

Escenario técnico y económico para la valorización integral a pequeña escala de residuos de naranja en Colombia

Technical and Economic Scenario for the Integral Small-Scale Valorization of Orange Waste in Colombia

Santiago Bedoya Betancur ^{*1}, **Sebastián Amar Gil** ², **Rolando Barrera Z** ¹, **Erasmó Arriola V** ², **Alba N. Ardila A.** ²

¹Grupo CERES Agroindustria e Ingeniería, Facultad de Ingeniería, Universidad de Antioquia (Medellín, Colombia), ²Grupo de Investigación en Catálisis Ambiental y Energías Renovables (CAMER), Politécnico Colombiano Jaime Isaza Cadavid (Medellín, Colombia).

*correspondence email: santiago_bedoya27081@elpoli.edu.co

Recibido: 17/03/2021. Modificado: 06/07/2021. Aceptado: 06/07/2021.

Abstract

Context: The integral valuation of orange peel was studied under a biorefinery scheme where orange oil (with hydrolate as a by-product and the valorization of the oil through the extraction of limonene in later stages), pectin and flour were obtained for use as a supplement in animal feeding.

Method: The process consisted of four general stages: i) extracting and obtaining orange oil and hydrolate through steam distillation, ii) obtaining limonene, iii) extracting pectin through the acid hydrolysis method, and iv) obtaining animal food from centrifugation and drying processes.

Results: The experiments and characterizations were carried out at the laboratory scale, from 700 g of peel (wet) 3,34 mL of oil (80-85 % limonene), about 500 mL of hydrolate and about 260 g of solid residues (dry) were obtained. From these, around 9,7 g of pectin and around 40,3 g of flour for animal food supplements were obtained from batches of 50 g of dry material.

Conclusions: According to the technical-economic analysis for the scale of production used, as well as for the national context, positive indicators such as the net present value (27'271.933) and the internal rate of return (5,27 %) were achieved, which show an interesting investment alternative to be considered as a waste valorization option for small and medium citrus producers in the country.

Keywords: Essential oil, orange peel, limonene, pectin, animal feed, waste valorization.

Acknowledgements: The authors would like to thank "Convocatoria de Proyectos de Investigación Sede Central y Sedes Regionales del Politécnico Colombiano Jaime Isaza Cadavid, 2018" for funding this project, as well as Universidad de Antioquia for the support through the Vice Rector's Office for Research and its support strategy for research groups in the 2018-2019 process of consolidation.

Language: Spanish

Open access



Cite this paper as: Bedoya-Betancur, S., Amar-Gil, S., Barrera-Zapata, R., Arriola-V, E., Ardila A, A.N.: Escenario técnico y económico para la valorización integral a pequeña escala de residuos de naranja en Colombia. INGENIERÍA, Vol. 26, Num. 3, 2021. 367:380.

© The authors; reproduction right holder Universidad Distrital Francisco José de Caldas.

<https://doi.org/10.14483/23448393.17783>

Resumen

Contexto: Se estudió la valorización integral de cáscara de naranja bajo un esquema de biorrefinería en el que se obtiene aceite de naranja (con hidrolato como subproducto y la valorización del aceite mediante la extracción de limoneno en etapas posteriores), pectina y harina para uso como suplemento en alimentación animal.

Método: El proceso consistió en cuatro etapas generales: i) extracción y obtención de aceite e hidrolato de naranja mediante el proceso de arrastre de vapor, ii) obtención de limoneno, iii) extracción de pectina por medio de hidrólisis ácida, y iv) obtención de pienso a partir de procesos de centrifugado y secado.

Resultados: Los experimentos y las caracterizaciones se realizaron a escala laboratorio, donde a partir de 700 g de cáscara (húmeda) se obtuvieron 3,34 mL de aceite (80-85 % limoneno), alrededor de 500 mL de hidrolato y cerca de 260 g de residuos sólidos (secos). De estos últimos, a partir de lotes de 50 g de material seco, se obtuvieron 9,7 g de pectina y alrededor de 40,3 g de harina para suplemento en alimentación animal.

Conclusiones: Según el análisis técnico-económico para la escala de producción utilizada y para el contexto nacional, se logran indicadores positivos como el valor presente neto (27'271.933) y la tasa interna de retorno (5,27 %), que muestran la alternativa de inversión interesante como para ser considerada una opción de valorización de residuos por pequeños y medianos productores de cítricos en el país.

Palabras clave: aceite esencial, cáscara de naranja, limoneno, pectina, pienso, valorización de residuos

Agradecimientos: Los autores agradecen a la “Convocatoria de Proyecto de Investigación Sede Central y Sedes Regionales del Politécnico Colombiano Jaime Isaza Cadavid, 2018” por financiar este proyecto, así como a la Universidad de Antioquia por el apoyo a través de la Vicerrectoría de Investigaciones y su estrategia de apoyo a los grupos de investigación en el proceso de consolidación 2018-2019.

Idioma: Español

1. Introducción

El crecimiento poblacional, ligado al necesario incremento en la producción de alimentos y la industrialización, ha acelerado el desarrollo de diversos sectores agroindustriales, con el consecuente aumento en la generación de materiales de desecho y residuos de cosecha [1]. Se estima que la producción mundial de desperdicios de alimentos constituye más de 1,3 billones de toneladas por año [2]. Los problemas ambientales más comúnmente asociados a esta industria se ven reflejados en aguas superficiales y subterráneas, cambios en el pH del suelo y generación de gases de efecto invernadero [3].

En cuanto a la industria de frutos cítricos, se estima a nivel global una producción cercana a los 124 millones de toneladas anuales, siendo Brasil, China, India, Estados Unidos y la UE algunos de los mayores productores [1]. Del total de producción de cítricos, entre el 30 y el 40 % se destina a la producción de jugos [4], por lo que las cáscaras, bagazos y semillas, que en el caso de frutos como la naranja pueden llegar a representar hasta el 40 % del peso total del fruto, se descartan como desechos [5]–[7]. No obstante, estos desechos tienen un alto potencial de valorización si se utilizan como materia prima para la obtención de subproductos de valor agregado, ya que contienen sustancias de interés comercial que incluyen, entre otros, diversos metabolitos, compuestos bioactivos, enzimas, fibras, material proteínico, aceites esenciales, azúcares fermentables, entre otros [4], [5], [8].

En la literatura se encuentran diversos estudios sobre la obtención de productos de valor agregado a partir de los residuos de la industria de los cítricos, específicamente cáscaras de naranja, buscando la integración de diferentes procesos y la obtención de variados productos a partir de la misma materia prima bajo el concepto de biorrefinería, para minimizar los impactos negativos en el medio ambiente a la vez que se favorece la economía de los procesos. A manera de ejemplo, Pourbafrani *et al.* [9] estudiaron la producción simultánea, a escala piloto, de bioetanol (con rendimientos cercanos a 40 L), metano (produciendo cerca de 45 m³), limoneno (alrededor de 9 L) y pectina (cerca de 39 kg). Lohrasbi *et al.* [10] realizaron el diseño del proceso y su análisis económico para la producción de limoneno, etanol y biogás. Senit *et al.* [11] propusieron la producción de terpenos, extractos fenólicos, pectina y monosacáridos. Por su parte, Patsalou *et al.* [2] estudiaron la producción integrada de aceite esencial, pectina, fertilizantes y ácido succínico. De la misma manera, otros autores han estudiado la extracción de aceite esencial, polifenoles y pectina utilizando técnicas y metodologías amigables con el medio ambiente [12]. En cuanto a la viabilidad económica de estos procesos, se han reportado análisis económicos para biorrefinerías con capacidad de tratamiento integral de hasta 100.000 toneladas de cáscara de naranja al año mediante procesos biotecnológicos, obteniendo como principales productos limoneno, pectina, etanol y metano, este último usado como fuente de energía en diversas etapas del mismo proceso de biorrefinería [11]. No obstante, algunos autores afirman que los altos costos asociados a etapas específicas de producción en una biorrefinería de naranja dificultan la posibilidad de implementar algunos procesos específicos [13].

En resumen y de acuerdo con la revisión de la literatura, es claro que los residuos de naranja contienen gran cantidad de sustancias de valor agregado. Por lo tanto, el procesamiento de tales residuos que contaminan el ambiente puede transformarlos en productos con valor económico que mejoren la economía de los procesos. En la Figura 1 se muestran algunos de los productos más comúnmente estudiados como posibles subproductos de valor agregado a partir del aprovechamiento de los residuos de naranja bajo el concepto de biorrefinería. No obstante, es importante considerar que no cualquier proceso puede ser fácilmente adaptado o no cualquier producto puede ser fácilmente comercializado si no se consideran las condiciones específicas (incluyendo condiciones sociales, geográficas, culturales y demográficas) de la zona donde los residuos se encuentran disponibles [14].

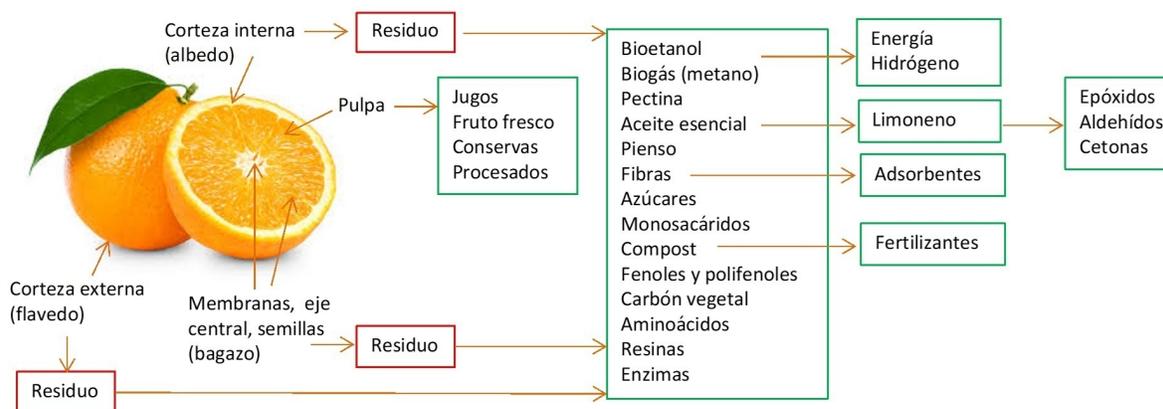


Figura 1. Algunos posibles productos a partir de la naranja y sus residuos

Fuente: elaboración propia.

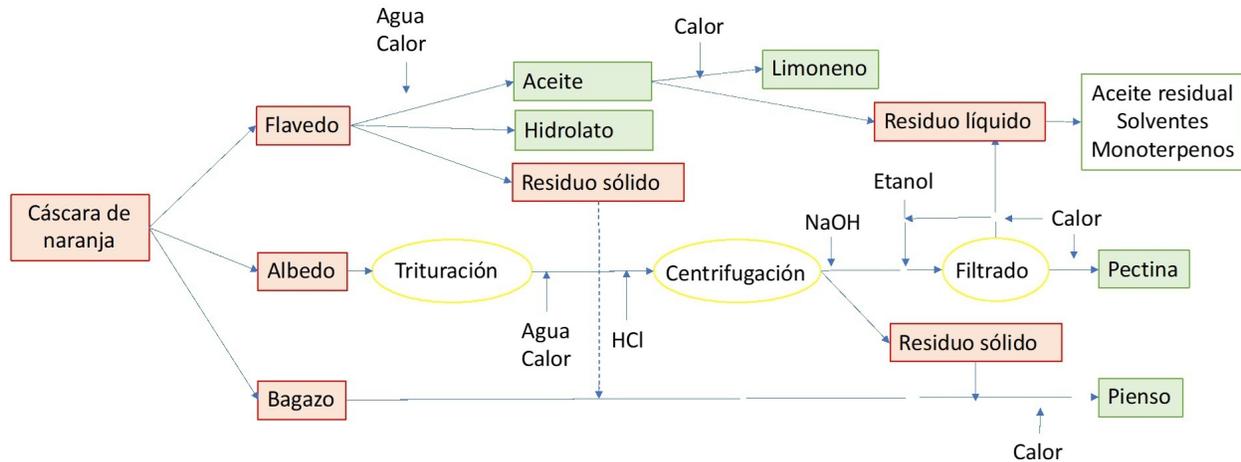


Figura 2. Esquema propuesto para una biorrefinería de cáscara de naranja

Fuente: elaboración propia.

En el caso de Colombia, la actividad agrícola y agroindustrial genera una cantidad de residuos cercana a los 72 millones de toneladas anuales, incluyendo residuos provenientes de café, palma de aceite, caña de azúcar, maíz, banano, plátano y cítricos. Generalmente dichos residuos son incinerados o dispuestos en rellenos sanitarios [4], [15].

Para el caso de las naranjas, en Colombia se producen cerca 230 mil toneladas por año [4], pero los residuos que se generan a partir de esa fruta no suelen ser aprovechados de manera eficiente [15], [16]. Los estudios en los que se aborda el aprovechamiento de estos residuos en Colombia se han enfocado principalmente en la obtención de biocombustibles, compostaje, fibras, suplementos alimenticios para animales, aceites o pectinas [4], [5], [16]–[20], los cuales son altamente deseados en el mercado nacional. No obstante, la mayoría de estos estudios se concentran en el aprovechamiento de los residuos de la naranja para la obtención de algún producto de manera aislada y no bajo el concepto integral de una biorrefinería. Adicionalmente, solo unos pocos incluyen análisis de viabilidad técnica y económica para los procesos propuestos [16], [21]–[23].

En este trabajo se presenta un análisis técnico y económico preliminar para el aprovechamiento integral de residuos de naranja a pequeña escala (procesamiento de 189 kg de cáscara de naranja al mes), obteniendo como productos el aceite de naranja, la pectina y la obtención de harina para suplemento alimenticio de animales (pienso). Se seleccionaron esos productos por presentar un mercado atractivo en el contexto nacional, por permitir el aprovechamiento integral de la totalidad de los residuos de naranja y porque los procesos o técnicas para su implementación son relativamente simples y pueden ser fácilmente adaptables, a pequeña y mediana escala, en regiones del país donde las condiciones socioculturales y económicas pueden dificultar la implementación de tecnologías de mayores costos o nivel de complejidad. La obtención y caracterización de estos productos se realizó a escala laboratorio, siguiendo procedimientos descritos en la literatura y que eventualmente pueden ser optimizados (en cuanto a los rendimientos específicos) bajo diferentes condiciones operativas. Los resultados a escala laboratorio se utilizaron como base de cálculo para realizar un análisis técnico-económico preliminar de su eventual implementación en el contexto na-

cional. Para el aprovechamiento del total de los residuos, inicialmente se extrajo el aceite de naranja (con hidrolato como subproducto y la posibilidad de aislar limoneno a partir del aceite como estrategia de valorización adicional en etapas posteriores). A partir de los residuos de la extracción del aceite, se extrajo la pectina y, finalmente, los residuos de la extracción de pectina se transformaron en harina para suplemento alimenticio animal. El esquema general de la biorrefinería propuesta en esta investigación para el aprovechamiento integral de cáscara de naranja se muestra en la Figura 2.

2. Materiales y métodos

2.1. Obtención y acondicionamiento de la materia prima

Como materia prima se utilizaron naranjas residuales (frutos que por su tamaño no cumplen las normas NTC 4086 para su comercialización, es decir, calibre inferior a 61 mm [24]) provenientes del departamento de Caldas (Colombia) y que fueron cosechadas durante el primer trimestre de 2020. Utilizando prensado, de cada fruto se extrajeron aproximadamente 43 cm³ de jugo para consumo. Las cáscaras residuales se lavaron con agua, se trozaron manualmente a un tamaño aproximado de 2 cm y se almacenaron en nevera a 4 °C hasta su utilización en los diferentes procesos. Antes de utilizarlas y con la ayuda de cuchillas, se separó el flavedo (corteza), el albedo (parte blanca de la cáscara) y el bagazo (membranas y eje central) (ver Figura 1).

2.2. Obtención y caracterización del aceite esencial de naranja

Para la extracción del aceite se usó un equipo extractor de aceites esenciales por arrastre de vapor a escala laboratorio marca Figmay, con cámara de extracción de 5,6 litros y sistema eléctrico para calentamiento y control de temperatura. Todas las pruebas se realizaron a presión atmosférica durante 2 horas de operación, fijando en el equipo la potencia (1.500 W), el nivel de agua (controlado mediante un controlador de nivel) y la cantidad de materia prima utilizada para la extracción según la capacidad del equipo (700 g de cáscara de naranja en cada lote). Los experimentos se realizaron por triplicado usando como materia prima la cáscara completa (flavedo + albedo + bagazo), combinaciones de algunos elementos constitutivos de la cáscara (flavedo + albedo, flavedo + bagazo), solo flavedo, solo albedo y solo bagazo.

El aceite extraído se almacenó en frascos ámbar a 4 °C. Para su caracterización [18], [25], se determinó el índice de acidez (mg de KOH requeridos para neutralizar 1 g de aceite esencial, norma ISO 1242:1999); la densidad relativa (pesando por separado agua destilada y aceite esencial en un picnómetro, norma ISO 279:1998); el índice de refracción (equipo Anton Paar, MCP 100 a longitud de onda de 589,3 nm) y el ángulo de rotación específica (polarímetro Anton Paar, Abemat 200, norma ISO 280:1998). También se determinó la solubilidad en etanol al 95 % (norma ISO 875:1999) y la cantidad de limoneno por cromatografía de gases, usando un equipo Shimadzu GC-2010 con un detector de ionización de llama y una columna capilar DB-1. El método cromatográfico se tomó de la literatura [26].

2.3. Extracción y caracterización de pectina

Los experimentos se realizaron por triplicado e iniciaron con el secado de la materia prima a 120 °C durante 48 horas. La materia prima utilizada fueron los residuos sólidos posteriores al proceso de extracción del aceite. Para la extracción de pectina se siguieron recomendaciones de la literatura [18], [19], [21], [27]–[29]. Cada lote se preparó con una solución de 50 g de material seco (triturado en molino de cuchillas y tamizado en malla ASTM 80) en 700 mL de agua desionizada. El pH de la solución se ajustó a 3 usando HCl (37 %). La solución se calentó a 85 °C por 40 minutos y posteriormente se centrifugó a 5.000 rpm por 2 minutos. Del sobrenadante se extrajo la pectina, mientras que el precipitado se usó posteriormente como materia prima para la producción de harina para alimentación animal (pienso). Al sobrenadante se adicionó NaOH al 40 % hasta alcanzar un pH de 12. Posteriormente se agregó etanol al 70 % (80 % del volumen inicial de la solución) para precipitar la pectina, se mantuvo la solución en reposo por 24 horas y después se filtró al vacío, secando el producto final a 40 °C por 24 horas.

La pectina se caracterizó por FTIR en un espectrofotómetro IR Shimadzu IRAffinity-1S, mezclando 1 mg de muestra con 100 mg de KBr. Adicionalmente se determinó su humedad en una estufa de secado a 120 °C. Para cuantificar el contenido de cenizas totales se llevó 1 g de muestra a una mufla a 600 °C por 4 horas. Por su parte, el peso equivalente y la acidez libre se determinaron por la técnica de Owen, titulando la muestra con rojo de fenol.

2.4. Obtención y caracterización de harina para suplemento en alimentación animal

Para la producción de pienso se utilizó el residuo del proceso de extracción de pectinas. La materia prima se secó a 60 °C por 24 horas en un horno convencional. Para su caracterización, se realizaron análisis bromatológicos en los que se determinó la cantidad de proteína y la cantidad de fibra siguiendo el método IN-GS-3.048 V8. También se determinó su contenido de humedad en una estufa de secado a 120 °C y su contenido de grasa por el método Soxhlet, con solventes orgánicos durante 2 horas [30].

3. Resultados

3.1. Extracción y caracterización del aceite esencial de naranja

En la Tabla I se presentan los resultados de extracción de aceite de naranja y la obtención de hidrolato como subproducto, utilizando en todos los casos 700 g de material (húmedo).

El mayor rendimiento hacia aceite esencial de naranja, utilizando como materia prima solo el flavedo (corteza externa de la cáscara), representa aproximadamente el 0,42 % p/p, cercano a datos reportados en la literatura y que oscilan entre el 0,5 % y 0,61 % p/p [13], [31]. La ausencia de aceite en el albedo y el bagazo explica la disminución en los rendimientos cuando se utilizan combinados con el flavedo como materia prima, pues la cantidad total de material utilizado para todas las extracciones fue similar (700 g).

Tabla I. Cantidad de aceite de naranja extraído a partir de diferentes partes de la cáscara

Material	Aceite (mL)	Hidrolato (mL)
Flavado	3,34 ± 0,2	aprox. 500
Flavado + albedo	2,83 ± 0,2	aprox. 300
Flavado + albedo + bagazo	1,34 ± 0,2	aprox. 300
Albedo + bagazo	trazas	trazas
Albedo	trazas	trazas
Bagazo	trazas	trazas

Por su parte, los análisis cromatográficos revelaron que el limoneno corresponde al principal componente en el aceite esencial (entre 80 y 85 %), detectándose además pequeñas cantidades de sustancias que corresponden a α -pineno, β -mirceno y β -linalol, entre otros.

En cuanto a la caracterización fisicoquímica del aceite, la Tabla II resume los valores determinados, observándose que en su mayoría coinciden con hidrocarburos alifáticos no oxigenados. De acuerdo con los valores de referencia que se muestran en la Tabla II (tomados de [20]), es posible considerar el producto obtenido para aplicaciones varias, incluyendo fragancia en productos para el hogar, cremas para masajes y productos de tocador, entre otras.

Tabla II. Caracterización fisicoquímica del aceite de naranja

Propiedad	Unidad	Valor	Valor referencia
Densidad (20 °C)	g/mL	0,865	0,842 - 0,855
Índice de refracción (20 °C)	nD	1,476	1,468 - 1,476
Solubilidad en etanol al 95 % (25 °C)	volúmenes	entre 7 y 10	entre 8 y 10
Rotación óptica	°	+93,8	+94 - +99
Viscosidad (20 °C)	mPas	0,918	0,99

3.2. Extracción y caracterización de pectina

En cuanto a la obtención de pectina, en los experimentos que se utilizó como materia prima solo flavado o solo bagazo no se obtuvo una cantidad significativa de producto. Los mayores rendimientos se obtuvieron al utilizar como materia prima solo albedo, con un rendimiento (en base seca) del 19,36 % ($\pm 0,44$), es decir, alrededor de 9,68 g de pectina por cada lote de 50 g de materia prima. Este valor concuerda con la literatura, en la que se han reportado rendimientos hacia la pectina entre el 14 y el 23 % utilizando diferentes variedades de naranja o diferentes condiciones de operación [6], [18]. La caracterización de la pectina obtenida se resume en la Tabla III.

Tabla III. Caracterización fisicoquímica de la pectina

Humedad (%)	Cenizas (%)	Contenido metoxilo (%)	Peso equivalente	Acidez libre (meq. carbolixos lb/g)
13,21 ± 1,02	2,10 ± 1,09	4,49 ± 0,04	2499,5	0,4

Un alto contenido de humedad en la pectina determina su textura e incide directamente sobre su estabilidad y calidad. Por su parte, la cantidad de cenizas puede afectar la capacidad de gelificación de la pectina. Dentro de los estándares recomendados para este parámetro el valor puede variar entre valores $<3,99\%$ [27] y valores $<10\%$ [32], según el fin último o uso de la pectina. En ese sentido, la pectina obtenida en este estudio puede tener un amplio margen de aplicaciones. El contenido de metoxilos permite clasificar la pectina obtenida como de bajo metoxilo, lo cual se correlaciona con poca solubilidad en agua.

Con relación al peso equivalente, su valor se correlaciona con la propiedad de gelificación. El valor obtenido en este estudio se ubica dentro de los rangos reportados para pectina extraída de otros tipos de naranja y diferentes condiciones de pH, que van desde 974 hasta 2.740. La acidez libre también se encuentra dentro de rangos reportados para pectinas extraídas a partir de cítricos (entre 0,372 y 0,844 meq. carboxilos lb/g) [28]. Los espectros FTIR permitieron identificar bandas características entre 1.000 y 1.200 relacionadas con el grupo C- O, bandas entre 1.500 y 1.700 relacionadas al C=O del ácido galacturónico, bandas entre 1.700 y 1.800 relacionadas con la señal del C=O de los ésteres, bandas entre 2.900 y 3.000 relacionadas con la presencia de grupos CH y bandas entre 3.000 y 3.500 atribuidas a grupos - OH, mostrando similitudes con el espectro FTIR de una pectina comercial [23].

3.3. Obtención y caracterización de harina para suplemento en alimentación animal

El rendimiento promedio de la harina fue de $80,64\% \pm 0,96$, es decir, se producen alrededor de 40,3 g de harina a partir de cada lote de 50 g utilizado para la extracción de pectina. En la Tabla IV se presentan los resultados de caracterización bromatológica de la harina.

Tabla IV. Caracterización fisicoquímica de la harina

Humedad (%)	Cenizas (%)	Grasa (%)	Proteína (%)	CHO (%)
14,45	10,59	1,94	2,63	70,39

CHO: Carbohidratos totales (determinados por diferencia).

El contenido de fibra se cuantificó alrededor del $27,44\%$ de los carbohidratos totales, por lo cual la harina obtenida a partir de residuo de naranja constituye una alternativa como uso potencial para elaboración de suplementos alimenticios para animales, ya sea para contribuir a otros nutrientes o como fuente de fibra dietaria; no obstante, procesos posteriores de secado pueden ser requeridos para incrementar el rango de aplicabilidad del producto [30].

3.4. Análisis técnico-económico preliminar

Con el objetivo de realizar un análisis técnico-económico del proceso integrado, se establecieron diversos indicadores económicos considerando la producción, a partir de la cáscara de naranja proveniente de residuos agroindustriales, de aceite, hidrolato, limoneno, pectina y harina para alimentación animal. Como base de cálculo se usaron los consumos de reactivos y materia prima, así como los rendimientos obtenidos a escala de laboratorio para los productos mencionados. Para la proyección de producción mensual, se consideró el procesamiento de 9 lotes diarios (incluyendo

entre cada lote el tiempo muerto de los equipos para su carga, descarga y limpieza) durante 30 días al mes. En cada lote se supone el procesamiento de 700 g de cáscaras de naranja. Bajo esos supuestos, la Tabla V resume los consumos y costos de reactivos mensuales para la biorrefinería de cáscara de naranja propuesta (Figura 2). Por tratarse de una escala de producción pequeña y considerando su eventual implementación o acoplamiento en o cerca a industrias procesadoras de cítricos, el costo de la materia prima (cáscara de naranja residual) y su acopio se consideran en cero pesos.

Tabla V. Consumo y costos (COP) de reactivos y materia prima a escala de laboratorio

Materia prima/reactivo	Unidad	Consumo mensual	Costo mensual
Cáscara de naranja	kg	189	-
HCl (37 %)	L	0,810	\$ 70.330
Etanol	L	151,2	\$ 904.828
Rojo de fenol	L	0,810	\$ 1'850.760
NaOH	L	1,350	\$ 980.300
Total			\$ 3'806.218

Para la obtención y caracterización (control de calidad) de los diferentes productos, se requieren inversiones fijas representadas en diversos equipos de laboratorio, de cómputo y muebles, incluyendo equipo de centrifugación, plancha de agitación y calentamiento, equipo extractor de aceites, mufla, Soxhlet, balanza de humedad, estufa y vidriería general. Tomando como base los costos de estos equipos a escala laboratorio, las inversiones fijas se estimaron en \$ 25'939.965 COP.

En la Tabla VI se presentan los costos de operación estimados, incluyendo mano de obra, agua, energía eléctrica, arrendamiento y servicios técnicos proyectados por mes de operación. El costo de mano de obra se estimó con base en el salario mínimo en Colombia para el año 2021, suponiendo personal no calificado. Para los costos de agua y energía se tomó como base el valor promedio de m³ y kWh (respectivamente) en la ciudad de Medellín. En cuanto a los costos de arrendamiento, se tomó como referencia el promedio de un local comercial entre 80 y 100 m² en la ciudad de Medellín. Por su parte, los costos de servicios técnicos incluyen 4 análisis mensuales del contenido de fibra y proteína en la harina, 2 análisis mensuales de espectroscopia FTIR para la pectina y 2 análisis mensuales de cromatografía de gases para el aceite, todos ellos con el fin de llevar registro de control y calidad de los productos. El costo de los análisis se fijó según los valores promedio en laboratorios certificados.

La Tabla VII muestra el volumen de producción estimado y el valor (COP) comercial para los productos obtenidos en el presente trabajo. En general, se encontró una amplia variabilidad en los precios según la fuente consultada (casas comerciales como Sigma-Aldrich y Merck, diversos sitios Web, distribuidores minoritarios y productores directos, entre otros) y sus especificaciones técnicas. A manera de ejemplo, para el aceite de naranja y el hidrolato se encuentran precios, por mililitro, en los intervalos de \$500 - \$7.200 y \$50 - \$380, respectivamente. Dada la naturaleza preliminar de este estudio, en la Tabla VII se asume un valor conservador de los mismos, utilizando el promedio de los valores, excluyendo datos máximos y mínimos en cada caso. Del total de ventas, dados los volúmenes de producción y valores de venta seleccionados, se observa que cerca del 85 % de los ingresos se espera a partir del hidrolato, dado su alto volumen de producción. Bajo tal

Tabla VI. Costos operativos estimados para un mes de producción

Descripción	Cantidad	Unidad	Valor unitario	Total
Personal	3	Salario	\$ 1'014.980	\$ 3'044.940
Agua	4,8	m ³	\$ 3.588	\$ 17.222
Energía	2.700	kWh	\$ 498	\$ 1'344.600
Arrendamiento	1	N/A	\$ 3'000.000	\$ 3'000.000
Servicios técnicos	8	Análisis	\$ 150.530	\$ 1'204.240
Total				\$ 8'611.002

escenario, un análisis económico riguroso podría considerar excluir del proceso global productos como la harina, cuya contribución a los ingresos totales es inferior al 1 %; sin embargo, desde una perspectiva ambiental, su inclusión en el proceso global es interesante, ya que permite transformar la totalidad de los residuos en productos de valor, mientras que con la sola obtención de aceite (limoneno), hidrolato y pectina se mantendría un alto porcentaje de desecho sólido de la cáscara para su disposición final. Adicionalmente, un esquema de producción a mayor escala podría generar suficiente cantidad de harina como para considerar una efectiva inclusión de este producto en los mercados colombianos.

Tabla VII. Producción y valor estimado para la producción mensual

Producto	Unidad	Valor unitario (COP)	Unidades Producidas (mes)	Total ventas (COP)
Pectina	kg	\$ 120.000	2,61	\$ 313.200
Harina	kg	\$ 2.600	10,89	\$ 28.314
Aceite	mL	\$ 1.500	901,8*	-
Hidrolato	mL	\$ 82	135.000	\$ 11'070.000
Limoneno	mL	\$ 2.200	766,53*	\$ 1'686.366
Total				\$ 13'097.880

*La producción de aceite y limoneno se asume mutuamente excluyente para el análisis económico, estimando la producción del limoneno como el 85 % del aceite.

Con la información de las Tablas **V-VII** se estimaron la tasa interna de retorno (TIR), el valor presente neto (VPN) y la relación beneficios/costos, suponiendo una inversión de \$174'946.605 COP para cubrir costos, gastos y operaciones durante el primero de los 10 años que se suponen como vida útil del proyecto. Una depreciación anual de equipos de \$ 2'593.997 COP y un valor de salvamento del proyecto asumido como el 20 % de la inversión inicial, es decir \$ 34'989.321 COP. Otras suposiciones para el análisis económico incluyen un incremento anual en los costos de 4,8 % (tomando como referencia los últimos cinco años en la inflación en Colombia), una tasa de oportunidad del 9 % (según datos del Departamento Nacional de Planeación) y un préstamo de \$ 87'473.303 COP, es decir, del 50 % de la inversión inicial [33], con una tasa de interés anual del 12 % y una proyección de 10 años. También se utiliza para el análisis un índice de precios al consumidor (IPC) de 3,5 % e impuestos a la renta del 29 %. En este sentido, se esperan los ingresos por venta y costos de operación mostrados en la Tabla **VIII**.

Con la información descrita, el VPN se calcula en \$ 27'271.933 COP, la TIR en 5,27 % y la relación beneficio costo (I B/C) en 1,31, indicando que, a la escala de producción analizada, la inversión presenta índices de rentabilidad positivos que pueden llegar a superar tasas de oportunidad

Tabla VIII. Ingresos por venta y costos de operación (en millones de pesos colombianos)

Periodo	2021	2022	2023	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030
Ingresos venta	157,2	162,7	168,4	174,3	180,4	186,7	193,2	200	207	214,2
Costos operación	124,5	130,5	136,7	143,3	150,2	157,4	164,9	172,9	181,2	189,9

y riesgos financieros. No obstante, es importante considerar diversos escenarios (tanto positivos como negativos) frente a las suposiciones realizadas en este estudio, considerando aspectos como la variabilidad en los precios asumidos para los diferentes productos y que no necesariamente serán tan conservadores en un contexto real; la escala de producción que dentro de una idea o plan de negocio puede ser superior a la usada en este estudio; o valorar el potencial impacto ambiental del proyecto al contribuir con una disminución en la generación de residuos, lo que eventualmente puede captar apoyos o financiación estatal o de entidades no gubernamentales disminuyendo los costos de inversión, entre otros. En cualquier caso y dado el relativo bajo nivel de producción supuesto al tomar como base la escala laboratorio, los indicadores VPN, TIR y B/C permiten suponer que, incluso frente a peores escenarios, la valoración de residuos de naranja mediante el esquema de biorrefinería propuesto en esta investigación continuará siendo atractivo como inversión financiera, además de contribuir positivamente al impacto en el ambiente por utilizar desechos como materia prima.

4. Conclusiones

De acuerdo con los resultados de esta investigación, incluso para una pequeña escala de producción y con el uso de tecnologías de fácil adaptación, es posible considerar el aprovechamiento integral de la cáscara de naranja para ayudar a mantener competitivo el mercado de este cítrico de manera amigable con el ambiente, ofreciendo una nueva gama de posibilidades para los pequeños y medianos productores de regiones específicas del país, donde la contratación de personal calificado o la inversión para la implementación de técnicas o procesos más elaborados pueda resultar complicada.

Como aspecto novedoso de esta investigación se tiene la separación de la materia prima (cáscara de naranja) para extraer el aceite solo de la corteza exterior (flavedo), la pectina de la corteza interior (albedo) y harina para suplemento animal de los residuos resultantes de dichos procesos. De acuerdo con indicadores económicos como TIR y VPN, bajo ese esquema de producción y el uso o comercialización de subproductos como el hidrolato o la valoración del aceite para su comercialización como limoneno, se puede plantear un modelo de negocio que vale la pena ser considerado por pequeños y medianos productores dentro de la industria de los cítricos en el país.

Referencias

- [1] C. Caldeira, A. Vlysidis, G. Fiore, V. De Laurentiis, G. Vignali and S. Sala, "Sustainability of food waste biorefinery: A Review on valorisation pathways, techno-economic constraints, and environmental assessment", *Biore-source Technology*, vol. 312, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2020.123575> ↑368
- [2] M. Patsalou, A. Chrysargyris, N. Tzortzakis and M. Koutinas, "A biorefinery for conversion of citrus peel waste into essential oils, pectin, fertilizer and succinic acid via different fermentation strategies", *Waste Management*, vol. 113, pp. 469-477, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2020.06.020> ↑368, 369

- [3] G. Mao, D. Wu, C. Wei, W. Tao, X. Ye, R. J. Linhardt, C. Orfila, S. Chen, "Reconsidering conventional and innovative methods for pectin extraction from fruit and vegetable waste: Targeting rhamnagalacturonan I", *Trends in Food Science & Technology*, vol. 94, pp. 65-78, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2019.11.001> ↑368
- [4] L. V. Peñaranda, S. P. Montenegro y P. A. Giraldo, "Aprovechamiento de residuos agroindustriales en Colombia", *Revista de Investigación Agraria y Ambiental*, vol. 8, no. 2, pp. 141-150, 2017. ↑368, 370
- [5] A. G. Manrique, "Visión general del aprovechamiento de residuos cítricos como materia prima de biorrefinerías", *Cuadernos del Tomás*, no. 10, pp. 153-168, 2018. ↑368, 370
- [6] A. K. Tovar, L. Godínez, F. Espejel, R.-M. Ramírez-Zamora, and I. Robles, "Optimization of the integral valorization process for orange peel waste using a design of experiments approach: Production of high-quality pectin and activated carbon", *Waste Management*, vol.85, pp. 202-213, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2018.12.029> ↑368, 373
- [7] D. L. Ortiz, E. Batuecas, C. E. Orrego, L. J. Rodríguez, E. Camelin, and D. Fino, "Sustainable management of peel waste in the small-scale orange juice industries: A Colombian case study", *Journal of Cleaner Production*, vol. 265, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.121587> ↑368
- [8] E. Tsouko, S. Maina, D. Ladakis, I. Kookos, and A. Koutinas, "Integrated biorefinery development for the extraction of value-added components and bacterial cellulose production from orange peel waste streams", *Renewable Energy*, vol. 160, pp. 944-954, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2020.05.108> ↑368
- [9] M. Pourbafrani, G. Forgács, I. S. Horváth, C. Niklasson, and M. Taherzadeh, "Production of biofuels, limonene and pectin from citrus wastes", *Bioresource Technology*, vol. 101, no. 11, pp. 4246-4250, 2010. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2010.01.077> ↑369
- [10] M. Lohrasbi, M. Pourbafrani, C. Niklasson, and M. Taherzadeh, "Process design and economic analysis of a citrus waste biorefinery with biofuels and limonene as products", *Bioresource Technology*, vol. 101, no. 19, pp. 7382-7388, 2010. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2010.04.078> ↑369
- [11] J. J. Senit, D. Velasco, A. Gomez, M. Sanchez-Barba, J. M. Toledo, V. Santos, F. Garcia-Ochoa, P. Yustos, M. Ladero, "Orange peel waste upstream integrated processing to terpenes, phenolics, pectin and monosaccharides: Optimization approaches", *Industrial Crops and Products*, vol. 134, pp. 370-381, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2019.03.060> ↑369
- [12] M. Boukroufa, C. Boutekedjiret, L. Petigny, N. Rakotomanomana, and F. Chemat, "Bio-refinery of orange peels waste: A new concept based on integrated green and solvent free extraction processes using ultrasound and microwave techniques to obtain essential oil, polyphenols and pectin", *Ultrasonics Sonochemistry*, vol. 24, pp. 72-79, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2014.11.015> ↑369
- [13] M. Ortiz-Sanchez, J.-C. Solarte-Toro, J.-A. González-Aguirre, K. Peltonen, P. Richard, and C. A. Cardona Alzate, "Pre-feasibility analysis of the production of mucic acid from orange peel waste under the biorefinery concept", *Biochemical Engineering Journal*, vol. 161, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.bej.2020.107680> ↑369, 372
- [14] J. F. Murcia, A. N. Ardila, R. Barrera, "A Bio-refinery approach from pineapple in the context of non-technified crops: The Choco-Colombian region", *Agricultural Reviews*, Vol. 41 (4), 2020, pp. 317-327, 2020. ↑369
- [15] Y. A. Vargas y L. I. Pérez, "Aprovechamiento de residuos agroindustriales para el mejoramiento de la calidad del ambiente", *Facultad de Ciencias Básicas*, vol. 14, no. 1, 59-72, 2018. <https://doi.org/10.18359/rfcb.3108> ↑370
- [16] A. M. Trujillo, *Plan de negocio para el aprovechamiento de residuos de naranja en Bogotá D.C. y la generación de oportunidades innovadoras y sostenibles con miras al mercado internacional*. Bogotá, Colombia, Universidad Piloto de Colombia, 2019. ↑370
- [17] S. M. Yepes, L. J. Montoya y F. Orozco, "Valorización de residuos agroindustriales - frutas - en Medellín y el sur del valle del Aburrá, Colombia", *Facultad Nacional de Agronomía*, vol. 61, no. 1, pp. 4422-4431, 2008. ↑370
- [18] J. P. Rojas, A. Perea y E. E. Stashenko, "Obtención de aceites esenciales y pectinas a partir de subproductos de jugos cítricos", *Vitae*, vol. 16, no. 1, pp. 110-115, 2009. ↑370, 371, 372, 373
- [19] I. Cerón-Salazar y C. Cardona-Alzate, "Evaluación del proceso integral para la obtención de aceite esencial y pectina a partir de cáscara de naranja", *Ingeniería y Ciencia*, vol. 7, no. 13, pp. 65-86, 2011. ↑370, 372
- [20] E. P. Hurtado y A. L. Villa (2016), "Estudio de mercado aceite esencial de naranja en Colombia en el período 2009-2014", *Revista Colombiana de Ciencias Hortícolas*, vol. 10, no. 2, pp. 301-310, 2016. ↑370, 373
- [21] K. A. Rodríguez y A. M. Román, *Extracción y evaluación de pectina a partir de la cáscara de naranja de las variedades Citrus sinensis y Citrus paradisi y propuesta de diseño de planta piloto para su producción* (Tesis de

- grado), Universidad de El Salvador, 2014. ↑370, 372
- [22] F. Araque y R. E. Moscoso, *Propuesta de diseño del proceso productivo para la obtención de pectina a base de residuos cítricos en Colombia, de acuerdo a las necesidades técnicas, comerciales y financieras requeridas* (Tesis de grado), Pontificia Universidad Javeriana, 2013. Recuperado de: <http://hdl.handle.net/10554/6353> ↑370
- [23] M. Güzel, and Ö. Akpınar, “Valorisation of fruit by-products: Production characterization of pectins from fruit peels”, *Food and Bioproducts Processing*, vol. 115, pp. 126-133, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.fbp.2019.03.009> ↑370, 374
- [24] V. Acevedo y D. M. Ramírez, *Análisis técnico y económico de la pectina, a partir de la cáscara de la naranja (Citrus sinensis)* (Trabajo de grado), Universidad de San Buenaventura Cali, 2011. ↑371
- [25] M. Escalante, I. Santos, L. B. Rojas y C. Lárez, “Aprovechamiento de desechos orgánicos: 1. Extracción y caracterización del aceite de semillas de naranja colectadas en expendios ambulantes de jugos”, *Avances en Química*, vol. 7, no. 3, pp. 181-186, 2012. ↑371
- [26] R. Barrera, A. L. Villa y C. Montes de Correa, “Limonene Epoxidation: Diffusion and Reaction over PW-Amberlite in a Triphasic System”, *Industrial & Engineering Chemistry Research*, vol. 45, no. 13, pp. 4589-4596, 2006. <https://doi.org/10.1021/ie060098b> ↑371
- [27] R. Vásquez, L. Ruesga, R. D’Addosio, G. Páez y M. Marín, “Extracción de pectina a partir de la cáscara de plátano (Musa AAB, subgrupo plátano) clon hartón”, *Revista de la Facultad de Agronomía*, vol. 25, no. 2, pp. 318-333, 2008. ↑372, 374
- [28] H. A. Arias y H. J. Tuiran, *Obtención de pectinas cítricas a base de las cascarras de naranja desechadas de los diferentes puestos de refresquerías de la ciudad de: Santa Marta* (Trabajo de grado), Universidad del Magdalena, 2009. ↑372, 374
- [29] L. H. Reichembach, and C. L. de Oliveira Petkowicz, “Extraction and characterization of a pectin from coffee (*Coffea arabica* L.) pulp with gelling properties”, *Carbohydrate Polymers*, vol. 245, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2020.116473> ↑372
- [30] C. Sáenz, A. M. Estévez y S. Sanhueza, “Utilización de residuos de la industria de jugos de naranja como fuente de fibra dietética en la elaboración de alimentos”, *Archivos Latinoamericanos de Nutrición*, vol. 57, no. 2, pp. 186-191, 2007. ↑372, 374
- [31] J. A. Siles, Q. Li, and I. P. Thompson, “Biorefinery of waste orange peel”, *Critical Reviews in Biotechnology*, vol. 30, no. 1, pp. 63-69, 2010. <https://doi.org/10.3109/07388550903425201> ↑372
- [32] National Academy of Sciences. *Food Chemicals Codex*. Washington: National Academy Press, 1996. ↑374
- [33] C. C. Redondo y A. P. Báez, *Análisis financiero para la obtención de un crédito constructor* (Trabajo de grado). Universidad Libre Seccional Cúcuta, 2015. Recuperado de: <http://hdl.handle.net/10901/11805> ↑376

Santiago Bedoya Betancur

Estudiante de Maestría en Ingeniería de la Universidad de Antioquia, Medellín, Colombia. Ingeniero Químico de la Universidad Nacional, Medellín, Colombia. Docente-Investigador en el Politécnico Colombiano Jaime Isaza Cadavid (PCJIC) (Medellín, Colombia), integrante del Grupo de Investigación CERES - Agroindustria & Ingeniería, Investigador en el grupo CAMER (Catálisis Ambiental y Energías Renovables) y Coinvestigador del proyecto Producción de Ácido Clavulánico en Colombia, financiado por Colciencias.

Correo electrónico: sabedoyab@unal.edu.co

Sebastian Amar Gil

Estudiante de Maestría en Ingeniería e Ingeniero Químico de la Universidad de Antioquia, Medellín, Colombia. Investigador Principal y Coinvestigador en diversos proyectos adscritos al Politécnico Colombiano Jaime Isaza Cadavid en el Grupo de Investigación Catálisis Ambiental y Energías Renovables (CAMER) e integrante del Grupo de Investigación CERES - Agroindustria & Ingeniería.

Correo electrónico: ssebastian.amar@udea.edu.co

Rolando Barrera Z

Doctor en Ingeniería, Magíster en Ciencias Químicas e Ingeniero Químico de la Universidad de Antioquia, Medellín, Colombia. Profesor (escalafón: asociado) del Departamento de Ingeniería Química de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de Antioquia y Coordinador del Grupo de Investigación CERES - Agroindustria & Ingeniería.
Correo electrónico: rolando.barrera@udea.edu.co

Erasmo Arriola V

Magíster en Ingeniería Química de la Universidad Autónoma Metropolitana Iztapalapa. Docente de la Facultad de Ciencias Básicas, Sociales y Humanas del Politécnico Colombiano Jaime Isaza Cadavid. Integrante del Grupo de Investigación en Catálisis Ambiental y Energías Renovables (CAMER).
Correo electrónico: yackko@gmail.com

Alba N. Ardila A

Doctora en Ciencias (Ingeniería Química) de la Universidad Autónoma Metropolitana Iztapalapa de México D.F., Magíster en Ciencias Químicas y Licenciada en Biología y Química de la Universidad de Antioquia. Profesora Titular adscrita al Programa de Tecnología en Química Industrial de Laboratorio de la Facultad de Ciencias Básicas, Sociales y Humanas del Politécnico Colombiano Jaime Isaza Cadavid. Directora del Grupo de Investigación en Catálisis Ambiental y Energías Renovables (CAMER).
Correo electrónico: anardila@elpoli.edu.co