual enfocado al uso de dicha técnica, para así generar conocimiento e interés acerca de esta.

Por esta razón, el presente trabajo tiene como propósito definir mediante una consulta bibliográfica el potencial bioactivo de la piel y semillas de Isabella y las condiciones de operación del uso de agua subcrítica en procesos de extracción e hidrólisis para la obtención de compuestos fenólicos, aceites vegetales y azúcares reductores. De esta forma se propone un diseño conceptual de estos procesos, empleando como materia prima la piel y semillas de la uva Isabella procesada en la industria vinícola del Valle del Cauca, para así evaluar su prefactibilidad tecno-económica.

2. MARCO CONCEPTUAL

2.1 COMPUESTOS VALORIZABLES PRESENTES EN LA PIEL Y SEMILLAS DE LA UVA ISABELLA

La piel y las semillas de la uva Isabella se encuentran representadas por tres compuestos valorizables principales: compuestos fenólicos, aceites vegetales y azúcares reductores. Los compuestos fenólicos son un grupo diverso que comprende desde moléculas sencillas como los ácidos fenólicos, hasta polímeros complejos como los taninos condensados. Estos poseen un anillo aromático con un grupo hidroxilo y son sintetizados naturalmente por las plantas como producto secundario (Martín, 2017).

Los aceites vegetales son aquellos que se extraen de varios tipos de semillas oleaginosas, frutas, nueces y cereales. Estos pueden estar saturados (completamente hidrogenados) o tener uno, dos o tres dobles enlaces de configuración cis. Los ácidos grasos saturados principales de los aceites vegetales son el ácido palmítico, ácido oleico y ácido linoleico (Schmid & Ohlrogge, 1996).

Finalmente, los azúcares reductores son los que contienen grupos funcionales capaces de oxidarse. Estos se pueden diferenciar según la ubicación de su respectivo grupo carbonilo funcional. Así mismo, los ángulos de enlace intramoleculares crean estructuras moleculares para estos azúcares, de modo que normalmente no existen como moléculas de cadena lineal sino en configuraciones cíclicas llamadas hemiacetales (como la glucosa) o hemicetales (como la fructosa) (Zoecklein et al., 1990).

2.2 EXTRACCIÓN E HIDRÓLISIS CON AGUA SUBCRÍTICA

Se considera que el agua está en estado subcrítico cuando se encuentra líquida a temperaturas y presiones por debajo de su punto crítico ($T_c = 374.15\text{ }^{\circ}\text{C}$, $P_c = 22.1\text{ MPa}$). La presión del agua subcrítica debe ser mayor que la presión de vapor a una temperatura determinada para mantener el agua en este estado (Cheng et al., 2021). Esta se emplea generalmente en procesos de extracción e hidrólisis para obtener compuestos altamente valorizables.

La extracción con agua subcrítica es una tecnología que se usa para aislar compuestos bioactivos (principalmente antioxidantes) de diferentes materias primas mediante el uso de agua desmineralizada a condiciones subcríticas. La ventaja sustancial de dicha técnica es que el agua es un solvente seguro y de fácil acceso (Gilbert-López et al., 2017).

En cuanto a la hidrólisis con agua subcrítica, es una técnica por la que se puede descomponer material lignocelulósico. Puede usarse como pretratamiento para el fraccionamiento selectivo de celulosa, hemicelulosa y lignina, o como medio reactivo para obtener directamente azúcares a partir de polímeros naturales o moléculas formadas por monómeros denominados monosacáridos (Prado et al., 2014).

A diferencia de otros tipos de hidrólisis, esta no necesita de solventes orgánicos o tóxicos que se deban reciclar, incinerar o desechar, por lo que resulta ser un método favorecedor para el medio ambiente. Así mismo, no requiere pretratamiento de la materia prima y es de corrosión casi nula (Rostagno et al., 2014).

3. METODOLOGÍA

3.1 CONSULTA BIBLIOGRÁFICA

A fin de establecer la composición total e importancia de la obtención de compuestos antioxidantes de la piel y semillas de la uva Isabella se llevó a cabo una búsqueda bibliográfica en la base de datos Scopus de Elsevier, donde el título, resumen y palabras claves debían incluir los términos de búsqueda. Se limitó a únicamente artículos en inglés publicados desde el 2010 hasta el 2022, para así asegurar información reciente y fiable. Las combinaciones de parámetros de búsqueda para la piel y semillas fueron, respectivamente:

TITLE-ABS-KEY ("*vitis labrusca*" OR "*vitis labrusca L.*") AND TITLE-ABS-KEY ("*phenolic compounds*" OR "*antioxidants*" OR "*antioxidant*") AND TITLE-ABS-KEY ("*skin*" OR "*pomance*") AND PUBYEAR > 2009 AND PUBYEAR < 2023 AND (LIMIT-TO (PUBSTAGE , "*final*")) AND (LIMIT-TO (DOCTYPE , "*ar*")) AND (LIMIT-TO (SUBJAREA , "*AGRI*") OR LIMIT-TO (SUBJAREA , "*CHEM*") OR LIMIT-TO (SUBJAREA , "*CENG*") OR LIMIT-TO (SUBJAREA , "*PHAR*")) AND (LIMIT-TO (LANGUAGE , "*English*"))

(TITLE-ABS-KEY ("*vitis labrusca L.*") OR TITLE-ABS-KEY ("*vitis labrusca*") AND TITLE-ABS-KEY ("*oil*") OR TITLE-ABS-KEY ("*seed*") OR TITLE-ABS-KEY ("*seeds*") OR TITLE-ABS-KEY ("*sugars*")) AND PUBYEAR > 2009 AND PUBYEAR < 2023 AND (LIMIT-TO (PUBSTAGE , "*final*")) AND (LIMIT-TO (SRCTYPE , "*j*")) AND (LIMIT-TO (DOCTYPE , "*ar*")) AND (LIMIT-TO (LANGUAGE , "*English*"))

En el caso de la primera combinación se limitó a únicamente artículos publicados por las áreas de ciencias de la agricultura, ingeniería química, química, farmacología, toxicología y ciencias de la farmacéutica. Puesto que, al tener una amplia lista de resultados, se necesitó de una combinación más específica, a fin de filtrar la información.

Posteriormente, se exportaron los resultados obtenidos de cada combinación de parámetros en formato RIS (Sistema de Información de Investigación), que es un archivo de citas bibliográficas. Estos se analizaron en el programa VOSviewer donde se observó que las combinaciones generaron resultados donde la palabra *vitis labrusca L.* tenía una mayor frecuencia en los artículos presentes y sus palabras claves se relacionaban entre sí, lo que permitió validarlas (véase Figuras 1 y 2).

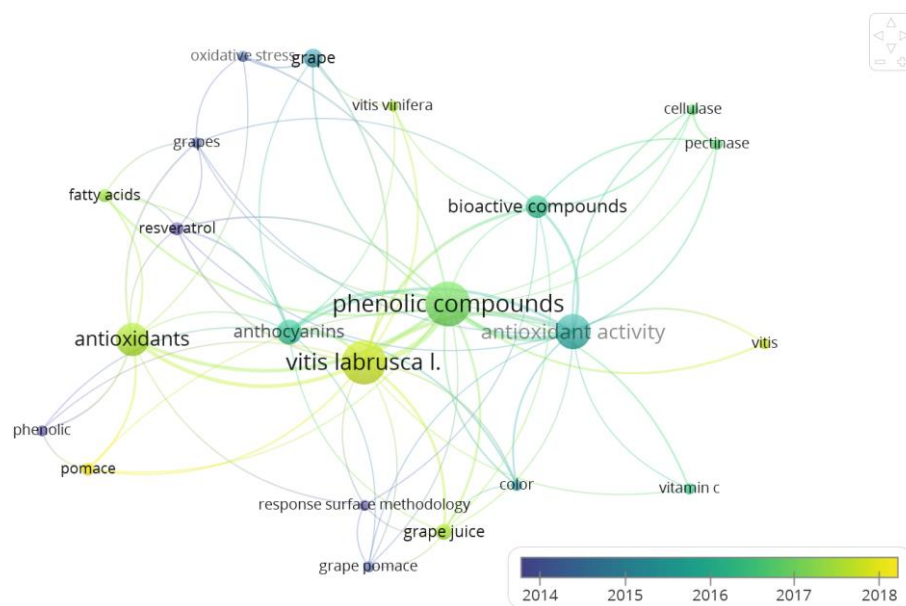


Figura 1. Representación gráfica de las palabras claves del potencial bioactivo de la piel de la uva Isabella.

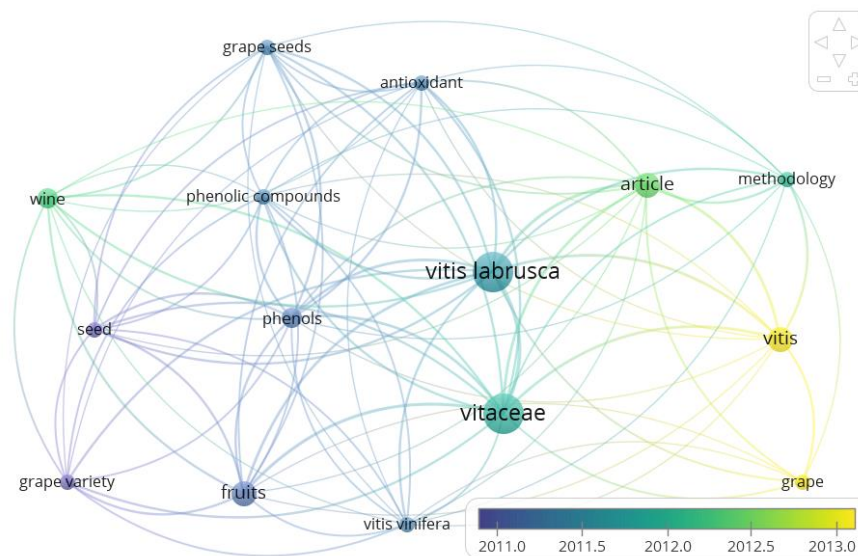


Figura 2. Representación gráfica de las palabras claves del potencial bioactivo de la semilla de la uva Isabella.

Una vez verificadas las combinaciones de parámetros de búsqueda, se empleó el indicador bibliométrico SJR (SCImago Journal Rank) con el fin de comprobar la relevancia, impacto y trascendencia de las revistas que realizaron publicaciones acerca del potencial bioactivo de la piel y semillas de la *vitis labrusca L.* Se descartaron los documentos cuyas

revistas estuvieron ubicadas en los últimos cuartiles (Q₃ y Q₄), pues se consideran de baja importancia o confiabilidad en comparación con las que se encuentran en los primeros dos.

Finalmente se descartaron aquellos artículos que se centraban en otras especies de uva o no se enfocaban en el potencial bioactivo de las semillas y piel de la uva Isabella, puesto que no aportaban información necesaria al estudio.

Ahora bien, para definir las condiciones de operación con las que se realizó el diseño conceptual que implementó agua subcrítica tanto en la extracción de compuestos fenólicos y aceites vegetales como en la obtención de azúcares reductores mediante hidrólisis se establecieron dos combinaciones de parámetros de búsqueda, que son:

(TITLE-ABS-KEY ("extraction") AND TITLE-ABS-KEY ("subcritical water") AND TITLE-ABS-KEY ("oil") OR TITLE-ABS-KEY ("seed oil") OR TITLE-ABS-KEY ("seeds oil") OR TITLE-ABS-KEY ("antioxidant") OR TITLE-ABS-KEY ("antioxidants") OR TITLE-ABS-KEY ("phenolic compounds") AND TITLE-ABS-KEY ("waste") OR TITLE-ABS-KEY ("grapes") OR TITLE-ABS-KEY ("grape") OR TITLE-ABS-KEY ("vitis vinifera") OR TITLE-ABS-KEY ("vitis labrusca")) AND PUBYEAR > 2009 AND PUBYEAR < 2023 AND PUBYEAR > 2009 AND PUBYEAR < 2023

TITLE-ABS-KEY ("grape") AND TITLE-ABS-KEY ("hydrolysis") AND TITLE-ABS-KEY ("subcritical water") AND (TITLE-ABS-KEY ("reducing sugars") OR TITLE-ABS-KEY (sugars) AND TITLE-ABS-KEY (sugar)) AND PUBYEAR < 2023 AND (LIMIT-TO (PUBSTAGE, "final")) AND (LIMIT-TO (DOCTYPE , "ar")) AND LIMIT-TO (SUBJAREA , "CENG") OR LIMIT-TO (SUBJAREA , "CHEM") OR LIMIT-TO (SUBJAREA , "ENER") OR LIMIT-TO (SUBJAREA , "PHAR")) AND (LIMIT-TO (LANGUAGE , "English")) AND (LIMIT-TO (SRCTYPE , "j"))

Así mismo, se realizó un análisis de dichos resultados en VOSviewer, donde se observó que con las combinaciones se obtuvo un conjunto de palabras claves con cohesión entre sí y el agua subcrítica tenía una mayor frecuencia en los artículos presentes (véase Figuras 3 y 4). Finalmente se empleó el índice SJR para excluir las publicaciones cuya revista no formara parte de los cuartiles Q₁ y Q₂ dentro de su área.

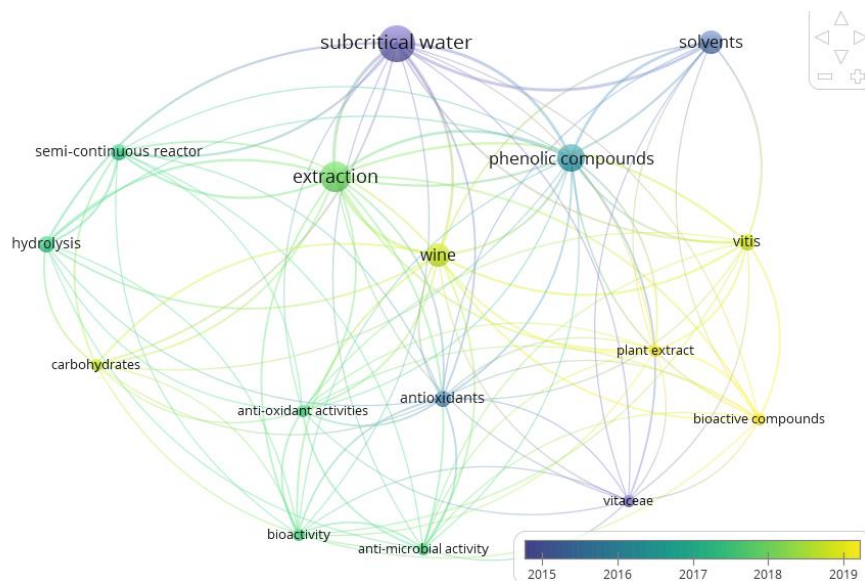


Figura 3. Representación gráfica de las palabras claves para la extracción con agua subcrítica de aceites vegetales y compuestos fenólicos.

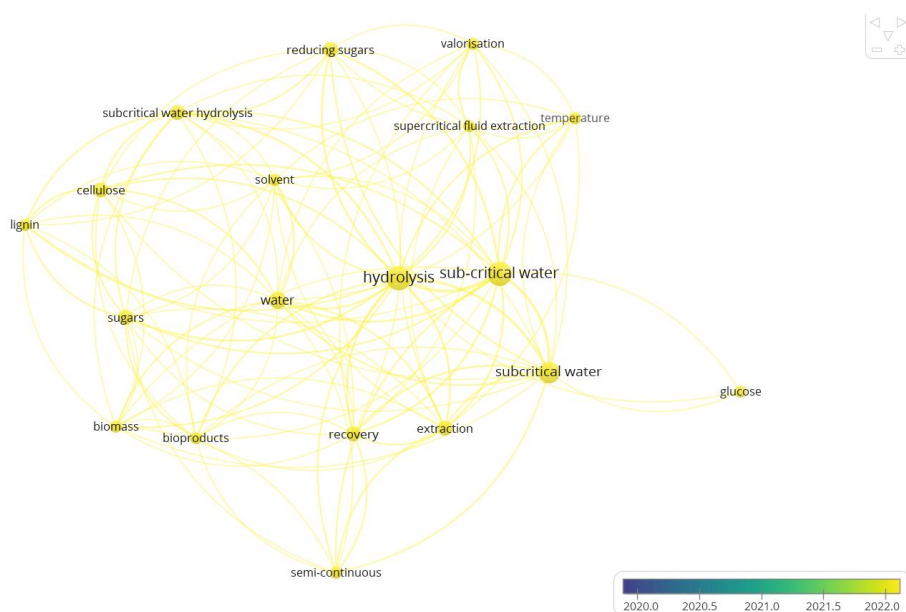


Figura 4. Representación gráfica de las palabras clave en la consulta de la hidrólisis con agua subcrítica para la obtención de azúcares reductores.

Las consultas bibliográficas realizadas permitieron a su vez obtener la composición de la piel y semillas de la uva Isabella. Estas se ajustaron recalculando en base húmeda las fracciones másicas de los compuestos con mayor proporción en el material orgánico según la

literatura asumiendo una base de cálculo de 100 g, a fin de ingresar un flujo con una composición de 100% del material en *Aspen Plus*.

3.2 ESTIMACIÓN DE LA BASE DE DISEÑO

Puesto que la información del número de hectáreas que representan en el Valle del Cauca los cultivos de la uva Isabella es reducida u obsoleta, pues el último reporte fue del 2011 con un valor de 1 151 hectáreas cultivadas (Hernández et al., 2011), se revisó la evaluación agropecuaria municipal realizada por el Ministerio de Agricultura sobre el área de uva cultivada entre 2007 y 2017 en Colombia (véase Figura 5). De esta forma se obtuvo el porcentaje que representó el cultivo de uva Isabella en el Valle con respecto al nacional en 2011 y se consideró que dicha relación es invariable con el tiempo (Ecuaciones 1 y 2).

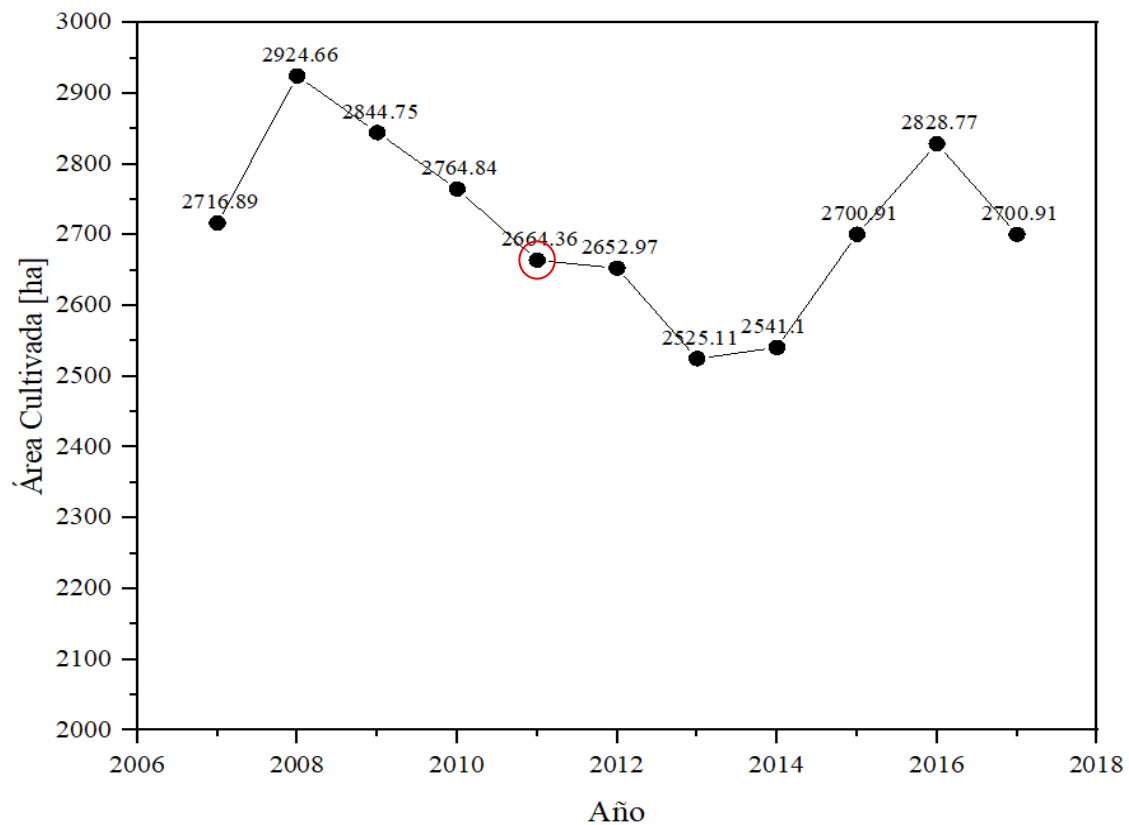


Figura 5. Área cultivada de uva en Colombia entre 2007 y 2017.
(MinAgricultura, 2017).

$$R = \frac{\text{hectáreas de uva Isabella cultivadas en el Valle del Cauca en 2011}}{\text{hectareas de uva cultivadas en Colombia en 2011}} \times 100 \quad (1)$$

$$R = \frac{1\,551}{2\,664.36} \times 100 = 58.21\% \quad (2)$$

Seguidamente, se consultó el panorama de la producción de uva en Colombia más reciente, que está dado por AgroNegocios. Dicha evaluación se realizó en el periodo de 2015 a 2019 (véase Figura 6). De esta forma, con la relación encontrada se calculó el número de hectáreas de uva Isabella cultivadas en el Valle del Cauca para el año 2019, como se ve en las ecuaciones 3 y 4.

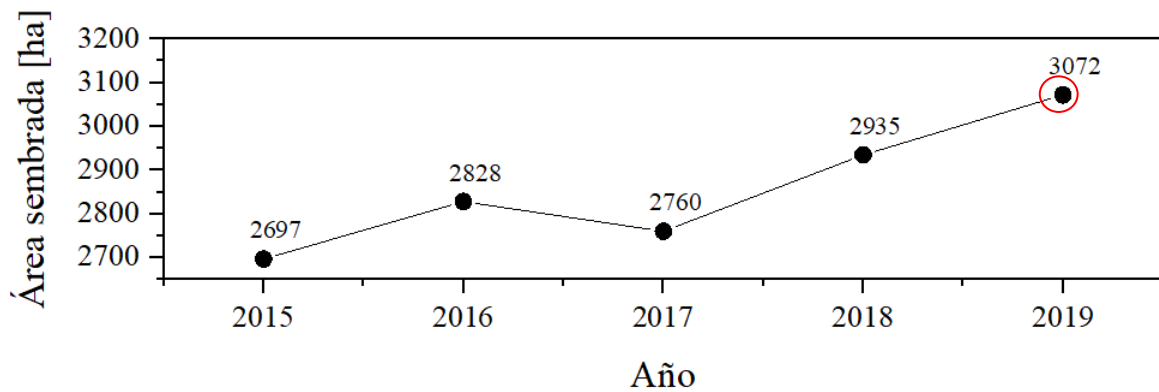


Figura 6. Panorama de la producción de uva en Colombia: área sembrada del cultivo de uva entre el 2015 y 2019. (AgroNegocios, 2021).

$$\begin{aligned} &\text{hectáreas de uva Isabella cultivadas en el Valle del Cauca en 2019} \\ &= R \times \text{hectareas de uva cultivadas en Colombia en 2019} \end{aligned} \quad (3)$$

$$\begin{aligned} &\text{hectáreas de uva Isabella cultivadas en el Valle del Cauca en 2019} \\ &= 58.21\% \times 3\,072 \text{ ha} = 1\,788.30 \text{ ha} \end{aligned} \quad (4)$$

Así mismo, se calculó la cantidad de materia prima con la que se realizó el diseño conceptual teniendo en cuenta la cantidad de uva cultivada que se destina para vinificar, la de residuos que se producen por cada hectárea de cultivo y el porcentaje útil de piel y semillas que representa dicho material luego de su procesamiento (véase Tabla 1).

Tabla 1. *Parámetros independientes del tiempo para el cálculo de la base de diseño.*

Parámetro	Valor	Fuente
Porcentaje de uva sembrada destinada para vinificar	45.59 %	(Organización Internacional de la Viña y el Vino, 2021)
Cantidad de residuos por hectárea de cultivo de uva en el mundo (ton/ha)	5	(Statista, 2022)
Porcentaje de orujo útil (semilla y piel) de uva Isabella resultante de la industria vinícola	40 %	(Rojas, 2022)
Porcentaje que representa la piel y semillas en los residuos	60 %	(Spigno et al., 2017)

Por último, se determinó la influencia del tiempo y las condiciones de conservación en el material orgánico para definir los periodos de almacenamiento, de tal forma que no se viera afectada de forma significativa la cantidad de compuestos fenólicos, ácidos grasos y demás componentes de interés contenidos en este.

3.3 SELECCIÓN DE LA RUTA DE OPERACIÓN

3.3.1 EXTRACCIÓN DE COMPUESTOS FENÓLICOS Y ACEITES VEGETALES

Para la selección de los artículos que permitieran definir las condiciones de operación del diseño conceptual se priorizaron aquellos que contaran con perfiles cinéticos del uso de agua subcrítica en procesos de extracción e hidrólisis, a fin de realizar la validación de las curvas de rendimiento.

En el caso de la extracción de compuestos fenólicos, se encontró un estudio que reunía todos los aspectos necesarios para la simulación y posterior escalamiento del proceso en *Aspen Plus*, empleando como materia prima la piel y semillas de la uva. Sin embargo, para la extracción de aceites no fue posible disponer de un estudio enfocado a la uva con los parámetros necesarios para su análisis. Por esta razón, se optó por utilizar un artículo enfocado a las semillas de girasol, puesto que la composición del material es similar y no influye significativamente en el comportamiento del perfil de extracción (Ravber et al., 2015).

Para la hidrólisis con agua subcrítica, las velocidades de las reacciones y los rendimientos dependen de las características del material orgánico, ya que cada uno cuenta con una composición de polímeros y una estructura de pared celular única, por lo que deben ser estudiados individualmente (Prado et al., 2014). Por esta razón, se priorizaron aquellos artículos que presentaron parámetros cinéticos y perfiles de rendimiento empleando como materia prima la uva, para así realizar la validación cinética.

3.4 SIMULACIÓN DEL PROCESO EN ASPEN PLUS

3.4.1 MÉTODO TERMODINÁMICO Y CARACTERÍSTICAS DE LOS COMPUESTOS SÓLIDOS

Inicialmente se usó la herramienta *Methods Assistant* de *Aspen Plus* a fin de determinar el método base más apropiado para simular la extracción e hidrólisis según los compuestos ingresados al simulador y las condiciones de operación. No obstante, los métodos termodinámicos variaron según cada equipo y proceso que se llevó a cabo.

Así mismo, para el cálculo de la distribución de tamaño de partícula (DTP) de la piel y semillas de la uva Isabella se empleó el simulador *Aspen Plus* debido a que no existen estudios con información de dichos parámetros. Lo anterior se realizó siguiendo los datos obtenidos en literatura para un rango de 3 a 6 mm y un diámetro medio de partícula (D_{50}) para la piel y las semillas de 5 y 3 mm, respectivamente (Milani & Moetamedzadegan, 2010).

Se asumió una distribución normal de tamaño de partícula puesto que en su campo de caracterización esta se usa en gran medida para describir el ancho de dichas distribuciones, cuyo cálculo más común es la desviación normal estándar que generalmente se asume como 1 mm (Horiba, 2010). Dichas suposiciones se realizaron ya que los resultados finales de la prefactibilidad tecno-económica no dependen directamente de estas.

3.4.2 EQUIPOS PRINCIPALES

A pesar de que la extracción de compuestos fenólicos y aceites vegetales se realiza en una columna de extracción mediante un proceso de separación sólido-líquido donde se obtienen constituyentes solubles del sólido mediante la utilización de solventes, para la simulación en *Aspen Plus* de esta operación unitaria se empleó un módulo de destilación semicontinua

(*BatchSep*), puesto que el material sólido se carga y descarga, pero el agua fluye de manera continua a lo largo del proceso de extracción.

BatchSep fue un artificio empleado para replicar las curvas de extracción reportadas en literatura en aras de realizar la cotización del proceso teniendo en cuenta tiempos de operación y parada del equipo, cargue y almacenamiento del material sólido, caso contrario si se realiza con un módulo continuo o ideal. Esto se pudo realizar ya que los compuestos de interés ingresan a la columna en estado líquido y los sólidos se comportan como inertes, pues su composición no varía a lo largo de dicha operación. Sin embargo, este módulo se rige por un equilibrio líquido-vapor y no representa un proceso de extracción sólido-líquido ni permite cotizar un equipo semejante al que se tendría en la realidad, por lo que su cotización se realizó basándose en la literatura.

Este se encuentra conformado por una columna de rectificación, recipientes del producto destilado, un tambor de reflujo, un condensador y un recipiente con chaqueta de calentamiento, puesto que dicho proceso se realiza empleando calor para tener una temperatura que permita la separación de los compuestos de interés (véase Figura 7).

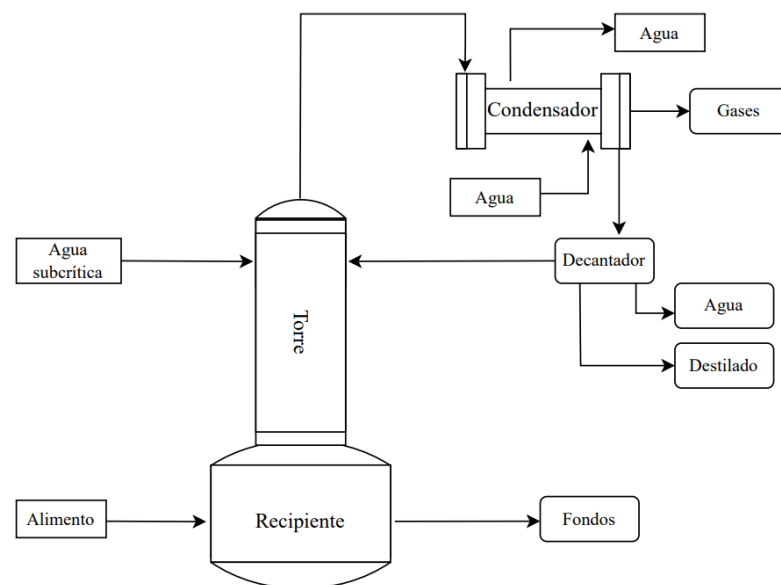


Figura 7. Diagrama general de la estructura de la columna semicontinua.

Por otra parte, a fin de obtener azúcares reductores a partir de la piel y las semillas de la uva se optó por reactores semicontinuos, presentados en *Aspen Plus* como *RBatch*, puesto que estos se emplean para producciones pequeñas, la fabricación de productos costosos y de difícil elaboración. Estos constan de un recipiente donde uno de los reactivos se encuentra en el interior mientras el otro se adiciona de manera continua (véase Figura 8).

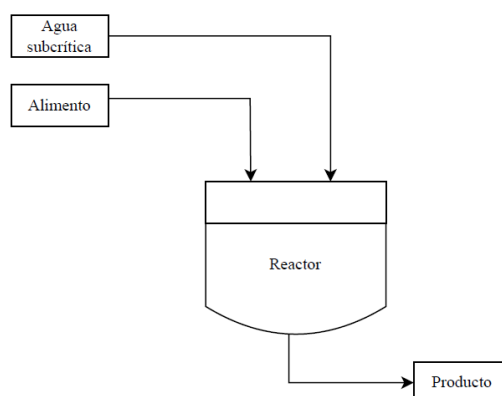


Figura 8. Diagrama general de la estructura del reactor semicontinuo.

3.4.3 VALIDACIÓN CINÉTICA DE LA EXTRACCIÓN E HIDRÓLISIS

La validación de los perfiles de extracción para los compuestos fenólicos y aceites vegetales se realizó simulando en *Aspen Plus* una columna de destilación semicontinua para las condiciones donde se reportó en literatura el mayor rendimiento en la obtención de estos productos, variando el calor aplicado en el recipiente y la temperatura del condensador según el caso. Por su lado, la validación cinética de la hidrólisis se llevó a cabo simulando en *Aspen Plus* un reactor semicontinuo manteniendo la temperatura, presión y relación de materia prima/solvente que permitió obtener, según la consulta bibliográfica, la mayor cantidad de azúcares reductores.

Puesto que no se encontraron reportes de cinética para la hidrólisis del orujo de la uva, se asumió y ajustó de forma manual la constante de velocidad (k_i) de todas las reacciones involucradas según el rendimiento de azúcares para las tres temperaturas estudiadas, puesto que en términos de ingeniería conceptual es válido realizar estas consideraciones a fin de escalar y evaluar tecno-económicamente el proceso.

Se consideró que todas las reacciones siguen un modelo cinético de primer orden (Ecuación 5), puesto que se asumió que la cantidad total de agua es constante debido a la gran

proporción que hay (97 % p/p) con respecto a la materia prima. Se calcularon los parámetros cinéticos según la ley de Arrhenius (Ecuación 6) para cada reacción, mediante una linealización de las constantes de velocidad. Finalmente, se ajustaron los factores pre-exponenciales para que el perfil de rendimiento simulado se ajustara al que se reportó en literatura.

$$\frac{dc_i}{dt} = r_i = k_i c_i^n \quad (5)$$

$$k_i = A_i e^{-\frac{E_a}{RT}} \quad (6)$$

Donde r_i es la velocidad de reacción, dc_i/dt es el cambio en la concentración de azúcares reductores con respecto al tiempo, c_i es la concentración de los polímeros que se van a hidrolizar (g/L), A es el factor pre-exponencial (g/(L·s)), E_a es la energía de activación (J/mol) y R es la constante de los gases ideales (8.314 J/(mol·K)).

3.4.4 DISEÑO CONCEPTUAL

Para el diseño conceptual fue necesaria la operación en paralelo de dos columnas de destilación semicontinua y dos reactores semicontinuos debido a que la cantidad de material orgánico que se va a tratar al día supera las capacidades establecidas en heurísticas para cada equipo (véase Anexo A), pues la naturaleza no continua del proceso hace necesario el procesamiento de más material en menos tiempo.

Dicho proceso se compuso de un bloque de adecuación de materia prima que constó de un secador de aire a condiciones estándar y un molino especial para el tratamiento de materia conformada por antioxidantes, para el posterior almacenamiento de esta en un silo. La adecuación se realizó a fin de evitar la descomposición del material debido a la humedad.

A su vez, se incluyeron bombas e intercambiadores para llevar el agua a condiciones subcríticas y para el enfriamiento de las corrientes líquidas que salen de la cima de las columnas. Un secador de aire comprimido para la materia prima que ingresa al reactor, pues esta debe estar seca en corto tiempo. Un decantador para la separación de las fases acuosa y aceitosa que se destilan de las columnas, un filtro prensa que permitió la separación del material

sólido y el jarabe contenido en agua que salen del reactor y un evaporador para separar el agua del jarabe conformado por los azúcares reductores.

Así mismo, se especificaron los tanques de almacenamiento de agua y productos y los equipos de servicios industriales tales como la caldera, el agua de torre de enfriamiento y la PTAR. Finalmente, se empleó la herramienta *Aspen Energy Analyzer* para el planteamiento de una red térmica y se evaluó con ayuda de *Aspen Plus* la huella de carbono del proceso.

3.4.5 EVALUACIÓN ECONÓMICA

Mediante la herramienta *Aspen Process Economic Analyzer* se realizó el análisis del flujo de caja descontado para un periodo de 12 años, teniendo 10 años de operación y 2 años de construcción y puesta en marcha. Esto permitió a su vez estimar el costo de capital, de instalación de equipos y operativo.

Para las columnas de destilación y los reactores se seleccionó como material de construcción el acero inoxidable 316 (SS 316), debido a que tiene una excelente resistencia a la corrosión, alta durabilidad y resistencia mecánica a comparación de otros aceros inoxidables que tienen contacto con agua en estado subcrítico (Thirumalai Kumaran et al., 2021). No obstante, está demostrado que los aceros inoxidables austeníticos tienden a sensibilizarse por encima de los 300 °C y 20 MPa (Chen et al., 2019) y en el diseño conceptual se tienen condiciones inferiores a estas (130 °C y 3 MPa para las columnas y 210 °C y 10 MPa para los reactores). Por su lado, los productos líquidos se cotizaron según su precio de venta para usos farmacéuticos según *Chemical Book*, ya que se obtuvo una alta pureza en los extractos finales (99 %) (véase Tabla 23), pues se pudo separar de forma sencilla el agua de estos.

Para dicho análisis se evaluaron tres escenarios: en el primero se consideró que el proceso se incorpora en una destilería existente, por lo que no se cotizaron los equipos de servicios industriales (caldera, torre de enfriamiento y PTAR). En el segundo se asumió que para el proceso se construye una planta autónoma. En estos dos se cotizó el precio de transporte de materia prima según lo reportado por el Ministerio de Transporte (MinTransporte, 2020). En el tercero se estableció el precio en logística y transporte que hace no prefactible técnicamente el proyecto que ocurre en la planta autónoma.

4. RESULTADOS Y ANÁLISIS

4.1 POTENCIAL BIOACTIVO DE LA PIEL Y SEMILLAS DE LA UVA ISABELLA

Los compuestos fenólicos de la uva Isabella son los principales responsables de su color, sabor y sensación en la boca (Shi et al., 2004), además de ser compuestos bioactivos beneficiosos en la ingesta humana. Los flavonoides y las antocianinas, por su parte, son los principales compuestos encontrados en el orujo (semilla y piel) de dicha variedad y son reconocidos por tener actividad antioxidante y capacidad antimicrobiana (Ribeiro et al., 2015).

Por esta razón, los estudios sobre la utilización del orujo de la uva *Vitis labrusca* (piel y semillas) como un subproducto valioso pueden revelar nuevas fuentes de antioxidantes naturales para la industria farmacéutica y proporcionar ganancias económicas significativas (Demirkol & Tarakci, 2018). Además, su utilización sería una alternativa viable tanto para reducir la contaminación ambiental como para agregar valor nutricional a los alimentos.

4.1.1 PIEL

La piel de la uva hace parte del subproducto que produce la viticultura y la enología, que alberga individualmente una rica diversidad de compuestos químicos, entre ellos flavonoides, que aportan propiedades antioxidantes a los vinos. Por otro lado, se cuenta con la presencia de ácidos fenólicos que actúan como antioxidantes naturales, protegiendo al mosto y al vino contra la oxidación no deseada (Gomes et al., 2019).

En la vinificación, que representa la mayor participación dentro de las industrias que emplean uva, parte de los compuestos fenólicos de esta se transfieren al vino, pero un alto porcentaje permanece en los residuos de dicho proceso, especialmente en la piel de la uva (Lafka et al., 2007).

Gomes et al. (2018) presentaron la composición polifenólica de los constituyentes individuales de la uva Isabella (véase Tabla 2). Estos identificaron en la piel compuestos fenólicos como flavonoles, ácidos hidroxibenzoicos e hidroxicinámicos, tirosol y taninos condensados.

Tabla 2. Perfil fenólico individual de la piel de la uva Isabella (mg/100 peso base seca)
(Gomes et al., 2019).

Compuesto	Valor
Ácidos hidroxibenzoicos	
Gálico	24.13±0.00
Protocatequico	1.16±0.02
Vainílico	0.54±0.04
Siríngico	3.61±0.03
Elágico	0.81±0.06
Ácidos hidroxicinámicos	
Transcaftárico	5.57±0.43
Caféico	5.41±0.06
<i>p</i> -coumanico	1.85±0.00
Ferúlico	2.59±0.00
Flavonoles	
Miricetina	1.15±0.16
Quercetina	3.66±0.01
Kaempferol	nd
Tirosol	0.54±0.13
Trans-Resveratrol	0.58±0.00
Antocianinas	
Cianidina-3,5-diglucósido	61.10±0.67
Delfinidina-3-O-glucósido	20.71±0.03
Malvidina-3,5-diglucósido	62.88±0.03
Cianidina-3,O-glucósido	12.92±0.00
Peonidina-3-O-glucósido	16.27±0.09
Malvidina-3-O-glucósido	41.90±0.24

Kuck y Noreña (2019) exponen en su investigación tres métodos para determinar la capacidad antioxidante de la piel de la uva Isabella: el DPPH (2,2-Difenil-1-Picrilhidrazilo) que evalúa la captación de radicales libres. El CUPRAC, que mide dicha capacidad haciendo uso de un electrodo como indicador para reemplazar la neocuproína. Finalmente, el método HRSA que reporta la capacidad estabilizadora del radical hidroxilo. Los resultados se

encuentran en la Tabla 3, de la que pudieron concluir que la piel de la uva Isabella presenta actividades antioxidantes del 55% (DPPH), 50% (CUPRAC) y 81% (HRSA), por lo que se considera un material con un alto potencial bioactivo.

Tabla 3. Capacidad antioxidante (por métodos DPPH, CUPRAC y HRSA) de la piel de uva Isabella (Kuck & Noreña, 2019).

Método	Valor
DPPH	3 896.98±44.34 ^a
CUPRAC	8 536.47±104.33 ^a
HRSA (%)	81.30±1.35 ^a

^a expresado en μmol de trolox equivalente (TE)/100 g de muestra en base seca.

Por otro lado, Koca et al., (2021) en su investigación reportan que en la piel de la uva Isabella (*Vitis Labrusca*) hay presencia de componentes como los ácidos triterpénicos, a los que se les ha atribuido numerosas propiedades beneficiosas para la salud y, por tanto, actualmente se estudia su uso en productos farmacéuticos para el tratamiento de enfermedades como el cáncer y la diabetes gracias a sus propiedades hepatoprotectoras, antiinflamatorias y su actividad antitumoral.

Los autores realizaron una extracción de dichos compuestos y obtuvieron un extracto promedio de $351.32 \pm 91.42 \text{ mg/kg}_{\text{piel}}$, valor encontrado en el mismo rango en otras investigaciones, lo que evidencia que hay una cantidad importante de estos que se puede extraer para su uso en industrias alimentarias y farmacológicas (Koca et al., 2021).

4.1.2 SEMILLAS

Las semillas de la uva Isabella obtenida después del proceso de vinificación constituyen una fuente de bajo costo para la obtención de compuestos antioxidantes, aceites vegetales y azúcares reductores. Esto representa grandes ventajas y una reducción en la cantidad de desperdicios generados por la industria vinícola.

La presencia de compuestos fenólicos monoméricos derivados del flavan-3-ol, como (+)-catequinas, (-)-epicatequina y (-)-epicatequina-3-O-galato, así como de procianidinas

diméricas, triméricas y tetrámeras en los extractos obtenidos de las semillas los hace antioxidantes naturales (Rockenbach et al., 2011), antiinflamatorios, antimicrobianos, cardioprotectores, hepatoprotectores y neuroprotectores (Scola et al., 2010). Esto permite que se puedan usar como sustitutos de antioxidantes fenólicos sintéticos, puesto que estos últimos tienen efectos cancerígenos, por lo que su uso se encuentra limitado en algunos países (Scola et al., 2010).

Se descubrió que los extractos flavan-3-ol previenen el daño oxidativo de lípidos y proteínas en los tejidos de la corteza cerebral, el cerebelo y el hipocampo de ratas y mostraron potencial para reducir la incidencia de enfermedades degenerativas asociadas con el estrés oxidativo como el cáncer, la aterosclerosis y las enfermedades neurodegenerativas. A su vez, poseen efectos biológicos tales como la eliminación de radicales libres, la quelación de metales de transición y la modulación de algunas enzimas antioxidantes (Scola et al., 2010).

Rockenbach, et al. (2011) evaluaron la capacidad antioxidante y el contenido de compuestos fenólicos presentes en el orujo proveniente de la vinificación de distintas variedades de uva, entre las que se encuentra la uva Isabella. La cuantificación de estos compuestos se realizó mediante el análisis por cromatografía líquida de alto desempeño (HPLC) (véase Tabla 4). Por su lado, la capacidad antioxidante se evaluó por el método DPPH y de poder antioxidante reductor férrico (FRAP) (véase Tabla 5), donde el primero consiste en la captación de radicales libres y el segundo se basa en el principio de que los antioxidantes son capaces de reducir el ion férrico al estado ferroso.

Tabla 4. Capacidad antioxidante, compuestos fenólicos y flavonoides totales de las semillas de la uva Isabella tras su vinificación (Rockenbach et al., 2011).

Parámetro	Valor
Compuestos fenólicos totales (mg CE ^a /100 g dw)	2 128 ± 19
Flavonoides totales (mg CE ^a /100 g dw)	1 188 ± 125
DPPH (μmol TE ^b /100 g dw)	2 694 ± 32
FRAP (μmol Fe ²⁺ /100 g dw)	2 942 ± 37

^aCE = equivalentes de catequinas. ^bTE = equivalentes de Trolox.
dw = base seca

Tabla 5. *Compuestos fenólicos en la semilla de la uva Isabella tras su vinificación*
(Rockenbach et al., 2011).

Parámetro	Valor
Antocianinas ^a	Nd
Rutina	Nd
Derivados de quercetina (excepto rutina)	Nd
Derivados de kaempferol	Nd
Catequina	24.12± 0.37
Epicatequina	17.78± 0.14
t-resveratrol	3.75± 0.08
Ácido clorogénico	4.62± 0.02

Los valores, en mg/100 g dw.

Nd = no detectado. ^aExpresado como equivalentes de cianidina-3-rutinósido.

Estos encontraron que la catequina fue el compuesto más abundante identificado en las semillas de las variedades de uva analizadas. También se pudo observar que en términos generales la actividad antioxidante de los extractos de las semillas fue mayor que en la piel. Además, el contenido total de flavonoides y actividad antioxidante evaluada por los métodos DPPH y FRAP presentó una correlación positiva ($r = 0.975$). Sin embargo, en el caso de la uva Isabella, la mayor concentración de compuestos fenólicos se presentó en la piel (Rockenbach et al., 2011).

Así mismo, se detectaron en los extractos de las semillas compuestos como el resveratrol y el ácido clorogénico. El primero es un potente antimutagénico, antioxidante, antiinflamatorio y antiproliferativo, así como un inhibidor de la ciclooxigenasa y la hidroxiperoxidasa en diversos sistemas experimentales (Namasivayam, 2011). El segundo es un polifenol abundante en la dieta humana, donde el café, las frutas y las verduras son sus principales fuentes.

Santos et al. (2011) realizaron un estudio donde se cuantificaron los compuestos fenólicos, capacidad antioxidante y composición de ácidos grasos de diferentes partes de distintas variedades de uva, tales como las semillas de la uva Isabella. La cuantificación de compuestos fenólicos se hizo por HPLC, la capacidad antioxidante se evaluó mediante el método DPPH (véase Tablas 6 y 7) y la cuantificación de ácidos grasos se realizó por triplicado frente al éster metílico del ácido tricosanoico como patrón interno (23:0) (véase Tabla 8).

Tabla 6. Concentraciones necesarias para la inhibición del 50% de DPPH (IC50) de extractos de la semilla de la uva Isabella (Santos et al., 2011).

Concentración en fracciones (µg/mL)	Valor
Acetato de etilo	10.11± 0.08
Butanol	55.93± 0.46
Metanol	20.41± 0.12
Hexano	90.67±0.85

Tabla 7. Concentración de compuestos fenólicos y trans-resveratrol en la semilla de la uva Isabella (Santos et al., 2011).

Parámetro	Valor
Compuestos fenólicos (mg EAG/g)	117.32± 2.05
trans-resveratrol (µg/g)	2.35±0.07

Tabla 8. Composición de ácidos grasos en las semillas de la uva Isabella (Santos et al., 2011).

Ácido graso	Valor (mg/100 g)
Ácido palmítico (16:0)	942.44± 29.47
Ácido cis-7-hexadecenoico (16:1n-9)	31.86± 0.77
Ácido margárico (17:0)	8.36± 0.17
Ácido esteárico (18:0)	323.53± 6.96
Ácido oleico (18:1n-9)	1 690.76± 70.01
Ácido vaccénico (18:1n-7)	120.49± 12.46
Ácido linoleico (18:2n-6)	5 890.87± 211.85
Ácido alfa-linolénico (18:3n-3)	56.85± 2.22
Ácido araquídico (20:0)	14.48± 0.86
Ácido eicosenoico (20:1n-9)	12.41± 0.63
Ácido behénico (22:0)	ND
Ácido lignocérico (24:0)	ND
ΣSFA	1 309.78± 31.10
ΣMUFA	1 855.53± 87.49
ΣPUFA	5 947.72± 19.43

PUFA=ácido graso poliinsaturado, MUFA=ácido graso monoinsaturado, SFA=ácido graso saturado, n-6=ácido graso omega-6, n-3=ácido graso omega-3, ND=no determinado

Contario al estudio realizado por Rockenbach et al. (2011) las semillas de la uva Isabella presentaron un mayor contenido de compuestos fenólicos que la piel, tales como la catequina, ácido gálico y epicatequina. A su vez, las semillas presentaron una de las mayores concentraciones de trans-resveratrol entre las variedades estudiadas. Sin embargo, se debe tener en cuenta que las muestras utilizadas en el análisis realizado por Santos et al., (2011) fueron previas a su vinificación

En las semillas de la uva se detectaron las mayores concentraciones de ácidos grasos, siendo los principales el ácido linoleico (LA) y el ácido oleico (OA, 18:1n-9). Por su lado, las semillas de la uva Isabella fueron las que presentaron la mayor cantidad de ácido oleico en contraste con las demás especies analizadas. Dicho aceite se encuentra relacionado con la reducción del nivel de proteínas de baja densidad y, por tanto, la prevención de la arteriosclerosis. Por lo que concluyeron que la semilla de la uva Isabella es una fuente rica de aceite y se puede extraer aceite comestible a partir de esta (Santos et al., 2011).

Scola et al., (2010) evaluaron la posibilidad de extraer compuestos de flavan-3-ol de las semillas de distintas variedades de uva después del proceso de vinificación usando agua como disolvente, entre las que se encuentra la uva Isabella. A su vez, se evaluó la actividad antioxidante de dichos extractos por medio de ensayos in vitro (véase Tabla 9).

Tabla 9. *Contenido de polifenoles totales (mg/L equivalente de catequina) y compuestos mayoritarios (mg/L) en los extractos de semillas de la uva Isabella tras vinificación (Scola et al., 2010).*

Compuestos principales	Valor
Contenido fenólico total	353.20 ± 4.60
Catequina	135.36 ± 0.99
Epicatequina	112.40 ± 0.32
Epigallocatequina	5.64 ± 0.02
Procianidina B1	8.86 ± 0.03
Procianidina B2	3.17 ± 3.64
Procianidina B3	9.72 ± 0.01
Procianidina B4	1.72 ± 0.06
Ácido gálico	6.88 ± 0.04

Dichos autores encontraron que los extractos de las semillas de la uva Isabella presentaron el mayor contenido fenólico total entre las especies estudiadas. Además, observaron que los extractos presentaron una mayor actividad antioxidante que la catequina estándar y una fuerte correlación entre el contenido fenólico y el ensayo DPPH ($r^2 = 0.950$, $p \leq 0.01$), demostrando el potencial de estos como antioxidantes (Scola et al., 2010).

Finalmente, se encontró mediante la consulta bibliográfica que los azúcares reductores de la semilla de uva están involucrados en las funciones corporales y son fuente de energía, por lo que se utilizan como materia prima en la industria alimentaria y farmacéutica. Además, se ha confirmado que azúcares como la galactosa y la fructosa presentan propiedades antioxidantes, ayudando a contrarrestar el estrés oxidativo en sistemas fisiológicos (Cherkas et al., 2020) (Girard et al., 2006).

4.2 COMPOSICIÓN DE LA MATERIA PRIMA

El porcentaje másico que representan las semillas y la piel en la materia prima empleada en el proceso se muestra en Tabla 10. Dicho porcentaje se calculó asumiendo que la materia prima consiste únicamente en la piel y semillas de la uva Isabella, pues es el foco del estudio.

Tabla 10. *Composición de las semillas y la piel de la uva Isabella*
(Toscano et al., (2013).

Componente	Valor (%)
Semillas	27.72
Piel	72.28
Total	100.00

En las Tablas 11 y 12 se presenta la composición de la piel de uva Isabella dada por la literatura y la identificación CAS con la composición total que se ingresó a *Aspen Plus*, respectivamente. Cabe recalcar que se seleccionaron los compuestos que presentaron el mayor porcentaje de composición en la materia prima según lo encontrado en la consulta bibliográfica para el potencial bioactivo.

Tabla 11. Datos de literatura sobre la composición de la piel de la uva Isabella.

Contenido	Valor	Observaciones	Fuente
Humedad	3.06	Agua (%)	(Santos et al., 2011)
Azúcares	18.77	Base húmeda (%)	(Ruales, 2016)
Proteína	0.29	Base húmeda (%)	(Santos et al., 2011)
Lípidos	0.1	Base húmeda (%)	(Santos et al., 2011)
Compuestos fenólicos	0.23	(mg EAG/g) Base seca	(Gomes et al., 2019)
Celulosa	3.31	Base húmeda (%)	(Mendes et al., 2013)
Hemicelulosa	5.00	Base húmeda (%)	(Mendes et al., 2013)
Lignina	0.00	Base húmeda (%)	(Mendes et al., 2013)
Ceniza	0.82	Base húmeda (%)	(Santos et al., 2011)

Tabla 12. Identificación de los compuestos presentes y composición total de la piel de la uva Isabella.

Identificación	Nombre	Tipo	CAS	Valor (%)
	Agua	Convencional	7732-18-5	10.54
Otros	Ceniza (Óxido de calcio)	Convencional	1305-78-8	2.89
Proteínas	L- Leuceína	Convencional	61-90-5	1.03
	Ácido palmítico	Convencional	57-10-3	0.10
Lípidos	Ácido oleico	Convencional	112-80-1	0.08
	Ácido linoleico	Convencional	60-33-3	0.17
	Ácido Gálico	Convencional	149-91-7	0.20
Compuestos	Ácido cafeico	Convencional	331-39-5	0.05
fenólicos	Quercetina	Convencional	117-39-5	0.03
	Ácido transcaftarico	Convencional	-	0.47
	Celulosa	Sólido	-	11.37
	Hemicelulosa	Sólido	-	16.91
Polímeros	Lignina	Sólido	-	0.00
	Glucano	Sólido	-	56.16

La composición de la semilla se calculó igual que como se hizo con la piel. En las Tablas 13 y 14 se encuentran los valores reportados por cada uno de los autores y la

identificación CAS de cada componente para su ingreso en el simulador con los valores de composición ajustados, respectivamente.

Tabla 13. Datos de literatura sobre la composición de las semillas de la uva Isabella.

Contenido	Valor	Observaciones	Fuente
Humedad	9.31	Agua (%)	(Santos et al., 2011)
Ceniza	1.48	Base húmeda (%)	(Santos et al., 2011)
Proteína	6.87	Base húmeda (%)	(Santos et al., 2011)
Lípidos	10.84	Base húmeda (%)	(Santos et al., 2011)
		(Celulosa + Hemicelulosa) Base	(Yedro et al., 2015)
Holocelulosa	36.80	seca (%)	
Lignina	43.80	Base seca (%)	(Yedro et al., 2015)
Compuestos fenólicos	117.32	(mg EAG/g) Base seca	(Rockenbach et al., 2011)
Azúcares	16.07	Base húmeda (%)	(Prado et al., 2016)
Lípidos	10.84	Base húmeda (%)	(Santos et al., 2011)

Tabla 14. Identificación de los compuestos presentes y composición total en la semilla de la uva Isabella.

Identificación	Nombre	Tipo	CAS	Valor (%)
	Agua	Convencional	7732-18-5	7.09
Otros	Cenizas (Óxido de calcio)	Convencional	1305-78-8	1.13
Proteína	L- Leuceina	Convencional	61-90-5	5.23
	Ácido	Convencional	57-10-3	0.91
Lípidos	hexadecanoico			
	Ácido oleico	Convencional	112-80-1	1.64
	Ácido linoleico	Convencional	60-33-3	5.71
	Celulosa	Sólido	-	10.92
Polímeros	Hemicelulosa	Sólido	-	15.54
	Lignina	Sólido	-	31.48

Tabla 14. Identificación de los compuestos presentes y composición total en la semilla de la uva Isabella (continuación).

Identificación	Nombre	Tipo	CAS	Valor (%)
Polímeros	Glucano	Sólido	-	5.33
	Xilano	Sólido	-	5.87
	Arabinano	Sólido	-	0.44
	Manano	Sólido	-	0.38
	Galactano	Sólido	-	0.22
Compuestos fenólicos	Catequina	Convencional	18829-70-4	3.89
	L-epicatequina	Convencional	490-46-0	2.87
	t-resveratrol	Convencional	501-36-0	0.60
	Ácido clorogénico	Convencional	-	0.75

4.3 CONDICIONES DE OPERACIÓN DEL USO DE AGUA SUBCRÍTICA

4.3.1 EXTRACCIÓN DE COMPUESTOS FENÓLICOS Y ACEITES VEGETALES

El uso de agua subcrítica para la extracción de compuestos fenólicos y aceites vegetales a partir del orujo de la uva es un tema que no se ha desarrollado lo suficiente a escala laboratorio o industrial. No obstante, la consulta bibliográfica permitió encontrar estudios donde se presentó la información necesaria para establecer el diseño conceptual.

Se escogieron únicamente artículos que contaban con perfiles de extracción a lo largo del tiempo. A pesar de que dichos estudios emplearon otro tipo de materia prima o variedades de uva distintas a la Isabella, estos permitieron definir las condiciones de temperatura y presión a las que se realiza dicho proceso, debido a que los compuestos de interés no varían significativamente entre material orgánico.

Para validar los perfiles de extracción de compuestos fenólicos se seleccionó el artículo de Duba et al., (2015). En este extrajeron polifenoles de la piel y la semilla de la uva desgrasada haciendo uso de agua subcrítica en un proceso de extracción semicontinuo. Las condiciones de operación empleadas fueron temperaturas de 80, 100 y 120 °C y una presión de 10 MPa. Se

obtuvieron rendimientos máximos de 77 ± 3 mg/g para la piel y 124 ± 1 mg/g para las semillas a 120 °C y una relación material/solvente de 1/120 g/mL. Así mismo, reportaron los perfiles de rendimiento experimental y el modelo ajustado de extracción (Duba et al., 2015a).

Por su lado, a fin de validar los perfiles de extracción de aceites vegetales se empleó el estudio realizado por Rayber et al., (2015). Estos propusieron el uso de agua subcrítica como una alternativa más ecológica para la eliminación simultánea de la fase soluble en agua y el aceite de las semillas de girasol a una presión de 30 bar y temperaturas de 60, 100, 130 y 160 °C. Dicho proceso se realizó de forma semicontinua y se encontró que a 130 °C y una relación material/solvente 1/20 g/mL se obtuvo un rendimiento máximo de 44.3 ± 0.3 % de aceite obtenido en los extractos. De igual forma, presentaron los perfiles cinéticos de extracción (Rayber et al., 2015).

4.3.2 HIDRÓLISIS CON AGUA SUBCRÍTICA PARA LA OBTENCIÓN DE AZÚCARES REDUCTORES

Yedro et al., (2015) llevaron a cabo un fraccionamiento de las semillas de uva mediante hidrólisis con agua subcrítica en un reactor semicontinuo, justo después de realizar una extracción de polifenoles y aceites con una mezcla de etanol/agua (70/30). El proceso se llevó a cabo a 190 °C y 20 MPa, con un flujo de agua de 3 mL/min y un tiempo de residencia de 30 minutos, para un rendimiento máximo de azúcares reductores totales de 23 % en peso. Los autores mostraron los perfiles de rendimiento y una gráfica con la composición de los azúcares individuales (Yedro et al., 2015).

Prado et al., (2014) también realizaron hidrólisis con agua subcrítica de las semillas de uva junto a otros dos residuos de la industria alimentaria en un reactor semicontinuo para la obtención de azúcares fermentables. El proceso se realizó a 258 °C y 20 MPa, con un flujo de agua de 33 mL/min y un tiempo de residencia de 30 minutos, para un rendimiento máximo de azúcares reductores totales de 7 gramos por cada 100 gramos de semillas desgrasadas (Prado et al., 2014).

Finalmente, Pedras et al., (2020) llevaron a cabo la hidrólisis del orujo de uva para vino blanco con agua subcrítica en un proceso semicontinuo a 170, 190 y 210 °C. Los ensayos mostraron que a 210 °C y 100 bar se obtuvo una mayor recuperación de azúcares (49.3 % de

la cantidad total semillas y piel que ingresa). A su vez, presentaron las curvas de rendimiento de la extracción de dichos compuestos. Este fue el artículo seleccionado debido a que se emplearon condiciones moderadas de presión y temperatura en comparación a los otros estudios para un rendimiento mayor en la obtención de azúcares, a pesar de tener un tiempo de residencia superior (180 min) (Pedras et al., 2020).

4.4 FORMULACIÓN DEL DIAGRAMA DE FLUJO

El diseño conceptual inicia con la adecuación de la materia prima y el proceso necesario para llevar al agua hasta las condiciones subcríticas. Debido a que la extracción de compuestos fenólicos y aceites vegetales ocurre a menor temperatura que la hidrólisis, es la primera operación a la que se somete dicho material. Esto a fin de evitar la degradación térmica de aceites y compuestos, que ocurre a 150 °C (Duba et al., 2015b).

Seguidamente se realiza el proceso de hidrólisis en un reactor semicontinuo en el que se extraen los azúcares reductores. Finalmente, se envía el material resultante de este proceso a un incinerador para la alimentación de la caldera de vapor (véase Figura 9)

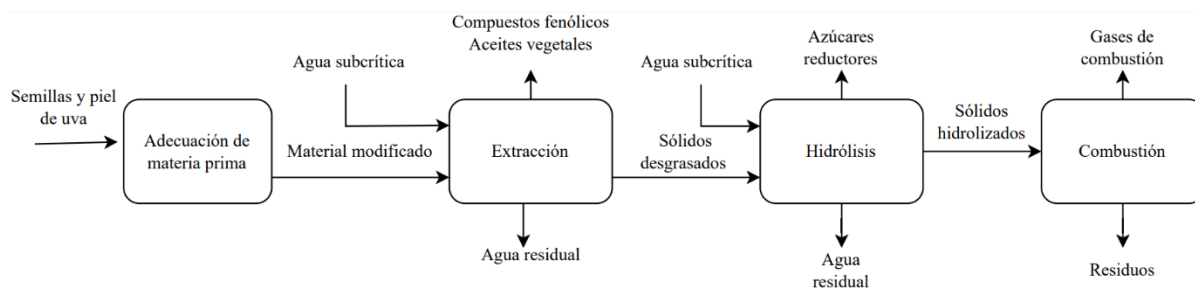


Figura 9. Diagrama de la formulación general del proceso.

4.5 BASE DE DISEÑO

En la Tabla 15 se pueden observar los valores obtenidos de área cultivada de uva Isabella en el Valle del Cauca para el año 2019, la cantidad destinada para vinificar, la de residuos de uva generados y la útil que representa la piel y las semillas.

Tabla 15. Estimación de la base de diseño.

Parámetro	2019
Área de cultivos destinados para vinificar (ha)	815.23
Cantidad de residuos de uva Isabella producidos por la industria vinícola del Valle del Cauca (ton/año)	4 076.27
Cantidad de piel y semillas útil obtenida luego de la vinificación de la uva Isabella (ton/año)	978.30
Cantidad de piel y semillas útil obtenida luego de la vinificación de la uva Isabella (ton/día)	2.68

En cuanto al almacenamiento, Gerardi et al., (2022) analizaron harina seca del orujo de la uva tinta durante un periodo de seis meses, a temperaturas de 4 y 25 °C. Estos encontraron que el almacenamiento prolongado no afectó significativamente el contenido de fenoles totales, polifenoles, ácidos grasos y en general, la actividad antioxidante. Sin embargo, se detectó un ligero aumento en los ésteres volátiles y cetonas después de seis meses a 25°C (Gerardi et al., 2022).

Por esta razón, se decidió que la recepción y almacenamiento de la materia prima se realiza para un periodo de 56 días, puesto que fue aquel donde no se presentó una variación considerable en su composición. Dicho periodo comprende la recepción de 150.10 toneladas de piel y semillas de uva Isabella, que posteriormente deben pasar por un proceso de secado y molienda para su almacenamiento a temperatura ambiente.

4.6 SIMULACIÓN DEL PROCESO EN ASPEN PLUS

4.6.1 INGRESO DE COMPUESTOS Y MÉTODO TERMODINÁMICO

Los compuestos que no se encontraban en las bases de datos de *Aspen Plus*, tales como el ácido transcaftarico y ácido clorogénico se ingresaron mediante sus estructuras en archivos “.mol” y se calcularon los parámetros químicos con TDE (*Thermo Data Engine*) del NIST. Para el caso de los sólidos, también se ingresaron sus estructuras en “.mol” y se evaluaron con el TDE. No obstante, luego se cambió el tipo de compuesto de convencional a sólido, debido

a que este último no permite ingresar estructuras. Finalmente, se completaron los parámetros faltantes para los sólidos según lo reportado por Wooley & Putsche, (1996).

Haciendo uso del *Method Assistant* se seleccionó el método POLYNRTL, puesto que es apropiado para procesos que involucran líquidos subcríticos y cualquier combinación de compuestos polares y no polares que presentan un comportamiento no ideal. Este, a diferencia del NRTL se puede emplear para un amplio rango de presiones y para estimar el comportamiento de polímeros.

4.6.2 DISTRIBUCIÓN DEL TAMAÑO DE PARTÍCULA

La distribución de tamaño de partícula de la piel y semilla de la uva Isabella se encuentra registrada en las Tablas 16 y 17. Los intervalos de dicha distribución son equidistantes y se basaron según lo reportado en la literatura. Estos parámetros fueron necesarios debido a que la simulación del secado y la molienda del material sólido requería de estos.

Tabla 16. Distribución de diámetro de partícula de la piel de la uva Isabella.

Intervalo	Límite superior	Límite inferior	Fracción de peso	Fracción de peso acumulada
	(mm)	(mm)		
1	3	3.3	0.05	0.05
2	3.3	3.6	0.04	0.10
3	3.6	3.9	0.07	0.16
4	3.9	4.2	0.09	0.25
5	4.2	4.5	0.11	0.37
6	4.5	4.8	0.13	0.50
7	4.8	5.1	0.14	0.64
8	5.1	5.4	0.14	0.78
9	5.4	5.7	0.12	0.90
10	5.7	6	0.10	1.00

Tabla 17. Distribución de diámetro de partícula de las semillas de la uva Isabella.

	Límite superior	Límite inferior	Fracción de peso	Fracción de peso acumulada
Intervalo	(mm)	(mm)		
1	3	3.3	0.62	0.62
2	3.3	3.6	0.11	0.73
3	3.6	3.9	0.09	0.82
4	3.9	4.2	0.07	0.89
5	4.2	4.5	0.05	0.93
6	4.5	4.8	0.03	0.97
7	4.8	5.1	0.02	0.98
8	5.1	5.4	0.01	0.99
9	5.4	5.7	0.00	1.00
10	5.7	6	0.00	1.00

4.6.3 VALIDACIÓN DE LOS PERFILES DE EXTRACCIÓN

Los perfiles de extracción de los compuestos fenólicos y aceites obtenidos en la simulación en *Aspen Plus* presentaron un comportamiento similar a los reportados en el artículo seleccionado (véase Figura 10 y 11) según las condiciones de operación empleadas (véase Tabla 18). Sin embargo, se puede observar que el ajuste en ambos casos no fue preciso, debido a que se emplearon perfiles de extracción de estudios que usaban otro tipo materia prima y el módulo con el que se operó es de destilación y no extracción sólido-líquido.

Cabe resaltar que, aunque la validación se realizó de forma individual según las condiciones de operación dadas por cada artículo, al momento de escalar el proceso se seleccionó las del estudio de Revber et al. (2015), pues fueron las más adecuadas en términos de costos operativos.

Tabla 18. Condiciones de operación de la columna semicontinua para validar perfiles de extracción

(Duba et al., 2015b) y (Ravber et al., 2015).

Parámetro	Valor		Unidades
	Compuestos fenólicos	Aceites vegetales	
Temperatura	120	130	°C
Presión	10	3	MPa
Tiempo de extracción	120	120	min
Relación material/solvente	1/120	1/20	g/mL
Número de etapas	5	5	-
Relación de reflujo	5	5	-

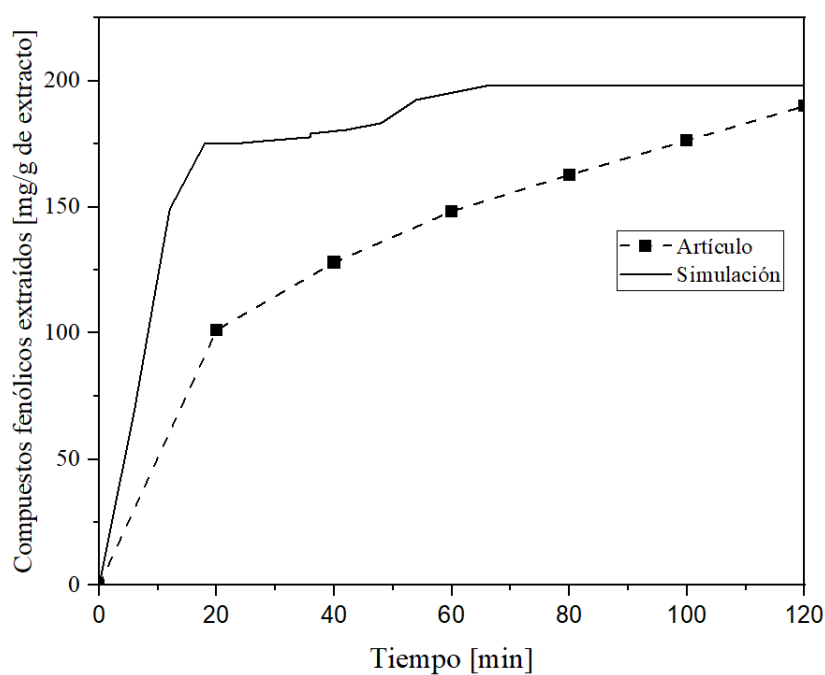


Figura 10. Comparación de los perfiles de extracción con agua subcrítica de compuestos fenólicos.

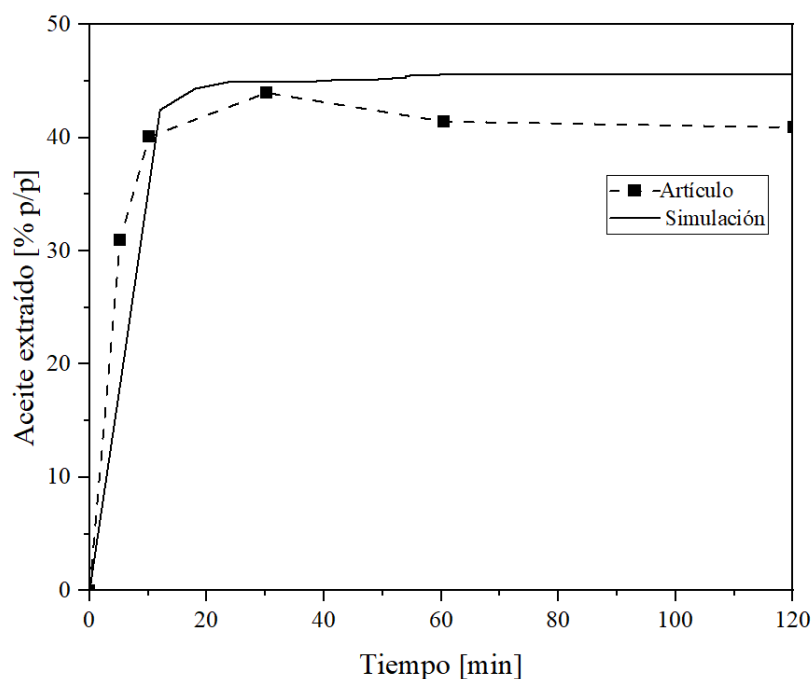


Figura 11. Comparación de los perfiles de extracción con agua subcrítica de aceites vegetales.

En el caso de la validación de la cinética planteada para la hidrólisis (Ecuaciones 7 a 12) dada según las condiciones reportadas por los autores (véase Tabla 19) se observó un mejor ajuste para los rendimientos a lo largo del tiempo (véase Figura 12) en contraste con los que se obtuvo en la extracción. Esto ya que el ajuste manual de los parámetros cinéticos (véase Tabla 20) permitió replicar de forma apropiada dichos perfiles.

Tabla 19. Condiciones de operación del reactor semicontinuo para validación cinética.
(B. Pedras et al., 2017).

Parámetro	Valor	Unidades
Temperatura	170, 190 y 210	°C
Presión	100	bar
Tiempo de hidrólisis	180	min
Material cargado	60	g
Flujo de agua	10	mL/min
Criterio de parada	3	h

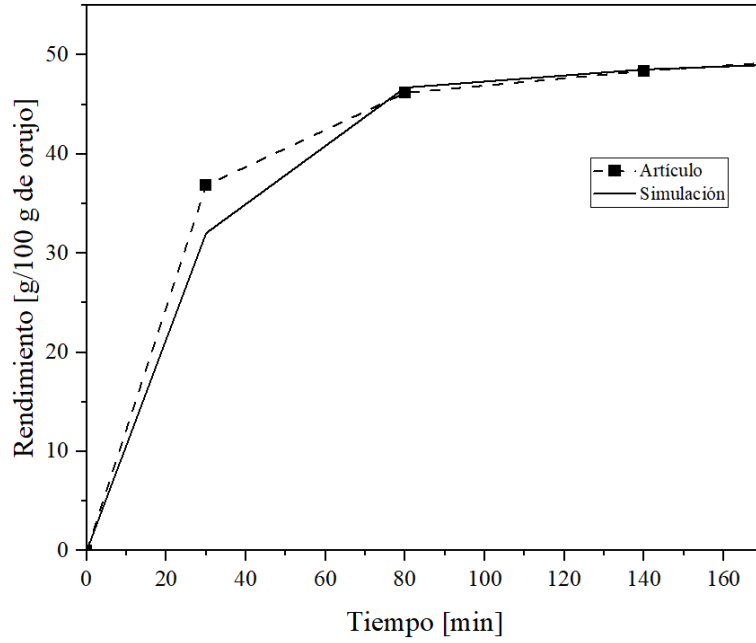


Figura 12. Validación del perfil de rendimiento de hidrólisis con agua subcrítica para obtención de azúcares reductores.

$$r_{XILOSA} = \frac{dc_{XILOSA}}{dt} = k_1 c_{HEMICELULOSA} + k_2 c_{XILANO} \quad (7)$$

$$r_{ARABINOSA} = \frac{dc_{ARABINOSA}}{dt} = k_3 c_{ARABINANO} \quad (8)$$

$$r_{GALACTOSA} = \frac{dc_{GALACTOSA}}{dt} = k_4 c_{GALACTANO} \quad (9)$$

$$r_{MANOSA} = \frac{dc_{MANOSA}}{dt} = k_5 c_{MANANO} \quad (10)$$

$$r_{GLUCOSA} = \frac{dc_{GLUCOSA}}{dt} = k_6 c_{CELULOSA} + k_7 c_{GLUCANO} - k_8 c_{GLUCANO} \quad (11)$$

$$r_{FRUCTOSA} = \frac{dc_{FRUCTOSA}}{dt} = k_8 c_{GLUCANO} - (k_6 c_{CELULOSA} + k_7 c_{GLUCANO}) \quad (12)$$

Tabla 20. Parámetros cinéticos de la hidrólisis validados.

No.	Reacción	A_i	E_{ai} (J/mol)
1	Hemicelulosa + 2 Agua $\rightarrow$ 3 Xilosa	5.74×10^{-16}	10 009.3
2	Xilano + 2 Agua $\rightarrow$ 3 Xilosa	5.74×10^{-15}	10 009.3
3	Arabinano + 2 Agua $\rightarrow$ 3 Arabinosa	8.35×10^{-7}	61 014.2
4	Galactano + 2 Agua $\rightarrow$ 3 Galactosa	7.99×10^{-11}	29 431.2
5	Manano + 3 Agua $\rightarrow$ 4 Manosa	1.51×10^{-16}	13 078.1
6	Celulosa + Agua $\rightarrow$ 2 Glucosa	9.54×10^{-11}	10 825.3
7	Glucano + 2 Agua $\rightarrow$ 3 Glucosa	1.17×10^{-3}	99 062.4
8	Glucano + 2 Agua $\rightarrow$ 3 Fructosa	5.98×10^{-8}	59 168.8

4.6.4 DESCRIPCIÓN DEL DISEÑO CONCEPTUAL PROPUESTO

La preparación de la piel y semillas de la uva para su almacenamiento se realizó en un secador con aire a condiciones estándar y un molino diseñado para el tratamiento del material orgánico. El secador permitió tener una materia prima con una concentración másica de agua de 9.58 % a una con 0.13 % en un periodo de 52 horas. Por su lado, el molino permitió almacenar la materia prima con un diámetro máximo de partícula de 0.5 mm.

El almacenamiento de la piel y las semillas de la uva Isabella se estableció a condiciones estándar en un silo para un tiempo de 56 días. Por su lado el agua, aceites vegetales, compuestos fenólicos y azúcares reductores se almacenaron en tanques cilíndricos verticales operados al 80 % de su capacidad para un tiempo de 15 días a condiciones estándar, según lo estipulado en las heurísticas (véase Anexo A).

Para el escalamiento del proceso de obtención de compuestos fenólicos y aceites vegetales se mantuvo la temperatura, presión y relación materia prima/solvente de 130 °C, 30 bar y 1/20 g/mL, ya que fueron las condiciones donde se obtuvo el mayor rendimiento de aceites con respecto a la cantidad que se alimentó de estos (88 %) sin incurrir en gastos elevados en bombeo de agua y de instalación de equipos.

Puesto que se priorizó que el perfil de temperatura tuviera un incremento controlado para así poder disponer de vapor de calderas como servicio industrial en el rehervidor, el rendimiento disminuyó a un 80 % para aceites, pero aumentó de 0.07 % a 2.79 % para compuestos fenólicos, puesto que la extracción no tiene un comportamiento lineal. Dichos rendimientos se calcularon con respecto a la cantidad de los mismos compuestos de interés que ingresan a la columna y no del material total.

La columna consta de 5 etapas, incluyendo el recipiente de calentamiento y el condensador. Se fijó un calor inicial en la chaqueta del recipiente de 25.12 kJ/s y una temperatura del condensador de 130 °C, puesto que a esa temperatura se evita la degradación térmica de los compuestos fenólicos. Esta tiene tres recibidores, debido a que se ingresaron tres fases válidas. En el primer recibidor se tiene una corriente acuosa con una fracción másica total de aceites, compuestos fenólicos y proteínas de 94.54 %, en el segundo se obtiene agua pura y en el tercero vapor de agua. Estas dos últimas se transportan en una sola corriente a la PTAR, puesto que tiene una pureza del 99 % de agua.

Para el funcionamiento de dicha columna se fijaron 4 pasos operativos: en el primero se carga la materia prima, en el segundo empieza a fluir agua subcrítica, en el tercero se aumenta el calor en la chaqueta térmica para iniciar el proceso de extracción mientras sigue ingresando agua y en el último se realiza el enfriamiento del equipo (véase Tabla 21).

Tabla 21. Pasos operativos de la columna de destilación semicontinua.

Paso operativo	Variable del proceso modificada	Valor	Duración (h)
O-1	Flujo másico de materia prima	2 356.08 kg/h	0.3
O-2	Flujo másico de materia prima	0 kg/h	0.5
	Flujo másico de agua subcrítica	25 445.68 kg/h	
O-3	Servicio en la chaqueta térmica del rehervidor	38 518.6 kJ/s	1
	Flujo másico de agua subcrítica	1 413.65 kg/h	
O-4	Flujo masico de agua subcrítica	0 kg/h	0.1
	Temperatura del condensador	50 °C	

Aunque en una columna de extracción sólido-líquido el proceso de separación ocurre de forma casi isotérmica e isobárica, en la columna de destilación se presentan perfiles de temperatura y presión. Se puede observar que el perfil de temperatura (véase Figura 13) tiene una pendiente más inclinada desde el condensador (etapa 1) a la segunda etapa que en el resto de la columna. Esto se debe a que en el paso operativo 4 (O-4) se disminuyó la temperatura del condensador a 50 °C, puesto que a partir de este paso inicia el enfriamiento de la columna (véase Tabla 21).

Así mismo, la temperatura varía significativamente desde la etapa 2 a la etapa 5, puesto que esta última representa el recipiente de calentamiento, al que se debe aplicar calor a fin de que ocurra la separación de los compuestos de interés. No obstante, los aceites y los compuestos salen de la columna a una temperatura de 114.63 °C, como se puede observar en el Anexo C-1, por lo que se asume que no ocurre degradación térmica.

En el caso del perfil de presión, se puede observar que se encuentra por encima de los 30 bar a lo largo de toda la columna. Así también, se evidencia que la presión aumenta a medida que se desciende por esta hasta el recipiente, puesto que en las últimas etapas aumenta la

fracción de vapor en la columna debido al calor aplicado (véase Figuras 14 y 15). Esto se debe a que, como se empleó un modelo de destilación, la fase vapor debe existir para así separar los compuestos de interés por medio de sus volatilidades (Valdés et al., 2018).

Por su lado, en el perfil de composiciones de los aceites (véase Figura 16) se puede evidenciar que estos se van concentrando en la cima de la columna en fase líquida. En el caso de los compuestos fenólicos (véase Figura 17 y 18) se puede observar que aumenta su composición a medida que suben por la columna y luego baja debido a que su volatilidad es menor a la de los ácidos grasos, por lo que pasan a ser los menos volátiles de la mezcla. Además, su composición en los recibidores no supera el 1 % (véase Figura 19). Sin embargo, en el caso de la quercetina se puede ver que su concentración disminuye en las etapas superiores (véase Figura 18), puesto es el compuesto menos volátil, por lo que sale en la corriente de fondos (Universidad de Alicante, 2016).

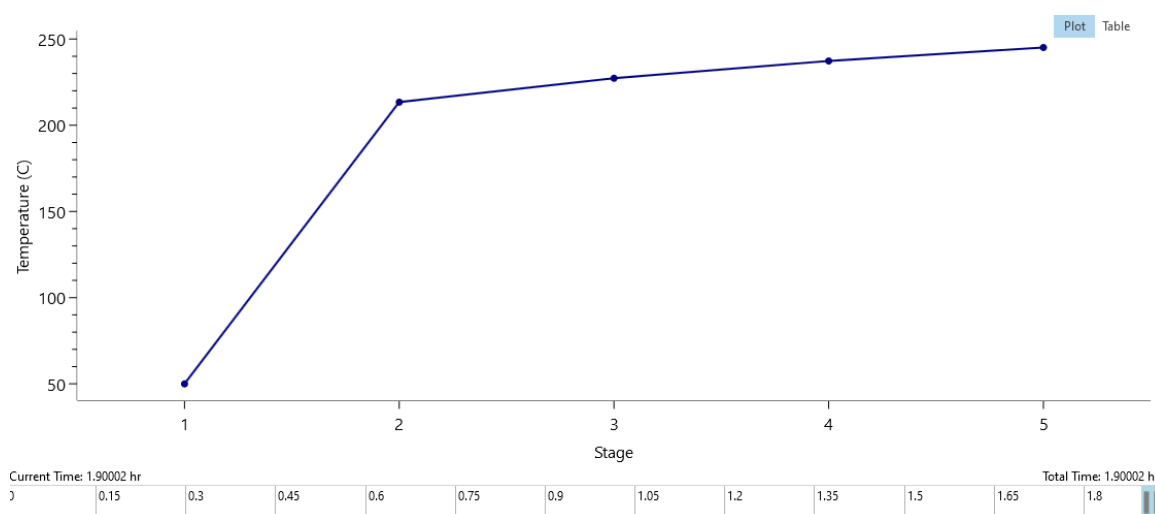


Figura 13. Perfil de temperatura de las columnas T-200A y T-200B.

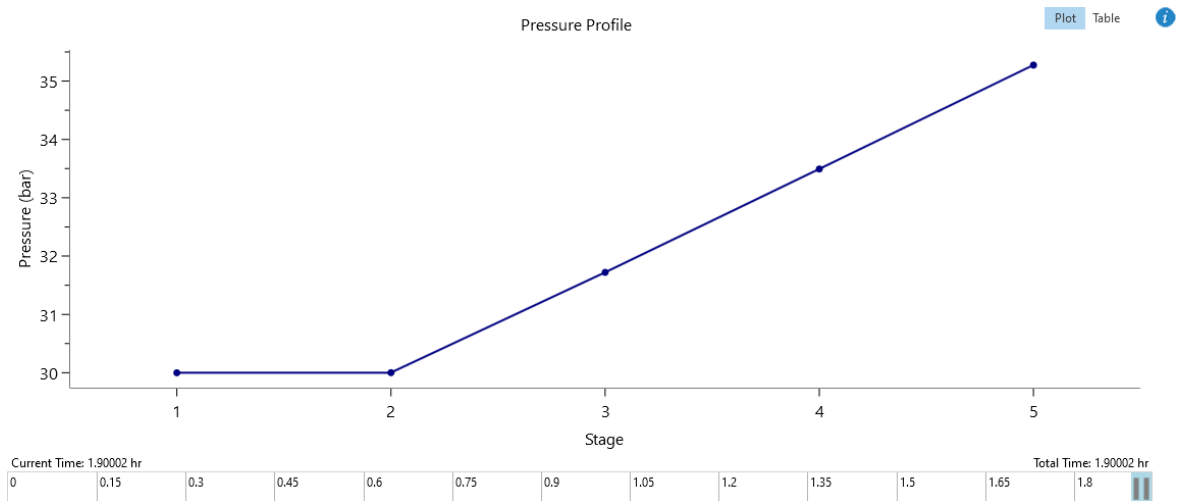


Figura 14. Perfil de presión de las columnas T-200A y T-200B.

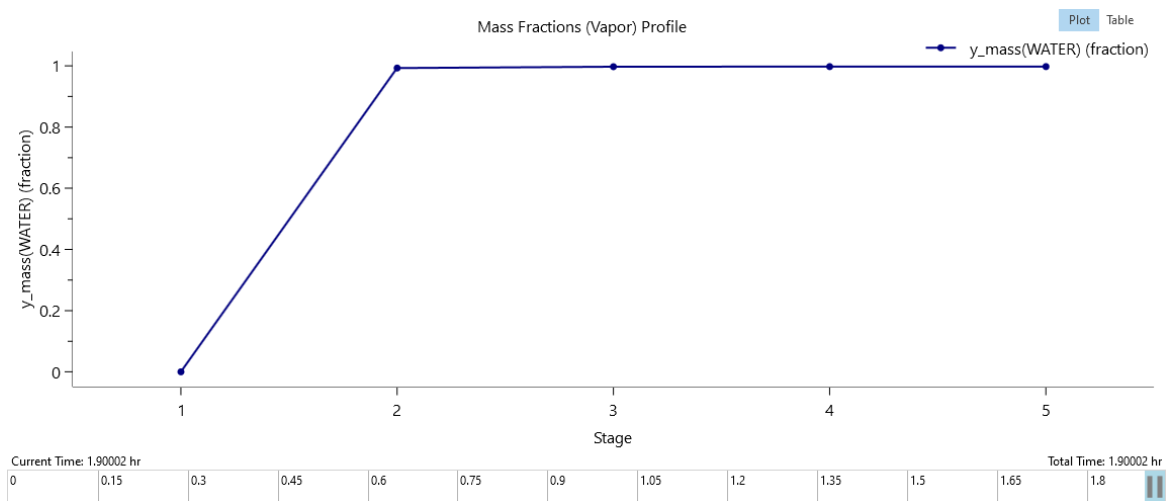


Figura 15. Perfil de composición de vapor del agua en las columnas T-200A y T-200B.

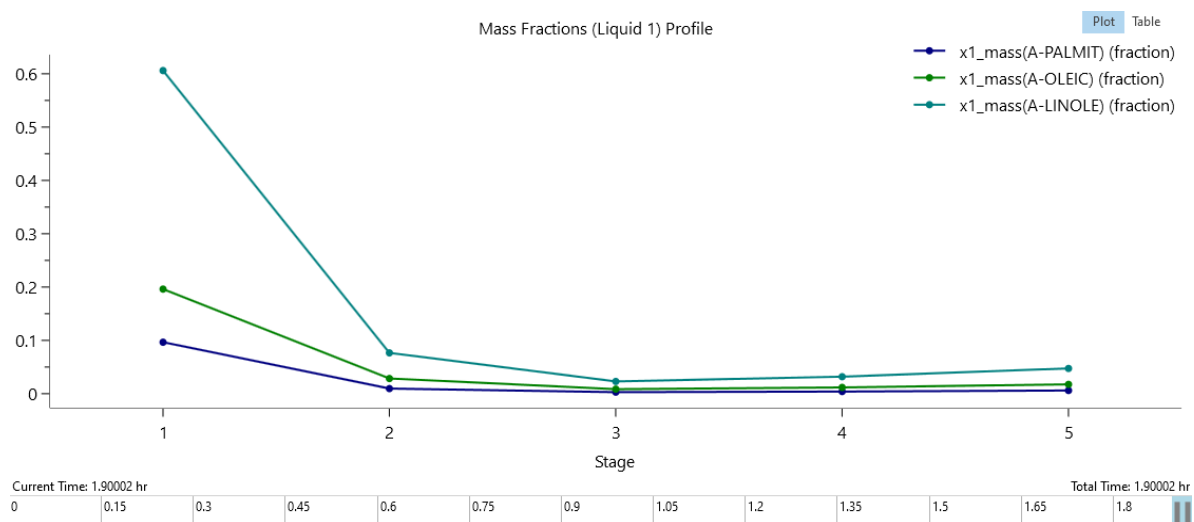


Figura 16. Perfil de composición de los aceites en las columnas T-200A y T-200B.

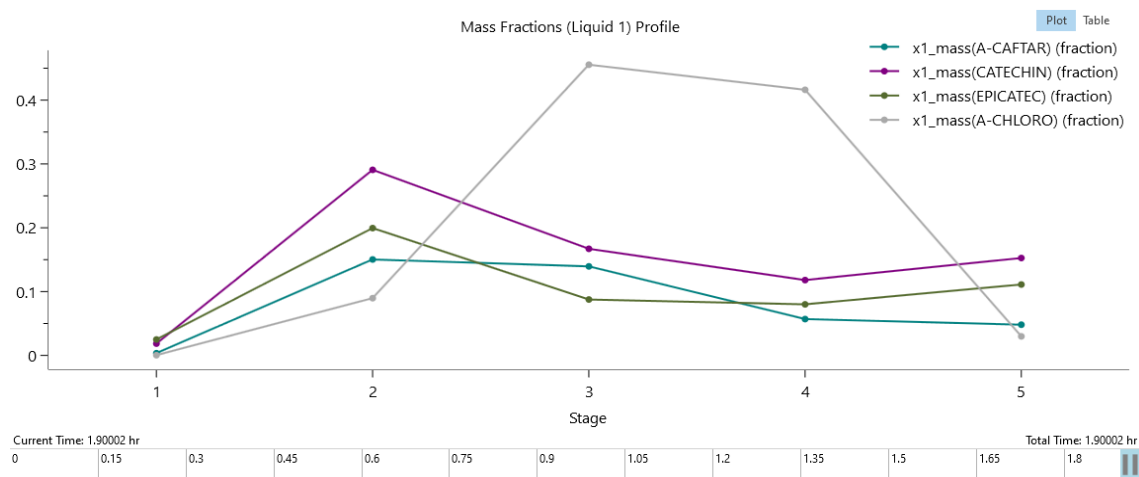


Figura 17. Perfil de composición de compuestos fenólicos las columnas T-200A y T-200B.

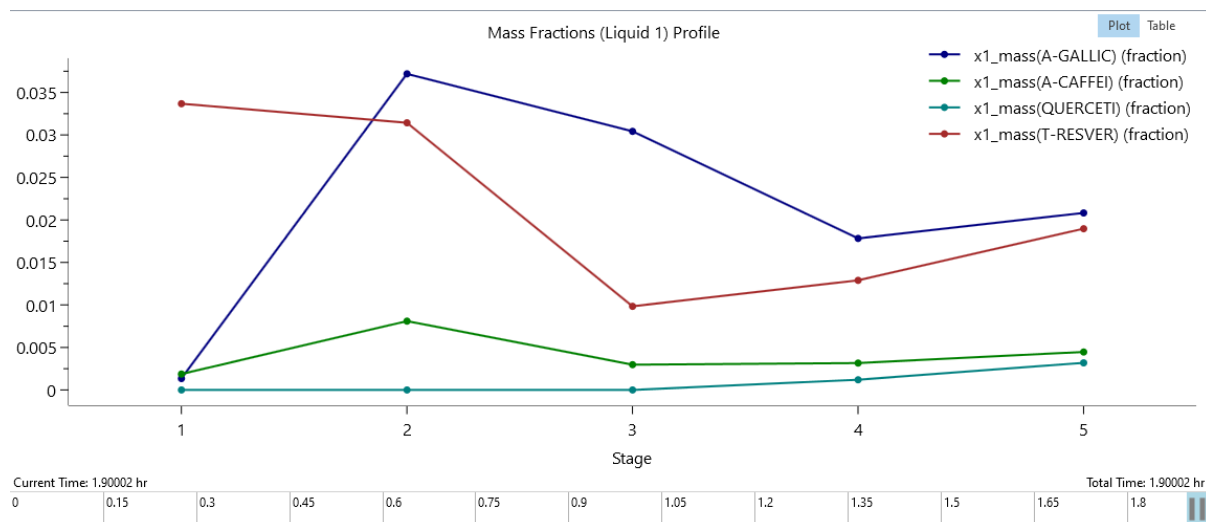


Figura 18. Perfil de composición de c. fenólicos las columnas T-200A y T-200B.

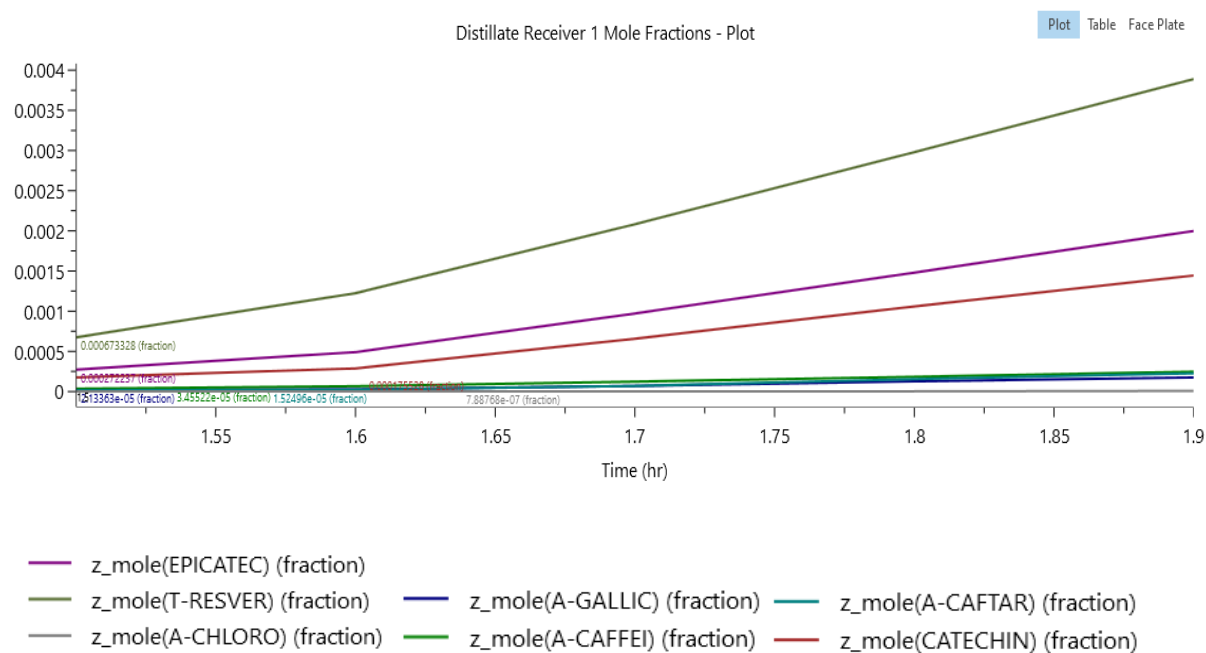


Figura 19. Composición de compuestos fenólicos en el recibidor 1.

Se asume que el vapor contenido en el recipiente de calentamiento se condensa una vez se descarga el material orgánico de la columna, debido a que esta se sometió a una etapa de enfriamiento. Puesto que la materia prima se encuentra con un contenido alto de humedad (63.55 % p/p) es necesario realizar de nuevo un secado, pues la validación de la cinética se realizó para el orujo (semillas y piel) seco y desgrasado y no es posible predecir los efectos que tenga la humedad del material en el rendimiento.

Debido a que este proceso debe ocurrir en un intervalo de tiempo mucho menor al del primer secado para poder ingresar el material al reactor cumpliendo con los tiempos estipulados en el diagrama de Gantt (véase Figura 22), se empleó un secador con aire seco presurizado. Este permitió tener una fracción másica de agua de 0.7 % en un tiempo de 6 minutos.

El escalamiento del reactor para la hidrólisis se realizó manteniendo la relación materia prima/solvente en 0.03 g/mL y la temperatura y presión a 210 °C y 100 bar. Se establecieron 3 fases validas y el criterio de parada fue de 3 horas de reacción, así como el ciclo total del proceso, puesto que el artículo seleccionado demostró que a dichas condiciones no ocurre una degradación significativa de los azúcares.

El perfil de temperatura del reactor (véase Figura 20) presentó una tendencia cercana a un proceso isotérmico, esto debido a la cantidad de agua que ingresa al proceso. Por otro lado, el perfil de composiciones del reactor muestra que los productos que tuvieron un mayor rendimiento fueron la glucosa y fructosa (véase Figuras 21 y 22), como se estipuló en la validación, para un rendimiento total de obtención de azúcares del 61.5 %. Así mismo, en las Figuras 23 y 24 se puede observar la cantidad de azúcares obtenidos en el acumulador del reactor.

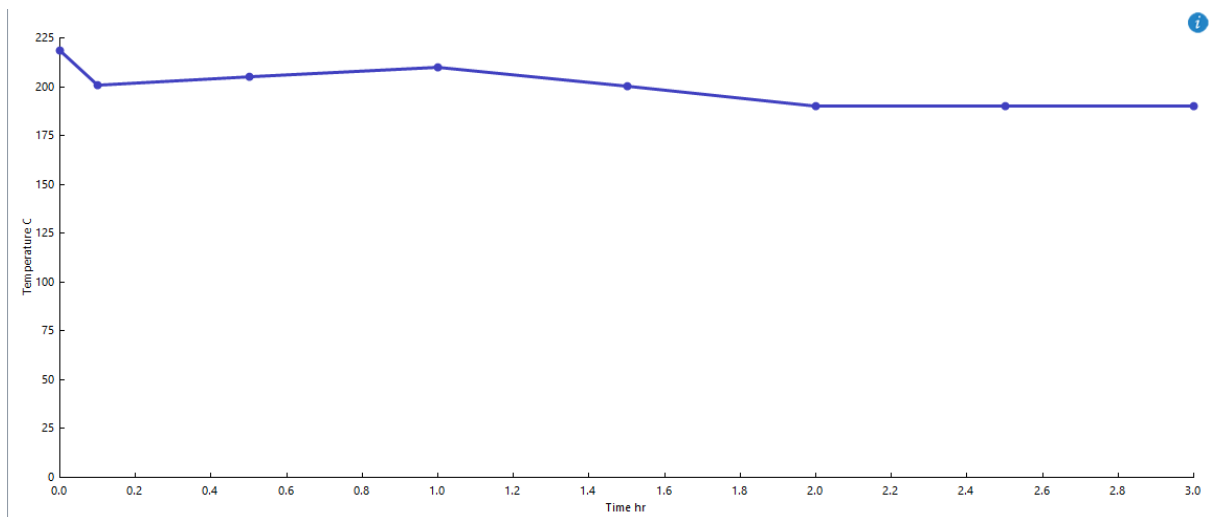


Figura 20. Perfil de temperatura de los reactores R-200A y R-200B.

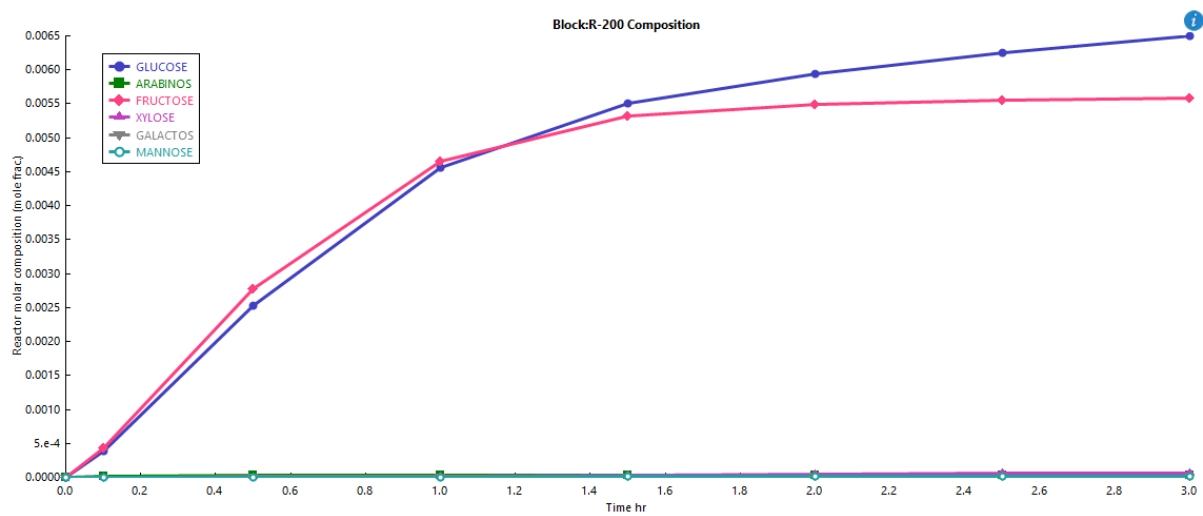


Figura 21. Perfil de composición molar de los azúcares mayoritarios en los reactores R-200A y R-200B.

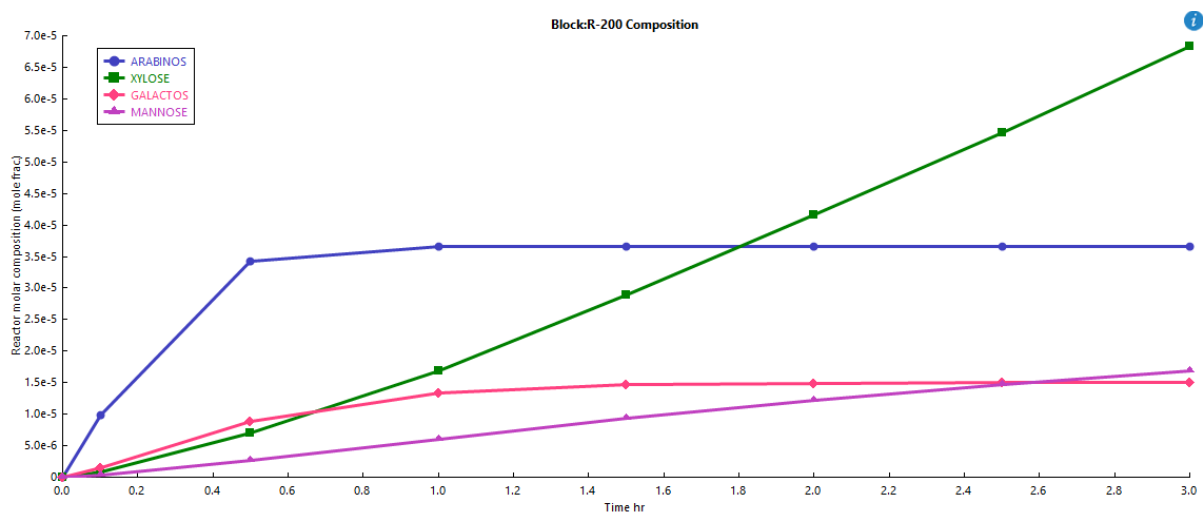


Figura 22. Perfil de composición molar de los azúcares minoritarios en los reactores R-200A y R-200B.

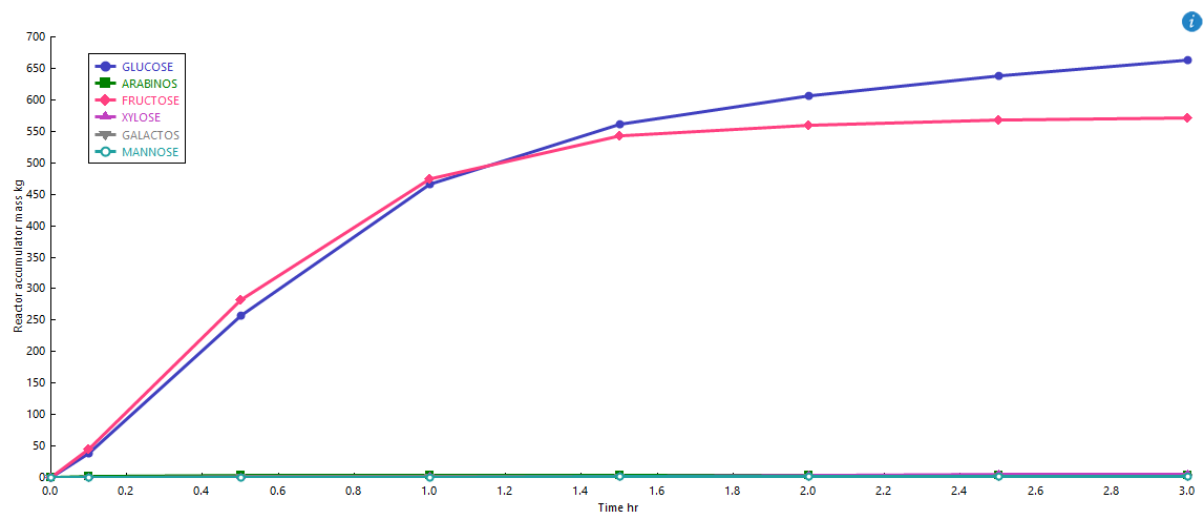


Figura 23. Perfil de composición de compuestos mayoritarios en los acumuladores de los reactores R-200A y R-200B.

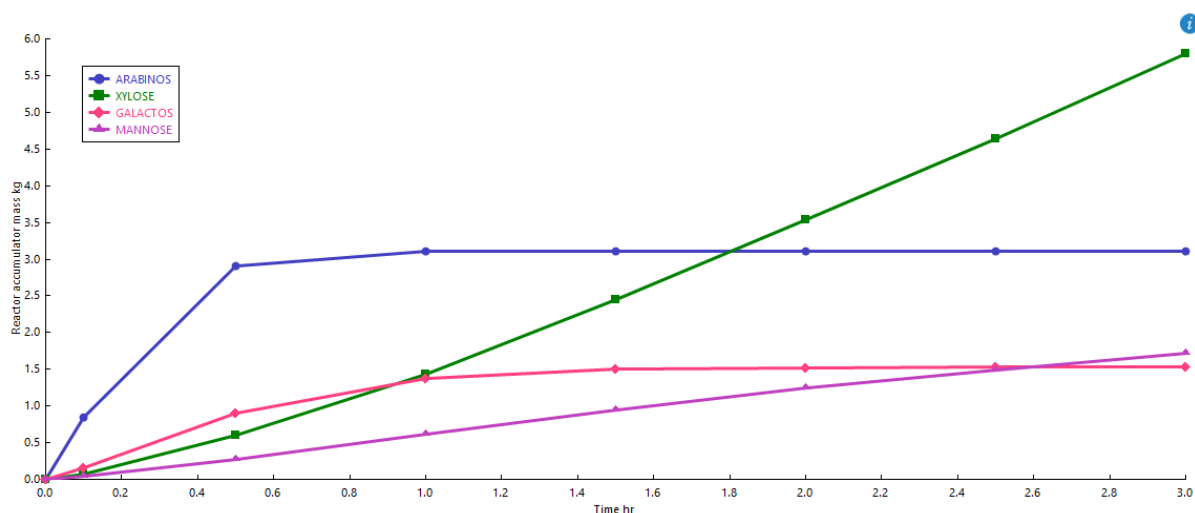


Figura 24. Perfil de composición de compuestos minoritarios en los acumuladores de los reactores R-200A y R-200B.

Puesto que los aceites y compuestos fenólicos salen de la columna de destilación semicontinua con una fracción acuosa, se empleó un decantador multietapas que permitiera separar los aceites y compuestos fenólicos del agua, debido a la diferencia de densidades (véase Tabla 22) y a que la mayoría de los antioxidantes son insolubles en agua a temperatura ambiente (Srinivas et al., 2010). Por su lado, los aminoácidos como la leucina presentan solubilidad en agua (18.9 g/L), por lo que están presentes en la fase acuosa que se transporta junto con la corriente acuosa que sale de las columnas hacia la PTAR. Los aceites y compuestos fenólicos que se separaron en el decantador se almacenaron con una pureza del 99 %.

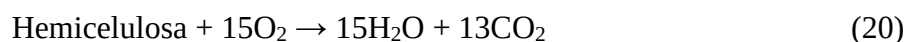
Tabla 22. Densidades de los compuestos que se separan en el decantador.

Compuesto	Densidad (kg/m ³) a 40 °C
Aceite	883.76
Agua (10 % p/p)	1 196.02
Compuestos fenólicos	1 715.20

Por su lado, ya que la corriente de salida del reactor semicontinuo se encuentra a 190 °C y 100 bar en una mezcla sólido-líquido, se aprovecha dicha presión en un filtro prensa a fin de separar los sólidos de la fase acuosa, puesto que el equipo cotizado resiste temperaturas y presiones de hasta 260 °C y 124 bar (METSO, 2020) (Ortiz, 2007). Además, debido a que el

jarabe sale del filtro como un jugo con una concentración de 10 °Brix, se necesita evaporar el agua a fin de obtener un jarabe de azúcares reductores con una concentración cercana a los 90 °Brix (Ea et al., 2016). Esto se realiza a 98.13 °C y presiones atmosféricas, pues lo que se permea en el filtro prensa pierde la presión de entrada.

El material que se retiene en el filtro prensa pasa a un incinerador, donde ocurre un proceso de combustión con aire. Los gases y el vapor de agua obtenidos se emplearon para alimentar la caldera que permite el funcionamiento del proceso. Sin embargo, la cantidad de gases producidos no supe completamente la demanda de calor (solo un 13.68 %) por lo que fue necesario cotizar los servicios industriales pertenecientes al vapor de calderas. Dichas reacciones de combustión se muestran en las Ecuaciones 13 a 20, asumiendo una conversión del 99 % del material lignocelulósico con una relación de aire/material de 5.56.



4.6.5 INTEGRACIÓN TÉRMICA

Se realizó un análisis de las posibles configuraciones entre intercambiadores de calor y corrientes del proceso para así lograr una reducción de los costos operativos (Figura 25). Esto no fue posible debido a que, como se puede observar en la curva compuesta (véase Figura 26), las corrientes calientes no presentan potencial de recuperación de calor.

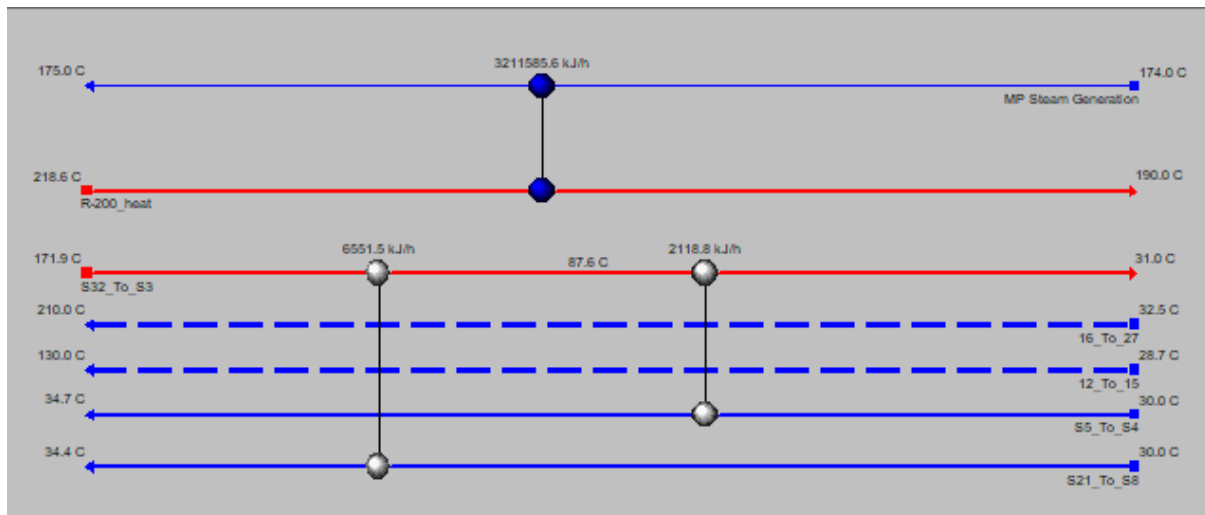


Figura 25. Diagrama de rejillas. Fuente: Aspen Plus V.12.

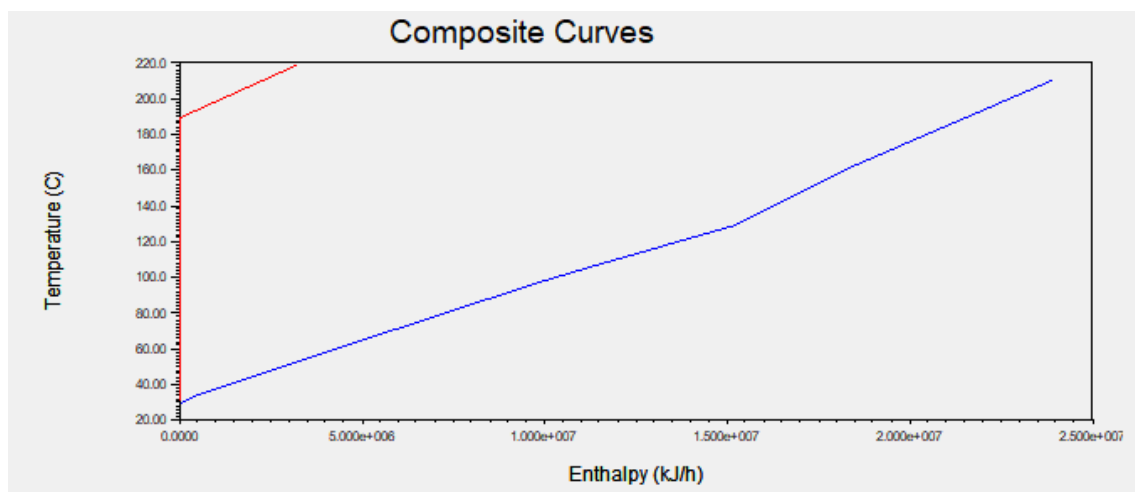


Figura 26. Curvas compuestas. Fuente: Aspen Plus V.12.

4.6.6 PROCESO OPERATIVO

Las generalidades del proceso, tales como producción anual y pureza del producto se pueden ver en la Tabla 23. Se estipuló una operación de 6 días a la semana / 8 horas diarias, que equivale a un turno laboral en Colombia. El último día de la semana se destina a realizar limpieza y mantenimiento de equipos.

Dicha operación no comprende la adecuación de la materia prima, pues se consideró que esta se encuentra ya almacenada en el momento del arranque y puesta en marcha del proceso. Por esta razón el turno comienza desde el momento de la primera extracción en la columna semicontinua, como lo muestra el diagrama de Gantt para el proceso (véase Figura

27). Esta etapa fue la que definió la cantidad de piel y semillas que se procesan al día, que son alrededor de 2 831 kg, pues de esta depende la cantidad de material que puede ingresar a los reactores.

El PFD del diseño conceptual se puede ver en las Figuras 28 a 31, donde se encuentran representados los procesos que involucran los equipos gemelos. Algunos equipos tienen más de una función (véase Tabla 24), por lo que se repiten. Las especificaciones de los equipos se presentan en el Anexo B y los balances de materia y energía de las columnas y los reactores semicontinuos se muestran en los Anexos C-1 y C-2, respectivamente.

Tabla 23. Generalidades del proceso.

Parámetro	Valor	Unidades
Flujo másico de aceites vegetales	19.95	toneladas/año-opeativo
Pureza de los aceites vegetales	99.00	%
Flujo másico de compuestos fenólicos	0.76	toneladas/año-opeativo
Pureza de los compuestos fenólicos	99.00	%
Flujo másico de los azúcares reductores	519.91	toneladas/año-opeativo
Concentración de los azúcares reductores	90.00	°Brix

Tabla 24. Equipos con más de una función involucrados en el proceso.

Equipo	Función
D-200	Secado del material que se descarga del T-200A y T-200B que ingresa a los reactores R-200A y R-200B, respectivamente
E-200	Aumento de temperatura del agua que ingresa a los reactores R-200A y R-200B
E-201	Aumento de temperatura del agua subcrítica que ingresa a los reactores R-200A y R-200B
E-202	Aumento de temperatura del agua que ingresa a las columnas T-200A y T-200B
E-203	Enfriamiento de las tres corrientes de cima que salen de las columnas T-200A y T-200B
P-200	Aumento de presión del agua que ingresa a los reactores R-200A y R-200B
P-201	Aumento de presión del agua que ingresa a las columnas T-200A y T-200B
P-202	Descompresión de las tres corrientes de cima que salen de las columnas T-200A y T-200B
V-200	Decantador de la corriente del producto deseado que sale de las columnas T-200A y T-200B
V-201	Filtro prensa para el tratamiento del material que sale de los reactores R-200A y R-200B

Etap	Proceso	0 hora	1 hora	2 hora	3 hora	4 hora	5 hora	6 hora	7 hora		
I	Extracción T-200A										
II	Hidrólisis R-200A										
I	Extracción T-200B										
II	Hidrólisis R-200B										
Tiempo = 0		0,1	0,3	2,0	2,2	2,4	3,0	3,2	4,9	5,1	7,8

Figura 27. Diagrama de Gantt del proceso operativo.

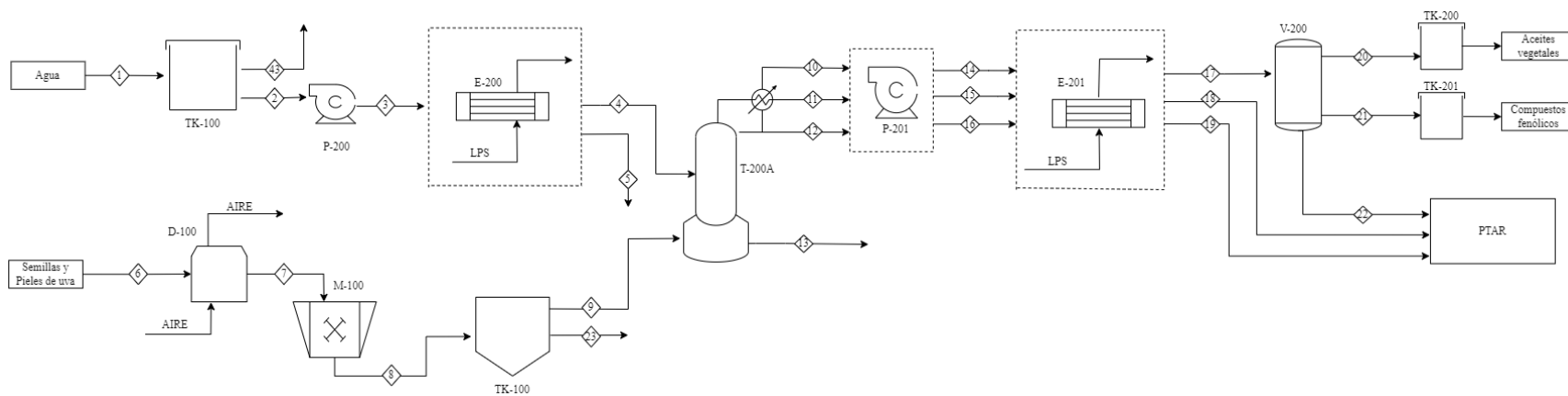
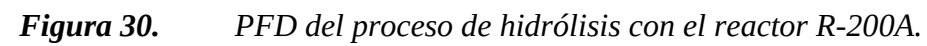
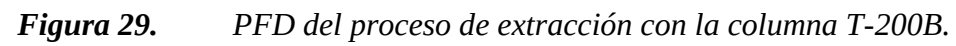


Figura 28. PFD del proceso de extracción con la columna T-200A.



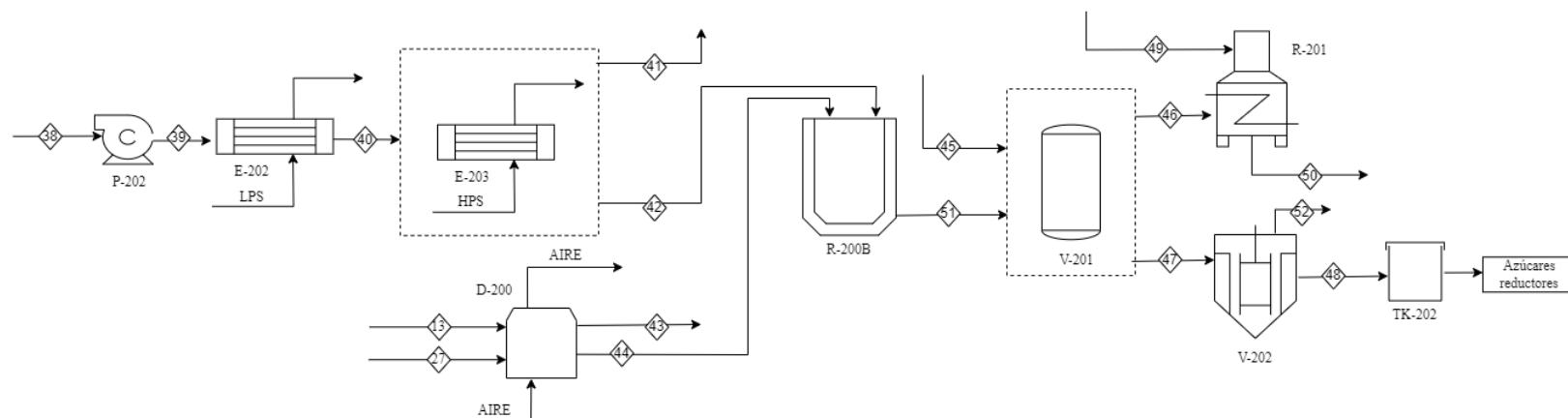


Figura 31. PFD del proceso de hidrólisis con el reactor R-200B.

4.7 PREFACTIBILIDAD DEL DISEÑO CONCEPTUAL

En aras de determinar la prefactibilidad tecno-económica del proyecto, se calculó el costo de instalación de los equipos y el costo anual de los servicios industriales empleados en el proceso, mediante el uso de *Aspen Plus* (véase Tablas 25 y 26). Estos determinaron un costo preliminar de capital total y de utilidades, siendo el primero lo que permitió estimar el Costo de Capital Promedio Ponderado (WACC, por sus siglas en inglés).

Tabla 25. Costo de instalación de equipos.

Equipo	Costo instalado (USD)
T-200A/T-200B	1 944 150
R-200A/R-200B	593 950
E-200	271 900
E-201	312 800
E-202	141 500
E-203	34 500
P-200	283 600
P-201	129 100
P-202	35 400
V-200	155 200
V-201	664 900
V-202	187 300
TK-100	289 500
TK-101	74 100
TK-200	130 400
TK-201	176 800
TK-202	125 700
D-100	48 800
D-200	100 400
M-100	99 600
BOILER	620 200
CWT	88 500
PTAR	117 300
R-201	325 100

Tabla 26. Costos de servicios industriales.

Servicio	Equipo	Consumo (toneladas/año-op)	Costo (USD/año-op)
Agua de enfriamiento (CWT)	E-203	450.51	7.10
	T-200A/B	1 236 399.97	19 624
Vapor de baja presión (LPS)	E-200	5 095.31	48 150
	E-202	3 811.35	36 017
Vapor de alta presión (HPS)	E-201	7 344.82	64 032
	T-200A/B	88 020.73	831 795
	P-200	291.30 kW	24 570
Electricidad	P-201	65.53 kW	5 527
	P-202	1.15×10^{-3}	0.10
Aire comprimido	D-200	41 922.86	238.31

Adicionalmente, se realizó el cálculo de la huella de carbono para el proceso con el uso de *Aspen Plus*, encontrando así que este produce 123.79 kg/h de CO₂. Por esta razón, para la evaluación tecno-económica se agregó el impuesto sobre el carbono, que para Colombia tiene un precio de 5 USD/tonelada (Instituto Nacional de Contadores Públicos, 2021).

Para el cálculo del WACC, que representa la tasa que se utiliza para descontar los flujos de caja a la hora de valorar un proyecto de inversión, se determinó un porcentaje estimativo de participación del 70 % para el costo de deuda y 30 % para los recursos propios. El costo de la deuda se estimó empleando la Ecuación 21.

$$\text{Costo de la deuda} = \text{Tasa de interés} \times (1 - \text{Tasa de impuestos corporativos}) \quad (21)$$

Donde la tasa de interés remuneratorio y de mora para la modalidad de crédito de consumo es de 43.13 %, según la Superintendencia Financiera en su Resolución del 2023 (Actualícese, 2023). Por su lado, la tasa de impuestos corporativos o impuesto de renta en Colombia tiene un valor de 35 % y la tasa de retorno esperada o rendimiento deseado de los inversionistas es del 15 % (véase Tabla 27).

Tabla 27. Valores requeridos para calcular el WACC.

Parámetro	Valor
Tasa de interés	43.13 %
Rendimiento deseado de los inversionistas	15 %
Tasa de impuestos corporativos	35 %
WACC	24%

Con estos valores se evaluaron en *Aspen Economic Analyzer* los tres escenarios estipulados, empleando también los parámetros económicos y los costos de materia prima mostrados en las Tablas 28 y 29, respectivamente. Se puede observar en la Figura 32 que tanto en el Escenario 1 como el 2 el proceso presenta prefactibilidad tecno-económica con un periodo de retorno de la inversión previo a los 5 años (véase Tabla 30). Esto se debe a que los productos se cotizaron según su precio de venta para usos farmacéuticos, pues el uso de agua subcrítica como solvente para su obtención permitió una alta pureza en el producto final (99 %).

Por su lado, se encontró que los costos en logística y transporte no pueden superar un valor de 2 292 USD/tonelada, pues de esta forma el proceso deja de ser rentable con un periodo de retorno de la inversión por encima de los 5 años. Sin embargo, se estima que en Colombia el precio de transporte en camión no supera los 3 USD/tonelada. El análisis de rentabilidad de los tres escenarios se muestra en el Anexo D para los 12 periodos evaluados.

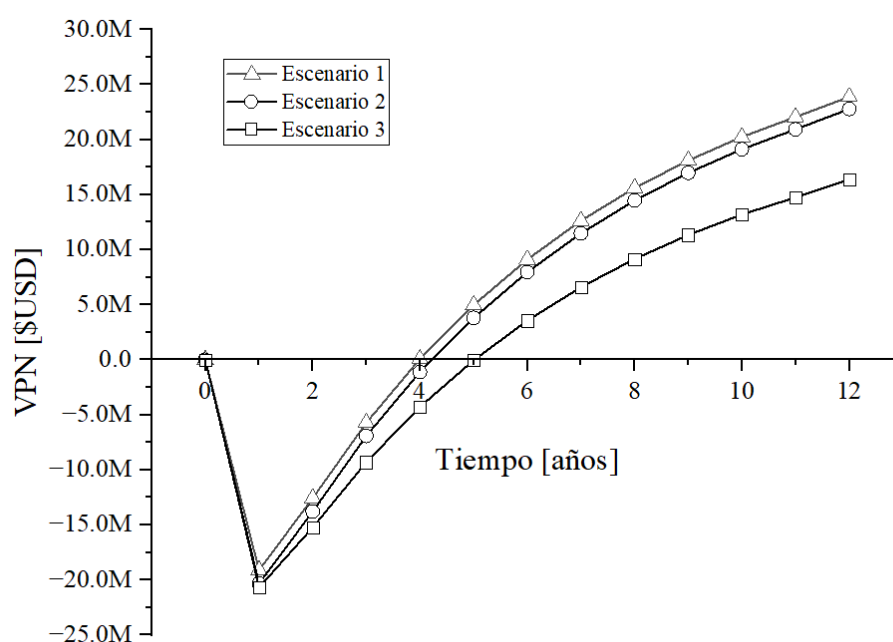


Figura 32. Flujo de caja en valor presente neto del proyecto.

Tabla 28. *Parámetros de entrada para el análisis económico.*

Parámetro	Valor
Número de semanas por periodo	45
Número de periodos para el análisis	12
Tasa de impuesto	35%
Tasa de rendimiento deseada (WACC)	24%
Vida económica del proyecto (años)	12
Duración del periodo de puesta en marcha (semanas)	15
Horas de funcionamiento por semana	48
Costo por hora del operador	3.5 USD/hora
Costo horario del supervisor	4.5 USD/hora

Tabla 29. *Precio de materia prima y productos.*

Sustancia	Precio	Referencia
Agua desmineralizada	1 523 USD/ton	ECHEMI
Aceites vegetales	482.81 USD/kg	Chemical Book.
Compuestos fenólicos	611.12 USD/kg	Chemical Book.
Azúcares reductores	5.65 USD/kg	Chemical Book.

Tabla 30. *Resumen del análisis económico.*

Escenario	Turnos operacionales	Equipos de servicios industriales	% TIR	% WACC	PO (años)
1	1	No	53.53	24.00	3.99
2	1	Sí	50.68	24.00	4.22
3	1	Sí	43.2	24.00	5.01

5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

La piel y semillas de la uva Isabella obtenida después del proceso de vinificación constituyen una fuente de bajo costo para la obtención de compuestos antioxidantes, aceites vegetales y azúcares reductores. Por tanto, la valorización de estos residuos para la obtención de productos de valor agregado resulta una potencial oportunidad de crecimiento para el sector vinícola del Valle del Cauca.

Se encontró en la literatura que la presencia de compuestos fenólicos monoméricos derivados del flavan-3-ol en los extractos obtenidos de las semillas y piel de la uva los hace antioxidantes naturales, antiinflamatorios, antimicrobianos, cardioprotectores, hepatoprotectores y neuroprotectores. Además, dichos extractos presentan una mayor actividad antioxidante que la catequina estándar y una fuerte correlación entre su alto contenido fenólico y los ensayos realizados para evaluar su capacidad antioxidante, DPPH ($r^2 = 0.950$, $p \leq 0.01$), demostrando su potencial bioactivo.

La consulta bibliográfica sobre el uso de agua subcrítica para la extracción de compuestos fenólicos y aceites vegetales a partir de la piel y semillas de la uva permitió encontrar estudios que presentaran tanto las condiciones de operación, como las curvas de rendimiento a fin de validar y escalar el proceso en *Aspen Plus*. Aunque para la extracción de compuestos fenólicos y de aceites se realizó una validación independiente, al momento de escalar se emplearon las condiciones encontradas en el artículo de la obtención de aceites (130 °C, 30 bar y una relación material/solvente de 1/20 g/mL).

Para el caso de la hidrólisis con agua subcrítica de la piel y las semillas de la uva, se encontró un artículo que presentaba las curvas de rendimiento, rango de temperaturas (190 – 210 °C), presión empleada (10 MPa) y relación material/flujo (0.03 g/mL). Sin embargo, en ninguno de los estudios se presentaba la cinética de dicha reacción, por lo que fue necesario proponerla y validarla en *Aspen Plus* con los perfiles reportados en el artículo, a fin de escalar el proceso.

Por su lado, para el diseño conceptual realizado en *Aspen Plus* que empleó una base de diseño de 2 831.17 kg/día de piel y semillas de uva Isabella molidas y secadas, se estipuló una operación de 6 días a la semana / 8 horas diarias. Este consistió en dos columnas de destilación semicontinuas, puesto que el programa no cuenta con un equipo de extracción que opere de

este modo y dos reactores semicontinuos para el proceso de hidrólisis. De dicho diseño se logró obtener compuestos fenólicos y aceites vegetales de la primera etapa del proceso con purezas del 99 % y un rendimiento de 80.21 % y 2.79 %, respectivamente. Así mismo, se produjeron azúcares reductores con un rendimiento de 61.5 % y una concentración de 90 °Brix.

Finalmente, se pudo observar que en dos de los tres escenarios planteados para la evaluación de prefactibilidad tecno-económica el proyecto fue prefactible y podría ser atractivo a inversionistas, con un periodo de retorno a la inversión previo a los 5 años. Para el tercer escenario, que fue en el que se realizó un análisis de sensibilidad de los costos de logística y transporte, se encontró que estos no pueden superar un valor de 2 292 USD/tonelada, pues de esta forma el proyecto presentó un periodo de retorno de la inversión mayor a 5 años.

A partir de este análisis de prefactibilidad tecno-económica realizado según los criterios de *Aspen Plus* se establecieron las bases de conocimiento aportadas mediante el diseño conceptual propuesto a fin de dar paso a la fase de ingeniería básica del proyecto. Por otro lado, se recomienda para estudios posteriores realizar a escala laboratorio un diseño experimental en el que use agua subcrítica para la extracción de compuestos fenólicos y aceites vegetales e hidrólisis para la obtención de azúcares reductores a partir de la piel y las semillas de la uva Isabella luego de su vinificación, a fin de establecer la distribución de tamaño de partícula, los perfiles de rendimiento de extracción y la cinética de hidrólisis. De esta forma, volver a determinar la prefactibilidad tecno-económica del diseño conceptual, contando ahora con información enfocada a la materia prima de interés.

6. ANEXOS

ANEXO A. REGLAS HEURÍSTICAS INVOLUCRADAS EN EL PROCESO

<i>Anexo A-1. Reglas heurísticas empleadas para almacenamiento.</i>		
Regla heurística	Referencia	
Para el equipo de almacenamiento del agua, teniendo en cuenta la cantidad (< 100 m³) se emplea el diseño API fabricado en el campo.	Woods, D. R. (2007).	
Los equipos de almacenamiento que tengan contacto directo con agua deben estar contruidos con acero inoxidable 304, de lo contrario se puede utilizar acero carbón o aluminio.	Woods, D. R. (2007).	
El almacenamiento de materia prima y productos debe de conservar no menos de 15 días operativos.	Ing. Nilson Marriaga	
Los tanques de almacenamiento se llenan al 80 % de su capacidad.	Ing. Nilson Marriaga	
<i>Anexo A-2. Reglas heurísticas empleadas para reactores semicontinuos.</i>		
Regla heurística	Referencia	
La fracción volumétrica del líquido debe estar en un intervalo de 0.8 – 0.9	Turton (2018)	
La altura del reactor debe estar entre 3 y 12 metros	Turton (2018)	
El volumen máximo es de 5 000 m³	Turton (2018)	
<i>Anexo A-3. Reglas heurísticas para columnas de destilación semicontinuo.</i>		
Regla heurística	Referencia	
El diámetro de las torres de rectificación debe ser menor o igual a 4 m	Turton (2018)	
La altura máxima de la torre es de 53.34 m	Turton (2018)	
Relación L/D < 30	Turton (2018)	

Anexo A-4. *Reglas heurísticas empleadas para bombas.*

Regla heurística	Referencia
Para bombas centrífugas de una sola etapa la eficiencia oscila entre el 0.2 y 0.85, para flujos de entre 20 y 10 000 gpm.	Woods, D. R. (2007) Ing Nilson Marriaga.

Anexo A-5. *Reglas heurísticas empleadas para intercambiadores de calor.*

Regla heurística	Referencia
El tipo de intercambiador de calor con un área de transferencia hasta 18.6 m ² es de doble tubo.	Ing. Nilson Marriaga
Intercambiadores con un área de transferencia mayor a 20 m ² corresponde a intercambiador de tubo y coraza.	Ing. Nilson Marriaga
La caída de presión máxima de los intercambiadores de calor es de 1.5 psi	Turton (2018)
La temperatura mínima de aproximación es 10°C para fluidos y 5°C para refrigerantes	Walas (2012)
Los intercambiadores de tubos y coraza están restringidos por un diámetro máximo de 60 ft y un área de 1 100 m ²	Woods, D. R. (2007).
La temperatura a la que sale el agua de torre no debe superar los 45 °C. Para el caso del vapor de calderas, la temperatura debe cambiar < 1 °C y únicamente cambia de vapor saturado a líquido saturado.	Ing. Nilson Marriaga

ANEXO B: ESPECIFICACIONES DE LOS EQUIPOS

<i>Anexo B-1. Especificaciones de las columnas de destilación semicontinuas.</i>		
Torres (columnas)	T-200A	T-200B
Servicio	Extracción de compuestos fenólicos y aceites vegetales	
Tiempo de operación / semana (min)	1 368	
Presión condensador / rehervidor (psi)	435.11 / 511.61	
Temperatura condensador / rehervidor (°C)	130 / 245.05	
Diámetro de entrada del condensador (m)	0.50	
Orientación (vert./horiz.)	Vertical	
Altura torre (m)	2.0	
Diámetro torre (m)	0.70	
Altura recipiente (m)	3.44	
Diámetro recipiente (m)	3.15	
Servicio industrial condensador (kg/h)	987 990.84	
Servicio industrial rehervidor (kg/h)	78 698.41	
Materiales de construcción	SS 316	
Costo instalado (USD)	1 944 150	

<i>Anexo B-2. Especificaciones de los reactores semicontinuos.</i>		
Reactores	R-200A	R-200B
Servicio	Hidrólisis	
Tiempo de operación / semana (min)	2 160	
Temperatura (°C)	210	
Presión (psig)	1 437.03	
Orientación (vert/horiz)	Vertical	
Altura/Longitud (m)	4.27	
Diámetro (m)	1.07	
Servicio industrial (kg/h)	No aplica	
Materiales de construcción	SS 316	
Costo instalado (USD)	593 950	

Anexo B-3. Especificaciones de los intercambiadores de calor del proceso.				
Intercambiador	E-200	E-201	E-202	E-203
				Enfriamiento de
	Aumento de	Aumento de	Aumento de	productos de
	temperatura del	temperatura del	temperatura	cima de las
Servicio	agua subcrítica	agua subcrítica	del agua	columnas T-
Tiempo de			subcrítica	200A y B
operación /				
semana (min)	48	48	36	36
			Tubos y	
Tipo	Tubos y coraza	Tubos y coraza	coraza	Doble tubo
Carga térmica				
(kW)	2 355.12	2 507.55	1 761.96	5.16
Coef. Global				
(BTU/hr ft ² °F)	200	200	200	5.26
Área (m ²)	29.68	28.23	22.63	5.48
Temp. fluido				
caliente, ent/sal				
(°C)	160 / 160	254 / 254	160 / 160	114.81 / 40
Temp. fluido				
frío, ent/sal (°C)	32.50 / 127	127 / 210	28.70 / 130	30 / 42.35
Presión fluido	1 440.03 /	1 438.53 /	421.87 /	-1.77 ×10 ⁻¹⁵ / -
frío (psig)	1 438.53	1 437.03	420.37	1.77 ×10 ⁻¹⁵
Presión fluido				
caliente (psig)	74.96 / 74.96	601.93 / 601.93	74.96 / 74.96	2.71 / 1.21
Material	SS 304	SS 304	SS 304	SS 304
Servicio				
industrial (kg/h)	4 071.6	5 324.4	3045.6	360
Costo instalado				
(USD)	271 900	312 800	141 500	34 500

<i>Anexo B-4. Especificaciones de las bombas.</i>			
Bombas	P-200	P-201	P-202
			Descompresión de productos de cima de las columnas T- 200A y B
Servicio	Aumento de presión de agua subcrítica	Aumento de presión de agua subcrítica	
Tiempo de operación / semana (min)	48	36	18
Potencia al eje (kW)	291.30	65.54	1.15×10^{-3}
Caudal (gpm)	89.92	62.74	0.16
NPSHa (m)	8.81	8.81	303.31
Eficiencia hidráulica	0.44	0.42	0.2
Materiales de construcción	SS 304	SS 304	SS 304
Costo instalado (USD)	283 600	129 100	35 400

<i>Anexo B-5. Especificaciones de los recipientes de separación.</i>			
Recipientes (vessels)	V-200	V-201	V-202
Servicio	Decantador	Filtro prensa	Evaporador
Tiempo de operación / semana (min)	288	60	60
Temperatura (°C)	31	190	98.13
Presión (psig)	-0.29	1 435.68	-1.74
Orientación (vert./horiz.)	Horizontal	Horizontal	Horizontal
Altura/Longitud (m)	3.65	4.85	2.26
Diámetro (m)	2.43	4.00	1.03
Materiales de construcción	SS 304	SS 304	SS 304
Costo instalado (USD)	155 200	664 900	187 300

Anexo B-6. *Especificaciones de los tanques de almacenamiento.*

Tanques de almacenamiento	TK-100	TK-101	TK-200	TK-201	TK-202
Servicio / almacenamiento	Agua	Piel y semillas	Aceites	Compuestos fenólicos	Azúcares reductores
Temperatura (°C)	27	16.05	31.00	31.00	98.13
Presión (psig)	-1.74	-1.74	-0.29	-0.29	-1.74
Capacidad (gal)	11 449.85	190 281.85	1 342.02	11.77	55 690.77
Materiales de construcción	SS 304	CS	SS 304	SS 304	SS 304
Costo instalado (USD)	289 500	74 100	130 400	176 800	125 700

Anexo B-7. *Especificaciones de los secadores.*

Secador	D-100	D-200
Tiempo de operación / semana (min)	390	72
Servicio	Secado materia prima	Secado materia prima
Temperatura aire (°C)	27	289.39
Presión aire (psig)	-1.74	57.82
Caudal de aire (kg/h)	15 500	33 500
Dirección del flujo de gas	Co-corriente	Co-corriente
Tipo de secador	Convectivo	Convectivo
Longitud (m)	1	4
Área de la bandeja (m ²)	16	3.72
Materiales de construcción	SS 304	SS 304
Costo instalado (USD)	48 800	100 400

<i>Anexo B-8. Especificaciones del molino.</i>	
Molino	M-100
Servicio	Molienda de materia prima
Tipo	Giratorio
Máximo diámetro de partícula	0.50
Materiales de construcción	SS 304
Costo instalado (USD)	99 600

<i>Anexo B-9. Especificaciones de los equipos auxiliares.</i>				
Equipo	BOILER	CWT	PTAR	R-201
Servicio	Generación de vapor	Enfriamiento de agua de servicio	Tratamiento de efluentes	Incineración de residuos sólidos
Temperatura (°C)	254.00	45	40.25	273.60
Presión (psig)	601.39	-0.19	-0.19	-1.74
Materiales	SS 304	SS 304	SS 304	SS 304
Altura (m)	1.35	1.52	1.67	2.74
Diámetro (m)	2.27	3.35	3.66	0.91
Costo instalado (USD)	620 200	88 500	117 300	325 100

ANEXO C: ESPECIFICACIONES DE CORRIENTES PRINCIPALES

<i>Anexo C-1. Corrientes de salida y entrada de las columnas semicontinuas.</i>						
Corriente	4-5	9-23	10-24	11-25	12-26	13-27
Temperatura (°C)	130.00	15.76	114.63	110.84	130.00	245.05
Presión (psig)	435.06	12.96	435.11	435.11	435.11	511.61
Flujo molar (kmol/h)	784.69	2.11	0.30	21.97	0.17	67.04
Flujo másico (kg/h)	14 136.49	707.79	35.62	395.72	4.73	1 847.11
Fración másica por componente						
Agua	1.00	1.37×10^{-2}	5.46×10^{-2}	1.00	2.36×10^{-2}	0.64
Cenizas	0.00	2.65×10^{-2}	1.01×10^{-11}	0.00	0.00	0.01
Proteína	0.00	2.42×10^{-2}	4.81×10^{-1}	0.00	6.64×10^{-4}	5.70×10^{-6}
Ácido Palmítico	0.00	3.59×10^{-3}	6.20×10^{-2}	0.00	5.94×10^{-7}	1.81×10^{-4}
Ácido oleico	0.00	5.69×10^{-3}	8.59×10^{-2}	0.00	3.82×10^{-7}	5.24×10^{-4}
Ácido linoleico	0.00	1.88×10^{-2}	3.00×10^{-1}	0.00	1.77×10^{-6}	1.42×10^{-3}
Celulosa	0.00	1.24×10^{-1}	0.00	0.00	0.00	4.76×10^{-2}
Hemicelulosa	0.00	1.83×10^{-1}	0.00	0.00	0.00	6.99×10^{-2}
Lignina	0.00	9.64×10^{-2}	0.00	0.00	0.00	3.69×10^{-2}
Ácido gálico	0.00	1.61×10^{-3}	2.49×10^{-4}	0.00	0.00	6.13×10^{-4}
Ácido cafeico	0.00	3.62×10^{-4}	3.72×10^{-4}	0.00	0.00	1.31×10^{-4}
Ácido caftarico	0.00	3.73×10^{-3}	5.91×10^{-4}	0.00	0.00	1.42×10^{-3}
Quercetina	0.00	2.45×10^{-4}	0.00	0.00	0.00	9.39×10^{-5}
Glucano	0.00	4.65×10^{-1}	0.00	0.00	0.00	0.17
Catequina	0.00	1.19×10^{-2}	3.51×10^{-3}	0.00	0.00	4.50×10^{-3}
Epicatequina	0.00	8.79×10^{-3}	4.86×10^{-3}	0.00	0.00	3.27×10^{-3}
T-resveratrol	0.00	1.84×10^{-3}	7.44×10^{-3}	0.00	1.89×10^{-8}	5.60×10^{-4}
Ácido clorogénico	0.00	2.30×10^{-3}	2.15×10^{-5}	0.00	0.00	8.80×10^{-4}
Xilano	0.00	1.80×10^{-2}	0.00	0.00	0.00	6.89×10^{-3}
Arabinano	0.00	1.35×10^{-3}	0.00	0.00	0.00	5.16×10^{-4}
Manano	0.00	1.16×10^{-3}	0.00	0.00	0.00	4.45×10^{-4}
Galactano	0.00	6.74×10^{-4}	0.00	0.00	0.00	2.58×10^{-4}
Nitrógeno	0.00	0.00	8.74×10^{-10}	7.87×10^{-11}	9.76×10^{-1}	0.00

Anexo C-2. *Corrientes de entrada y salida de los reactores.*

Corriente	41-42	43-44	45-50
Temperatura (°C)	210.00	204.64	190.00
Presión (psig)	1 451.73	12.96	1 450.38
Flujo molar (kmol/h)	1 124.65	2.13	189.57
Flujo másico (kg/h)	20 260.91	675.51	4 052.31
Fracción másica por componente			
Agua	1.00	7.03×10^{-3}	8.28×10^{-1}
Cenizas	0.00	2.78×10^{-2}	4.63×10^{-3}
Proteína	0.00	1.56×10^{-5}	2.60×10^{-6}
Ácido palmítico	0.00	1.52×10^{-4}	2.54×10^{-5}
Ácido oleico	0.00	5.65×10^{-4}	9.42×10^{-5}
Ácido linoleico	0.00	1.57×10^{-3}	2.61×10^{-4}
Celulosa	0.00	1.30×10^{-1}	7.58×10^{-3}
Hemicelulosa	0.00	1.91×10^{-1}	3.17×10^{-2}
Lignina	0.00	1.01×10^{-1}	1.68×10^{-2}
Ácido gálico	0.00	1.68×10^{-3}	2.80×10^{-4}
Ácido cafeico	0.00	3.60×10^{-4}	6.00×10^{-5}
Ácido caftarico	0.00	3.88×10^{-3}	6.46×10^{-4}
Quercetina	0.00	2.57×4	4.28×10^{-5}
Glucano	0.00	4.87×10^{-1}	2.92×10^{-4}
Catequina	0.00	1.23×10^{-2}	2.05×10^{-3}
Epicatequina	0.00	8.95×10^{-3}	1.49×10^{-3}
T-resveratrol	0.00	1.53×10^{-3}	2.56×10^{-4}
Ácido clorogénico	0.00	2.41×10^{-3}	4.01×10^{-4}
Xilano	0.00	1.88×10^{-2}	2.92×10^{-3}
Arabinano	0.00	1.41×10^{-3}	0.00
Manano	0.00	1.22×10^{-3}	7.27×10^{-5}
Galactano	0.00	7.06×10^{-4}	2.73×10^{-8}
Glucosa	0.00	0.00	5.46×10^{-2}
Arabinosa	0.00	0.00	2.56×10^{-4}
Fructosa	0.00	0.00	4.69×10^{-2}
Xilosa	0.00	0.00	4.79×10^{-4}
Galactosa	0.00	0.00	1.26×10^{-4}
Manosa	0.00	0.00	1.41×10^{-4}

ANEXOS D: ANÁLISIS DE RENTABILIDAD

		<i>Anexo D-1.</i>	<i>Resumen de análisis económico del Escenario 1.</i>			
	Año	0	1	2	3	4
Costos operativos	USD/año	0	\$ 429 676	\$ 2 515 519	\$ 2 618 150	\$ 2 724 987
Materia prima	USD/año	0	\$ 31 513	\$ 186 128	\$ 195 434	\$ 205 206
Costo mano de obra	USD/año	0	\$ 4 858	\$ 28 424	\$ 29 561	\$ 30 743
Costo mantenimiento	USD/año	0	\$ 6 218	\$ 36 376	\$ 37 831	\$ 39 344
Servicios industriales	USD/año	0	\$ 348 504	\$ 2 038 749	\$ 2 120 299	\$ 2 205 111

Anexo D-2.		<i>Resumen de análisis económico del Escenario 1 (Continuación).</i>			
	Año	5	6	7	8
Costos operativos	USD/año	\$ 2 836 203	\$ 2 951 978	\$ 3 072 501	\$ 3 197 966
Materia prima	USD/año	\$ 215 466	\$ 226 239	\$ 237 551	\$ 249 429
Costo mano de obra	USD/año	\$ 31 973	\$ 33 252	\$ 34 582	\$ 35 965
Costo mantenimiento	USD/año	\$ 40 918	\$ 42 555	\$ 44 257	\$ 46 027
Servicios industriales	USD/año	\$ 2 293 315	\$ 2 385 048	\$ 2 480 450	\$ 2 579 668
Depreciación	USD/año	\$ 2 836 203	\$ 2 951 978	\$ 3 072 501	\$ 3 197 966

	<i>Anexo D-3.</i>	<i>Resumen de análisis económico del Escenario 1 (Continuación).</i>			
	Año	9	10	11	12
Costos operativos	USD/año	\$ 3 328 579	\$ 3 464 550	\$ 3 606 102	\$ 3 753 465
Materia prima	USD/año	\$ 261 900	\$ 274 995	\$ 288 745	\$ 303 182
Costo mano de obra	USD/año	\$ 37 404	\$ 38 900	\$ 40 456	\$ 42 075
Costo mantenimiento	USD/año	\$ 47 869	\$ 49 783	\$ 51 775	\$ 53 846
Servicios industriales	USD/año	\$ 2 682 855	\$ 2 790 169	\$ 2 901 776	\$ 3 017 847
Depreciación	USD/año	\$ 3 328 579	\$ 3 464 550	\$ 3 606 102	\$ 3 753 465

<i>Anexo D-4.</i>		<i>Resumen de análisis económico del Escenario 2.</i>				
	Año	0	1	2	3	4
Costos operativos	USD/año	0	\$ 430 004	\$ 2 517 438	\$ 2 620 146	\$ 2 727 062
Materia prima	USD/año	0	\$ 31 513	\$ 186 128	\$ 195 434	\$ 205 206
Costo mano de obra	USD/año	0	\$ 4 858	\$ 28 424	\$ 29 561	\$ 30 743
Costo mantenimiento	USD/año	0	\$ 6 420	\$ 37 560	\$ 39 063	\$ 40 625
Servicios industriales	USD/año	0	\$ 348 504	\$ 2 038 749	\$ 2 120 299	\$ 2 205 111
Depreciación	USD/año	0	\$ 430 004	\$ 2 517 438	\$ 2 620 146	\$ 2 727 062

<i>Anexo D-5.</i>		<i>Resumen de análisis económico del Escenario 2 (Continuación).</i>			
	Año	5	6	7	8
Costos operativos	USD/año	\$ 2 838 361	\$ 2 954 223	\$ 3 074 835	\$ 3 200 394
Materia prima	USD/año	\$ 215 466	\$ 226 239	\$ 237 551	\$ 249 429
Costo mano de obra	USD/año	\$ 31 973	\$ 33 252	\$ 34 582	\$ 35 965
Costo mantenimiento	USD/año	\$ 42 250	\$ 43 940	\$ 45 698	\$ 47 526
Servicios industriales	USD/año	\$ 2 293 315	\$ 2 385 048	\$ 2 480 450	\$ 2 579 668
Depreciación	USD/año	\$ 2 838 361	\$ 2 954 223	\$ 3 074 835	\$ 3 200 394

<i>Anexo D-6.</i>		<i>Resumen de análisis económico del Escenario 2 (Continuación).</i>			
	Año	9	10	11	12
Costos operativos	USD/año	\$ 3 331 103	\$ 3 467 176	\$ 3 608 833	\$ 3 756 305
Materia prima	USD/año	\$ 261 900	\$ 274 995	\$ 288 745	\$ 303 182
Costo mano de obra	USD/año	\$ 37 404	\$ 38 900	\$ 40 456	\$ 42 075
Costo mantenimiento	USD/año	\$ 49 427	\$ 51 404	\$ 53 460	\$ 55 599
Servicios industriales	USD/año	\$ 2 682 855	\$ 2 790 169	\$ 2 901 776	\$ 3 017 847
Depreciación	USD/año	\$ 3 331 103	\$ 3 467 176	\$ 3 608 833	\$ 3 756 305

<i>Anexo D-7.</i>		<i>Resumen de análisis económico del Escenario 3.</i>				
	Año	0	1	2	3	4
Costos operativos	USD/año	0	\$ 870 743	\$ 5 120 557	\$ 5 353 421	\$ 5 597 001
Materia prima	USD/año	0	\$ 439 606	\$ 2 596 423	\$ 2 726 244	\$ 2 862 557
Costo mano de obra	USD/año	0	\$ 4 858	\$ 28 424	\$ 29 561	\$ 30 743
Costo mantenimiento	USD/año	0	\$ 6 420	\$ 37 560	\$ 39 063	\$ 40 625
Servicios industriales	USD/año	0	\$ 348 504	\$ 2 038 749	\$ 2 120 299	\$ 2 205 111
Depreciación	USD/año	0	\$ 870 743	\$ 5 120 557	\$ 5 353 421	\$ 5 597 001

<i>Anexo D-8.</i>		<i>Resumen de análisis económico del Escenario 3 (Continuación).</i>			
	Año	5	6	7	8
Costos operativos	USD/año	\$ 5 851 797	\$ 6 118 330	\$ 6 397 148	\$ 6 688 823
Materia prima	USD/año	\$ 3 005 684	\$ 3 155 969	\$ 3 313 767	\$ 3 479 455
Costo mano de obra	USD/año	\$ 31 973	\$ 33 252	\$ 34 582	\$ 35 965
Costo mantenimiento	USD/año	\$ 42 250	\$ 43 940	\$ 45 698	\$ 47 526
Servicios industriales	USD/año	\$ 2 293 315	\$ 2 385 048	\$ 2 480 450	\$ 2 579 668
Depreciación	USD/año	\$ 5 851 797	\$ 6 118 330	\$ 6 397 148	\$ 6 688 823

<i>Anexo D-9.</i>		<i>Resumen de análisis económico del Escenario 3 (Continuación).</i>			
	Año	9	10	11	12
Costos operativos	USD/año	\$ 6 993 954	\$ 7 313 169	\$ 7 647 125	\$ 7 996 512
Materia prima	USD/año	\$ 3 653 428	\$ 3 36 100	\$ 4 027 905	\$ 4 229 300
Costo mano de obra	USD/año	\$ 37 404	\$ 38 900	\$ 40 456	\$ 42 075
Costo mantenimiento	USD/año	\$ 49 427	\$ 51 404	\$ 53 460	\$ 55 599
Servicios industriales	USD/año	\$ 2 682 855	\$ 2 790 169	\$ 2 901 776	\$ 3 017 847
Depreciación	USD/año	\$ 6 993 954	\$ 7 313 169	\$ 7 647 125	\$ 7 996 512

7. REFERENCIAS

- Actualícese. (2023). *En agosto de 2023 se reduce el interés bancario corriente para créditos de consumo y ordinarios*. <https://actualicese.com/en-agosto-de-2023-se-reduce-el-interes-bancario-corriente-para-creditos-de-consumo-y-ordinarios/>
- Álvarez-Viñas, M., Rodríguez-Seoane, P., Flórez-Fernández, N., Ma, & Torres, D., Díaz-Reinoso, B., Moure, A., & Domínguez, H. (1947). *Subcritical Water for the Extraction and Hydrolysis of Protein and Other Fractions in Biorefineries from Agro-food Wastes and Algae: a Review*. <https://doi.org/10.1007/s11947-020-02536-4/Published>
- Chen, K., Wang, J., Shen, Z., Du, D., Guo, X., Gong, B., Liu, J., & Zhang, L. (2019). Comparison of the stress corrosion cracking growth behavior of cold worked Alloy 690 in subcritical and supercritical water. *Journal of Nuclear Materials*, 520, 235–244. <https://doi.org/10.1016/J.JNUCMAT.2019.04.017>
- Cheng, Y., Xue, F., Yu, S., Du, S., & Yang, Y. (2021). Subcritical Water Extraction of Natural Products. *Molecules* 2021, Vol. 26, Page 4004, 26(13), 4004. <https://doi.org/10.3390/MOLECULES26134004>
- Cherkas, A., Holota, S., Mdzinarashvili, T., Gabbianelli, R., & Zarkovic, N. (2020). Glucose as a Major Antioxidant: When, What for and Why It Fails? *Antioxidants*, 9(2). <https://doi.org/10.3390/ANTIOX9020140>
- Demirkol, M., & Tarakci, Z. (2018). Effect of grape (*Vitis labrusca* L.) pomace dried by different methods on physicochemical, microbiological and bioactive properties of yoghurt. *LWT*, 97, 770–777. <https://doi.org/10.1016/J.LWT.2018.07.058>
- Duba, K. S., Casazza, A. A., Mohamed, H. Ben, Perego, P., & Fiori, L. (2015a). Extraction of polyphenols from grape skins and defatted grape seeds using subcritical water: Experiments and modeling. *Food and Bioprocess Processing*, 94, 29–38. <https://doi.org/10.1016/J.FBP.2015.01.001>
- Duba, K. S., Casazza, A. A., Mohamed, H. Ben, Perego, P., & Fiori, L. (2015b). Extraction of polyphenols from grape skins and defatted grape seeds using subcritical water: Experiments and modeling. *Food and Bioprocess Processing*, 94, 29–38. <https://doi.org/10.1016/J.FBP.2015.01.001>
- Ea, A.-C. D., Castillejos, R. G., García, M. N., Castillo, A. S., & Martínez Montes García N Tellez Luis S, S. A. (2016). *DETERMINACIÓN Y CUANTIFICACIÓN DE AZÚCARES TOTALES EN JARABES DE SORGO DULCE RB CAÑERO Y UNA VARIEDAD EXPERIMENTAL*. 1(2), 679–684.
- Gerardi, C., Durante, M., Tufariello, M., Grieco, F., & Giovino, G. (2022). Effects of Time and Temperature on Stability of Bioactive Molecules, Color and Volatile Compounds during Storage of Grape Pomace Flour. *Applied Sciences* 2022, Vol. 12, Page 3956, 12(8), 3956. <https://doi.org/10.3390/APP12083956>
- Gilbert-López, B., Plaza, M., Mendiola, J. A., Ibáñez, E., & Herrero, M. (2017). Subcritical Water Extraction and Neof ormation of Antioxidants. *Water Extraction of Bioactive*

- Compounds: From Plants to Drug Development*, 109–130. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-809380-1.00004-8>
- Girard, A., Madani, S., Boukourt, F., Cherkaoui-Malki, M., Belleville, J., & Prost, J. (2006). Fructose-enriched diet modifies antioxidant status and lipid metabolism in spontaneously hypertensive rats. *Nutrition (Burbank, Los Angeles County, Calif.)*, 22(7–8), 758–766. <https://doi.org/10.1016/J.NUT.2006.05.006>
- Gomes, T. M., Toaldo, I. M., Haas, I. C. da S., Burin, V. M., Caliar, V., Luna, A. S., de Gois, J. S., & Bordignon-Luiz, M. T. (2019). Differential contribution of grape peel, pulp, and seed to bioaccessibility of micronutrients and major polyphenolic compounds of red and white grapes through simulated human digestion. *Journal of Functional Foods*, 52, 699–708. <https://doi.org/10.1016/J.JFF.2018.11.051>
- González, X. (2021). Los departamentos del Valle del Cauca y Huila concentran el 97% de la producción de uva . *AgroNegocios*.
- Hernández, J., Trujillo, Y., & Durán, D. (2011). Contenido fenólico e identificación de levaduras de importancia vínica de la uva Isabella (*Vitis Labrusca*) procedente de Villa del Rosario (Norte de Santander). *Vitae*, 18(1), 17–25. <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=169822667003>
- Horiba. (2010). *A GuideBook To Particle Size Analysis*.
- Instituto Nacional de Contadores Públicos. (2021). *Tarifas del impuesto nacional a la gasolina, ACPM y al carbono – Instituto Nacional de Contadores Públicos de Colombia*. <https://incp.org.co/tarifas-del-impuesto-nacional-a-la-gasolina-acpm-y-al-carbono/>
- Koca, I., Tekguler, B., & Turkyilmaz, B. (2021). Bioactive Properties of Different Parts of *Vitis labrusca* L. Fruit *Vitis labrusca* L. Meyvesinin Farklı Kısımlarının Biyoaktif Özellikleri. *Commagene Journal of Biology Koca et Al*, 5(2), 193–198. <https://doi.org/10.31594/commagene.1016721>
- Kuck, L. S., & Noreña, C. P. Z. (2019). Application of gum Arabic, β -cyclodextrin, and hydroxypropyl- β -cyclodextrin to microencapsulation by molecular inclusion of grape skin extract (*Vitis labrusca* var. Isabel). *Journal of Food Processing and Preservation*, 43(2). <https://doi.org/10.1111/JFPP.13874>
- Lafka, T. I., Sinanoglou, V., & Lazos, E. S. (2007). On the extraction and antioxidant activity of phenolic compounds from winery wastes. *Food Chemistry*, 104(3), 1206–1214. <https://doi.org/10.1016/J.FOODCHEM.2007.01.068>
- Martín, D. (2017). *Los compuestos fenólicos: Un acercamiento a su biosíntesis, síntesis y actividad biológica* .
- Mendes, J. A. S., Prozil, S. O., Evtuguin, D. V., & Lopes, L. P. C. (2013). Towards comprehensive utilization of winemaking residues: Characterization of grape skins from red grape pomaces of variety Touriga Nacional. *Industrial Crops and Products*, 43(1), 25–32. <https://doi.org/10.1016/J.INDCROP.2012.06.047>
- METSO. (2020). *Filtro prensa de tubo*. <https://www.metso.com/es/portafolio/filtro-prensa-de-tubo/>

- Milani, J., & Moetamedzadegan, A. (2010). Moisture dependent physical properties of grape seeds. *International Journal of Food Engineering*, 6(5). <https://doi.org/10.2202/1556-3758.1822>
- MinTransporte. (2020). *Costos de referencia por tonelada para un tractocamión*.
- Namasivayam, N. (2011). Chemoprevention in experimental animals. *Annals of the New York Academy of Sciences*, 1215(1), 60–71. <https://doi.org/10.1111/j.1749-6632.2010.05873.x>
- Análisis anual del sector vitivinícola mundial en 2021, (2021).
- Ortiz, V. (2007). *Implementación de sistema de control para filtro prensa de cachaza*. Universidad Autónoma de Occidente, Facultad de Ingeniería.
- Pedras, B. M., Nascimento, M., Sá-Nogueira, I., Simões, P., Paiva, A., & Barreiros, S. (2019). Semi-continuous extraction/hydrolysis of spent coffee grounds with subcritical water. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, 72, 453–456. <https://doi.org/10.1016/J.JIEC.2019.01.001>
- Pedras, B., Salema-Oom, M., Sá-Nogueira, I., Simões, P., Paiva, A., & Barreiros, S. (2017). Valorization of white wine grape pomace through application of subcritical water: Analysis of extraction, hydrolysis, and biological activity of the extracts obtained. *Journal of Supercritical Fluids*, 128, 138–144. <https://doi.org/10.1016/J.SUPFLU.2017.05.020>
- Prado, J. M., Forster-Carneiro, T., Rostagno, M. A., Follegatti-Romero, L. A., Mauger Filho, F., & Meireles, M. A. A. (2014). Obtaining sugars from coconut husk, defatted grape seed, and pressed palm fiber by hydrolysis with subcritical water. *Journal of Supercritical Fluids*, 89, 89–98. <https://doi.org/10.1016/J.SUPFLU.2014.02.017>
- Prado, J. M., Lachos-Perez, D., Forster-Carneiro, T., & Rostagno, M. A. (2016). Sub- and supercritical water hydrolysis of agricultural and food industry residues for the production of fermentable sugars: A review. *Food and Bioproducts Processing*, 98, 95–123. <https://doi.org/10.1016/J.FBP.2015.11.004>
- Ravber, M., Knez, Ž., & Škerget, M. (2015). Simultaneous extraction of oil- and water-soluble phase from sunflower seeds with subcritical water. *Food Chemistry*, 166, 316–323. <https://doi.org/10.1016/J.FOODCHEM.2014.06.025>
- Ribeiro, L. F., Ribani, R. H., Francisco, T. M. G., Soares, A. A., Pontarolo, R., & Haminiuk, C. W. I. (2015). Profile of bioactive compounds from grape pomace (*Vitis vinifera* and *Vitis labrusca*) by spectrophotometric, chromatographic and spectral analyses. *Journal of Chromatography B*, 1007, 72–80. <https://doi.org/10.1016/J.JCHROMB.2015.11.005>
- Rockenbach, I. I., Gonzaga, L. V., Rizelio, V. M., Gonçalves, A. E. de S. S., Genovese, M. I., & Fett, R. (2011). Phenolic compounds and antioxidant activity of seed and skin extracts of red grape (*Vitis vinifera* and *Vitis labrusca*) pomace from Brazilian winemaking. *Food Research International*, 44(4), 897–901. <https://doi.org/10.1016/J.FOODRES.2011.01.049>
- Rojas, M. C. (2022). *Aprovechamiento de los residuos sólidos orgánicos para la generación energía en Bogotá*. Fundación Universidad de América.

- Rostagno, M., Prado, J. M., Vardanega, R., Forster-Carneiro, T., Rostagno, M. A., Prado, J. M., Forster-Carneiro, T., Angela, M., & Meireles, A. (2014). *Study of Recovery of Fermentable Sugars with Subcritical Water and Carbon Dioxide from Palm Fiber and Grape Seed Life Cycle Assessment of Assai's Production Chain and Anaerobic Digestion of Residues after Hydrothermal Pretreatment View project Study of Recovery of Fermentable Sugars with Subcritical Water and Carbon Dioxide from Palm Fiber and Grape Seed*. 37. <https://doi.org/10.3303/CET1437068>
- Ruales, A. (2016). *Obtención de compuestos fenólicos a partir de residuos de uva isabella (Vitis labrusca)*.
- Santos, L. P., Morais, D. R., Souza, N. E., Cottica, S. M., Boroski, M., & Visentainer, J. V. (2011). Phenolic compounds and fatty acids in different parts of *Vitis labrusca* and *V. vinifera* grapes. *Food Research International*, 44(5), 1414–1418. <https://doi.org/10.1016/J.FOODRES.2011.02.022>
- Schmid, K. M., & Ohlrogge, J. B. (1996). Lipid metabolism in plants. *New Comprehensive Biochemistry*, 31(C), 363–389. [https://doi.org/10.1016/S0167-7306\(08\)60521-9](https://doi.org/10.1016/S0167-7306(08)60521-9)
- Scola, G., Conte, D., Spada, P. W. D. S., Dani, C., Vanderlinde, R., Funchal, C., & Salvador, M. (2010). Flavan-3-ol Compounds from Wine Wastes with in Vitro and in Vivo Antioxidant Activity. *Nutrients*, 2(10), 1048. <https://doi.org/10.3390/NU2101048>
- Shi, J., Yu, J., Pohorly, J., & Kakuda, Y. (2004). *Polyphenolics in Grape Seeds - Biochemistry and Functionality*.
- Spigno, G., Marinoni, L., & Garrido, G. (2017). State of the Art in Grape Processing By-Products. *Handbook of Grape Processing By-Products*, 1–27.
- Srinivas, K., King, J. W., Howard, L. R., & Monrad, J. K. (2010). Solubility of Gallic Acid, Catechin, and Protocatechuic Acid in Subcritical Water from (298.75 to 415.85) K. *Journal of Chemical and Engineering Data*, 55(9), 3101–3108. <https://doi.org/10.1021/JE901097N>
- Thirumalai Kumaran, S., Baranidharan, K., Uthayakumar, M., & Parameswaran, P. (2021). Corrosion studies on stainless steel 316 and their prevention – A review. *INCAS Bulletin*, 13(3), 245–251. <https://doi.org/10.13111/2066-8201.2021.13.3.21>
- Toscano, G., Riva, G., Duca, D., Pedretti, E. F., Corinaldesi, F., & Rossini, G. (2013). *Analysis of the characteristics of the residues of the wine production chain finalized to their industrial and energy recovery*. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2013.02.015>
- Universidad de Alicante, O. de separación. (2016). *Métodos aproximados para el cálculo de operaciones de separación de mezclas multicomponentes*.
- Valdés, J., Atencio, A. M., & Valadez, S. (2018). *Procesos de separación, columnas de destilación utilizando simuladores en laboratorios de ingeniería química industrial, en el Instituto Politécnico Nacional*.
- Wooley, R., & Putsche, V. (1996). *Development of an ASPEN PLUS Physical Property Database for Biofuels Components*.

- Yedro, F. M., García-Serna, J., Cantero, D. A., Sobrón, F., & Cocero, M. J. (2015). Hydrothermal fractionation of grape seeds in subcritical water to produce oil extract, sugars and lignin. *Catalysis Today*, 257(Part 2), 160–168. <https://doi.org/10.1016/J.CATTOD.2014.07.053>
- Zoecklein, B. W., Fugelsang, K. C., Gump, B. H., & Nury, F. S. (1990). Carbohydrates: Reducing Sugars. *Production Wine Analysis*, 114–128. https://doi.org/10.1007/978-1-4615-8146-8_6