



UNIVERSIDAD  
**NACIONAL**  
DE COLOMBIA

# **Caracterización multidimensional y usos potenciales de los excedentes productivos de zanahoria (*Daucus carota*) en el oriente del departamento de Antioquia**

**Jaison Martínez Saldarriaga**

Universidad Nacional de Colombia  
Facultad de Ciencias Agrarias, Departamento de Ingeniería Agrícola y Alimentos  
Medellín, Colombia  
2025



# **Caracterización multidimensional y usos potenciales de los excedentes productivos de zanahoria (*Daucus carota*) en el oriente del Departamento de Antioquia**

**Jaison Martínez Saldarriaga**

Tesis o trabajo de investigación presentada(o) como requisito parcial para optar al título  
de:

**Magister en Ciencia y Tecnología de Alimentos**

Director (a):

M.Sc. Juan Camilo Henao Rojas

Codirector (a):

Ph.D. Edith M. Cadena Chamorro  
Ph.D. Diana Paola Yepes Betancur

Línea de Investigación:

Ciencia y Tecnología de Alimentos

Grupo de Investigación:

Ingeniería Agrícola

Universidad Nacional de Colombia

Facultad de Ciencias Agrarias, Departamento de Ingeniería Agrícola y Alimentos

Medellín, Colombia

2025

IV Caracterización multidimensional y usos potenciales de los excedentes productivos de zanahoria (*Daucus carota*) en el oriente del Departamento de Antioquia

---



*A mis padres y a mi familia que fueron mi sustento, espero siempre seguirlos haciendo sentir orgullosos.*

*A Valery por su amor infinito, su comprensión y por siempre creer en mí.*

## Agradecimientos

A la Universidad Nacional de Colombia Sede Medellín, por ser ese gran espacio de crecimiento personal y profesional, por todos los conocimientos obtenidos a lo largo de mis años de pregrado y posgrado, y por ser mi segundo hogar tantas veces.

A la Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria – Agrosavia, por brindarme la oportunidad de formarme entre ustedes, por ser un ejemplo y un sueño que logré alcanzar, por rodearme de profesionales y personas espectaculares que no dudaron en compartir sus experiencias, conocimientos y formas de ver la vida.

A mi director, tutor y mentor Juan Camilo Henao Rojas por su confianza, fe y acompañamiento constante en esta travesía, por creer en mí, en mis capacidades, por su ambición inagotable en enseñar y verme crecer, y por ser ese investigador modelo a seguir.

A mis codirectoras, la profesora Edith Cadena Chamorro por ser siempre esa madre en la universidad, por incentivar me a superarme y por creer en mí siempre; y a Diana Yepes Betancur por impulsarme a dar este salto, por poner su confianza en mí y por su apoyo incondicional.

A mis compañeros y amigos del Laboratorio de Química de Productos Naturales del Centro de Investigación La Selva de Agrosavia, Yeraldin Bedoya, Amelia Madroñero, Melisa Castañeda, Robert Ardila, Ximena Rojas, Viviana Galeano y Daniela Ortiz, gracias por tanto apoyo.

A mis mentores Diego Flórez Hernández y Adriana Gallego por sus conocimientos, trabajo en conjunto y lo especial e importante de sus enseñanzas.

VIII Caracterización multidimensional y usos potenciales de los excedentes productivos de zanahoria (*Daucus carota*) en el oriente del Departamento de Antioquia

---

Infinitas gracias a mis padres, Aliria Saldarriaga y Abelardo Martínez, por su apoyo innegable y sustento en esta etapa tan importante, a mi familia por su acompañamiento incondicional, y a Valery Medina por su motivación, su impulso constante, por nunca dudar de mí y por ser esa compañera de vida invaluable.

## Resumen

### **Caracterización multidimensional y usos potenciales de los excedentes productivos de zanahoria (*Daucus carota*) en el oriente del Departamento de Antioquia**

Los excedentes de producción del cultivo de zanahoria (*Daucus carota* L.) representan una fuente desaprovechada de biomasa vegetal con alto valor funcional, cuyo potencial puede ser aprovechado bajo principios de bioeconomía circular. Esta investigación integró metodologías de caracterización fisicoquímica, bromatológica, biofuncional, análisis metabolómico y vigilancia científica con el fin de explorar el perfil nutricional, químico y las vocaciones de uso de estos excedentes de producción. Las zanahorias descartadas por criterios comerciales (baja calidad visual) en la etapa de cosecha mostraron niveles elevados de compuestos fenólicos y actividad antioxidante, equiparables o superiores a los de la zanahoria comercializable. A través de técnicas LC-MS/MS se identificaron 90 metabolitos, entre ellos alcaloides, flavonoides, terpenoides y polifenoles con propiedades antioxidantes, antiinflamatorias, nutracéuticas y farmacológicas ampliamente referenciadas, cuya abundancia estuvo asociada a las condiciones microclimáticas del cultivo en dos clústeres climáticos, El Santuario junto a Rionegro y Marinilla. Adicionalmente, mediante una serie de análisis bibliométricos, cienciométricos y patentométricos se identificaron tendencias globales en bioprospección fitoquímica, áreas clave en investigación aplicada y nichos de mercado para el desarrollo de alimentos funcionales (humano y animal), biocosméticos y productos nutracéuticos. Los hallazgos evidencian que los excedentes de producción de zanahoria representan una fuente potencial de materia prima subutilizada con características comparables o superiores a la zanahoria estándar, poseen un perfil químico valioso y versátil, que incluye compuestos de interés como feruloyltiramina, 4'-methoxyflavonol, cryptotanshinona y nuciferina, los cuales proporcionan un potencial en bioprospección en alimentos biofuncionales, nutracéuticos, tratamientos medicinales y aplicaciones industriales; además, su

X Caracterización multidimensional y usos potenciales de los excedentes productivos de zanahoria (*Daucus carota*) en el oriente del Departamento de Antioquia

---

aprovechamiento representa una oportunidad estratégica para fomentar modelos sostenibles, integradores y basados en innovación científica y tecnológica.

**Palabras clave:** zanahoria, excedentes de producción, caracterización funcional, metabolómica, compuestos bioactivos, bioprospección, economía circular.

## Abstract

### **Multidimensional characterization and potential uses of carrot (*Daucus carota*) production surpluses in the eastern part of the Department of Antioquia**

Agronomic production surpluses from carrot (*Daucus carota* L.) cultivation constitute an underutilized plant biomass source with high functional value, offering significant potential within circular bioeconomy strategies. This study integrated physicochemical, bromatological, and biofunctional characterization, metabolomic profiling, and scientific surveillance to investigate carrot agronomic surplus nutritional composition, chemical diversity, and industrial applicability. Carrots discarded due to commercial grading standards at harvest exhibited elevated phenolic compounds and antioxidant capacity levels, often surpassing market-grade carrots. LC-MS/MS analysis enabled the identification of 90 metabolites, including alkaloids, flavonoids, terpenoids, and polyphenols with well-documented antioxidant, anti-inflammatory, and pharmacological potential, whose abundance was influenced by local microclimatic conditions. Additionally, bibliometric, scientometric, and patentometric analyses revealed global trends in fitochemistry bioprospecting, key areas to applied research, and emerging market niches for functional foods (human food and animal feed), biocosmetics, and nutraceuticals. The findings demonstrate that carrot production surpluses represent a potential source of underutilized raw material with characteristics comparable to or superior to standard carrots, possessing a valuable and versatile chemical profile that includes compounds of interest such as feruloyltiramine, 4'-methoxyflavonol, cryptotanshinone, and nuciferine, which offer bioprospecting potential for biofunctional foods, nutraceuticals, medicinal treatments, and industrial applications; additionally, their valorization represents a strategic opportunity to promote sustainable, integrative, and innovation-driven production models.

XII Caracterización multidimensional y usos potenciales de los excedentes productivos de zanahoria (*Daucus carota*) en el oriente del Departamento de Antioquia

---

**Keywords:** carrot, agricultural by-products, functional characterization, metabolomics, bioactive compounds, bioprospecting, circular economy.

# Contenido

Resumen.....	IX
Abstract.....	XI
Lista de Figuras.....	XVI
Lista de Tablas .....	XVIII
Lista de Abreviaturas .....	XIX
Introducción .....	1
Marco teórico.....	5
Objetivos.....	12
<b>1. Capítulo 1: Caracterización integral de los excedentes de producción de zanahoria (<i>Daucus carota</i> L.): Perspectivas para el aprovechamiento sostenible de residuos agroalimentarios.....</b>	<b>13</b>
1.1 Resumen.....	13
1.2 Abstract.....	14
1.3 Introducción.....	15
1.4 Materiales y métodos .....	18
1.4.1 Material vegetal .....	18
1.4.2 Muestreo y análisis estadístico .....	19
1.4.3 Caracterización fisicoquímica .....	21
1.4.4 Procesamiento de muestras y preparación de extractos.....	22
1.4.5 Análisis del contenido total de fenoles .....	23
1.4.6 Determinación de la capacidad antioxidante.....	23
1.4.7 Análisis del perfil bromatológico y nutricional.....	25
1.4.8 Análisis estadístico .....	26
1.5 Resultados y discusión.....	27
1.5.1 Composición fisicoquímica de los excedentes de producción de zanahoria...27	
1.5.2 Análisis de clúster jerárquico .....	31
1.5.3 Análisis de componentes principales .....	32
1.5.4 Análisis de rangos múltiples.....	36
1.5.5 Vocaciones de uso de los excedentes de producción.....	39
1.6 Conclusiones.....	41
<b>2. Capítulo 2: Perspectiva metabolómica de la biomasa residual de zanahoria: Un enfoque de bioprospección a través de los microclimas colombianos .....</b>	<b>43</b>
2.1 Resumen.....	43

2.2	Abstract .....	44
2.3	Introducción .....	44
2.4	Materiales y métodos .....	49
2.4.1	Material vegetal y condiciones de cultivo .....	49
2.4.2	Preparación de muestras .....	51
2.4.3	Condiciones LC/MS y RP-LCMS/MS-QTOF .....	52
2.4.4	Procesamiento y análisis de los datos metabolómicos .....	54
2.4.5	Análisis de enriquecimiento de metabolitos .....	55
2.4.6	Análisis estadístico .....	55
2.5	Resultados .....	56
2.5.1	Análisis exploratorio de los patrones microclimáticos .....	56
2.5.2	Perfil metabolómico de las zanahorias residuales de distintas localidades .....	59
2.5.3	El potencial de bioprospección de las zanahorias residuales .....	66
2.6	Discusión .....	68
2.7	Conclusiones .....	76
<b>3. Capítulo 3: Marco metodológico para el apoyo a la investigación en bioprospección fitoquímica: Un caso de estudio sobre los subproductos de la cosecha de zanahoria (<i>Daucus carota</i> L.) .....</b>		<b>79</b>
3.1	Resumen .....	79
3.2	Abstract .....	80
3.3	Introducción .....	81
3.4	Materiales y métodos .....	84
3.4.1	Estrategia de búsqueda y recopilación de datos .....	84
3.4.2	Análisis bibliométrico .....	85
3.4.3	Análisis de redes científicas .....	86
3.4.4	Análisis de patentes .....	86
3.5	Resultados .....	87
3.5.1	Estrategia de búsqueda y recopilación de datos .....	87
3.5.2	Análisis bibliométrico .....	88
3.5.3	Análisis de redes científicas .....	91
3.5.3.1	Análisis semántico de palabras clave .....	91
3.5.3.2	Red científica de tendencias de investigación .....	96
3.5.3.3	Red de compuestos bioactivos de interés .....	99
3.5.4	Búsqueda y análisis de patentes .....	102
3.6	Discusión .....	111
3.7	Conclusiones .....	116
<b>4. Conclusiones y recomendaciones .....</b>		<b>119</b>
4.1	Conclusiones .....	119
4.2	Recomendaciones .....	120
<b>5. Bibliografía .....</b>		<b>123</b>
<b>A. Anexo: Metabolitos anotados provenientes de los excedentes de producción de zanahoria .....</b>		<b>147</b>



## Lista de Figuras

### Pág.

<b>Figura -1:</b> Anatomía de la raíz de zanahoria: (A) longitudinal; (B) sección transversal que muestra el peridermis, el floema y el xilema. Tomado de (Ahmad et al., 2019). .....	6
<b>Figura -2:</b> Producción anual de zanahoria en Colombia (FAOSTAT, 2025), elaboración propia. ....	8
<b>Figura -3:</b> Hectáreas cosechadas de zanahoria anualmente en Colombia (FAOSTAT, 2025), elaboración propia. ....	8
<b>Figura -4:</b> Principales Departamentos productores de zanahoria en Colombia (Agronet, 2025), elaboración propia. ....	9
<b>Figura 1-1:</b> Tipologías de zanahoria, (A) Zanahoria regular o de categoría extra, (B) Control, (C) Rajada, (D) Deforme, (E) Daño patológico. Elaboración propia. ....	19
<b>Figura 1-2:</b> Mapa georreferencial de las localidades de cosecha. Elaboración propia.	20
<b>Figura 1-3:</b> Dendograma generado al agrupar muestras mediante un análisis de clúster jerárquico. ....	32
<b>Figura 1-4:</b> Análisis de componentes principales de los excedentes de producción de zanahoria; gráfico de loadings (cargas) del PCA (A); Gráfico de scores (puntajes) del PCA (B); porcentaje de varianza explicada (C). ....	33
<b>Figura 1-5:</b> Análisis de componentes principales de los excedentes de producción de zanahoria bajo tres esquemas, caracterización total (A), composición fisicoquímica, bromatológica y nutricional (B) y composición fisicoquímica (C). ....	35
<b>Figura 1-6:</b> Análisis de rangos múltiples de diferentes variables evaluadas en los excedentes de producción de zanahoria. ....	37
<b>Figura 2-1:</b> Tipologías analizadas de la biomasa residual de zanahoria: Control (A), Rajada (B), Deforme (C), Daño Patológico (D), y mapa georreferencial de las localidades de cosecha (E). ....	51
<b>Figura 2-1:</b> ..... Análisis climáticos asociados a las tres localidades evaluadas. Gráfico de gradiente altitudinal (A), y diferencias significativas en variables climáticas (B-G); altitud (B), precipitación (C), velocidad del viento en superficie (D), temperatura del aire en superficie (E), Radiación solar de onda corta en superficie (F), y fracción de área nublada (G). ....	58
<b>Figura 2-2:</b> Análisis climáticos asociados a las tres localidades evaluadas. Gráfico de gradiente altitudinal (A) .....	61
<b>Figura 2-3:</b> Gráfico de puntajes (score plot) del OPLS-DA (A), gráfico de puntaje de VIP (B), y gráfico de mapa de calor (C) entre la localidad de Marinilla (C2) comparada con las localidades de Rionegro y El Santuario (C1). ....	62

<b>Figura 2-4:</b> Gráfico de volcán resaltando los metabolitos diferenciales entre el clúster 2 (Marinilla) y el clúster 1 (Rionegro and El Santuario). .....	64
<b>Figura 2-5:</b> Análisis de enriquecimiento metabólico de las muestras de biomasa residual de zanahoria de las localidades evaluadas. ....	65
<b>Figura 3-1:</b> Distribución de las publicaciones en el tiempo. Elaboración propia en Excel con base a información disponible en Scopus®. Fecha de consulta, abril del 2023. ....	89
<b>Figura 3-2:</b> Principales áreas de estudio. Elaboración propia en Excel con base a información disponible en Scopus®. Fecha de consulta, abril del 2023.....	91
<b>Figura 3-3:</b> Paisaje científico de tendencias generales. Elaboración propia en VOSviewer® con base a información disponible en Scopus®. Fecha de consulta, abril del 2023. ....	92
<b>Figura 3-4:</b> Visualización de sobreposición de palabras clave en el tiempo. Elaboración propia en VOSviewer® con base a información disponible en Scopus®. Fecha de consulta, abril del 2023.....	95
<b>Figura 3-5:</b> Paisaje científico de textos clave. Elaboración propia en VOSviewer® con base a información disponible en Scopus®. Fecha de consulta, abril del 2023. ....	97
<b>Figura 3-6:</b> Red de coocurrencias de compuesto químicos. Elaboración propia en VOSviewer® con base a información disponible en Scopus®. Fecha de consulta, abril del 2023. ....	100
<b>Figura 3-7:</b> Tendencias en la publicación de patentes. Elaboración propia Excel con base a información disponible en PatentInspiration®. Fecha de consulta, junio del 2023. ....	103
<b>Figura 3-8:</b> Paisaje científico de patentes. Elaboración propia en VOSviewer® con base a información disponible en PatentInspiration®. Fecha de consulta, junio del 2023. ....	105
<b>Figura 3-9:</b> Mapa de densidades de códigos IPC. Elaboración propia en VOSviewer® con base a información disponible en PatentInspiration®. Fecha de consulta, junio del 2023. ....	107
<b>Figura 3-10:</b> Red de coocurrencia de títulos y reclamos de patentes concedidas. Elaboración propia en VOSviewer® basada en la información disponible en PatentInspiration®. Fecha de consulta: junio de 2023. ....	108

## Lista de Tablas

### Pág.

<b>Tabla 1-1:</b>	Tipologías de excedentes de producción evaluadas.....	18
<b>Tabla 1-2:</b>	Coordenadas geográficas correspondiente a los 40 muestreos realizados. 20	
<b>Tabla 1-3:</b>	Propiedades fisicoquímicas de las tipologías de zanahoria.....	28
<b>Tabla 1-4:</b>	Composición nutricional de las tipologías de zanahoria.....	29
<b>Tabla 1-5:</b>	Composición nutricional de las tipologías de zanahoria.....	31
<b>Tabla 2-1:</b>	Características geográficas de las localidades de cosecha evaluadas.....	50
<b>Tabla 2-2:</b>	Descripción de metabolitos y potencial de bioprospección de la biomasa residual de zanahoria.....	67
<b>Tabla 3-1:</b>	Principales compuestos bioactivos presentes en la zanahoria.....	102
<b>Tabla 3-2:</b>	Integración de tendencias científicas y comerciales en la bioprospección de los subproductos del cultivo de zanahoria.....	112

## Lista de Abreviaturas

### Abreviaturas

<b>Abreviatura</b>	<b>Término</b>
<i>C</i>	Tipología control
<i>C1</i>	Clúster 1
<i>C2</i>	Clúster 2
<i>CPT</i>	Contenido total de fenoles
<i>CV</i>	Coefficiente de variación
<i>D</i>	Tipología deforme
<i>DPPH</i>	2,2-Difenil-1-Picrilhidrazilo
<i>ESI</i>	Ionización por electrospray
<i>FC</i>	Fold change (cambio de piegue)
<i>FRAP</i>	Ferric reducing antioxidant power
<i>HCA</i>	Análisis de clusterización jerárquica
<i>HPLC</i>	Cromatografía líquida de alta resolución
<i>IPA</i>	Alcohol isopropílico
<i>LC</i>	Cromatografía líquida
<i>LC-MS</i>	Cromatografía líquida acoplada a espectrometría de masas
<i>LW</i>	Low weight (bajo peso molecular)
<i>MS</i>	Espectrometría de masas
<i>MSI</i>	Metabolomics Standards Initiative
<i>MTBE</i>	Metil terbutil éter
<i>NTF</i>	N-trans-feruloiltiamina
<i>OPLS-DA</i>	Análisis discriminante por mínimos cuadrados parciales ortogonales
<i>ORA</i>	Over representation analysis
<i>ORAC</i>	Oxygen radical absorbance capacity
<i>P</i>	Tipología daño patológico
<i>PA's</i>	Alcaloides pirrolidínicos
<i>PCA</i>	Análisis de componentes principales
<i>PC</i>	Componente principal
<i>R</i>	Tipología rajada
<i>ROS</i>	Especies reactivas de oxígeno
<i>TOF</i>	Tiempo de vuelo
<i>TPA</i>	Análisis del perfil de textura
<i>TPC</i>	Contenido total de fenoles
<i>UHPLC</i>	Cromatografía líquida de ultra alta resolución
<i>VIP</i>	Puntaje de importancia de las variables
<i>QC</i>	Control de calidad
<i>QTOF</i>	Tiempo de vuelo cuadrupolo



# Introducción

La generación de residuos agroalimentarios representa uno de los mayores desafíos ambientales, sociales y económicos a nivel global. Se estima que aproximadamente el 26% de los residuos alimentarios son generados por la industria de bebidas, seguida por la industria láctea (21%), producción y transformación de frutas/verduras (14,8%), elaboración y procesamiento de cereales (12,9%), elaboración y conservación de productos cárnicos (8%), elaboración y procesamiento de aceites vegetales y animales (3,9%), elaboración y conservación de productos pesqueros (0,4%) y otros (12,7%) (Nayak & Bhushan, 2019). Usualmente estas pérdidas y residuos están asociadas a las etapas de poscosecha, procesamiento, comercialización y consumo, sin embargo, en la etapa de producción, alimentos que podrían ser considerados idóneos para el consumo humano, son descartados debido a su baja calidad visual, es decir, sus características morfológicas no son las típicas del alimento regular (Idrovo Encalada et al., 2019; Jyot Kaur et al., 2020; Rodrigues et al., 2022) y son considerados como excedentes de producción o agrícolas (Rodrigues et al., 2022). No obstante, estos residuos, subproductos o excedentes de producción son vistos como una fuente de materia prima renovable, la cual incluye una gran cantidad de compuestos químicos y nutraceuticos relevantes para diversas industrias, reportando azúcares, fibras, proteínas, compuestos antioxidantes, compuestos fenólicos, vitaminas, entre otros (Brivaldo Viana Da Silva et al., 2023; Caruso et al., 2020; Georganas et al., 2020; Tiwari et al., 2022). Adicionalmente, el uso de excedentes de producción o residuos agroalimentarios como un medio para la recuperación de compuestos de alto valor agregado mediante tecnologías sustentables y estrategias de bioprospección es esencial para mejorar la seguridad alimentaria y mantener un entorno sustentable; esto en relación con el aumento de la emisión de gases de efecto invernadero, la degradación del aire, la contaminación del suelo y del agua, como consecuencias de la generación de residuos, subproductos o excedentes agrícolas (Sarmiento-García et al., 2023; Vigneshwar et al., 2022).

La creciente demanda de alimentos contribuye de forma adicional y directa al aumento en la generación de residuos, subproductos o excedentes de producción, además, la falta de conocimiento sobre la composición nutracéutica y/o fitoquímica de los mismos enfatiza lo crítico de la implementación de los principios de la economía circular en la búsqueda de moléculas de alto valor (Rudke et al., 2022), en la reintegración en la cadena productiva, o en la incorporación hacia otra industria que los requiera, particularmente si una fracción considerable sigue siendo segura y valiosa (García-Hernández et al., 2023). De hecho, los residuos agroalimentarios de forma generalizada están siendo utilizados como fuente de compuestos bioactivos (Brivaldo Viana Da Silva et al., 2023; Domínguez et al., 2020; Okino Delgado & Fleuri, 2015), en la generación de productos con alto valor añadido, como insumos químicos y farmacéuticos (Chandra Nath et al., 2023; Jyot Kaur et al., 2020; Nayak & Bhushan, 2019), o en la producción de biocombustibles y otros productos de biorrefinería (Ramos-Andrés et al., 2021; Salvañal et al., 2021). Entre estos, los excedentes de producción de zanahoria (*Daucus carota L.*) han adquirido especial relevancia, no solo por su volumen, sino por el potencial que representan como materia prima para procesos de transformación y valorización, en donde han sido utilizados en procesos de biorrefinería con énfasis en la producción de azúcares fermentables, ácidos orgánicos, pectinas, compuestos antioxidantes, carotenoides y biocombustibles (Clementz et al., 2019; Idrovo Encalada et al., 2019; Jyot Kaur et al., 2020; Kaur et al., 2020; Ramos-Andrés et al., 2021; Salvañal et al., 2021).

La zanahoria es una especie perteneciente a la familia *Apiaceae* (*Umbelliferae*) cuya raíz es la principal fuente de provitamina A ( $\beta$ -caroteno) y ha sido considerada como una buena fuente de carotenoides, vitaminas, fibra dietética, minerales y compuestos antioxidantes en la dieta humana (Ahmad et al., 2019; Que et al., 2019; Tian et al., 2024), lo que la ha convertido en un alimento nutritivo y versátil. Su producción se ha incrementado durante las últimas décadas (Bhandari et al., 2023; Rosales-Mendoza & Tello-Olea, 2015; Tian et al., 2024), posicionándola como uno de los diez vegetales más consumidos a nivel global (Rodrigues et al., 2022) y su mercado, en términos de exportaciones, está valorado actualmente en \$1,6 billones de dólares (FAOSTAT, 2025). China es el mayor productor de zanahoria a nivel global, con una producción anual que supera los 11 millones de toneladas, seguido por Estados Unidos, Rusia y Uzbekistán con una producción por encima del millón de toneladas (FAOSTAT, 2025). Particularmente en Colombia, el área total sembrada con zanahoria para el año 2022 correspondió a 10.339 hectáreas para una

producción total de 291.278 toneladas, siendo Cundinamarca el departamento con mayor producción (38,73%), seguido de Boyacá (29,84%) y Antioquia (25,84%) (*Agronet*, 2025; *FAOSTAT*, 2025); siendo una fuente significativa de empleo para los agricultores; de hecho, la producción de hortalizas en Colombia proporciona aproximadamente 300.000 empleos directos e indirectos (Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural, 2015).

A pesar de los altos volúmenes de producción de zanahoria, esta no es comercializada en su totalidad, por ejemplo, se estima que entre el 25 y el 30% de la producción total de zanahoria se descarta en las zonas de cultivo debido a su singularidad en tamaño, longitud, forma, color o daños mecánicos (Jyot Kaur et al., 2020; Kaur et al., 2020; Salvañal et al., 2021). En Colombia la zanahoria debe ser clasificada bajo tres categorías, categoría extra, categoría primera y categoría segunda (Cámara de comercio de Bogotá, 2015; ICONTEC, 1994). Las zanahorias que no cumplen con estos criterios de selección no son comercializadas, son descartadas y se convierten en excedentes de producción, normalmente son dispuestas para alimentación animal o se convierten en desecho orgánico o material de compostaje (Jyot Kaur et al., 2020; Salvañal et al., 2021). Estos excedentes, si bien no cumplen con los estándares de comercialización por razones morfológicas o su calidad visual, constituyen una fuente abundante y renovable de compuestos bioactivos con aplicaciones potenciales en las industrias alimentaria, cosmética, farmacéutica y biotecnológica (Clementz et al., 2019; Idrovo Encalada et al., 2019; Jyot Kaur et al., 2020; Kaur et al., 2020; Ramos-Andrés et al., 2021; Rodrigues et al., 2022; Salvañal et al., 2021).

El aprovechamiento de estos excedentes de producción requiere un enfoque multidimensional que permita su caracterización integral y la identificación de compuestos químicos, nutraceuticos y bioactivos de interés. En este sentido, el presente documento se estructura en tres capítulos que abordan distintos niveles de análisis de los excedentes de producción de zanahoria. En el capítulo 1, se realiza una caracterización fisicoquímica, bromatológica, nutricional y bioactiva (capacidad antioxidante) de diferentes tipologías de excedentes producidos en el oriente antioqueño, evidenciando el potencial funcional de algunas de estas tipologías, especialmente aquellas que presentan daños físicos o patológicos. El capítulo 2 profundiza en el perfil metabolómico de estos excedentes a través del uso de técnicas de cromatografía líquida de alta resolución y espectrometría de masas, aplicando un enfoque de metabolómico transversal a diferentes microclimas del

oriente antioqueño colombiano. Este análisis permitió identificar compuestos con alto valor nutracéutico y farmacológico, como flavonoides, alcaloides, terpenoides, carotenoides, ácidos fenólicos, entre otros; además, evidenciar cómo las condiciones agroclimáticas influyen en la composición química de los excedentes de producción de zanahoria y permiten comprender el potencial de bioprospección dirigida de los metabolitos encontrados y las localidades evaluadas. Finalmente, el capítulo 3 propone un marco metodológico para la bioprospección fitoquímica a partir de procesos de vigilancia científica, análisis bibliométrico, cienciométrico y patentométrico, tomando como estudio de caso los subproductos de zanahoria. Este enfoque permite visualizar tendencias científicas, comerciales e industriales emergentes, áreas de investigación claves, compuestos bioactivos presentes en la zanahoria con potencial de vocación de uso (aplicaciones) en diversas industrias, y nichos de oportunidad en el mercado, articulando el conocimiento científico con el desarrollo tecnológico y las aplicaciones industriales.

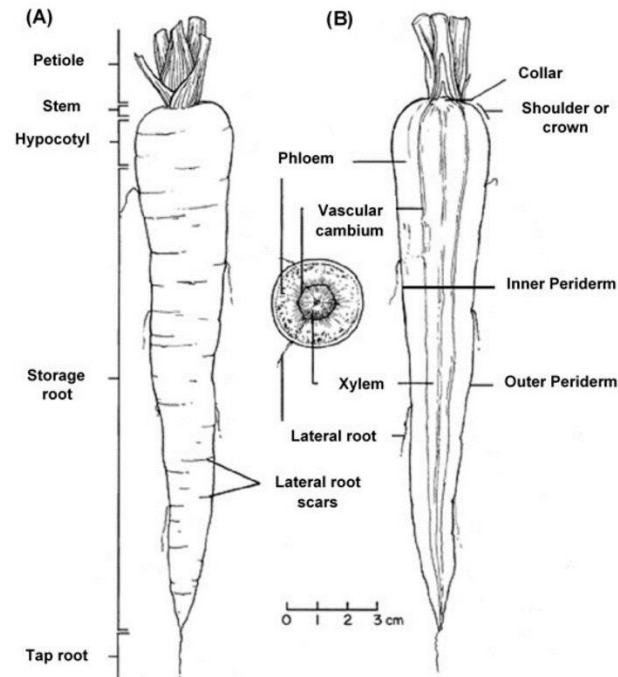
Así, esta tesis busca generar conocimiento útil para la toma de decisiones en el contexto de la valorización de residuos agroalimentarios, específicamente de los excedentes de producción de zanahoria, aprovechando el vacío existente de investigación y producción científica relacionada en Colombia, aportando herramientas técnicas y metodológicas que puedan ser replicables a otras matrices agroalimentarias bajo los principios de la economía circular, determinando las posibles vocaciones de uso y cerrando las brechas entre la gestión de residuos agroalimentarios y el desarrollo de productos de alto valor. Por lo anterior, entender que la valorización de estos excedentes puede fortalecer la cadena productiva local es vital, no solo debido a la generación de nuevas oportunidades de ingresos económicos para productores, también con relación a la diversificación de los usos y aplicaciones de la zanahoria, la mitigación de pérdidas y focos de contaminación ambiental mediante la aplicación de estrategias de economía circular, y la alineación con los objetivos 2, 8, 12 y 13 de desarrollo sostenible (ODS) (MinCiencias, 2020) y las líneas de investigación definidas por el Ministerio de Ciencia, Tecnología e Innovación, seguridad alimentaria, producción agropecuaria sostenible, y bioprospección y bioprocesos presentes en el foco de investigación 5, denominado *bioeconomía, biotecnología y medio ambiente* (MinCiencias, 2020).

## Marco teórico

### Generalidades

La zanahoria es una especie herbácea bienal de la familia *Apiaceae* (Que et al., 2019). Es la planta vegetal de raíz más importante que se cultiva en todo el mundo (Ahmad et al., 2019; Bhandari et al., 2023). Las raíces de zanahoria, que se desarrollan a partir de los hipocótilos, tienen una buena capacidad de almacenamiento; una gran cantidad de carbohidratos se almacenan en las raíces primarias y su forma es siempre cónica (Que et al., 2019). La zanahoria consta principalmente de dos partes, el tallo y la raíz, y la mayor parte de la raíz consta de la cáscara, llamada peridermis, una corteza externa pulposa denominada floema y un núcleo interno que recibe el nombre de xilema (Ahmad et al., 2019), como se observa en la Figura -1.

**Figura -1:** Anatomía de la raíz de zanahoria: (A) longitudinal; (B) sección transversal que muestra el peridermis, el floema y el xilema. Tomado de (Ahmad et al., 2019).



La zanahoria es un cultivo de clima fresco que se puede sembrar en primavera u otoño en zonas de clima templado, en donde se comportan como plantas bienales, es decir, su crecimiento vegetativo es el proceso principal del primer año del ciclo de vida, cuyo objetivo es almacenar material para el crecimiento reproductivo en el segundo año (Alessandro et al., 2013). En zonas de clima subtropical la zanahoria puede sembrarse en invierno y tiene un comportamiento anual, en donde su fase vegetativa y reproductiva ocurren en el mismo año (Alessandro et al., 2013; DANE, 2017).

La zanahoria ha sido estudiada desde décadas atrás en términos de su composición nutricional y nutracéutica (Babic et al., 1993; Hansen et al., 2003; Kidmose et al., 2004), además, ha sido ampliamente descrita como una fuente importante de fitonutrientes que incluyen compuestos fenólicos, flavonoides, poliacetilenos, ácidos orgánicos, y carotenoides, siendo la principal fuente de  $\beta$ -caroteno en la dieta humana (Mandrigh et al., 2023; Que et al., 2019; Tian et al., 2024; Varshney & Mishra, 2022). Debido a la presencia de estos compuestos, la zanahoria se considera un alimento funcional y nutracéutico, con beneficios potenciales para la salud humana (Ahmad et al., 2019; Babar et al., 2025; Mandrich et al., 2023; Varshney & Mishra, 2022).

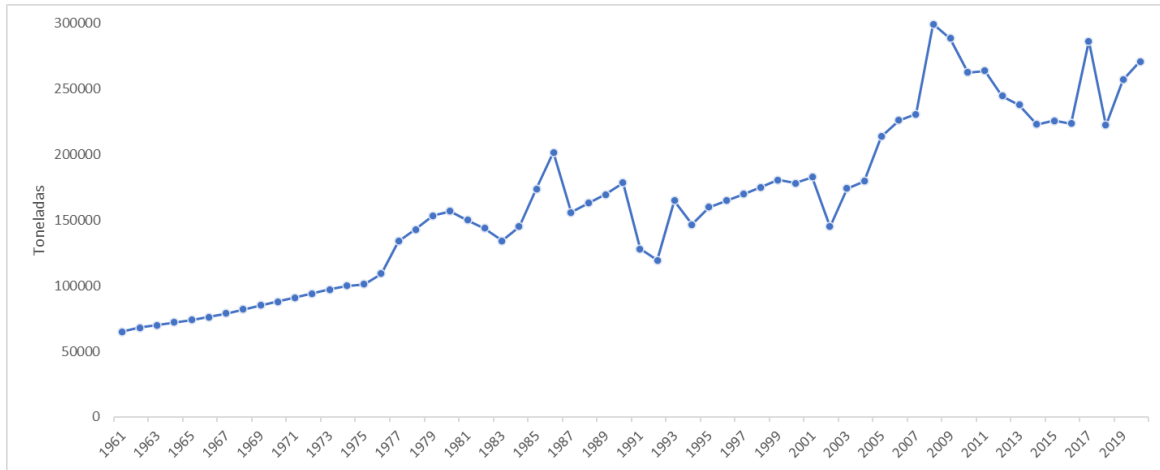
## Importancia económica de la zanahoria en Colombia

En Colombia las variedades sembradas presentan un ciclo de cultivo anual, es decir, que su fase vegetativa y la reproductiva ocurren en el mismo año. En sus estados iniciales, esta hortaliza muestra un tallo corto que se encuentra cerca del suelo; pero cuando se desarrolla se alarga un poco, con una inflorescencia primaria en su ápice, con hojas pubescentes y segmentos lobulados, y flores pequeñas y blancas que forman umbelas compuestas; las semillas son pequeñas, pues pesan entre 0,8 y 3 gramos y su raíz, que es la parte comestible, de acuerdo a la variedad puede ser de forma redonda y cilíndrica con diámetros entre 1 y 10 centímetros con una longitud de 5 a 50 centímetros (DANE, 2017).

El cultivo de zanahoria en el país se siembra de los 300 a los 2.900 metros sobre el nivel de mar, con rangos de temperatura óptima de los 15 a los 21°C, pero con una mínima de 9 y máxima de 28°C, con una humedad relativa adecuada del 70 al 80%. Además, para su óptimo desarrollo, el cultivo demanda entre 400 y 800mm de agua al año. Respecto a los suelos, se desarrolla mejor en los que tienen una textura arcillo-arenosa, con buen drenaje, profundos, sueltos, con un contenido de materia orgánica mayor al 3,5%, y con un pH que debe estar entre 5,8 y 7 (Cámara de comercio de Bogotá, 2015; DANE, 2017).

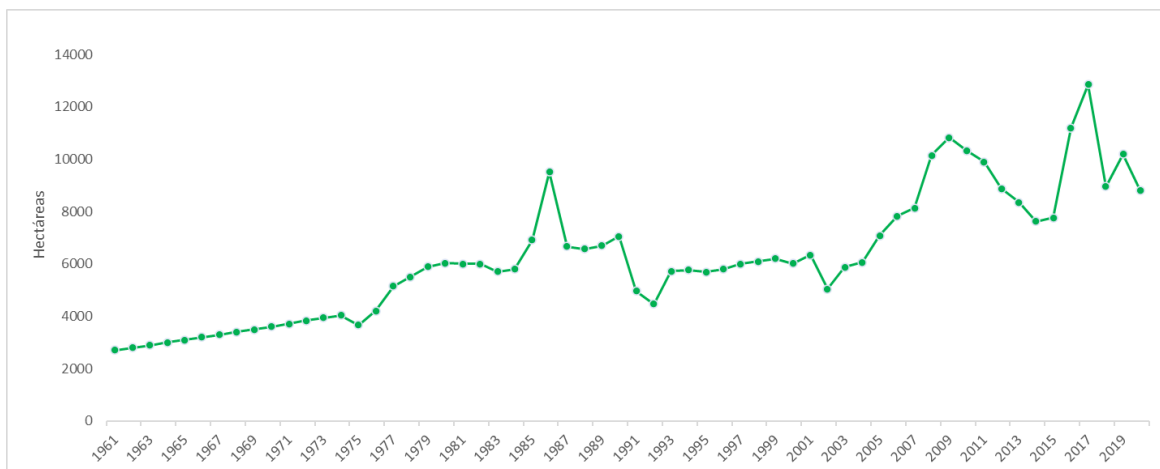
La producción de zanahoria en Colombia ha mostrado un incremento durante los últimos sesenta años, presentando un pico máximo de producción correspondiente al año 2008 con un valor total de 299.452 toneladas; no obstante, luego de esta fecha se registra un descenso en la producción, equivalente al 25,5% para el año 2014, registrando valores de 222.957 toneladas (Agronet, 2025; FAOSTAT, 2025). Sin embargo, en los años recientes se evidenció un nuevo aumento en la producción nacional, tal como se observa en la Figura-2.

**Figura -2:** Producción anual de zanahoria en Colombia (FAOSTAT, 2025), elaboración propia.



En relación con lo anterior, el área cosechada de zanahoria en Colombia también ha registrado un crecimiento en el mismo periodo de tiempo, teniendo su máximo pico productivo en el año 2017, correspondiendo a un área total sembrada de 12.852 hectáreas; para el año 2020, se ha presentado una disminución en el área cosechada, teniendo un registro cercano a las 9.000 hectáreas, lo cual se evidencia en la Figura -3.

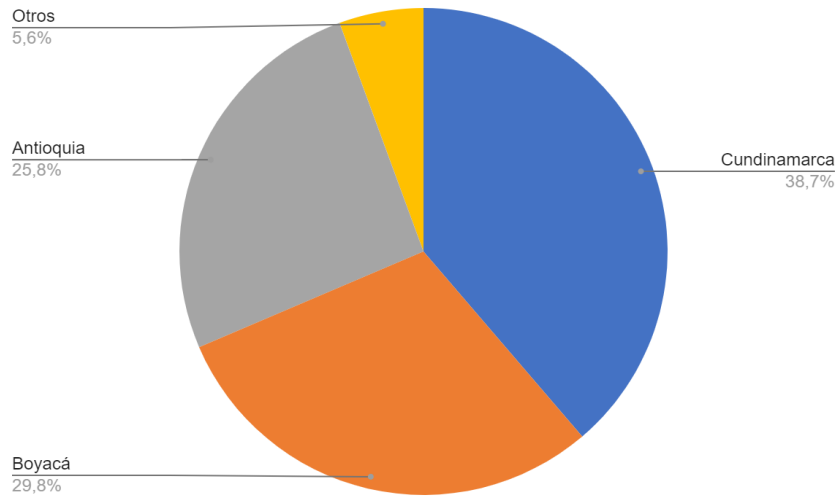
**Figura -3:** Hectáreas cosechadas de zanahoria anualmente en Colombia (FAOSTAT, 2025), elaboración propia.



A pesar del crecimiento en la producción de zanahoria en el país, estos números se pueden atribuir a solo tres de los departamentos, en ellos se concentra la producción nacional y

están representados en la Figura -4; siendo el departamento de Boyacá el mayor productor con un total de 104.877 toneladas en el año 2020 (Agronet, 2025).

**Figura -4:** Principales Departamentos productores de zanahoria en Colombia (Agronet, 2025), elaboración propia.



De acuerdo con lo anterior, es posible observar que la producción de zanahoria tiene una tendencia hacia el crecimiento, lo cual permite reafirmar la importancia que tiene el cultivo de esta hortaliza, más aún, cuando en Colombia es una fuente significativa de empleo para los agricultores, la cual proporciona aproximadamente 300.000 empleos directos e indirectos en términos de producción de hortalizas (Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural, 2015).

## **Producción primaria agrícola y etapa postcosecha de la zanahoria en Colombia**

Luego de cumplir el periodo vegetativo, 75 a 130 días dependiendo de la variedad, el diámetro de la raíz es medido y debe de registrar un valor entre 4 a 5cm; es en este punto donde la zanahoria es extraída de manera manual o mecánicamente (Cámara de comercio de Bogotá, 2015; ICONTEC, 1994). Después de ser extraída la raíz, se realiza una

selección del producto en campo, donde se eliminan las zanahorias que no cumplen con las exigencias del mercado; allí se pueden identificar la presencia de plagas, enfermedades, afectaciones superficiales como fisuras, rajaduras o presencia de daños mecánicos o malformaciones; las hojas se retiran en campo y posteriormente el producto elegido es llevado a los puntos de acopio para el lavado, clasificación y empaque (Cámara de comercio de Bogotá, 2015)

La selección se realiza en campo descartando las zanahorias que presenten daños por plagas, enfermedades, malformaciones, hombros verdes o que no presenten las características típicas de la variedad (Cámara de comercio de Bogotá, 2015); y la clasificación debe realizarse de acuerdo con la Norma Técnica Colombiana NTC 1226, la cual clasifica a la zanahoria en tres categorías. La primera categoría denominada *extra* consiste en zanahorias sin defectos morfológicos, de forma regular, libres de efectos de congelación, sin magulladuras ni fisuras. La segunda categoría denominada *primera* incluye zanahorias con buena apariencia, deben poseer las características típicas de la variedad, aunque se aceptan defectos leves como heridas causadas por la manipulación o el lavado. Finalmente, la última categoría conocida como *segunda* incluye zanahorias con defectos tales como heridas cicatrizadas y quemaduras (ICONTEC, 1994). En general, si se presentan variaciones en la calidad visual de las zanahorias, ya sea en su tamaño, malformaciones, presencia daño mecánico o fitosanitario, se procede a su descarte, las cuales son consideradas biomasa residual o excedentes de producción y pueden equivaler a un 30% de la producción total (Jyot Kaur et al., 2020; Kaur et al., 2020).

En consecuencia, este escenario provoca pérdidas económicas a los productores y genera costos adicionales asociados con la eliminación de material descartado, lo que podría desincentivar los esfuerzos agrícolas, si no poner en riesgo la seguridad alimentaria; por lo cual, reducir la cantidad de residuos orgánicos generados, en términos de excedentes de producción, puede mejorar la seguridad alimentaria sin incrementar el impacto ambiental de las prácticas agrícolas (Rodrigues et al., 2022). Adicionalmente, en la actualidad existe una mayor conciencia sobre el cuidado de la salud desde la alimentación, por lo tanto, el consumo de zanahoria es cada vez más popular debido a sus componentes nutraceuticos de alto valor y los subsecuentes beneficios para la salud humana (Que et al., 2019), esto sumado al elevado crecimiento de la población humana, demanda un crecimiento de los sistemas agroalimentarios, lo cual se ve reflejado en el incremento de

---

áreas cultivadas, incluyendo la zanahoria (Chauhan et al., 2021); por ende, un aumento en la generación de pérdidas, residuos, subproductos y excedentes de producción. En este sentido, se hace necesario enfocar la atención en los excedentes de producción de zanahoria, conocer y explotar su riqueza química con miras a la reintegración de estos a la cadena productiva, la generación de vocaciones de uso y la agregación de valor a su cadena productiva; este enfoque se soporta en modelos de economía circular, promoviendo la sostenibilidad ambiental mientras impulsa el crecimiento económico (P. Sharma et al., 2021), permitiendo reducir las pérdidas económicas y optimizando los procesos en la cadena de producción de la zanahoria.

# Objetivos

## Objetivo general

Evaluar el uso potencial de los excedentes productivos de zanahoria (*Daucus carota*) en el oriente del Departamento de Antioquia como producto funcional en la industria alimentaria, cosmética y farmacéutica.

## Objetivos específicos

- Caracterizar multidimensionalmente las tipologías de excedentes de producción de zanahoria (*Daucus carota*) producidas en el oriente del departamento de Antioquia.
- Evaluar la metabolómica de la biomasa residual generada en el cultivo de zanahoria (*Daucus carota*) en tres localidades de estudio.
- Establecer vocaciones de uso de los excedentes productivos de zanahoria (*Daucus carota*) para la generación de productos con valor agregado en el sector alimentario y/o cosmético y farmacéutico.

# **1. Capítulo 1: Caracterización integral de los excedentes de producción de zanahoria (*Daucus carota* L.): Perspectivas para el aprovechamiento sostenible de residuos agroalimentarios.**

## **1.1 Resumen**

Los residuos provenientes del cultivo y el procesamiento de la zanahoria (*Daucus carota*) juegan un papel importante debido a que la producción masiva de esta hortaliza en el mundo no solo genera una gran cantidad de producto comercializable, sino además una gran cantidad de residuos, principalmente raíces rechazadas, estos residuos son considerados como fuentes renovables y abundantes de compuestos de interés, incluyendo fibras, proteínas, fenoles, compuestos antioxidantes. Es por lo anterior que, el presente estudio caracteriza multidimensionalmente los excedentes de producción de zanahoria generados en el oriente del departamento de Antioquia (Colombia), con el fin de evaluar su potencial de aprovechamiento en el contexto de la bioeconomía circular. Se recolectaron zanahorias descartadas por criterios estéticos, deformaciones, fisuras y daños patológicos, y se agruparon en cuatro tipologías. A partir de estas, se realizó una caracterización fisicoquímica, bromatológica, nutricional y antioxidante. Los resultados evidenciaron que, a pesar de no cumplir con estándares de comercialización, estas zanahorias presentan contenidos relevantes de compuestos bioactivos como carotenoides, fenoles totales y fibra dietaria, así como una actividad antioxidante destacable. Entre las tipologías, se identificaron diferencias significativas en atributos nutricionales y funcionales, lo que permite establecer criterios para su clasificación con fines de valorización. Este trabajo demuestra el potencial de los subproductos agrícolas como materia prima para industrias alimentarias, cosméticas y farmacéuticas, y aporta

evidencia para diseñar estrategias de aprovechamiento de excedentes de producción del cultivo de zanahoria.

**Palabras clave:** zanahoria, excedentes de producción, compuestos bioactivos, economía circular, caracterización multidimensional.

## 1.2 Abstract

The residues generated by cultivation and processing of carrots (*Daucus carota*) play an important role due to the mass production of this vegetable in the world, not only generates a large amount of marketable product, but also a large amount of residues, mainly rejected roots, these residues are considered as renewable and abundant sources of compounds of interest, including fibers, proteins, phenols, antioxidant compounds. That is why the present study provides a multidimensional characterization of carrot agronomic surplus generated in eastern Antioquia, Colombia, aiming to assess its potential for value-added use within a circular bioeconomy framework. Discarded carrots due to aesthetic criteria, deformities, fissures, and pathological damage were collected and grouped into four typologies. These were subjected to physicochemical, bromatological, nutritional, and bioactive compound analysis. The results revealed that, despite not meeting commercial standards, these carrots contain relevant levels of bioactive compounds such as carotenoids, total phenolics, and dietary fiber, as well as notable antioxidant activity. Significant differences were found among typologies regarding nutritional and functional attributes, allowing the establishment of classification criteria for valorization purposes. This work highlights the potential of agricultural by-products as raw material for the food, cosmetic, and pharmaceutical industries, and provides evidence for designing strategies to reduce postharvest losses in horticultural crops.

**Keywords:** carrot, agricultural surpluses, bioactive compounds, circular economy, physicochemical characterization.

### 1.3 Introducción

Grandes cantidades de material de desecho se generan anualmente a partir de las actividades agrícolas y el subsecuente procesamiento agroindustrial, comercio y consumo (Matei et al., 2021; Rodrigues et al., 2022; Van Dyk et al., 2013). Se estima que aproximadamente un tercio de los alimentos producidos son desechados cada año, de los cuales un 22% está relacionado a excedentes, residuos o pérdidas de frutas y verduras (Rodrigues et al., 2022), y un 14,8% son generados únicamente en las etapas de producción y transformación de estas (Nayak & Bhushan, 2019). Aunque generalmente, las pérdidas o residuos agroalimentarios están relacionados a las etapas de poscosecha, procesamiento o consumo; en la etapa de producción primaria o en campo, alimentos aptos para el consumo humano son descartados debido a su baja calidad visual (Rodrigues et al., 2022), estos residuos generados corresponden a excedentes de producción, es decir, alimentos que no son comercializados debido a que sus características morfológicas no corresponden con las típicas o regulares del producto agrícola (Clementz et al., 2019; Idrovo Encalada et al., 2019; Jyot Kaur et al., 2020). No obstante, estos residuos son considerados como fuentes renovables y abundantes de compuestos de interés, incluyendo fibras, proteínas, fenoles, compuestos antioxidantes, vitaminas, entre otros (Baiano, 2014; Matei et al., 2021; Nayak & Bhushan, 2019; Rodrigues et al., 2022), los cuales tienen el potencial de ser usados en procesos de biorefinería (Ramos-Andrés et al., 2021; Rudke et al., 2022), reutilización y transformación en alimentos (Eliopoulos et al., 2022), piensos (Georganas et al., 2020; Sarmiento-García et al., 2023), fuentes de energía (Jyot Kaur et al., 2020) o metabolitos de interés (Brivaldo Viana Da Silva et al., 2023; Idrovo Encalada et al., 2019; Rodrigues et al., 2022).

En este contexto, los residuos provenientes del cultivo y el procesamiento de la zanahoria (*Daucus carota*) juegan un papel importante; la producción masiva de esta hortaliza en el mundo no solo genera una gran cantidad de producto comercializable, sino además una gran cantidad de residuos, principalmente raíces rechazadas y partes no comestibles, como cáscaras y hojas (Jayesree et al., 2021; Salvañal et al., 2021; Song et al., 2018). La zanahoria es una especie perteneciente a la familia *Apiaceae* (*Umbelliferae*) cuya raíz es la principal fuente de provitamina A ( $\beta$ -caroteno) en la dieta humana (Jyot Kaur et al., 2020; Rosales-Mendoza & Tello-Olea, 2015); es una buena fuente de fibra dietética, minerales, azúcares, vitaminas, antioxidantes y compuestos bioactivos como carotenos, fenoles,

---

poliacetilenos y ácido ascórbico (Bhandari et al., 2023; Que et al., 2019; Schulzova et al., 2022). Su producción se ha incrementado durante las últimas décadas, y actualmente, se encuentra entre las seis hortalizas más cultivadas en el mundo (Jyot Kaur et al., 2020). China es el mayor productor de zanahoria, con una producción anual que supera los 18 millones de toneladas, seguido por Uzbekistán, Rusia y Estados Unidos con una producción superior al millón de toneladas (FAOSTAT, 2025).

En Colombia, el área total sembrada con zanahoria para el año 2022 correspondió a 10.339 hectáreas para una producción total de 291.278 toneladas, siendo Cundinamarca el departamento con mayor producción (38,73%), seguido de Boyacá (29,84%) y Antioquia (Agronet, 2025; FAOSTAT, 2025); siendo una de las cinco hortalizas con mayor consumo y producción en el país (Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural, 2020; SAC, 2023), lo cual, significó para el año 2021, un consumo per cápita de 5,38kg (Ortiz Florez, 2023). Sus usos principales se centran en el consumo en fresco como condimento o en preparaciones culinarias; por otro lado, a nivel industrial se emplea como materia prima para jugos, conservas, congelados, deshidratados, encurtidos, entre otros (DANE, 2017).

A pesar de los altos volúmenes de producción nacional y mundial, la zanahoria no es comercializada en su totalidad, por ejemplo, se estima que entre el 25 y el 30% de la producción total se descarta en campo debido a su singularidad en tamaño, longitud, forma, color o por la presencia de daños mecánicos (Jyot Kaur et al., 2020; Kaur et al., 2020; Salvañal et al., 2021). De manera específica, la zanahoria en Colombia debe ser clasificada bajo tres categorías; la primera es denominada *extra*, y agrupa las zanahorias que poseen una forma cónica regular, sin ningún tipo de malformaciones, no presentan quemaduras, magulladuras ni heridas y se encuentran libres de efectos de congelación. La segunda categoría es denominada *primera*, e incluye zanahorias con buena apariencia y características típicas de la variedad, sin embargo, se aceptan defectos leves relacionados a heridas superficiales causadas por la manipulación. La última categoría es denominada *segunda*, aquí son solo clasificadas las zanahorias que presentan daños superficiales como fisuras o quemaduras (ICONTEC, 1994). Las zanahorias que no cumplen con estos criterios de selección, en algunos casos logran comercializarse a muy bajos precios, cercanos a la décima parte del valor correspondiente a la zanahoria extra

(Agronet, 2025; Centrales de Abasto, 2023); aun así, en la mayoría de las situaciones, estas zanahorias no logran ser comercializadas y se convierten en un excedente agronómico; es decir, son descartadas, dispuestas para alimentación animal, material de compostaje o se convierten en desecho orgánico (Clementz et al., 2019; Jyot Kaur et al., 2020).

Los excedentes de producción, al igual que los residuos del procesamiento de vegetales y en general de la industria agroalimentaria, son reconocidos de forma amplia como una de las fuentes más abundantes y renovables de compuestos de interés en el planeta (Rodrigues et al., 2022), los cuales incluyen proteínas, aceites, fibras, compuestos fenólicos, antioxidantes, vitaminas y otros compuestos bioactivos (Brivaldo Viana Da Silva et al., 2023; Domínguez et al., 2020; Okino Delgado & Fleuri, 2015). Estos compuestos tienen el potencial de ser utilizados en procesos secundarios, lo cual se traduce en un suministro accesible y permanente de materia prima de alto valor para la industria de alimentos, agroindustrial, farmacéutica, de insumos químicos, combustibles, entre otras (Chandra Nath et al., 2023; Domínguez et al., 2020; Georganas et al., 2020; Nayak & Bhushan, 2019; Rudke et al., 2022; Sarmiento-García et al., 2023).

Particularmente, los excedentes de producción de zanahoria han comenzado a ser utilizados como materia prima en procesos de biorefinería para la producción de carotenoides, azúcares fermentables, ácido láctico, y biocombustibles (Jyot Kaur et al., 2020; Ramos-Andrés et al., 2021; Salvañal et al., 2021); o como fuente de moléculas de alto valor, tales como, carotenoides, compuestos antioxidantes, fibras, pectinas, entre otros (Clementz et al., 2019; Idrovo Encalada et al., 2019; Kaur et al., 2020). No obstante, a pesar de las investigaciones que se han desarrollado en relación con los excedentes de producción de zanahoria, prevalece un desconocimiento de la composición nutricional, las propiedades funcionales y características fisicoquímicas de los mismos, más aún, con respecto al cultivo de zanahoria en Colombia. Por consiguiente, el presente trabajo pretende caracterizar multidimensionalmente (caracterización fisicoquímica, bromatológica, nutricional y bioactiva) cuatro tipologías presentes en los excedentes de producción de zanahoria, producidos en el oriente del departamento de Antioquia con el fin de establecer sus posibles vocaciones de uso.

## 1.4 Materiales y métodos

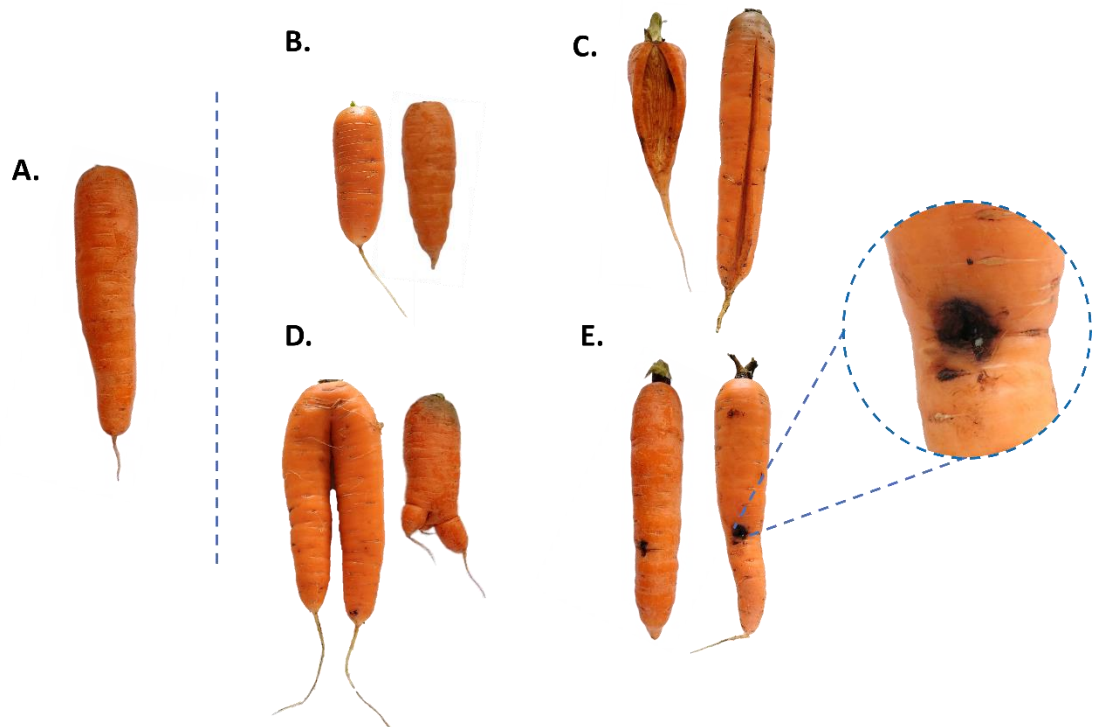
### 1.4.1 Material vegetal

Los excedentes de zanahoria fueron obtenidos de productores locales del oriente del Departamento de Antioquia, específicamente de los municipios de El Santuario y Marinilla, con un tiempo de cosecha de 120 días a partir de la siembra. Un total de cuarenta muestras fueron recolectadas y clasificadas bajo cuatro tipologías (Tabla 1-1, Figura 1-1).

**Tabla 1-1:** Tipologías de excedentes de producción evaluadas.

<i>Tipología</i>	<i>Descripción</i>	<i>Características</i>	<i>Referencia</i>
Control (C)	Presentan las características fisiológicas típicas de la zanahoria comercial, con excepción de sus dimensiones, presentando tamaño y grosor superior o inferior a la zanahoria extra.	Forma cónica sin bifurcaciones ni raíces secundarias, sin manchas, fisuras o heridas visibles, con una longitud por debajo de 100mm o superior a 300mm y un diámetro menor a 20mm o superior a 60mm.	Figura 1B
Rajada (R)	Presentan algún daño superficial en forma de fisuras en su raíz.	Forma cónica similar al control, con presencia de fisuras superficiales o profundas a lo largo de la raíz.	Figura 1C
Deforme (D)	Presentan variedad en tamaño, forma o dimensiones respecto a la zanahoria comercial.	Formas y tamaños irregulares, con presencia de múltiples raíces, malformaciones o bifurcaciones de la raíz.	Figura 1D
Daño patológico (P)	Presentan algún tipo de deterioro superficial origen patológico.	Forma cónica similar al control, con presencia de afectaciones superficiales evidenciadas por decoloraciones o manchas.	Figura 1E

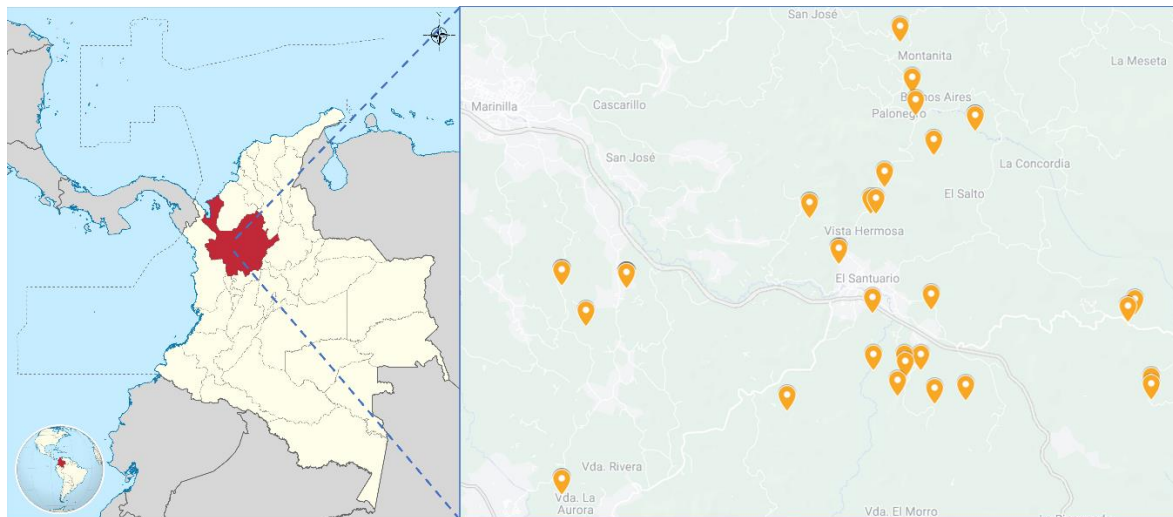
**Figura 1-1:** Tipologías de zanahoria, (A) Zanahoria regular o de categoría extra, (B) Control, (C) Rajada, (D) Deforme, (E) Daño patológico. Elaboración propia.



### 1.4.2 Muestreo y análisis estadístico

Se realizaron un total de 40 muestreos en localidades diferentes de los municipios de El Santuario y Marinilla (Figura 1-2), sus coordenadas geográficas se encuentran disponibles en la Tabla 1-2; en cada muestreo, aproximadamente cinco kilogramos fueron recolectados de cada una de las cuatro tipologías descritas, los cuales fueron procesados al día siguiente. Las zanahorias fueron lavadas con abundante agua, y desinfectadas por inmersión en una solución de hipoclorito de sodio (200ppm) durante 5 minutos. De cada una de las tipologías 3 individuos (tres unidades experimentales al azar) fueron seleccionadas y dispuestas para la evaluación del peso, dimensiones, color interno, color externo, y textura, es decir, se obtuvieron datos de tres réplicas reales; para las variables restantes, se obtuvieron datos a partir de tres pseudo réplicas, generadas a partir de un material vegetal homogéneo y representativo de cada una de las tipologías.

**Figura 1-2:** Mapa georreferencial de las localidades de cosecha. Elaboración propia.



**Tabla 1-2:** Coordenadas geográficas correspondiente a los 40 muestreos realizados.

Número de Cosecha	Latitud	Longitud	Vereda	Municipio	Área Cosechada (m <sup>2</sup> )
1	6° 6' 54,81''	75° 12' 26,27''	Las Palmas	El Santuario	284
2	06° 8' 16''	75° 18' 38,5''	Serranía	El Santuario	1029
3	06° 8' 16''	75° 18' 38,5''	Las Mercedes	Marinilla	589
4	6° 9' 12''	75° 16' 38,6''	Pavas	El Santuario	249
5	6° 9' 21,6''	75° 17' 3,5''	Pavas	El Santuario	528
6	6° 7,58' 08''	75° 15' 4,09''	Autopista	El Santuario	179
7	6° 9' 6,8''	75° 15' 43,1''	La Aurora	El Santuario	393
8	6° 11' 37,6''	75° 15' 53,8''	Yarumos	Marinilla	589
9	6° 8' 30,1''	75° 17' 32,4''	Vargas	El Santuario	603
10	6° 6' 50,3''	75° 15' 0,97''	Morritos	El Santuario	247
11	6° 8' 5,4''	75° 18' 43,35''	Las Mercedes	Marinilla	307
12	06° 09' 34 ''	75° 19' 35,9 ''	La Esperanza	Marinilla	168
13	6° 9' 46''	75° 14' 19,8''	Los Alpes	Marinilla	177
14	06° 16' 42,7 ''	75° 16' 42,7''	El Roble	El Santuario	667
15	6° 9' 24,4''	75° 19' 41,1''	La Esperanza	Marinilla	126
16	6° 6' 49,3''	75° 14' 25,8''	Valle María	El Santuario	136
17	6° 11' 1,5''	75° 15' 41,4''	Montañita	Marinilla	415
18	6° 5' 59,8 ''	75° 17' 15,3 ''	Aldana arriba	El Santuario	2057
19	6° 7' 55,7''	75° 15' 46,9''	Autopista	El Santuario	203
20	6° 7' 15,49,9''	75° 15' 11,4''	Bodegas	El Santuario	330

21	6° 7' 15,11,2''	75° 15' 45,3''	El Retiro	El Santuario	501
22	6° 7' 15,09,9'	75° 15' 23,5''	Primavera	El Santuario	562
23	6° 6' 46,1''	75°16' 47,5''	El Carmelo	El Santuario	217
24	6° 9' 48,7''	75°15' 02,9''	Montañita	Marinilla	278
25	6° 9' 25,3''	75°15' 37,7''	Bodegas	El Santuario	403
26	6° 11' 08,5''	75°15' 26''	Yarumos	Marinilla	403
27	6° 09' 06,6''	75°15' 47,1"	La Aurora	El Santuario	349
28	6° 10' 16,0''	75°15' 15,8"	Montañita	Marinilla	227
29	6° 7' 10,2''	75°15'22,1"	Primavera	El Santuario	212
30	6° 06' 51,8''	75°15'01,3"	Morritos	El Santuario	252
31	6° 07' 54,7''	75°12'38,1"	La Paz1	El Santuario	375
32	6° 07' 49,3''	75°12'43,7"	La Paz2	El Santuario	181
33	6° 10' 05,2''	75°14'32,2"	Los Alpes	Marinilla	375
34	6° 10' 05,2''	75°14'32,7"	Los Alpes	Marinilla	167
35	6° 07' 46,5''	75° 19'11,7''	La Esmeralda	Marinilla	511
36	6° 09' 03,4''	75° 16'31,2''	Pavas-Cuchillas	El Santuario	255
37	6° 6' 59,59''	75°12' 26''	Las Palmas	El Santuario	640
38	6° 11' 08,5''	75°15' 26''	Yarumos	Marinilla	426
39	6° 06' 56,4''	75° 15' 28,1''	Primavera	El Santuario	260
40	6° 06' 53,7''	75° 14' 39,8''	Valle de María	El Santuario	394

La composición fisicoquímica fue analizada en la totalidad de los cuarenta muestreos; de los mismos, un total de 26 muestreos fueron analizados en relación con su composición bromatológica y nutricional; finalmente, de estos 26 muestreos, 16 fueron analizados en cuanto a su cantidad total de fenoles y su capacidad antioxidante.

### 1.4.3 Caracterización fisicoquímica

Para cada una de las cuatro tipologías pertenecientes a cada punto de muestreo, fue registrado el peso individual, el diámetro transversal (al 70% de la longitud total de la zanahoria) y la dimensión longitudinal en tres individuos representativos (tres unidades experimentales al azar, previamente seleccionadas). El color fue determinado por medio de las coordenadas CIEL\*a\*b\* y CIEL\*C\*h, mediante mediciones de forma aleatoria en la parte exterior de la zanahoria y su interior a través de un corte longitudinal (Espectrofotómetro Konica Minolta, CR-400). Las propiedades de textura fueron evaluadas aplicando un análisis de perfil de textura (TPA), a las tres unidades experimentales, previamente cortadas de forma transversal (al 70% de la longitud total de la zanahoria) en cubos de 23,8mm aproximadamente por cada lado; en este perfil fueron analizadas las propiedades de adhesividad, dureza, elasticidad, masticabilidad, cohesividad, gomosidad

---

y resiliencia, mediante un texturómetro TA-XT plus (Stable Micro Systems); el TPA fue realizado utilizando una sonda de compresión (plato de compresión P/75), con una velocidad de prueba de 5mm/s, una distancia de compresión 2mm, un tiempo entre compresiones de 3 segundos y una carga aplicada de 0,049N. Para los análisis de pH, sólidos solubles totales, porcentaje de humedad y materia seca, fueron pesados aproximadamente tres kilogramos de zanahorias, las cuales fueron desprovistas de sus puntas, coronas y cáscaras; fueron trituradas y homogenizadas en una licuadora (Oster Xpert Series); el material triturado obtenido fue utilizado para la determinación del porcentaje de humedad y materia seca con base a la norma AOAC 934.06 (2023), en la cual fueron tomados 2g del material triturado y dispuestos en un horno a 105°C hasta alcanzar un peso constante. El pH y los sólidos solubles totales fueron determinados a partir de un extracto líquido obtenido del procesamiento del material triturado de zanahoria en un extractor de jugos (Imusa); 20mL de extracto líquido fueron depositados en un beaker para la determinación del pH utilizando un pH metro (Ohaus ST2100) con base a la norma AOAC 981.12 (2023); por otro lado, los sólidos solubles totales fueron determinados bajo la norma AOAC 932.12 (2023) utilizando un refractómetro digital (Hanna Instruments HI96801).

#### **1.4.4 Procesamiento de muestras y preparación de extractos**

A partir del material triturado perteneciente a los puntos de muestreo y sus respectivas tipologías, 300g fueron liofilizados a -50°C, bajo una presión de vacío promedio de 10mbar durante 40h (Liofilizador Biobase BK-FD12P), obteniendo aproximadamente 30g de material liofilizado con un contenido de humedad final cercano al 3%. El material liofilizado fue almacenado en condiciones de vacío dentro de bolsas laminadas multicapa (aluminio/polietileno/polietileno de baja densidad) y a una temperatura de -30°C hasta el momento de extracción.

Para la preparación de los extractos, se tomaron 200mg de cada muestra liofilizada, los cuales fueron mezclados con 2mL de una solución de etanol al 70% (v/v) en un tubo falcon de 15mL, mediante una homogeneización en vórtex (Dlab MX-S) durante 5 minutos. Posterior a esto, la muestra fue sometida a un proceso de sonicación (45 min, 30°C, 5500

Hz) (Elmasonic Easy 120H) y centrifugación (15min, 0°C, 5000rpm) (Centrífuga Thermo Scientific, SL 16R). El sobrenadante fue recuperado y depositado en un balón volumétrico de 5mL aislado de la luz. En el precipitado resultante se adicionó nuevamente 2mL de la solución de etanol al 70%, repitiendo el proceso de extracción dos veces; finalmente, los dos sobrenadantes obtenidos son mezclados y depositados en el balón volumétrico de 5mL mencionado anteriormente, el cual fue aforado con agua destilada (tipo II). El extracto es depositado en un tubo *ependorf* aislado de la luz y bajo condiciones de refrigeración hasta el momento de análisis; protocolo tomado con algunas modificaciones de Średnicka-Tober et al. (2022).

### 1.4.5 Análisis del contenido total de fenoles

El contenido total de fenoles fue determinado por el método espectrofotométrico de Folin-Ciocalteu (Singleton & Rossi, 1965). En este caso, 50 $\mu$ L del extracto obtenido fueron depositados en un tubo de ensayo, luego de esto, 450 $\mu$ L de agua destilada, y 125 $\mu$ L de reactivo de Folin fueron adicionados; posteriormente, se dejó en reposo por 5 minutos finalizando con la adición de 400 $\mu$ L de carbonato de sodio al 7,1%. Las muestras fueron incubadas en completa oscuridad por un periodo de 60 minutos y su absorbancia fue determinada a una longitud de onda ( $\lambda$ ) de 760nm por medio de un espectrofotómetro (BioTech Epoch). Protocolo adaptado a partir de las metodologías implementadas por Neis et al. (2022).

### 1.4.6 Determinación de la capacidad antioxidante

La capacidad antioxidante de la zanahoria fue evaluada bajo tres metodologías, FRAP, DPPH y ORAC (hidrofílico y lipofílico). En el caso del método FRAP (Ferric Reducing Antioxidant Power) (Benzie & Strain, 1996), 10 $\mu$ L del extracto obtenido fueron mezclados con 250 $\mu$ L de solución de trabajo FRAP, la cual fue preparada mezclando una solución de TPTZ (31,2mg de 2,4,6-tripiridil-1,3,5-triazina en 10mL de HCl 40mM) con una solución de FeCl<sub>3</sub> (54mg de cloruro férrico en 10mL de agua destilada) y una solución buffer acetato pH 3,6 (39,75mg de acetato de sodio anhidrido junto a 400 $\mu$ L de ácido acético glacial en 25mL de agua destilada); de acuerdo con la siguiente relación, 1 FeCl<sub>3</sub>:1 TPTZ :10 Buffer acetato. Las muestras fueron depositadas en una microplaca de 96 pozos e incubadas en completa oscuridad por un periodo de 30 minutos y su absorbancia fue determinada a una  $\lambda$  de 590nm en un espectrómetro (BioTech Epoch). Una mezcla de 10 $\mu$ L de agua destilada

---

y 250 $\mu$ L de solución de trabajo DPPH fue usado como blanco.  $\mu$ todas las lecturas fueron realizadas por triplicado. Los valores de FRAP fueron calcularon con base a una curva estándar de trolox (10 $\mu$ L del estándar de trolox en concentraciones desde 31,25 $\mu$ M hasta 1000 $\mu$ M disueltos en 250 $\mu$ L de solución de trabajo FRAP) y fueron expresados como  $\mu$ mol de equivalente trolox (ET) por cada 100g de peso seco; método descrito por Idrovo Encalada et al. (2019) con algunas modificaciones.

Para determinar la capacidad antioxidante por el método DPPH (Blois, 1958), 150 $\mu$ L del extracto obtenido fueron mezclados con 50 $\mu$ L de una solución de trabajo estandarizada de DPPH (125 $\mu$ M) con una absorbancia de 0,3 a una  $\lambda$  de 517nm; la cual fue preparada a partir de la disolución de 1,97mg de DPPH (2,2-difenil-1-picrilhidracilo), en 15mL de metanol y llevados a un volumen final de 25mL con buffer acetato. Este buffer fue preparado mezclando dos soluciones, una primera solución formada a partir de la disolución de 1mL de ácido acético glacial en 88mL de agua destilada, junto a una segunda solución preparada a partir de 6,76g de acetato de sodio en 412mL de agua destilada, la mezcla de ambas soluciones fue llevada a un volumen final de 1 litro en agua destilada y un pH final de 5,5. Las muestras fueron depositadas en una microplaca de 96 pozos y dejadas en reposo por 30 minutos y su absorbancia fue determinada a una  $\lambda$  de 517nm en un espectrofotómetro (BioTech Epoch); el blanco fue preparado a partir de 150 $\mu$ L de una solución metanol-buffer acetato (40:60) y 50 $\mu$ L de solución de trabajo DPPH, además, todas las lecturas fueron realizadas por triplicado. Los valores de DPPH fueron calculados con base a una curva estándar de trolox (150 $\mu$ L del estándar de trolox en concentraciones desde 0,9375 $\mu$ M hasta 30 $\mu$ M junto a 50 $\mu$ L de solución de trabajo de DPPH) y fueron expresados como  $\mu$ mol ET por cada 100g de peso seco y como porcentaje de inhibición de DPPH (%) =  $(1 - (\text{absorbancia}_{\text{muestra}} - \text{absorbancia}_{\text{blanco}}) / \text{absorbancia}_{\text{solución trabajo DPPH}}) \times 100$ . Método adaptado a partir de las metodologías propuestas por Szczepańska et al. (2022).

Para la evaluación hidrofílica de la capacidad de absorción de radicales oxígeno (ORAC-H), 50 $\mu$ L del extracto obtenido fueron mezclados con 150 $\mu$ L de solución de trabajo de fluoresceína (1,6 $\mu$ M), la cual fue preparada a partir de la disolución de 332 $\mu$ L de solución madre de fluoresceína (10mg de fluoresceína junto a 500mL de DMSO llevados a un

volumen final de 250mL con buffer fosfato, 120,37 $\mu$ M) en un volumen final de 25mL con buffer fosfato. Este buffer fue preparado mezclando 1,44g de  $\text{KH}_2\text{PO}_4$  y 5g de  $\text{Na}_2\text{HPO}_4$  en 500mL de agua tipo II, con un pH final de 7,3 a 7,5. Las muestras fueron depositadas en una microplaca de 96 pozos de fondo oscuro y dejadas en reposo por 30 minutos en oscuridad, posterior a esto, fueron agregados 50 $\mu$ L de una solución de APPH (203,4mg de dihidrocloruro de 2,2'-azobis (2-metilpropionamida en 6,0mL de buffer fosfato, 125mM). La microplaca fue depositada inmediatamente en un espectrofluorímetro (BioTech Sinergy-HT) y la fluorescencia fue leída cada dos minutos durante un tiempo de 2 horas, la  $\lambda$  de excitación fue establecida en 485nm y la  $\lambda$  de emisión en 525nm. El blanco fue preparado a partir de 50 $\mu$ L de buffer fosfato junto a 150 $\mu$ L de la solución de trabajo de la fluoresceína y 50 $\mu$ L de la solución de APPH mencionados anteriormente; además, todas las lecturas fueron realizadas por triplicado. Los valores de ORAC hidrofílico fueron calculados con base a una curva estándar de trolox (10 $\mu$ L del estándar de trolox en concentraciones desde 12,5 $\mu$ M hasta 100 $\mu$ M disueltas en 950 $\mu$ L buffer fosfato) y fueron expresados como  $\mu$ mol de equivalente trolox (ET) por cada 100g de peso seco; método descrito por Gerardi et al. (2015) con algunas modificaciones. En relación con la evaluación lipofílica de la capacidad de absorción de radicales oxígeno (ORAC-L) la metodología fue realizada como se describió anteriormente, excepto que, el solvente utilizado para diluir los extractos y las soluciones de trolox fue una solución de ciclodextrina metilada aleatoriamente (RMCD), la cual fue preparada en una solución de acetona:agua tipo II (50:50v/v) con un 7% en peso de RMCD; esta solución también fue utilizada como el blanco para las lecturas. Método adaptado a partir de las metodologías propuestas por Prior et al. (2003)

### **1.4.7 Análisis del perfil bromatológico y nutricional**

De acuerdo con la resolución 810 del 2021 del Ministerio de Salud y Protección Social, los alimentos para consumo humano deben cumplir unas condiciones y requisitos relacionados al etiquetado o rotulado nutricional, es por esto que, en el análisis del perfil nutricional fue desarrollado con base en la determinación y detección de los siguientes parámetros: Grasa total, azúcares totales, fibra dietaria total, fibra soluble e insoluble, proteína, carbohidratos, calorías, cenizas y determinación de metales como hierro, sodio, cadmio y plomo (Ministerio de Salud y Protección Social, 2021) métodos establecidos y respaldados por las Normas Técnicas Colombianas (NTC). La determinación de grasa total fue llevada a cabo mediante el método Soxhlet, utilizando extracción por hexano de

---

acuerdo con la NTC 6240 (ICONTEC, 2017). Los azúcares totales fueron cuantificados a través de cromatografía líquida de alta resolución (UHPLC, Thermo Fisher Scientific, Vanquish Flex), junto a un detector de índice de refracción (ERC, RefractoMax 520), conforme a la norma AOAC 2018.16 (2023). La fibra dietaria, tanto soluble como insoluble y total, fue determinada mediante la implementación de metodologías enzimáticas y gravimétricas, siguiendo los lineamientos de la NTC 6383 (ICONTEC, 2020), la cual se encuentra basada en la norma AOAC 991.43 (2023). La cuantificación de proteínas fue realizada mediante el método Kjeldahl, de acuerdo con la NTC 4617 (ICONTEC, 2022), determinando el contenido de proteína a través de la cuantificación del nitrógeno presente. Las cenizas fueron cuantificadas a través el método gravimétrico, mediante calcinación a 550°C, según la NTC 2171 (ICONTEC, 2021). Los carbohidratos fueron calculados por diferencia de peso en relación con los macronutrientes restantes, mientras que las calorías fueron estimadas utilizando los factores de conversión de Atwater, los cuales tiene en cuenta los valores energéticos del contenido de proteínas, grasas y carbohidratos de la zanahoria junto a su digestibilidad aparente. Finalmente, los minerales o el contenido de metales como hierro, sodio, cadmio y plomo fueron determinados mediante espectrometría de absorción atómica (Thermo Fisher Scientific, iCE 3300), de acuerdo con las NTC 14084 (ICONTEC, 2021b) y NTC 5151 (ICONTEC, 2003), las cuales definen los protocolos para la detección de minerales, metales o elementos traza en alimentos.

#### **1.4.8 Análisis estadístico**

Los datos obtenidos fueron sometidos a un análisis estadístico, en el cual fueron aplicadas una serie de pruebas de normalidad, independencia de errores y homocedasticidad; mediante un análisis de varianza, aplicando un ANOVA multifactorial ( $p < 0,05$ ) acompañado de una prueba de rangos múltiples Tukey, un análisis de rangos múltiples, un análisis de agrupación o clúster jerárquico (HCA) y componentes principales (PCA). Estos análisis estadísticos fueron realizados en los softwares Statgraphics Centurion XVIII (versión 18,1,12) y R (versión 4,3,0).

## 1.5 Resultados y discusión

### 1.5.1 Composición fisicoquímica de los excedentes de producción de zanahoria

La composición fisicoquímica aproximada de las cuatro tipologías de zanahoria se presenta en la Tabla 1-3, en donde la tipología se utilizó como factor en un ANOVA de una vía, con el objetivo de determinar la capacidad discriminante de cada una de las variables. Se encontró que los valores medios de las propiedades de color, cohesividad, resiliencia y las variables relacionadas al peso, diámetro y longitud diferían significativamente.

Las muestras pertenecientes a la tipología daño patológico, demostraron valores inferiores en algunas de las propiedades de color externo evaluadas, es el caso de las coordenadas  $L^*$ ,  $a^*$ ,  $b^*$  y  $C^*$ , las cuales indican que, dentro de esta tipología, las zanahorias presentan coloraciones más oscuras y con matices en tendencia hacia las tonalidades menos amarillas o rojas, y esto puede estar directamente relacionado a las manchas o afectaciones superficiales causadas por fitopatógenos (Figura 1-1E). Estos cambios de color han sido reportados como síntomas de diversas enfermedades derivadas del ataque de fitopatógenos, como “la podredumbre negra”, causada por *Alternaria radicina*, “la pudrición del cráter”, causada por *Athelia arachnoidea*, “el moho gris”, causado por *Botrytis cinerea* o “pudrición de la raíz” causada por *Phytophthora cactorum*, entre otras; en las cuales se reportan apariciones de lesiones o manchas ovaladas de color café, café oscuro o negro en las primeras etapas hasta la aparición de lesiones necróticas secas o húmedas (Davis, 2004; Higgins & Hausbeck, 2023).

Por otro lado, las zanahorias rajadas reportaron los valores más altos en términos del peso, diámetro y longitud, lo cual indica, zanahorias con mayor tamaño con relación a las otras tipologías. Este fenómeno de fisuras o fracturas en la zanahoria se ha asociado previamente a la provisión de cantidades abundantes de agua, derivadas del riego o las lluvias (McGarry, 1993); estos cambios en el estado hídrico del cultivo, sumados al potencial de turgencia de las zanahorias han demostrado relación directa con la facilidad o disposición en la generación de fisuras o fracturas; es decir, cuando la turgencia es mayor, se requiere menos fuerza para iniciar la fractura en el tejido de la zanahoria (Lockley, 2016; McGarry, 1995). Por lo anterior, las zanahorias rajadas podrían presentar

un mayor tamaño al verse sometidas a mayores regímenes hídricos, por ende, podrían representar algún foco de interés en términos de producción por masa o volumen. En cuanto a la cohesividad y resiliencia, la tipología control reportó los menores valores. Las variables restantes evaluadas en términos de la caracterización fisicoquímica no presentaron diferencias significativas entre las cuatro tipologías descritas.

**Tabla 1-3:** Propiedades fisicoquímicas de las tipologías de zanahoria.

Parámetro	Tipología			
	Control	Deforme	Rajada	Daño Patológico
pH	6,08 ± 0,04a	6,12 ± 0,04a	6,13 ± 0,05a	6,12 ± 0,04a
°Brix	7,5 ± 0,1a	7,4 ± 0,1a	7,4 ± 0,1a	7,5 ± 0,1a
Materia seca (%)	10,411 ± 0,080a	10,600 ± 0,079a	10,591 ± 0,081a	10,508 ± 0,080a
Humedad (%)	89,589 ± 0,080a	89,4 ± 0,079a	89,409 ± 0,081a	89,492 ± 0,080a
L* (externo)	56,13 ± 0,45a	56,99 ± 0,44a	54,33 ± 0,45b	49,16 ± 0,45c
a* (externo)	20,08 ± 0,44a	19,52 ± 0,43ab	17,99 ± 0,44b	15,05 ± 0,44c
b* (externo)	35,23 ± 0,52a	35,83 ± 0,51a	34,15 ± 0,53a	28,73 ± 0,52b
C* (externo)	40,58 ± 0,64a	40,89 ± 0,63a	38,64 ± 0,64a	32,56 ± 0,64b
h* (externo)	60,60 ± 0,40a	61,68 ± 0,39ab	62,94 ± 0,40b	63,16 ± 0,40b
L* (interno)	57,27 ± 0,54ab	59,08 ± 0,54a	57,02 ± 0,55b	57,69 ± 0,54ab
a* (interno)	19,71 ± 0,58a	19,67 ± 0,57a	19,47 ± 0,59a	20,79 ± 0,58a
b* (interno)	41,69 ± 0,74a	44,89 ± 0,73b	41,74 ± 0,75a	44,31 ± 0,74ab
C* (interno)	46,24 ± 0,88a	49,17 ± 0,87a	46,18 ± 0,89a	49,11 ± 0,88a
h* (interno)	65,13 ± 0,41a	66,73 ± 0,40b	65,56 ± 0,41ab	65,41 ± 0,41ab
Dureza (g)	17571,501 ± 305,253a	17272,902 ± 301,682a	17503,8 ± 308,953a	16745,301 ± 305,253a
Adhesividad (g.s)	-0,566 ± 0,270a	-0,803 ± 0,267a	-0,655 ± 0,273a	-1,06 ± 0,270a
Elasticidad	0,846 ± 0,004a	0,851 ± 0,004a	0,848 ± 0,004a	0,844 ± 0,004a
Cohesividad	0,848 ± 0,002a	0,841 ± 0,002ab	0,839 ± 0,002ab	0,839 ± 0,002b
Gomosidad	14896,201 ± 263,086a	14535,900 ± 260,009a	14701,299 ± 266,275a	14056,301 ± 263,086a
Masticabilidad	12671,100 ± 249,687a	12410,489 ± 246,766a	12529,701 ± 252,713a	11874,299 ± 249,687a
Resiliencia	0,755 ± 0,005a	0,737 ± 0,005b	0,730 ± 0,005b	0,727 ± 0,005b
Peso (g)	136,25 ± 8,46a	162,99 ± 8,36ab	204,63 ± 8,56c	181,55 ± 8,46bc
Longitud (cm)	15,74 ± 0,36a	14,24 ± 0,36b	16,64 ± 0,36a	16,15 ± 0,36a
Diámetro (cm)	3,88 ± 0,08a	4,6 ± 0,08b	4,9 ± 0,08c	4,58 ± 0,08b

\*Los valores con las diferentes letras en las filas son significativamente diferentes.

Con respecto a la composición bromatológica y nutricional de las diferentes tipologías de zanahoria, fue posible determinar las variables que presentaron diferencia significativa, en este caso particular, el contenido de proteína, azúcares totales, carbohidratos, calorías, fibra total, zinc y el contenido de carotenos totales; de igual forma, en este análisis se utilizó la tipología como factor en un ANOVA de una vía (Tabla 1-4).

**Tabla 1-4:** Composición nutricional de las tipologías de zanahoria.

Parámetro	Tipología			
	Control	Deforme	Rajada	Daño Patológico
Proteína (g/100g)	0,39 ± 0,05a	0,46 ± 0,05ab	0,59 ± 0,06b	0,57 ± 0,06b
Azúcares Totales (g/100g)	5,245 ± 0,201a	4,886 ± 0,195a	4,688 ± 0,208ab	4,01 ± 0,215b
Carbohidratos (g/100g)	9,197 ± 0,166a	9,072 ± 0,161ab	8,582 ± 0,171ab	8,395 ± 0,177b
Calorías (kcal/100g)	32,806 ± 0,620a	32,402 ± 0,601ab	31,108 ± 0,640ab	30,064 ± 0,662b
Fibra Total (g/100g)	2,8 ± 0,065ab	2,89 ± 0,063a	2,63 ± 0,067b	2,89 ± 0,070a
Fibra Soluble (g/100g)	0,45 ± 0,055a	0,40 ± 0,053a	0,41 ± 0,056a	0,55 ± 0,058a
Fibra Insoluble (g/100g)	2,33 ± 0,057a	2,50 ± 0,056a	2,42 ± 0,059a	2,34 ± 0,061a
Cenizas (g/100g)	0,80 ± 0,02a	0,76 ± 0,02a	0,80 ± 0,02a	0,81 ± 0,02a
Carotenos Totales (mg/100g)	1,71 ± 0,12a	2,19 ± 0,11b	1,90 ± 0,12ab	1,94 ± 0,12ab
Hierro (mg/100g)	0,679 ± 0,112a	0,547 ± 0,109a	0,553 ± 0,116a	0,723 ± 0,120a
Sodio (mg/100g)	25,022 ± 1,487a	21,929 ± 1,443a	19,531 ± 1,536a	20,776 ± 1,590a
Calcio (mg/100g)	29,654 ± 0,831a	29,82 ± 0,806a	29,313 ± 0,858a	27,623 ± 0,888a
Cobre (mg/100g)	0,301 ± 0,012a	0,332 ± 0,012a	0,311 ± 0,013a	0,324 ± 0,013a
Zinc (mg/100g)	0,074 ± 0,013a	0,078 ± 0,012a	0,128 ± 0,013ab	0,11 ± 0,014b
Níquel (mg/kg)	0,068 ± 0,010a	0,061 ± 0,009a	0,05 ± 0,010a	0,036 ± 0,010a

\*Los valores con las diferentes letras en las filas son significativamente diferentes.

Las zanahorias control presentaron los valores más altos de azúcares totales, carbohidratos y calorías, sin embargo, solo presentaron diferencia significativa con respecto a las zanahorias que presentan daño patológico. Esta reducción en el contenido de azúcares o carbohidratos ha sido reportada en estudios de zanahorias afectadas por entomopatógenos como *Bactericera trigonica* o *Trioza apicalis*, la cual se relaciona a un aumento de la respiración y, por ende, del consumo de carbohidratos debido al estrés y a la actividad de cicatrización de las heridas causadas por los insectos (Nissinen et al., 2012; Othmen et al., 2022). Resultados similares se han encontrado en zanahorias con tejidos ennegrecidos o con presencia de manchas de color café oscuro o negro, en las cuales, los contenidos de aminoácidos, azúcares solubles como glucosa, fructosa y sacarosa, y los

ácidos orgánicos presentes se agotan en las regiones negras en comparación con las zanahorias naranjas o sanas (Schulz et al., 2023).

En términos del contenido total de carotenos, las muestras pertenecientes a la tipología Deforme presentaron valores significativamente diferentes solo en relación con la tipología control; para el resto de las variables no se determinó diferencia alguna entre las cuatro tipologías evaluadas.

En términos del contenido total de fenoles (TPC) y del análisis de la capacidad antioxidante de las diferentes tipologías de la zanahoria, se determinó que todas las variables evaluadas presentaron significancia en las diferencias observadas entre dichas tipologías (Tabla 1-5). Para el caso de TPC y la evaluación de la capacidad antioxidante mediante FRAP, las tipologías R y S presentaron los valores más altos, indicando que, bajo estas metodologías generales, ambas tipologías de zanahorias podrían estar presentando una mayor concentración o diversidad de compuestos químicos de características antioxidantes resultantes de las afectaciones fitopatológicas o de ambiente. Ahora bien, los valores más altos de capacidad antioxidante por DPPH y su porcentaje de inhibición hacen referencia a la tipología P, zanahorias en las cuales se ha demostrado contenidos superiores de compuestos fenólicos, flavonoides o presencia alta de prolina, involucrados generalmente en la resistencia a patógenos (Othmen et al., 2022). De hecho, se han reportado aumentos generales en los niveles de compuestos fenólicos solubles en zanahoria con presencia de segmentos o manchas negras, en los cuales se reportan aumentos significativos en los niveles de ácido clorogénico, ácido cafeico, ácido dicafeoilquínico y ácido 5-cafeoilquínico (Schulz et al., 2023); este aumento del contenido de compuestos fenólicos surge como una consecuencia de varios factores de estrés, como el ataque de nematodos, la presencia de patógenos, las condiciones ambientales o incluso, el estrés mecánico (Nissinen et al., 2012).

Estos compuestos químicos han sido ampliamente relacionados a actividades antioxidantes (Anbualakan et al., 2023; Bhandari et al., 2023; Brahmi et al., 2022; Granato et al., 2011), lo cual podría relacionarse con los valores superiores de DPPH, técnica que posee mayor afinidad a los compuestos poco polares, por ende, estos resultados pueden

estar directamente relacionados con los obtenidos para la misma tipología en relación con la capacidad antioxidante por ORAC lipofílico, para la cual, nuevamente se reportan los valores más altos y una diferencia significativa en relación a las tipologías C y D. Es de resaltar que esta tipología reporta en la mayoría de las metodologías evaluadas los valores más altos y significativamente diferentes con una o dos de las otras tipologías evaluadas, con excepción a la capacidad antioxidante por ORAC hidrofílico, en la cual la tipología D reporta los valores más altos, sin embargo, no presenta alguna diferencia significativa con las zanahorias de la tipología P.

**Tabla 1-5:** Composición nutricional de las tipologías de zanahoria.

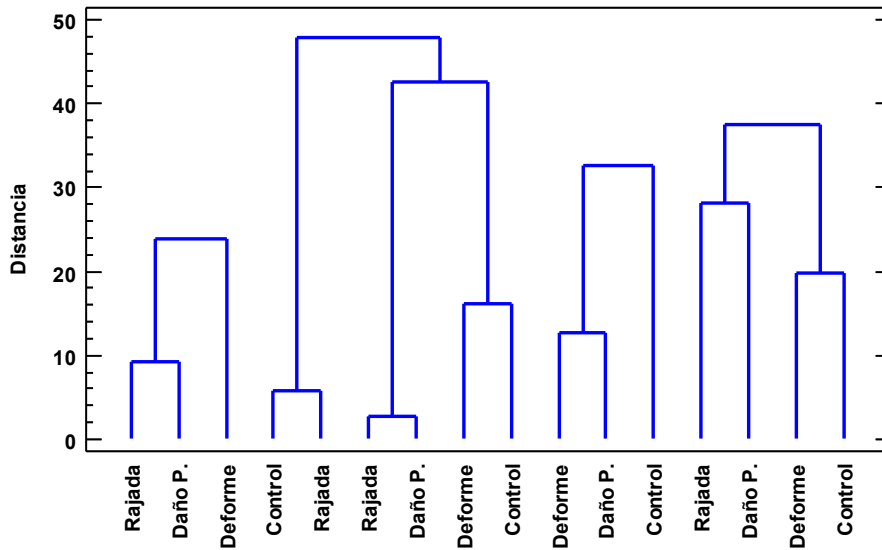
Parámetro	Tipología			
	Control	Deforme	Rajada	Daño Patológico
TPC (mg EAG/100g)	84,67 ± 6,36a	80,38 ± 6,36a	128,25 ± 6,36b	136,05 ± 6,36b
FRAP (µmol ET/100g)	167,64 ± 35,87a	181,89 ± 35,05a	326,28 ± 35,05b	393,66 ± 35,05b
DPPH (µmol ET/100g)	349,36 ± 28,96ab	323,44 ± 28,96ab	270,8 ± 28,96a	420,4 ± 28,96b
Inhibición DPPH (%)	53,70 ± 2,66ab	51,55 ± 2,66ab	46,05 ± 2,66a	59,92 ± 2,656b
ORAC Hidrofílico (µmol ET/100g)	4295,68 ± 405,42a	8376,79 ± 405,42b	5374,37 ± 405,42a	8085,12 ± 405,42b
ORAC Lipofílico (µmol ET/100g)	2342,16 ± 225,14a	2475,57 ± 225,14a	3410,51 ± 225,14b	3614,66 ± 229,98b

EAG: Equivalentes de ácido gálico, ET: Equivalentes de trolox. Los valores con las diferentes letras en las filas son significativamente diferentes.

### 1.5.2 Análisis de clúster jerárquico

Las muestras correspondientes a los excedentes de producción de zanahoria se analizaron mediante un análisis de clúster jerárquico (HCA), utilizando el método de Ward con el propósito de minimizar la variabilidad interna y maximizar las diferencias entre grupos utilizando una distancia euclidiana; no obstante, no se encontró evidencia alguna que permita determinar afinidades, similitudes o establecer una tendencia de las muestras a agruparse naturalmente en función de rasgos compartidos, discriminados por las tipologías descritas (Figura 1-3).

**Figura 1-3:** Dendograma generado al agrupar muestras mediante un análisis de clúster jerárquico.

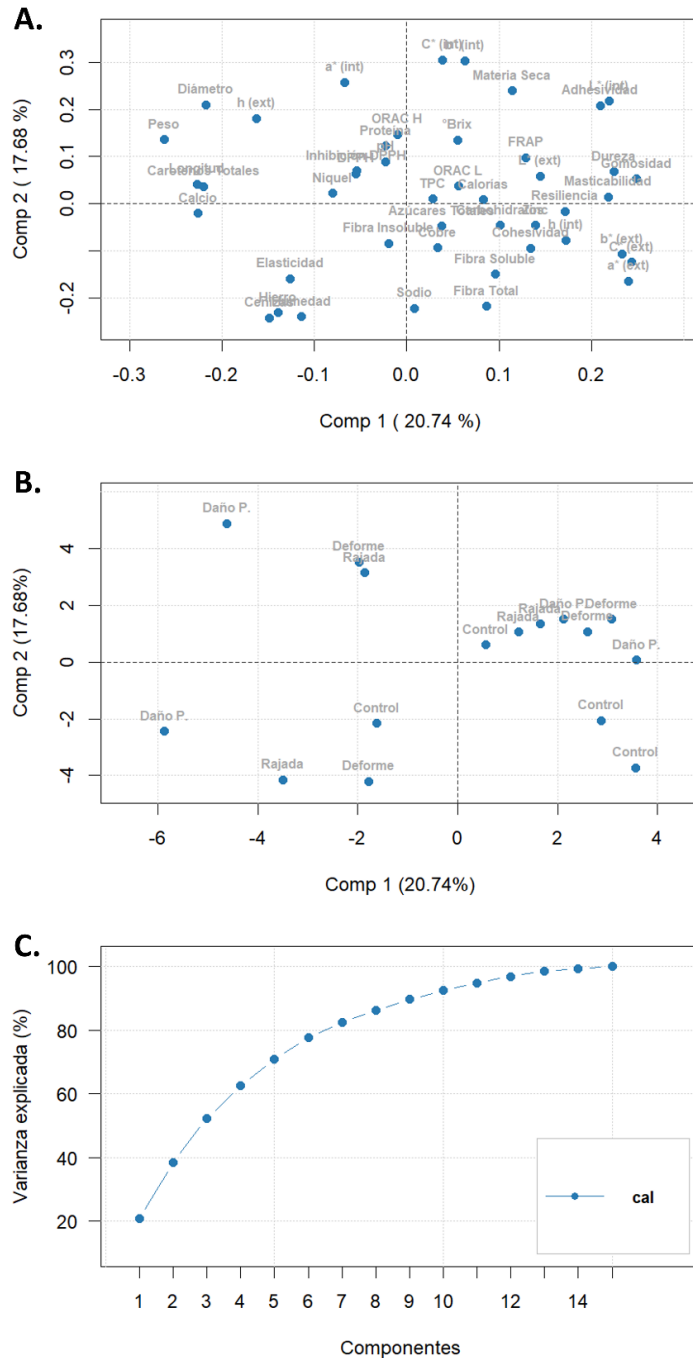


### 1.5.3 Análisis de componentes principales

Se implementó un análisis de componentes principales (PCA) con relación al análisis de los datos experimentales de la totalidad de las variables evaluadas, con el fin de visualizar patrones de respuesta en el espacio de características de los componentes principales (PC). Los resultados de PCA de las variables evaluadas en la caracterización de las muestras de excedentes de producción de zanahoria se proyectan en los dos primeros PC en la Figura 1-4A. El primer componente principal (PC) es responsable del 20,74% de la variabilidad general de los datos y, cuando se combina con el segundo componente principal (17,68%), es responsable del 38,42% de la variabilidad total de los datos. La principal relevancia del primer componente fue su correlación positiva con las variables adhesividad, dureza, gomosidad y masticabilidad del perfil de textura, además de las coordenadas de color  $a^*$ ,  $b^*$ ,  $C^*$  exterior y  $L^*$  interior; por consiguiente, el valor del primer componente principal aumentó a medida que aumentaron los niveles de estas variables relacionadas a la textura y el color. Por otro lado, el segundo componente presentó una correlación positiva con las coordenadas de color  $a^*$ ,  $b^*$  y  $C^*$  interior, junto con el porcentaje de materia seca. Sin embargo, estas variables solo son capaces de explicar el 38,42% de

la variabilidad de todas las muestras, para obtener una explicación superior al 80%, sería necesario analizar los primeros siete PC, tal como se describe en la Figura 4C.

**Figura 1-4:** Análisis de componentes principales de los excedentes de producción de zanahoria; gráfico de loadings (cargas) del PCA (A); Gráfico de scores (puntuajes) del PCA (B); porcentaje de varianza explicada (C).



Al analizar el gráfico de scores (Figura 1-4B), los resultados del PCA concuerdan con los obtenidos por HCA, debido a que no es posible observar una clara tendencia de agrupamiento natural en las muestras de excedentes de producción de zanahoria según la tipología descrita.

Para una comprensión más completa de las variaciones entre las diferentes tipologías de los excedentes de producción de zanahoria, se implementó un PCA bajo tres esquemas: caracterización total, la cual incluye las variables fisicoquímicas, nutricionales y bromatológicas, así como las variables de TPC y capacidad antioxidante (Figura 1-5A); composición fisicoquímica, bromatológica y nutricional (Figura 1-5B); y finalmente, solo la composición fisicoquímica (Figura 1-5C), con el objetivo de comprender de manera más profunda diferencias o similitudes entre muestras. Según la caracterización total, la Figura 1-5A representa el gráfico biplot resultante de la unión de los gráficos de loadings y scores obtenidos en la Figura 1-4, el cual permite visualizar de manera conjunta las variables que presentan correlación positiva en ambos CP; de igual forma se observa la no agrupación de las muestras en relación con las características compartidas y establecidas por las tipologías.

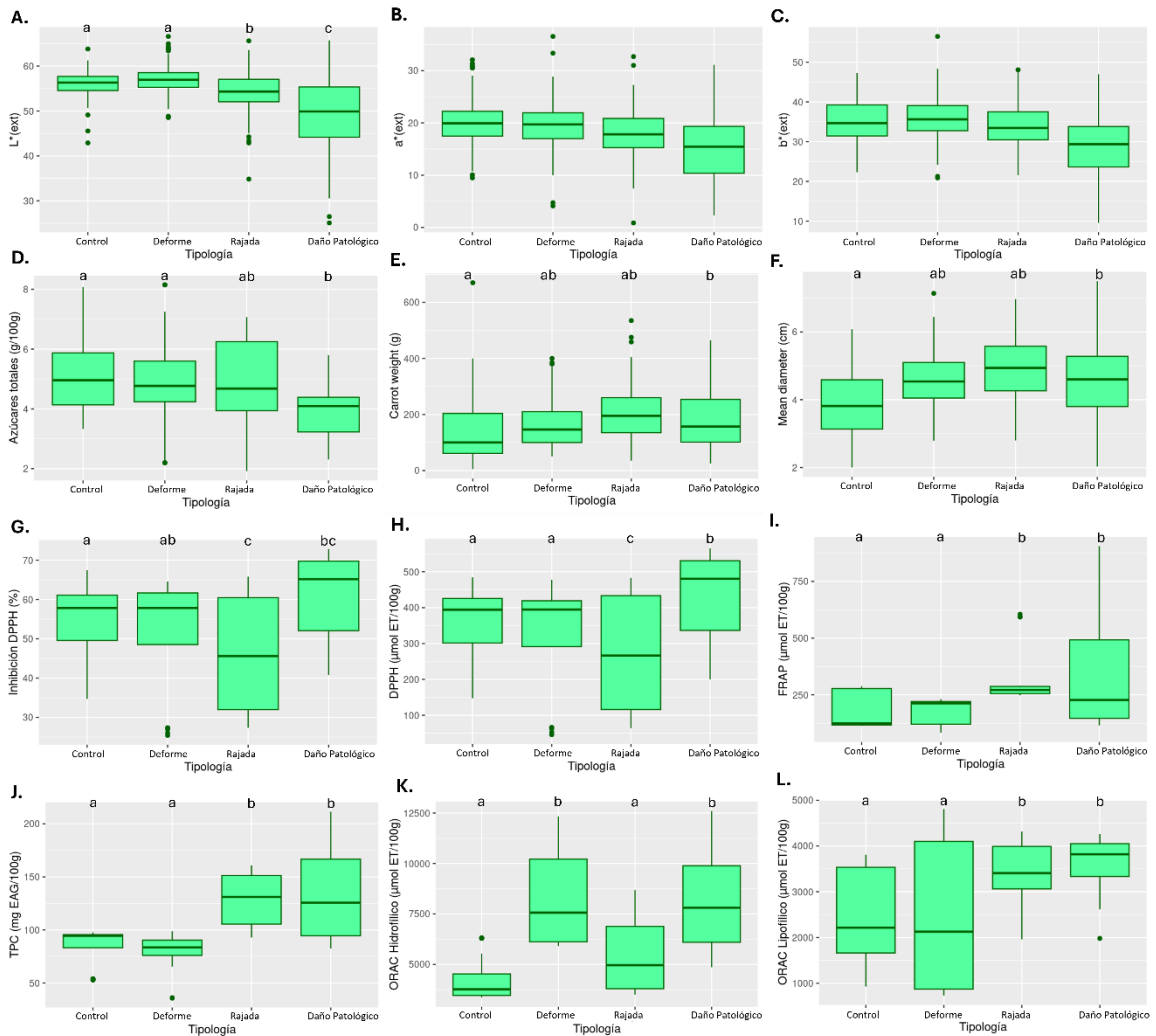


representa el 17,67% de la variabilidad; el CP2 por su lado representa el 12,88%, y se correlaciona positivamente solo con las variables peso y la fibra total; bajo este esquema el PCA representa en total un 30,55% de la variabilidad (Figura 1-5B). Ahora, en relación exclusiva a la composición fisicoquímica, el PCA arrojó que las variables que se correlacionan positivamente con el CP1 son las resultantes del análisis de perfil de textura y las coordenadas de color interno, representando un total de 23,66% de la variabilidad fisicoquímica; por su parte el CP2 se correlaciona positivamente solo con la variable de °Brix (Figura 1-5C). Para los tres esquemas planteados del PCA, los gráficos de scores representados en los gráficos biplot de la Figura 1-5, concuerdan de igual manera con los resultados obtenidos por el HCA, en los cuales, no es posible observar una tendencia de agrupamiento natural en ninguno de los esquemas en relación con las muestras de excedentes de producción de zanahoria según la tipología descrita; por lo mismo existe una alta dispersión de las muestras sin importar el tipo de caracterización que se analice.

#### **1.5.4 Análisis de rangos múltiples**

De forma paralela, se seleccionaron las variables que presentaron correlación positiva en los diferentes PCA realizados, siendo algunas de estas, las variables que demostraron diferir significativamente entre las tipologías evaluadas, además de otras variables como TPC, o actividades antioxidantes como FRAP y ORAC hidrofílico, las cuales, de manera similar, presentaron diferencias significativas; las mismas fueron presentadas en las Tablas 1-3, 1-4 y 1-5. Para estas variables se realizó un análisis de rangos múltiples con el objetivo explorar las diferencias en la distribución de los datos analizados entre las cuatro tipologías establecidas y su variabilidad (Figura 1-6).

**Figura 1-6:** Análisis de rangos múltiples de diferentes variables evaluadas en los excedentes de producción de zanahoria.



Las propiedades de color externo en términos de las coordenadas L\*, a\* y b\* (Figura 1-6A, 1-6B y 1-6C, respectivamente), presentan una distribución simétrica en las cuatro tipologías evaluadas, además, en las tipologías C, D y R se observa una similitud en las medianas, pero diferencias en la dispersión de las coordenadas a\* y b\*, lo que sugiere una mayor variabilidad dentro de cada tipología que entre ellas. Con respecto a la tipología P se puede observar valores medianos más bajos en las tres coordenadas de color, acompañados de una dispersión alta y con diferencia significativa en relación a las otras tipologías evaluadas; lo anterior indica que, las zanahorias con presencia de afectaciones por daño patológico (P) poseen coloraciones más oscuras o menos brillantes, tonalidades menos rojizas y/o ligeramente menos amarillas, pero con una mayor dispersión en los

---

datos obtenidos; lo cual puede estar relacionado a las diferentes afectaciones patológicas y diferentes causantes microbiológicos o entomológicos, causantes de las decoloraciones y apariciones de manchas oscuras y negras relacionadas al deterioro de tejidos (Davis, 2004; Higgins & Hausbeck, 2023; Othmen et al., 2022; Schulz et al., 2023; Tülek & Dolar, 2015).

En relación con el contenido de azúcares totales (Figura 1-6D), carbohidratos (Figura 1-6E) y calorías (Figura 1-6F), las cuatro tipologías evaluadas presentan similitudes en las medianas, con distribuciones asimétricas y con diferencias significativas entre la tipología C y P. Adicionalmente, el contenido de azúcares totales en la tipología P presenta una baja dispersión y unos valores significativamente menores respecto a la tipología C y D; lo cual se relaciona directamente a la reducción de azúcares que se ha reportado en diferentes en afectaciones de este tipo en tejidos de zanahoria (Nissinen et al., 2012; Odebode & Unachukwu, 1997; Othmen et al., 2022; Schulz et al., 2023). Por su parte, las Figuras 1-6g y 1-6h indican que las zanahorias pertenecientes a la tipología R poseen un peso y un diámetro significativamente mayor, respectivamente, con respecto a las otras tipologías; esta relación ha sido demostrada, en tanto que el peso fresco de las raíces tiene una influencia importante en la susceptibilidad a la ruptura o la generación de fisuras, es decir, las raíces más pesadas son más susceptibles a sufrir daños de este tipo (Hole et al., 1999).

Las variables relacionadas a TPC y a la capacidad antioxidante evaluada en FRAP y ORAC hidrofílico presentan diferencias en las medianas y en la dispersión de los datos, esto sugiere que existen diferencias significativas entre las tipologías evaluadas. Para el caso del TPC, las tipologías R y P presentan los valores más altos, una mayor dispersión y una diferencia significativa respecto a las zanahorias C y D; por su parte, la capacidad antioxidante expresada en FRAP presenta resultados similares, las tipología R presenta una baja dispersión de datos y por su lado, la tipología P una mayor dispersión, sin embargo, ambas tipologías demuestran valores superiores y significativamente diferentes frente a C y D; esta tendencia es reiterativa en la evaluación de la capacidad antioxidante bajo la metodología ORAC lipofílico, en donde las zanahorias P y R difieren significativamente de C y D. Finalmente, en términos de la capacidad antioxidante ORAC hidrofílico, las zanahorias D y P presentaron valores medianos más altos y diferencias

significativas con respecto al control. Estas tipologías, particularmente las zanahorias R y P evidencian capacidades antioxidantes superiores y así mismo, un contenido superior de compuestos fenólicos; lo cual está relacionado directamente a las causales de dichas tipologías, es decir, estrés físico, fisiológico o afectaciones causadas por microorganismos o entomopatógenos; estos orígenes de estrés o de respuesta de defensa a patógenos han sido relacionados como causales de producción de metabolitos secundarios en plantas (Isah & Isah, 2019; Yang et al., 2018), los cuales se relacionan con la producción de compuestos fenólicos, polifenólicos, flavonoides, pigmentos, entre otros; compuestos con actividades antioxidantes reportadas ampliamente (A. Vaz et al., 2022; Bhandari et al., 2023; Idrovo Encalada et al., 2019; Nicolle et al., 2004; Vodnar et al., 2017), los cuales han sido descritos en zanahoria con presencia de afectaciones de este tipo (Othmen et al., 2022; Schulz et al., 2023; Tülek & Dolar, 2015).

De forma general los resultados obtenidos sugieren que las zanahorias pertenecientes a tipologías específicas como “Rajada” y “Daño Patológico” presentan características superiores en términos de contenido de fenoles y capacidad antioxidantes, estas características posicionan a estas tipologías en potenciales candidatos para procesos de transformación y valorización, mediante extracción de compuestos bioactivos (Clementz et al., 2019; Idrovo Encalada et al., 2019) y/o generación de prototipos o productos funcionales. Sin embargo, en términos de las variables fisicoquímicas y nutricionales evaluadas, en su gran mayoría no se encontró diferencias significativas entre las diferentes tipologías, lo cual destaca la importancia de considerar las diferentes tipologías como una misma fuente de materia prima en estudios orientados a bioprospección (Martinez-Saldarriaga et al., 2024), procesos de transformación, biorrefinería (Jyot Kaur et al., 2020; Salvañal et al., 2021), y por ende, a la revalorización de los excedentes de producción de zanahoria (Clementz et al., 2019), contribuyendo así a mitigar el impacto ambiental, social y económico asociado.

### **1.5.5 Vocaciones de uso de los excedentes de producción**

Los excedentes de zanahoria poseen un contenido de fibra total entre 2,63g/100g y 2,89g/100g, siendo valores competitivos con respecto a otros vegetales como espárragos, apio, pepino, entre otros. La fibra presenta efecto benéfico en relación con reducción del colesterol en sangre y cuidado del sistema digestivo, así como en la absorción de

---

minerales. En adición, se resalta que la zanahoria independiente del tipo de clasificación en el contexto de excedentes es una fuente de minerales como hierro, sodio, calcio, cobre, zinc y níquel. La presencia del calcio en valores de 27,62mg/100g a 29,82mg/100g, valida la importancia de incluir la zanahoria en la dieta para prevenir la formación de pólipos adenomatosos en el colon y reducir el riesgo de enfermedades cardiovasculares y osteoporosis (Mandrich et al., 2023). Los excedentes de la zanahoria reportan un contenido total de polifenoles en un rango de 80,36 a 136,05mg EAG/100g, y de carotenoides de 1,71 - 2,19mg/100g, los compuestos vinculados a  $\alpha$ -caroteno y  $\beta$ -caroteno puede aumentar funciones del sistema inmunológico; por ejemplo, el  $\beta$ -caroteno como precursor de vitamina A, y el  $\alpha$ -tocoferol de la vitamina E, pueden presentar efecto positivo en la señalización celular, expresión génica y la estabilidad de la membrana celular en el cuerpo humano (Babar et al., 2025). Así mismo, dada la presencia de vitamina C en la zanahoria su consumo puede contribuir a controlar la presión arterial y prevenir la deficiencia de hierro (Varshney & Mishra, 2022).

El papel de compuestos polifenólicos es generalizado en el contexto de propiedades antioxidantes, los cuales tienen diversa actividad biológica y reconocidos por su acción preventiva contra el daño causado por estrés oxidativo. Acorde a los resultados, la capacidad antioxidante de la zanahoria en términos de FRAP, DPPH y ORAC (Tabla 1-5), los excedentes de zanahoria en la categoría de daño patológico, revela valores altos de FRAP 393,66 $\mu$ mol ET/100g y DPPH 420,4 $\mu$ mol ET/100g, demostrando su potencial de aprovechamiento en la generación de productos de alto valor agregado en el contexto de productos con alto poder antioxidante para la industria alimentaria y farmacéutica. En relación con otros compuestos presentes en la zanahoria, los ácidos linoleico y linolénico son reportados por otros autores, estos ácidos grasos insaturados constituyen los precursores de las oxilipinas acetilénicas, en consecuencia, el alto contenido de ácidos grasos poliinsaturados se relaciona con efectos antioxidantes, antiinflamatorios y antipiréticos (Bhandari et al., 2023). Además, las oxilipinas de tipo faltarinol exhiben actividades citotóxicas y anticancerígenas (Mandrich et al., 2023). Bhandari et al. 2023, también reportan la presencia de fitoesteroles ( $\beta$ -sitosterol, estigmasterol y campesterol) en diferentes genotipos de zanahoria, su relevancia radica en que los fitoesteroles ayudan a mejorar los niveles plasmáticos de colesterol de lipoproteínas de baja densidad, la

enfermedad del hígado graso no alcohólico y las enfermedades cardiovasculares y también presentan efectos antioxidantes, antiinflamatorios y antipiréticos (Lesma et al., 2018).

Con base en lo anterior, es fundamental implementar estrategias de reincorporación de estos excedentes de producción en industrias que permitan la disminución de los desechos generados mientras se optimizan simultáneamente los procedimientos de producción, con el objetivo de transformar el modelo de consumo y producción lineal a uno de economía circular (Eliopoulos et al., 2022); en el cuál, los residuos generados por una determinada industria pueden convertirse en materia prima de otra (Brivaldo Viana Da Silva et al., 2023); en este caso, los excedentes de producción permiten explotar aquellas moléculas de interés y sus propiedades biofuncionales inherentes, por consiguiente, generando un valor agregado en la cadena productiva de la zanahoria. En el caso particular de la zanahoria, los residuos o subproductos han comenzado a implementarse como materia prima o fuente de obtención de moléculas de alto valor. Autores como Clementz et al. (2019) y Jyot Kaur et al. (2020) han desarrollado metodologías de valorización en excedentes de producción, mediante la extracción de carotenos, fibra y azúcares fermentables, para la producción de biocombustibles; a su vez se reportan estudios acerca del uso del bagazo de zanahoria en polvo como una fuente abundante de fibra, carbohidratos y minerales, lo que indica su capacidad para mejorar el valor nutricional de los alimentos a los que se pueda incorporar (Luca et al., 2022). Por consiguiente, es esencial identificar, recuperar y reincorporar moléculas de alto valor en los residuos y subproductos provenientes de la cadena productiva de la zanahoria en industrias tales como farmacéutica, biorrefinería, producción de alimentos funcionales o extracción de compuestos bioactivos.

## 1.6 Conclusiones

La caracterización multidimensional de los excedentes de producción de zanahoria basado en las cuatro tipologías evaluadas (Control, Rajada, Deforme y Daño Patológico) permitió identificar diferencias y similitudes significativas en términos de composición fisicoquímica, bromatológica, nutricional y bioactiva. Aunque las variables fisicoquímicas mostraron en su mayoría pocas diferencias significativas, aspectos como el contenido de fenoles totales y la capacidad antioxidante destacaron en las tipologías Rajada y Daño Patológico, evidenciando su potencial como fuente de compuestos bioactivos; además, las grandes

similitudes entre las tipologías sugieren que pueden ser integradas en procesos de aprovechamiento de manera conjunta, promoviendo así la valorización de la cadena productiva de la zanahoria, la sostenibilidad, y la reducción del impacto ambiental asociado al desperdicio agrícola. Estos resultados subrayan la importancia de considerar los excedentes de producción de zanahoria como una fuente de materia prima versátil, potencial y subutilizada.

## **2. Capítulo 2: Perspectiva metabolómica de la biomasa residual de zanahoria: Un enfoque de bioprospección a través de los microclimas colombianos**

### **2.1 Resumen**

Aproximadamente el 30% de la producción mundial de zanahoria es descartada, lo cual representa un ejemplo significativo de pérdida y desperdicio de alimentos a lo largo de la cadena de producción. En lugar de ser enviados a rellenos sanitarios, donde las zanahorias descartadas contribuyen a problemas ambientales como la emisión de gases de efecto invernadero y generan costos para su disposición, estas podrían constituir fuentes valiosas de metabolitos de alto valor comercial. El presente estudio emplea un análisis metabolómico para explorar el potencial de bioprospección de la biomasa residual de zanahoria proveniente de tres localidades colombianas, con el objetivo de reducir el desperdicio alimentario y promover un enfoque de economía circular. Se investigaron los perfiles metabolómicos de diferentes tipologías de zanahoria: rajadas (R), deformes (D), con presencia de daño patológico (P) y controles sanos (C), recolectadas en Marinilla, El Santuario y Rionegro en el Departamento de Antioquia, Colombia. Estas localidades, con condiciones climáticas particulares, influyeron en la composición metabolómica de las zanahorias descartadas. De manera destacada, la Nuciferina y la Criptotanshinona fueron más abundantes en las muestras de Rionegro y El Santuario, mientras que el 4'-Metoxiflavonol, la N-hexadecanoilpirrolidina, la Microcistina LW y la Feruloiltiamina se encontraron en mayores concentraciones en las zanahorias de Marinilla. Esta última localidad también presentó una mayor diversidad metabólica en comparación con las demás. El estudio discute además el potencial de bioprospección de los metabolitos identificados en zanahorias residuales, destacando sus posibles aplicaciones industriales y su contribución a la valorización de residuos.

---

**Palabras clave:** zanahoria, bioprospección, revalorización, biomasa residual, metabolómica, metabolito, microclima.

## 2.2 Abstract

Approximately 30% of global carrot production is discarded, illustrating a significant example of food loss and waste within the supply chain. Rather than being sent to landfills, where discarded carrots contribute to environmental issues such as greenhouse gas emissions and incur disposal costs, they could serve as valuable sources of high-value commercial metabolites. The present study employs metabolomic analysis to explore bioprospecting potential of discarded carrot biomass sourced from three Colombian locations, contributing to reduced food waste and supporting a circular economy approach. This study investigates the metabolomic profiles of different carrot types—cracked (R), deformed (D), pathologically damaged (P), and healthy controls (C)—from distinct locations: Marinilla, El Santuario, and Rionegro located in the department of Antioquia-Colombia. These locations, with their unique climatic conditions, influenced the metabolomic composition of the residual carrots. Notably, Nuciferine and Cryptotanshinone were more abundant in the Rionegro and El Santuario carrots. At the same time, 4'-Methoxyflavonol, N-Hexadecanoylpyrrolidine, Microcystin LW, and Feruloyltyramine were found in higher concentrations in carrots from Marinilla. Moreover, Marinilla exhibited more metabolic diversity than Rionegro and El Santuario. The study also discusses the bioprospecting potential of these metabolites in residual carrots, highlighting their possible applications as well as waste valorization.

**Keywords:** carrot, bioprospecting, re-valorization, residual biomass, metabolomic, metabolite, microclimate.

## 2.3 Introducción

El aumento de la población ha generado una creciente demanda global de alimentos, ejerciendo una presión significativa sobre los sistemas agrícolas actuales. Paralelamente, se han incrementado las pérdidas y los residuos generados a lo largo de la cadena de suministro de alimentos. Se estima que los porcentajes globales de pérdida de alimentos

en las etapas de producción, poscosecha y consumo son del 24, 24 y 35%, respectivamente (Chauhan et al., 2021). El uso de residuos alimentarios como fuente de materia prima para la recuperación de compuestos de valor agregado, mediante tecnologías sostenibles y estrategias de bioprospección, es la clave para mejorar la seguridad alimentaria y avanzar hacia un entorno más sostenible; debido a que los residuos alimentarios contribuyen, por ejemplo, a la emisión de gases de efecto invernadero, la disminución de la calidad del aire y la contaminación del suelo y el agua (Sarmiento-García et al., 2023; Vigneshwar et al., 2022). Los residuos de alimentos pueden constituir una plataforma para la obtención de compuestos químicos, nutraceuticos, azúcares, biocombustibles, biogás y biocarbón, mediante la implementación de procesos de conversión termoquímica, digestión anaerobia y fermentación. Sin embargo, es necesario resaltar que, la pérdida de alimentos puede originarse desde el lugar de cosecha, en donde los agricultores seleccionan los productos que cumplen con los estándares comerciales. A su vez, el metabolismo vegetal se ve influenciado por factores ambientales locales como la temperatura, disponibilidad hídrica y concentración atmosférica de CO<sub>2</sub> (Večeřová et al., 2022). Por tanto, comprender cómo el entorno local influye en el perfil bioquímico de los residuos alimentarios es esencial para determinar su potencial de valorización y el uso en procesos de bioprospección.

Las zanahorias son una excelente fuente de carotenoides, vitaminas, fibra dietaria, minerales y antioxidantes, lo que las convierte en un alimento altamente nutritivo y (Ahmad et al., 2019; Que et al., 2019). A nivel mundial, la zanahoria se ubica entre las diez hortalizas con mayor producción y consumo (Rodrigues et al., 2022). El mercado global de la zanahoria, en términos de exportaciones, se valora actualmente en 1,6 billones de dólares (FAOSTAT, 2023), y representa una fuente importante de empleo para los agricultores; de hecho, en Colombia, la producción de hortalizas genera aproximadamente 300.000 empleos directos e indirectos (Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural, 2015).

La producción de zanahoria ha aumentado en las últimas décadas, alcanzando los 41,7 millones de toneladas en 2021 a nivel mundial (FAOSTAT, 2023). Sin embargo, aproximadamente el 30% de la producción de zanahoria se descarta en la etapa poscosecha, debido al incumplimiento con los estándares de calidad exigidos para su comercialización, entre los criterios de descarte se incluyen tamaño reducido, longitud irregular, inconsistencias en la forma y color, además de la presencia de daños mecánicos

---

(Jyot Kaur et al., 2020). Esto equivale a cerca de 12,51 millones de toneladas de biomasa descartada potencialmente aprovechable dentro de la cadena de valor de la zanahoria. En zonas rurales donde se cultiva zanahoria, esta biomasa residual se emplea comúnmente para la alimentación animal o el compostaje; no obstante, también puede ser incinerada o dispuesta en campo abierto, lo que genera impactos negativos sobre el medio ambiente, como la contaminación del aire y del agua subterránea (A. Vaz et al., 2022; Eliopoulos et al., 2022). Además, esto representa pérdidas económicas para los productores y costos adicionales relacionados con la disposición del material descartado, lo cual puede desincentivar la actividad agrícola. La reducción en el volumen de residuos orgánicos generados ya sea por pérdidas o excedentes de producción, puede contribuir a mejorar la seguridad alimentaria sin aumentar la carga ambiental de las prácticas agrícolas (Rodrigues et al., 2022).

En Colombia, las zanahorias se clasifican en tres categorías para su comercialización. La categoría “extra” incluye zanahorias sin defectos morfológicos, de forma regular y sin daños mecánicos ni fisuras. La categoría “primera” incluye zanahorias con buena apariencia, pero permite defectos menores asociados a la manipulación o el lavado. Finalmente, la categoría “segunda” agrupa aquellas zanahorias que presentan heridas cicatrizadas o marcas de quemaduras (Cámara de comercio de Bogotá, 2015; ICONTEC, 1994). Las zanahorias son descartadas y consideradas como biomasa residual o excedentes de producción cuando presentan variaciones morfológicas como fisuras o rajaduras, deformidades o con presencia de daños patológicos. Estos excedentes han sido reconocidos como fuentes renovables y abundantes de compuestos químicos de interés, e incluso se han utilizado como materia prima en procesos de biorrefinería orientados a la producción de azúcares fermentables, carotenoides y biocombustibles (Jyot Kaur et al., 2020; Ramos-Andrés et al., 2021; Salvañal et al., 2021).

La composición química de una matriz agroalimentaria como la zanahoria puede variar dependiendo de los factores asociados al sitio de cultivo y sus microclimas. La cantidad, proporción, composición y calidad de los compuestos químicos presentes en las plantas, se ven influenciados por factores ambientales como la ubicación geográfica, la radiación solar, la precipitación y la temperatura media, determinados principalmente por la altitud

en regiones intertropicales como Colombia. Estos factores afectan de manera directa o indirecta la concentración de metabolitos secundarios y la actividad biológica asociada a dichos compuestos (Chelghoum et al., 2021; Kecis et al., 2023; Z. Zhao et al., 2024). Reportes previos han explorado la relación en matrices alimentarias como la menta, el mango o la pitaya y los factores climáticos, determinando una influencia directa de la altitud y otras características climáticas en la concentración de compuestos fenólicos, flavonoides, alcaloides y aminoácidos, entre otros, y sus propiedades bioactivas inherentes (Brahmi et al., 2022; Chelghoum et al., 2021; Cornara et al., 2023; Kecis et al., 2023; Z. Zhao et al., 2024). Sin embargo, son pocos los estudios que evalúan la variabilidad química de los residuos orgánicos y los excedentes de producción en función de su localidad, especialmente en zanahorias descartadas; por lo tanto, es importante considerar tanto la alta heterogeneidad del cultivo como la variabilidad química asociada a la localidad, junto con los problemas relacionados con el desaprovechamiento de los excedentes de producción, así como la disminución del rendimiento en cosechas y las pérdidas económicas para los productores (Jyot Kaur et al., 2020; Ramos-Andrés et al., 2021), como una posible oportunidad para identificar zonas de cultivo con calidades diferenciales (Brahmi et al., 2022; Z. Zhao et al., 2024) y lograr un aprovechamiento integral de la producción.

Con base en lo anterior, resulta esencial desarrollar estudios de bioprospección que permitan identificar moléculas de interés presentes en la biomasa residual de zanahoria, facilitando la determinación de nuevos usos y el descubrimiento de mercados o nichos de producción específicos. Por ejemplo, excedentes con mayor contenido de carotenoides podrían destinarse a la producción de colorantes naturales, ingredientes bioactivos en la industria farmacéutica o compuestos cosméticos (Ramos-Andrés et al., 2021; Tiwari et al., 2022). Asimismo, los excedentes provenientes de una localidad con mayor concentración de compuestos fenólicos y/o antioxidantes podrían ser utilizados para generar ingredientes funcionales para diversas aplicaciones (A. Vaz et al., 2022; Idrovo Encalada et al., 2019) o para procesos de fermentación o biorrefinería en caso de presentar mayor contenido de azúcares fermentables o polisacáridos (Idrovo Encalada et al., 2019; Jyot Kaur et al., 2020). Esto permitiría generar un valor agregado a la cadena productiva y replicar dichas aplicaciones en otras localidades con condiciones climáticas similares.

---

Los estudios de bioprospección pueden llevarse a cabo mediante el uso de técnicas metabolómicas, las cuales permiten realizar una identificación fenotípica de alta resolución (Quimiotípos) (Fukusaki, 2015). La metabolómica consiste en el estudio integral de metabolitos de bajo peso molecular presentes en un sistema biológico (Viant et al., 2017), además, la metabolómica proporciona un perfil amplio de la riqueza metabólica de una matriz alimentaria (Sutliff et al., 2021). Los avances recientes en técnicas analíticas como la cromatografía líquida acoplada a espectrometría de masas (LC-MS) han facilitado la identificación de cientos de metabolitos, así como la evaluación de similitudes y diferencias entre muestras (Hoffmann et al., 2017). De hecho, la lipidómica, considerada como una subdisciplina de la metabolómica (Luque de Castro & Quiles-Zafra, 2020; Sutliff et al., 2021), ha demostrado ser clave para descifrar la composición de metabolitos en la zanahoria, dado que incluye numerosos compuestos lipídicos asociados con el color y la actividad antioxidante, como los carotenoides (Luque de Castro & Quiles-Zafra, 2020; Sutliff et al., 2021). Sin embargo, son escasos los estudios lipidómicos centrados en evaluar el efecto de factores agroecológicos sobre el metaboloma de zanahorias (Chevalier et al., 2021; Koudela et al., 2021) y ninguno hasta el momento ha abordado los residuos, excedentes de producción o biomasa residual de zanahoria.

Es por esto que este estudio tiene como objetivo determinar el efecto del microclima sobre los perfiles metabolómicos de cuatro tipos de biomasa de zanahoria, rajada (R), deforme (D), con presencia de daño patológico (P) y control sin algún tipo de daño presente (C), recolectadas en tres localidades diferentes del oriente del Departamento de Antioquia: Rionegro, Marinilla y El Santuario. Cada una de estas localidades presenta condiciones climáticas únicas, por lo cual, comprender cómo estos gradientes climáticos influyen en los perfiles metabólicos de la biomasa residual puede ofrecer información valiosa en un estudio de bioprospección. Adicionalmente, este conocimiento puede contribuir a la reducción de pérdidas, la optimización de procesos en la cadena productiva de la zanahoria, y el desarrollo de estrategias específicas que favorezcan la revalorización de residuos agroindustriales. Estos avances impulsan la transición de un modelo de producción lineal a uno de economía circular, promoviendo la sostenibilidad y la eficiencia productiva (Eliopoulos et al., 2022). Finalmente, los resultados de esta investigación podrían facilitar la replicación de iniciativas de caracterización metabolómica en otras

regiones con condiciones climáticas similares, permitiendo la identificación de compuestos bioactivos con aplicaciones en las industrias farmacéutica, nutracéutica y procesos agroindustriales.

## 2.4 Materiales y métodos

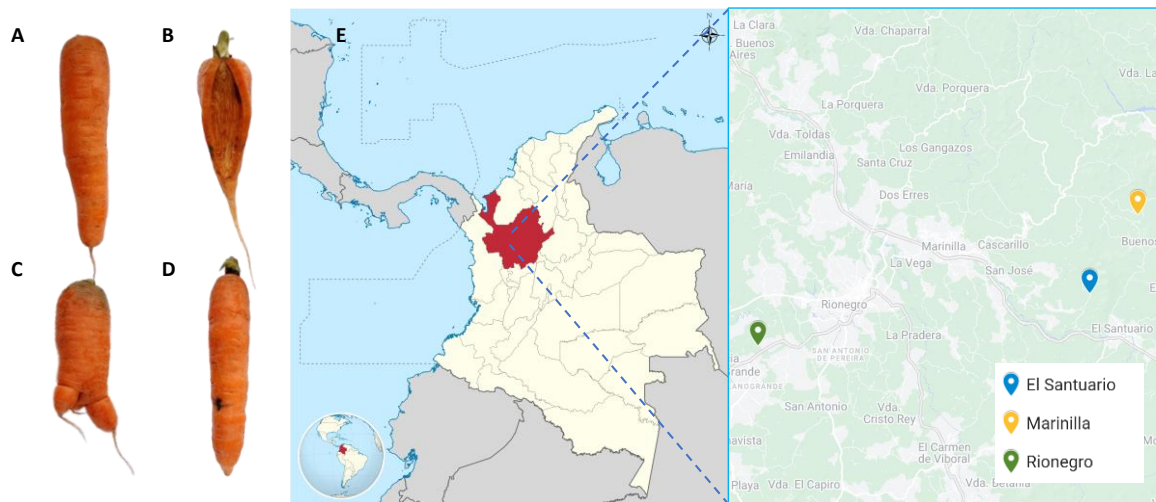
### 2.4.1 Material vegetal y condiciones de cultivo

Las muestras de zanahoria (*Daucus carota L.*), variedad Bangor, fueron cosechadas a los cuatro meses de siembra, en tres localidades del Departamento de Antioquia (Colombia): El Santuario (6°9'12"N, 75°16'38,6"E), Marinilla (6°11'8,5"N, 75°15'26"E) y Rionegro (6°7'53,876"N, 75°24'52,166"E), recolectadas durante el mes de noviembre de 2023 (Figura 2-1E). Las características climáticas de estas tres localidades se encuentran presentadas en la Tabla 2-1, para las cuales, los datos relacionados fueron obtenidos desde la plataforma WorldClim 2,1 (<https://worldclim.org/data/worldclim21.html>), la cual ofrece datos climáticos mensuales interpolados espacialmente, representativos del clima actual, con una resolución espacial de aproximadamente 1km<sup>2</sup>, correspondientes al período 1970–2000 (Fick & Hijmans, 2017). En cada localidad se llevó a cabo un muestreo general de excedentes de producción, considerando cuatro tipos de zanahoria: Control (C), zanahorias con forma cónica, sin raíces secundarias ni ramificaciones, libres de manchas, fisuras o heridas (Figura 2-1A). Rajada (R), zanahorias con daños superficiales en forma de fisuras (Figura 2-1B). Deforme (D), zanahorias con malformaciones evidentes o apariencia bifurcada (Figura 2-1C). Daño Patológico (P), zanahorias con deterioro superficial asociado a cambios de color o manchas causadas por ataques de patógenos (Figura 2-1D).

**Tabla 2-1:** Características geográficas de las localidades de cosecha evaluadas.

<i>Características geográficas</i>	<i>Localidades</i>		
	<i>El Santuario</i>	<i>Marinilla</i>	<i>Rionegro</i>
Altitud (msnm)	2284,0 ± 0,0	2160,0 ± 0,0	2119,0 ± 0,0
Precipitación (mm)	2929,085 ± 0,0	2752,389 ± 10,925	2536,944 ± 12,218
Humedad relativa en superficie (%)	66,759 ± 0,0	66,535 ± 0,008	67,683 ± 0,068
Temperatura mínima de aire en superficie (°C)	28,408 ± 0,0	28,487 ± 0,005	28,514 ± 0,005
Temperatura máxima de aire de superficie (°C)	29,296 ± 0,0	29,387 ± 0,007	29,452 ± 0,006
Temperatura del aire en superficie (°C)	28,915 ± 0,0	29,000 ± 0,007	29,048 ± 0,006
Déficit de la presión de vapor (kPa)	0,610 ± 0,0	0,647 ± 0,002	0,643 ± 0,001
Radiación solar de onda corta en superficie (MJ/m <sup>2</sup> )	1,815 ± 0,0	1,862 ± 0,001	1,898 ± 0,003
Velocidad del viento en superficie (m/s)	2,008 ± 0,0	1,232 ± 0,071	1,566 ± 0,052
Evapotranspiración potencial (mm/día)	1151,500 ± 0,0	1167,840 ± 13,053	1224,506 ± 4,686
Fracción de área nublada (%)	79,255 ± 0,0	77,679 ± 0,0	75,310 ± 0,0
Índice de humedad climática	1777,578 ± 0,0	1584,5209 ± 24,026	1312,535 ± 7,860

**Figura 2-1:** Tipologías analizadas de la biomasa residual de zanahoria: Control (A), Rajada (B), Deforme (C), Daño Patológico (D), y mapa georreferencial de las localidades de cosecha (E).



### 2.4.2 Preparación de muestras

Se recolectaron y procesaron cinco kilogramos de zanahorias para cada una de las tipologías de biomasa residual. Las zanahorias fueron lavadas cuidadosamente, desinfectadas mediante inmersión en una solución de hipoclorito de sodio (200ppm durante 5 minutos) y posteriormente lavadas para eliminar el exceso de desinfectante; luego, fueron peladas, y las coronas y puntas fueron retiradas. Posteriormente, las zanahorias fueron troceadas y homogenizadas utilizando una licuadora industrial (Oster; Milwaukee, WI, EE. UU.) hasta alcanzar un tamaño de partícula inferior a  $1\text{cm}^3$ . A partir del material procesado, 300 gramos fueron liofilizados a  $-50^\circ\text{C}$  durante 40 horas (Biobase; Jinan, China), obteniendo aproximadamente 30 gramos. Este proceso fue realizado por cuadruplicado. El material liofilizado fue almacenado al vacío en bolsas laminadas de múltiples capas (aluminio/polietileno/polietileno de baja densidad) a  $-20^\circ\text{C}$  hasta el momento de la extracción.

Para la extracción, 10mg de cada muestra liofilizada fueron mezclados con  $150\ \mu\text{L}$  de acetona fría y homogenizados mediante vortex durante 30 segundos (DLab Scientific; Beijing, China). Luego, la muestra fue centrifugada a 16.000rpm durante 10 minutos a  $4^\circ\text{C}$

(Thermo Fisher Scientific; Waltham, MA, EE. UU.). El sobrenadante fue recuperado y el proceso de extracción fue repetido dos veces más, añadiendo 150µL de acetona fría al precipitado en cada ocasión. Los tres sobrenadantes fueron unificados y reservados en un tubo Eppendorf. 300µL de esta mezcla de sobrenadantes fueron tomados y mezclados con 300µL de éter-metil-tér-butílico (MTBE), agitando con vortex durante 5 segundos. Posteriormente, 100µL de agua fueron agregados, repitiendo la agitación en vortex. La mezcla fue centrifugada a 16.000 rpm durante 10 minutos a 4°C. El sobrenadante fue recuperado y nuevamente se repitió el proceso con 150µL adicionales de MTBE. Finalmente, el extracto obtenido, con una mezcla de solventes acetona:MTBE, fue filtrado utilizando un filtro acro-disco de 0,2µm.

### 2.4.3 Condiciones LC/MS y RP-LCMS/MS-QTOF

El análisis metabolómico se llevó a cabo utilizando un sistema de cromatografía líquida Agilent Technologies 1.260 acoplado a un analizador de masas Q-TOF 6545 con fuente de ionización por electrospray (ESI) (Agilent Technologies, Palo Alto, CA, EE. UU.). 1µL de cada extracto fue inyectado en una columna C18 (InfinityLab Poroshell 120 EC-C18, 100 × 3,0mm, 2,7µm) a una temperatura de 50°C, con un gradiente de elución compuesto por una solución de acetato de amonio (10mM) disuelta en una mezcla de H<sub>2</sub>O (90:10) como fase A, y una solución de acetato de amonio (10mM) disuelta en una mezcla de acetonitrilo:metanol (20:30:50) como fase B, con un flujo constante de 0,6mL/min. La detección por espectrometría de masas se realizó en modo ESI positivo, en un escaneo completo de 100 a 1700m/z. Durante el análisis se emplearon masas de referencia para calibración: m/z 121,0509 (C<sub>5</sub>H<sub>4</sub>N<sub>4</sub>) y m/z 922,0098 (C<sub>18</sub>H<sub>18</sub>O<sub>6</sub>N<sub>3</sub>P<sub>3</sub>F<sub>24</sub>). El gradiente cromatográfico inició con un 70% de la fase B durante 1 minuto, incrementándose hasta un 86% en 3,5 minutos, permaneciendo en esas condiciones por 6,5 minutos más. Posteriormente, se aumentó al 100% de fase B en 1 minuto, manteniéndose durante 6 minutos. Luego se regresó a las condiciones iniciales en 0,1 minutos y se equilibró por 3 minutos adicionales.

Los análisis ESI-MS/MS se realizaron en un modo de ionización positiva con escaneo completo de 100 a 1700Da. El sistema ESI-QTOF-MS/MS fue operado bajo las siguientes

condiciones: fuente Dual AJS ESI, voltaje de capilar ( $V_{cap}$ ) de 3500V, gas de secado a un flujo de 10L/min, y temperatura de 200°C, nebulizador a 50psi, temperatura del gas envolvente de 300°C y un flujo de 12L/min. Para el MS-TOF, las condiciones de operación fueron establecidas de la siguiente manera: voltaje de fragmentación de 175V, skimmer a 65 V y OCT RF  $V_{pp}$  a 750V. Para el análisis MS/MS, se utilizó una energía de colisión de 40 eV, con un rango de escaneo de 100–1700m/z, una velocidad de adquisición de 1espectrum/s y un tiempo de adquisición de 1000ms/espectrum. El tiempo total de ejecución fue de 20 minutos. Para control de calidad, una serie de muestras fueron medidas al inicio del análisis; por lo cual un grupo de control de calidad (QC) fue preparado mezclando 150 $\mu$ L de cada muestra, dos QC's fueron inyectados al inicio de la secuencia y luego uno cada cuatro muestras para asegurar la estabilidad analítica del instrumento. Las muestras fueron aleatorizadas utilizando la función de aleatoriedad de Excel y fueron inyectadas en ese orden.

Un proceso de refragmentación fue realizado sobre un grupo de masas previamente seleccionadas, basadas en sus niveles de abundancia o grado de significancia. Para ello, las muestras fueron analizadas nuevamente en un sistema de cromatografía líquida Agilent Technologies 1260 acoplado a un analizador de masas Q-TOF 6545 con fuente de ionización por electrospray (ESI) (Agilent Technologies, Palo Alto, CA, EE. UU.). 1  $\mu$ L de los extractos fue inyectado en una columna C18 (100 x 3,0mm, 2,7 $\mu$ m) a 60°C. El gradiente de elución consistió en una solución de formiato de amonio a una concentración de 10mM en una mezcla de ACN 60:40 con 0,1% de ácido fórmico (fase A), y una solución de formiato de amonio a una concentración de 10mM en alcohol isopropílico (IPA) 90:10 con 0,1% de ácido fórmico (fase B), a un flujo constante de 0,6mL/min. La detección de masas fue realizada en modo ESI positivo. Para la corrección de masas, fueron empleadas las referencias m/z 121,0509 ( $C_5H_4N_4$ ) y m/z 922,0098 ( $C_{18}H_{18}O_6N_3P_3F_{24}$ ). El análisis dirigido MS/MS fue establecido con una energía de colisión de 20 V, el gradiente cromatográfico comenzó con un 15% de la fase B, aumentando a 30% en 2 minutos, luego a 48% en otros 2,5 minutos, hasta alcanzar un 82% en 11 minutos y posteriormente un 99% en 23,5 minutos; finalmente, el gradiente se redujo a 15%, con un primer segmento de 12,1 minutos y una fase final a los 18 minutos.

#### 2.4.4 Procesamiento y análisis de los datos metabolómicos

Los compuestos presentes en las muestras fueron analizados e inspeccionados manualmente mediante el software Agilent MassHunter Profinder, versión 10,0, utilizando el algoritmo Recursive Molecular Extraction. Este algoritmo se aplicó con un tiempo de extracción de 17 minutos y un umbral de intensidad de 5000 conteos, utilizando especies iónicas en modo positivo (+H, +Na, -H<sub>2</sub>O, NH<sub>4</sub>, K), sin aplicar filtros por masa o señal. Este algoritmo permite la deconvolución del cromatograma e integra las características moleculares de las muestras y del blanco del solvente, basándose en las masas y el tiempo de retención. Los resultados obtenidos fueron sometidos a un proceso de filtrado basado en reproducibilidad, durante este proceso se calculó el coeficiente de variación (CV) del área en las muestras de control de calidad (QC), y se excluyeron aquellas propiedades moleculares que presentaban un CV superior al 20%.

Los datos iniciales de espectrometría de masas (MS) fueron convertidos a formato mzXML utilizando el software ProteoWizard (<https://proteowizard.sourceforge.io/>) y luego a archivos en formato abf mediante ABF Converter (<https://www.reifycs.com/AbfConverter/>). El análisis de datos fue realizado utilizando el software MS-DIAL (<http://prime.psc.riken.jp/compms/msdial/main.html>), configurado con los siguientes parámetros: rango de masas (0–2000Da), tolerancia de alineamiento MS1 (0,01Da), tolerancia de alineamiento MS2 (0,025Da), tiempo de retención (0–100 minutos), altura mínima de pico (1000), sigma (0,5), y tolerancia de masa precisa para MS (0,015Da).

La confirmación de las características moleculares estadísticamente significativas fue lograda durante el proceso de refragmentación, mediante la determinación de la masa exacta, la fórmula molecular y el análisis de los espectros de masas. La anotación fue realizada utilizando una combinación de plataformas, incluyendo MS-DIAL 5,0 con bibliotecas provenientes de MoNA – MassBank of North America: MoNA-export-LC-MS/MS\_Positive\_Mode, MoNA-export-GNPS y MoNA-export-Vaniya-Fiehn\_Natural\_Products\_Library. Adicionalmente, se emplearon herramientas como el software SIRIUS 5,8,6 y herramientas de predicción *in silico* como CFM-ID (<https://cfmid3.wishartlab.com/>). Cada metabolito fue reportado con un nivel de confianza

en la identificación, de acuerdo con las directrices del *Metabolomics Standards Initiative* (MSI), estos niveles son: Nivel 0: indica una estructura 3D inequívoca, Nivel 1: estructura 2D confirmada mediante comparación con un estándar de referencia, Nivel 2: estructura probable respaldada por literatura o evidencia de bases de datos, Nivel 3: indica una posible estructura o clase identificada por fórmula molecular, Nivel 4: característica no identificada, que indica presencia sin una identificación específica.

### 2.4.5 Análisis de enriquecimiento de metabolitos

La lista de metabolitos anotados fue sometida a un análisis de representación excesiva (Over Representation Analysis, ORA) y enriquecimiento de rutas metabólicas utilizando la plataforma MetaboAnalyst 6,0 (<https://www.metaboanalyst.ca/>). La anotación general de las características de los metabolitos fue realizada mediante el módulo “Annotated Features”, específicamente a través de los submódulos “Pathway Enrichment” y “Network Analysis”, empleando la base de datos de rutas metabólicas RaMP-DB, la cual integra información de la base de datos *Kyoto Encyclopedia of Genes and Genomes* (KEGG) a través de las librerías de metabolitos y rutas metabólicas del *Human Metabolome Database* (HMDB), *Reactome Pathway Database* y *WikiPathways*. El análisis de rutas metabólicas se enfocó en la especie *Zea mays* (maíz) como organismo objetivo, según lo definido en KEGG.

### 2.4.6 Análisis estadístico

Se realizó un análisis de las diferencias de medias entre las localidades para cada una de las variables climáticas mediante un ANOVA de una vía, acompañado de una prueba post-hoc de Tukey utilizando las funciones *aov* y *TukeyHSD* (paquete R stats) con el objetivo de identificar diferencias significativas entre los microclimas, ; además, se realizó un análisis de gradiente altitudinal utilizando las funciones *rast* y *ggplot2* (paquete R stats, <https://cran.r-project.org/bin/windows/base/>) en relación con el conjunto de datos climáticos obtenidos.

Los picos de abundancia correspondientes a los metabolitos identificados fueron exportados desde el software MS-DIAL y sometidos a análisis estadísticos multidimensionales utilizando la plataforma MetaboAnalyst 6,0 (<https://www.metaboanalyst.ca/>), dentro del módulo “Statistical Analysis” y el submódulo

“one factor”. Antes de realizar el análisis estadístico, los datos fueron preprocesados, para lo cual no se detectaron valores faltantes en el conjunto de datos original y no fue necesario aplicar filtros adicionales. Diversos métodos de normalización, transformación y escalamiento fueron evaluados con el objetivo de seleccionar el modelo más adecuado para representar la variabilidad de los datos. Por lo cual, los datos fueron preprocesados mediante una normalización por mediana, una transformación logarítmica (base 10) y escalamiento de Pareto, posteriormente, una serie de análisis estadísticos univariados y multivariados fueron aplicados. El análisis univariado incluyó un análisis de fold change, (FC, cambio de pliegue) con un umbral de FC = 2, con el objetivo de identificar metabolitos regulados positiva o negativamente, y un gráfico de volcán (volcano plot) con umbrales de FC = 2 y valor  $p = 0,05$ . El análisis multivariado incluyó análisis de componentes principales (PCA) y análisis discriminante por mínimos cuadrados parciales ortogonales (OPLS-DA), con un valor  $p = 0,05$ ; adicionalmente, un análisis de agrupamiento jerárquico (HCA) fue realizado utilizando los datos normalizados, teniendo en cuenta el escalamiento automático de muestras, una distancia euclidiana y el método de agrupamiento de Ward. El puntaje de importancia de las variables (VIP) obtenido en el modelo OPLS-DA, junto con los valores de fold change, facilitaron la evaluación de la influencia y la capacidad explicativa de cada metabolito para clasificar y discriminar los grupos de muestras, en función de características biológicas relevantes.

## 2.5 Resultados

### 2.5.1 Análisis exploratorio de los patrones microclimáticos

La diversidad climática observada entre las tres localidades reveló agrupamientos microclimáticos diferenciados que podrían influir en los perfiles metabólicos de las zanahorias. Las localidades de El Santuario, Marinilla y Rionegro, ubicadas en el Departamento de Antioquia (Colombia), presentaron condiciones climáticas únicas, tal como se describe en la Tabla 2-1. Marinilla, situada a mayor altitud, presentó características climáticas distintivas, incluyendo los valores más altos de precipitación, velocidad del viento, fracción de área nublada e índice de humedad climática. En contraste, Rionegro y El Santuario, ubicadas en altitudes intermedias e inferiores, presentaron

condiciones climáticas similares entre sí, asociadas a humedad relativa, evapotranspiración potencial, variables relacionadas con temperatura y radiación solar, lo cual sugiere una variación climática moderada y menos extrema en comparación con Marinilla.

Aunque cada localidad está situada en una altitud diferente, se identificaron ciertas similitudes climáticas entre localidades. Marinilla destacó por su mayor velocidad del viento (2,008 m/s) y mayor precipitación (2929,0 mm/año), lo cual la posiciona como la localidad con un microclima más húmedo y con mayor viento respecto a las otras dos localidades. Por su parte, El Santuario se agrupó más cercanamente con Rionegro, compartiendo perfiles similares caracterizados por temperaturas moderadas a elevadas, una mayor radiación solar y un mayor déficit de presión de vapor (0,647 y 0,643 kPa, respectivamente), lo que indica un microclima más cálido y seco comparado con Marinilla. Estos patrones climáticos se correlacionan con el gradiente altitudinal presentado en la Figura 2-2A, donde Marinilla se encuentra a una mayor altitud (2284,0 msnm), seguida de El Santuario (2160,0 msnm) y Rionegro (2119,0 msnm), resaltando la relación entre la altitud y la variación climática entre las localidades. Por lo tanto, la altitud parece ser un factor esencial, debido a que las diferencias de altitud pueden influir en las condiciones climáticas locales, afectando así la variabilidad metabólica de los productos agrícolas plantados a una altitud específica (Almeida et al., 2021; Romero et al., 2021; Večeřová et al., 2022).

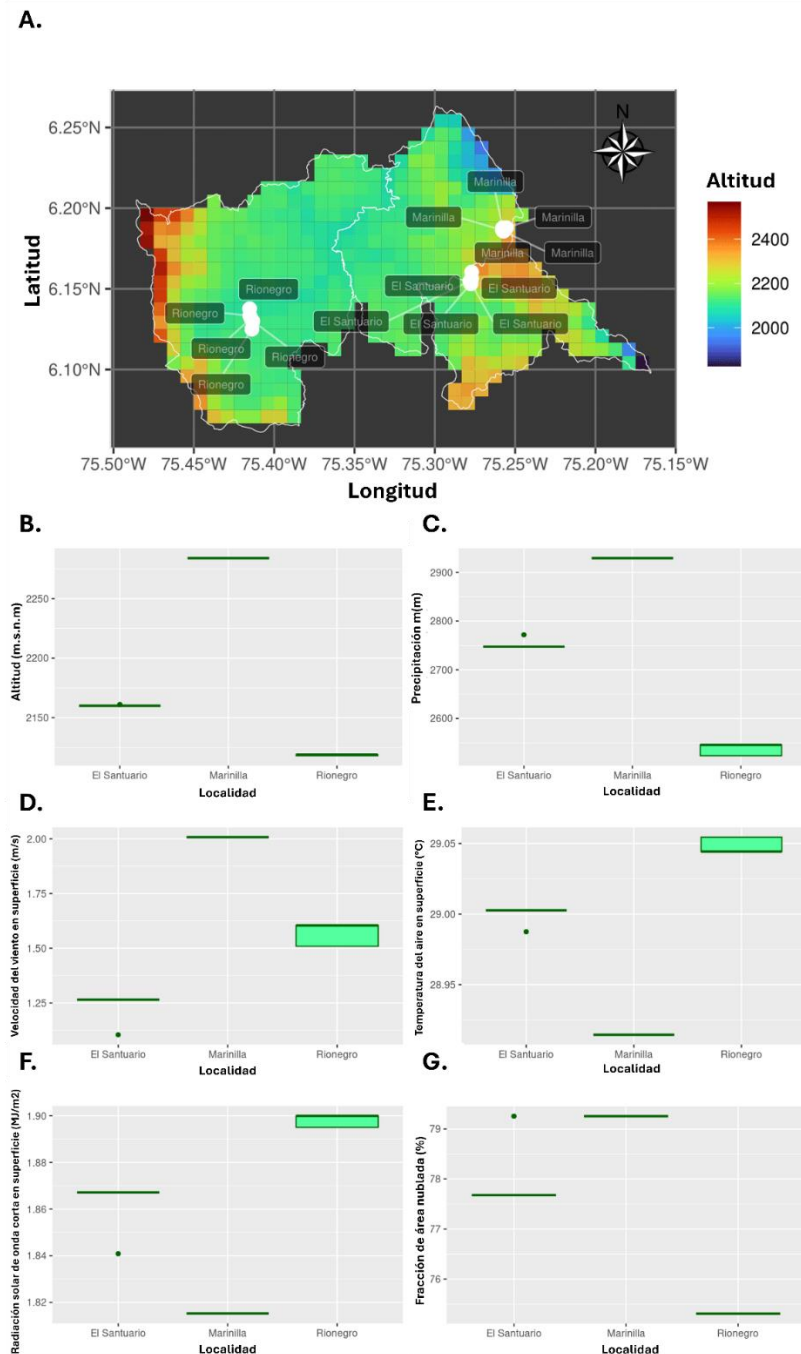
El análisis estadístico mediante ANOVA reveló diferencias significativas en variables climáticas claves entre las localidades. La prueba post hoc de Tukey identificó diferencias por pares, tal como se observa en las Figuras 2-2B-G, lo cual refuerza las diferencias o separaciones según la altitud. Con base en estos resultados, se decidió agrupar las localidades en dos clústeres, el clúster 1 (C1), conformado por Rionegro y El Santuario, y el clúster 2 (C2), correspondiente a Marinilla.

Los análisis demostraron que El Santuario y Rionegro pueden ser considerados un grupo homogéneo basados en sus similitudes climáticas, mientras que Marinilla presenta un perfil climático diferenciado, influenciado por una combinación única de factores ambientales. Estas diferencias climáticas probablemente influyen en los perfiles metabólicos de las muestras de biomasa residual de zanahoria. Factores como la altitud, temperatura,

---

precipitación y otras características climáticas, junto con variables bióticas específicas de cada región (por ejemplo, el entorno de cultivo), pueden explicar las variaciones en la composición química y en los compuestos bioactivos presentes (Brahmi et al., 2022; Chelghoum et al., 2021). En este sentido, la diversidad microclimática resalta la importancia de considerar las condiciones ambientales locales en investigaciones agrícolas y metabolómicas

**Figura 2-1:** Análisis climáticos asociados a las tres localidades evaluadas. Gráfico de gradiente altitudinal (A), y diferencias significativas en variables climáticas (B-G); altitud (B), precipitación (C), velocidad del viento en superficie (D), temperatura del aire en superficie (E), Radiación solar de onda corta en superficie (F), y fracción de área nublada (G).



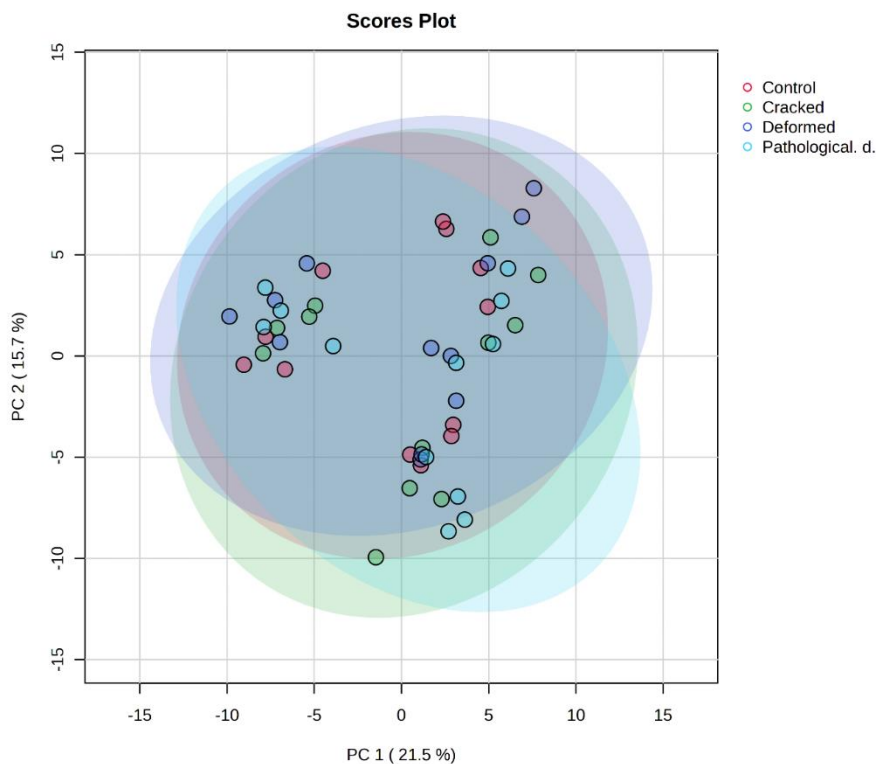
### 2.5.2 Perfil metabólico de las zanahorias residuales de distintas localidades

Los perfiles metabólicos de los diferentes tipos de zanahoria, rajada (R), deforme (D), daño patológico (P) y sanas como control (C), provenientes de las localidades de Marinilla, El Santuario y Rionegro fueron evaluados. El análisis mediante componentes principales

---

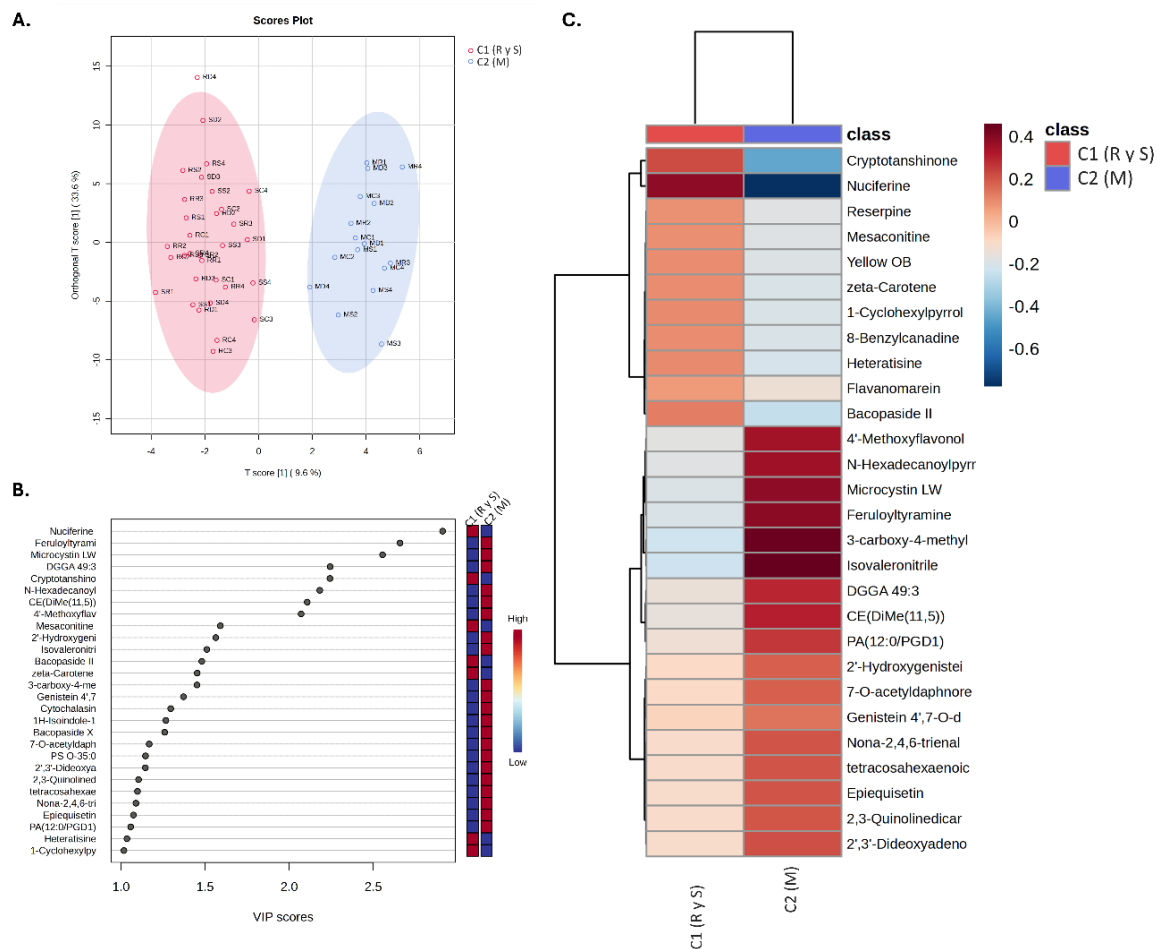
(PCA) no reveló una separación clara entre las tipologías de zanahorias (Figura 2-3). Sin embargo, sí se observaron agrupamientos distintivos al analizar los patrones climáticos de las tres localidades. Esto sugiere que los factores pedoclimáticos y las prácticas agrícolas ejercen una mayor influencia sobre los perfiles metabólicos entre localidades que las diferencias entre los tipos de zanahoria dentro de una misma localidad (Chevalier et al., 2022; Cornara et al., 2023). Estudios relacionados han reportado contenidos de compuestos químicos consistentes, como  $\alpha$ -caroteno y  $\beta$ -caroteno, en distintos tipos de residuos de zanahoria provenientes de una misma localidad (Jyot Kaur et al., 2020). Además, se ha demostrado que el origen geográfico puede ser un factor determinante en la segregación metabólica de cultivos de la misma variedad (El-Shabasy et al., 2024). Estos hallazgos respaldan que las diferencias ambientales, particularmente aquellas asociadas a la altitud tienen un mayor impacto en la variabilidad metabólica que las condiciones físicas o patológicas de las tipologías de zanahorias (Chelghoum et al., 2021; A. jing Lu et al., 2022; Z. Zhao et al., 2024).

**Figura 2-2:** Análisis climáticos asociados a las tres localidades evaluadas. Gráfico de gradiente altitudinal (A)



Un total de 90 metabolitos fueron identificados (Anexo A), sus datos de abundancia fueron analizados mediante un análisis de agrupamiento jerárquico (HCA) y un análisis discriminante por mínimos cuadrados parciales ortogonales (OPLS-DA). Los datos de abundancia de todas las muestras experimentales y los controles de calidad fueron sometidos a OPLS-DA, el modelo fue establecido comparando a Rionegro y El Santuario agrupados como clúster 1 (C1) frente a Marinilla designada como clúster 2 (C2). Los parámetros de evaluación del modelo fueron  $R^2Y = 0,556$  y  $Q^2 = 0,453$ .

**Figura 2-3:** Gráfico de puntajes (score plot) del OPLS-DA (A), gráfico de puntaje de VIP (B), y gráfico de mapa de calor (C) entre la localidad de Marinilla (C2) comparada con las localidades de Rionegro y El Santuario (C1).



El gráfico de puntajes del OPLS-DA (Figura 2-4A) muestra una separación clara con un nivel de confianza del 95% entre las muestras de Marinilla y aquellas pertenecientes a Rionegro y El Santuario, lo que indica diferencias metabólicas entre los clústeres. Las muestras de Marinilla se agruparon de forma más estrecha, lo cual sugiere una mayor homogeneidad en términos de riqueza química o características metabólicas. Por el contrario, las muestras de Rionegro y El Santuario presentaron mayor dispersión, lo que indica una mayor variabilidad metabólica.

Adicionalmente, se calcularon los valores de importancia de la variable en la proyección (VIP) para evaluar la influencia de cada metabolito en la diferenciación entre clústeres. Los

metabolitos con valores VIP > 1 fueron considerados como los más influyentes en el modelo, y se utilizaron para clasificar y distinguir las muestras entre Marinilla y las otras dos localidades. Entre los veinte metabolitos con los valores VIP más altos (VIP > 1,0; valor  $p < 0,05$ ), destacaron Nuciferina (Nuciferine), Feruloiltiramina (Feruloyltyramina) y Microcistina LW (Microcystina LW) con valores VIP superiores a 2,5; mientras que Criptotanshinona (Cryptotanshinona), N-Hexadecanoilpirrolidina (N-Hexadecanoylpyrrolidina) y 4'-Metoxiflavonol (4'-Methoxyflavonol) presentaron valores entre 2,0 y 2,5, indicando su alta relevancia en la separación entre C1 y C2.

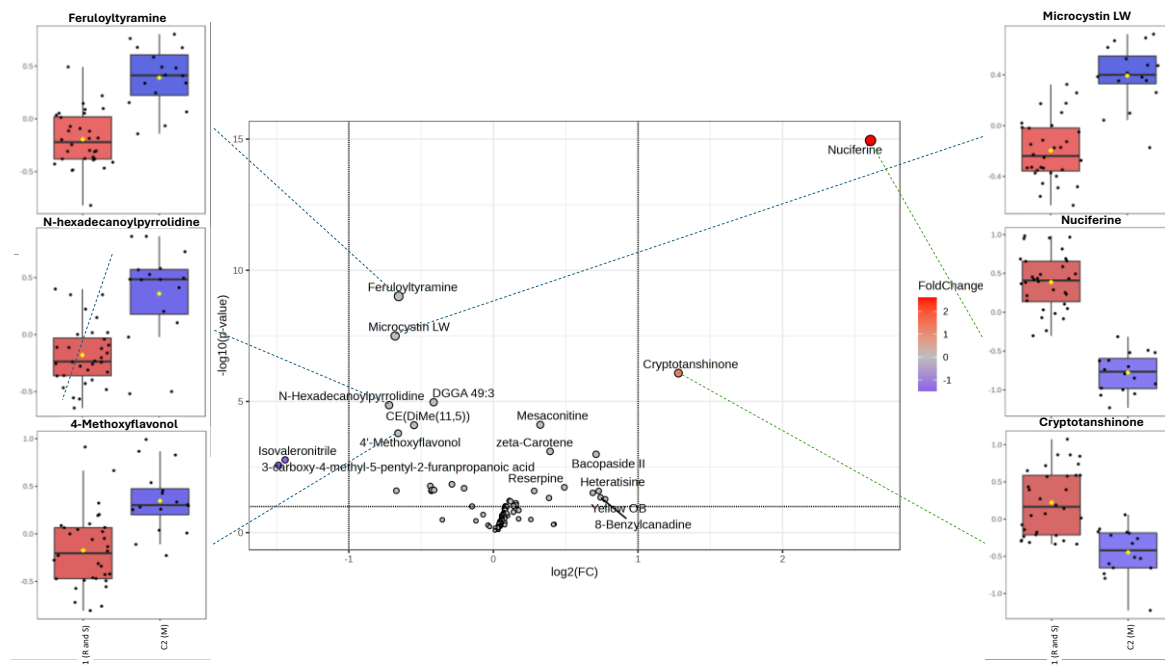
Para evaluar de forma más integral e intuitiva las diferencias en los patrones de expresión de metabolitos entre clústeres, los datos de relacionados con las abundancias relativas fueron analizados mediante un análisis de agrupamiento jerárquico utilizando un mapa de calor (heatmap). Este análisis permitió identificar de forma más precisa los metabolitos marcadores y comprender los procesos metabólicos relacionados. Los metabolitos agrupados mostraron patrones de expresión similares, lo cual sugiere su posible participación en rutas metabólicas relacionadas. La Figura 2-4C ilustra los resultados de la agrupación jerárquica de los 28 VIP principales.

La escala de color revela una clara separación entre los clústeres C1 y C2. En particular, Nuciferina y Criptotanshinona se encontraron en mayor abundancia en C1 (Rionegro y El Santuario), mientras que 4'-Metoxiflavonol, N-Hexadecanoilpirrolidina, Microcistina LW y Feruloiltiramina presentaron una abundancia mayor en las zanahorias pertenecientes a C2 (Marinilla). Adicionalmente, se observó una mayor cantidad de metabolitos enriquecidos en Marinilla (C2) en comparación con C1, lo que podría estar relacionado con la altitud. Las plantas de zanahoria podrían invertir más recursos en la producción de metabolitos secundarios como mecanismo de adaptación a condiciones de mayor altitud en lugar de la producción de metabolitos primarios (Pan et al., 2023). A su vez, la acumulación de metabolitos secundarios y el aumento en la actividad de enzimas antioxidantes se ha relacionado con estrategias de supervivencia en altitudes elevadas (Hashim et al., 2020; Ibrahim et al., 2022).

La clara separación de los clústeres C1 y C2 basados en la abundancia de metabolitos específicos indica una divergencia metabólica significativa. Esta divergencia probablemente se deba a factores ambientales únicos asociados a cada clúster, la cual

puede activar diferentes rutas metabólicas (Brahmi et al., 2022; Chelghoum et al., 2021; Koudela et al., 2021; Večeřová et al., 2022). Adicionalmente, se evaluaron los valores de fold change (FC) de los principales metabolitos con alta puntuación VIP fueron evaluados, mediante un gráfico de volcán (volcano plot). En este análisis, los puntos de colores representan metabolitos con  $FC > 1$  (regulación positiva) o  $FC < -1$  (regulación negativa) y un valor de  $p < 0,05$ , indicando diferencias estadísticamente significativas en su expresión. Los resultados de este análisis estadístico univariado se encuentran en la Figura 2-5.

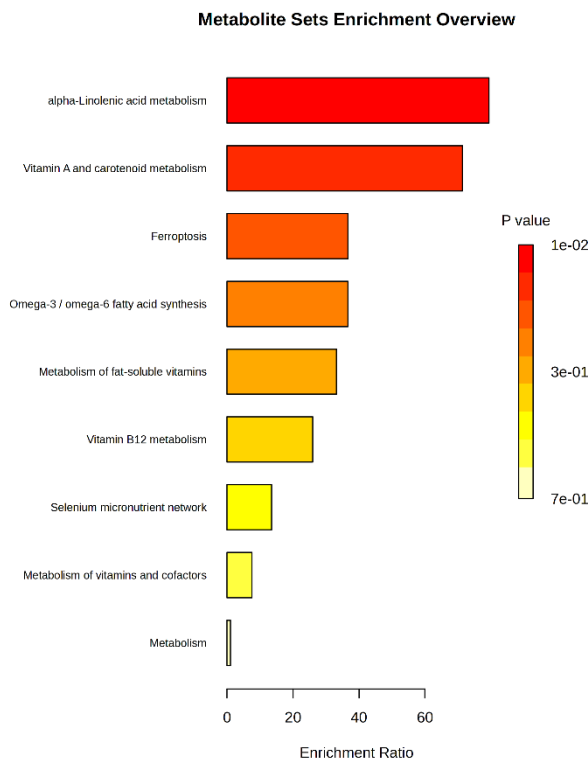
**Figura 2-4:** Gráfico de volcán resaltando los metabolitos diferenciales entre el clúster 2 (Marinilla) y el clúster 1 (Rionegro and El Santuario).



Los puntos rojos situados en el lado derecho del eje x corresponden a metabolitos más abundantes en C1 (Rionegro y El Santuario). Entre ellos, la Nuciferina presentó el valor de FC más alto ( $> 2,5$ ), con una diferencia significativa y clara en su abundancia respecto a C2. Criptotanshinona, con un valor de FC entre 1,0 y 1,5, se destacó como el metabolito más relevante en C1, sugiriendo una alta acumulación de estos compuestos en esta localidad. Esta variabilidad podría estar relacionada con factores agroclimáticos específicos en Rionegro y El Santuario que favorecen su síntesis, posiblemente como

respuesta a condiciones de estrés ambiental o prácticas de cultivo específicas. Por otro lado, los valores negativos en el eje x del gráfico corresponden a metabolitos con mayor abundancia en C2, es decir, en Marinilla. Entre ellos se encuentran Feruloiltiramina, Microcistina LW, N-Hexadecanoilpirrolidina y 4'-Metoxiflavonol, con valores de FC entre -0,5 y -1, y diferencias significativas respecto a C1. En particular, Feruloyltyramine y Microcystin LW fueron los metabolitos que presentaron las mayores abundancias en C2. Adicionalmente, un análisis de enriquecimiento metabólico fue realizado con el objetivo de comprender mejor las rutas metabólicas asociadas a los metabolitos identificados. Este análisis se basó en la significancia estadística ( $p < 0,05$ ) y el puntaje de enriquecimiento obtenido. La Figura 2-6 presenta las rutas metabólicas más representativas, el metabolismo del ácido  $\alpha$ -linolénico encabeza la lista, seguido del metabolismo de la vitamina A y carotenoides; estas dos rutas presentaron los valores p más bajos, lo cual sugiere que los metabolitos involucrados en estos procesos tienen un impacto significativo en la riqueza química de las zanahorias analizadas, en función de su localidad de origen.

**Figura 2-5:** Análisis de enriquecimiento metabólico de las muestras de biomasa residual de zanahoria de las localidades evaluadas.



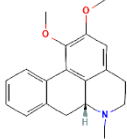
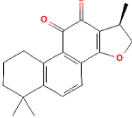
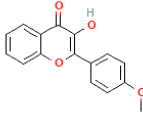
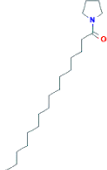
### 2.5.3 El potencial de bioprospección de las zanahorias residuales

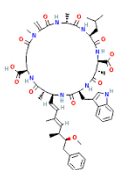
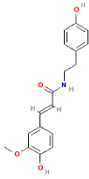
Los seis metabolitos identificados en la biomasa residual de zanahoria exhiben un potencial de bioprospección prometedor y diverso, gracias a sus actividades biológicas y funciones ecológicas reportadas. La Nuciferina, es un alcaloide versátil, el cual ha demostrado un gran potencial farmacéutico en el manejo de la obesidad, diabetes y enfermedades cardiovasculares, además de poseer propiedades anticancerígenas y antiinflamatorias (Aniszewski, 2015; Huang et al., 2022). De forma similar la Criptotanshinona, posee aplicaciones terapéuticas vinculadas con actividades antioxidantes, antiinflamatorias, el tratamiento del cáncer y la protección cardiovascular (F. Wei et al., 2023; Xing et al., 2024; Zhu et al., 2016), destacando para la industria farmacéutica y nutracéutica. La acumulación de ambos compuestos bajo condiciones climáticas específicas observadas en el C1 sugiere oportunidades estratégicas para la optimización agrícola localizada.

En contraste, los metabolitos enriquecidos en Marinilla (C2) evidencian adaptaciones ecológicas particulares. El 4'-Metoxiflavonol presenta una potente actividad antioxidante y antimicrobiana, además de aplicaciones relacionadas con la salud cardiovascular (Han et al., 2020; Stanković & Jakovljević, 2021; Su et al., 2018), lo que lo convierte en una opción promisorio para el desarrollo de alimentos nutracéuticos y funcionales. N-Hexadecanoilpirrolidina destaca por su rol en la defensa contra insectos y patógenos (Schramm et al., 2019; Srivasatava, 2022), además sus bioactividades de amplio espectro reportadas, antiparasitarias, anticancerígenas, antidiabéticas, protectoras de órganos y neurofarmacológicas (Islam & Mubarak, 2020; Poyraz et al., 2023). refuerzan su potencial como una opción viable para las industrias agroquímica, farmacéutica y alimentaria. A pesar de su asociación frecuente con toxicidad ambiental (Bulc Rozman et al., 2017; Levizou et al., 2020), la Microcistina LW ofrece oportunidades únicas para estudiar las interacciones planta-cianobacterias y las posibles estrategias de bioremediación en sistemas agrícolas contaminados. Finalmente, la Feruloiltiramina contribuye a la tolerancia al estrés en plantas y al fortalecimiento de la pared celular (Grandmaison et al., 1993; Gupta et al., 2013), lo que plantea aplicaciones interesantes tanto en el mejoramiento de cultivos resilientes como en el desarrollo de productos antioxidantes.

En conjunto, estos metabolitos representan una fuente valiosa de compuestos para aplicaciones farmacéuticas, nutraceuticas y agroindustriales (Tabla 2-2). Futuros estudios podrían enfocarse en optimizar su producción a través de prácticas agrícolas específicas o mediante biotecnología, con el fin de potenciar al máximo su potencial de aprovechamiento.

**Tabla 2-2:** Descripción de metabolitos y potencial de bioprospección de la biomasa residual de zanahoria.

Metabolito	Clase química	Estructura molecular	Concentración en clúster	en	Condiciones climáticas relevantes	Potencial de Bioprospección	de
Nuciferina	Diterpeno	 <p>PubChem CID 10146</p>	Abundante (Rionegro Santuario)	en y	C1 El	Temperatura más cálida, radiación solar alta y altitud media a baja.	Alimentos biofuncionales y nutraceuticos
Criptotanshinona	Alcaloide	 <p>PubChem CID 160254</p>	Abundante (Rionegro Santuario)	en y	C1 El	Temperatura más cálida, radiación solar alta y altitud media a baja.	Tratamientos medicinales (inflamación, cáncer y protección cardiovascular).
4'-Metoxiflavonol	Flavonoide	 <p>PubChem CID 171036846</p>	Abundante (Marinilla)	en	C2	Nivel de precipitación alto, velocidad del viento y altitud altas.	Alimentos biofuncionales y nutraceuticos
N-Hexadecanoilpirrolidina	Alcaloide	 <p>PubChem CID 247220</p>	Abundante (Marinilla)	en	C2	Nivel de precipitación alto, velocidad del viento y altitud altas.	Industria agroquímica y farmacéutica

Microcistina LW	Heptapeptido		Abundante (Marinilla)	en C2	Nivel de precipitación alto, velocidad del viento y altitud altas.	Biorremediación
		PubChem CID 16760564				
Feruloiltiramina	Phenolamina		Abundante (Marinilla)	en C2	Nivel de precipitación alto, velocidad del viento y altitud altas.	Desarrollo de productos antioxidantes
		PubChem CID 5280537				

## 2.6 Discusión

Se decidió profundizar en las funciones biológicas de los metabolitos con mayor puntuación VIP. Particularmente la Nuciferina y la Criptotanshinona, presentaron abundancias contrastantes entre ambos clústeres, siendo más elevados en el C1 comparado con C2. La Nuciferina es un alcaloide perteneciente a la clase aporfina, reportado previamente en la planta de loto, y ampliamente reconocido por su espectro de actividades biológicas con potencial significativo en aplicaciones terapéuticas. Esta molécula ha sido vinculada con efectos anti-hiperlipidémicos, antiobesidad, antidiabéticos, anticancerígenos, antiinflamatorios, antivirales, antioxidantes e incluso con actividades hepatoprotectoras y antihiperuricémicas (Huang et al., 2022). Algunos estudios en *Caenorhabditis elegans* han evidenciado que la Nuciferina puede prolongar la esperanza de vida en aproximadamente un 14,86% a una concentración de 100µM, mediante la regulación negativa de la ruta de señalización insulina/IGF-1, favoreciendo la tolerancia al estrés y la salud general (Xu et al., 2024). Sus efectos antiinflamatorios son especialmente destacables, ya que modula el estrés oxidativo y las rutas metabólicas involucradas en enfermedades como la obesidad, diabetes y patologías cardiovasculares (T. Zhao et al., 2023). Además, se ha demostrado que protege al sistema cardiovascular al reducir la activación de moléculas de adhesión endotelial (VCAM1), a través de la activación de

autofagia y la inhibición de la ruta Akt/mTOR (H. Wei et al., 2023). También se ha observado su efecto hepatoprotector en hepatocitos bovinos, donde mitiga el daño oxidativo inducido por ácidos grasos mediante la activación de la ruta TFEB/PGC-1 $\alpha$ . Este mecanismo mejora la resiliencia celular y disminuye los marcadores de estrés oxidativo (Fang et al., 2024). Hallazgos previos posicionan a la Nuciferina como un compuesto valioso para tratar el daño oxidativo, los trastornos metabólicos y las enfermedades inflamatorias.

En términos generales, los alcaloides como la Nuciferina desempeñan roles que dependen de las condiciones celulares y de los receptores implicados, abarcando funciones defensivas, de regulación metabólica y respuesta al estrés (Aniszewski, 2015). Además, su síntesis puede verse inducida bajo condiciones estresantes como temperaturas elevadas o radiación ultravioleta intensa, factores que caracterizan a la localidad del C1 lo cual explicaría la mayor acumulación de Nuciferina en esas zonas.

Por otro lado, la Criptotanshinona (CPT), un diterpeno quinona perteneciente a la familia de las tanshinonas, también exhibe propiedades antioxidantes, antiinflamatorias y anticancerígenas, además de efectos protectores a nivel cardiovascular (F. Wei et al., 2023; Xing et al., 2024; Zhu et al., 2016). Su mecanismo de acción es multifacético y afecta distintos procesos celulares y rutas de señalización que explican su eficacia en diversas aplicaciones. En cuanto a su actividad antimicrobiana, CPT demuestra propiedades antibacterianas al interactuar con las membranas celulares, provocando su permeabilización y eliminando microorganismos infecciosos (Ortiz et al., 2024). En el contexto oncológico, CPT inhibe la proliferación de células de melanoma al activar la ruta AMPK, lo que interfiere en la glucólisis y favorece la apoptosis (Chen et al., 2024). Adicionalmente, en células de cáncer ovárico, CPT genera una disrupción metabólica, reduciendo la producción de ATP y favoreciendo la degradación proteica, lo cual detiene el ciclo celular (T. Wang et al., 2023). De igual manera, se ha reportado que CPT mejora funciones metabólicas en trastornos como el síndrome de ovario poliquístico, mediante la modulación de rutas estrogénicas, lo que podría contribuir a una mejor salud reproductiva (Y. C. Liu et al., 2024). También se ha observado que regula la microbiota intestinal y el metabolismo de ácidos biliares, demostrando potencial para tratar enfermedades como la fibrosis pulmonar inducida por radiación (Z. Li et al., 2023).

---

La acumulación de CPT en plantas parece estar influenciada por factores ambientales como la radiación, temperatura y precipitaciones (C. He et al., 2023; C. E. He et al., 2010). Se ha reportado que condiciones climáticas extremas, incluyendo altas temperaturas, intensa radiación solar y precipitaciones elevadas (>1877 mm/año), se asocian con un aumento en su síntesis (Zhang et al., 2015). Estas observaciones coinciden con las características climáticas del C1, lo que respalda la mayor abundancia de CPT en esas localidades y posiciona a la biomasa residual de zanahoria de C1 como una fuente valiosa para la bioprospección y la exploración terapéutica.

En contraste, Marinilla (C2) presentó un mayor número de metabolitos con valores VIP superiores a 2, entre ellos, 4'-Metoxiflavonol, N-Hexadecanoilpirrolidina, Microcistina LW y Feruloiltiramina. 4'-Metoxiflavonol es un flavonoide con funciones defensivas en plantas (Do Socorro Chagas et al., 2022) y con diversas actividades bioactivas como antioxidante, antiacetilcolinesterasa, antibacteriana y antifúngica, especialmente en plantas halófitas (Stanković & Jakovljević, 2021). Adicionalmente ha sido vinculado con la liberación controlada de monóxido de carbono, lo que genera beneficios cardiovasculares y antiinflamatorios (Han et al., 2020; Su et al., 2018). En estudios relacionados, un alto contenido de flavonoides ha sido asociado con una mayor altitud (Han et al., 2020; Su et al., 2018), lo cual coincide con la ubicación geográfica de Marinilla comparada con las otras localidades.

Por su parte, la N-Hexadecanoilpirrolidina, es un compuesto perteneciente al grupo de los alcaloides pirrolidínicos (PAs). Los PA's son compuestos orgánicos heterocíclicos sintetizados por plantas con una amplia variedad de actividades biológicas y farmacológicas, incluyendo actividades antioxidantes, antiinflamatorias, antibacterianas, antifúngicas, antiparasitarias, antihelmínticas, anticancerígenas, antihiperoglucémicas, protectoras de órganos y neurofarmacológicas (Islam & Mubarak, 2020; Poyraz et al., 2023), además, se ha asociado con funciones de defensa frente a insectos y herbívoros (Schramm et al., 2019; Srivasatava, 2022). Adicionalmente, los derivados naturales de pirrolidina han sido identificados en zanahorias silvestres (Boshra et al., 2023). Los PA's se caracterizan por su doble naturaleza, ofreciendo tanto aplicaciones terapéuticas como preocupaciones toxicológicas. Terapéuticamente, los AP demuestran propiedades

antioxidantes, mitigando eficazmente el estrés oxidativo y la inflamación; también presentan actividad antimicrobiana, lo que los convierte en candidatos prometedores para tratamientos antibacterianos y antifúngicos (Islam & Mubarak, 2020). Además, algunos PA's muestran potencial anticancerígeno, con mecanismos que involucran la regulación del ciclo celular y la inducción de la apoptosis (Abdelfatah et al., 2022; Islam & Mubarak, 2020).

Sin embargo, también se reconocen algunos riesgos toxicológicos asociados a los PAs, como hepatotoxicidad (daño hepático y riesgo de carcinogénesis) (Abdelfatah et al., 2022; Wei et al., 2021), neurotoxicidad por antagonismo de receptores muscarínicos, provocando efectos adversos sobre el sistema nervioso, y genotoxicidad como daño al ADN y alteraciones del ciclo celular, generando inquietudes sobre su potencial mutagénico (Abdelfatah et al., 2022).

La riqueza de PA's en plantas ha mostrado un incremento en su síntesis bajo condiciones de humedad elevada, esto sugiere que el aumento de las precipitaciones intensifica la presión patógena, potenciando así la síntesis de PA's como mecanismo de defensa contra amenazas subterráneas (Kirk et al., 2010). Este fenómeno podría explicar la mayor abundancia de N-hexadecanoilpirrolidina observada en C2, correlacionada con los elevados niveles de precipitación en esta localidad. Si bien los PA's ofrecen oportunidades prometedoras para el desarrollo de fármacos y aplicaciones agrícolas, sus perfiles toxicológicos requieren una evaluación cuidadosa. Equilibrar sus beneficios terapéuticos con los posibles riesgos sigue siendo un área crucial para futuras investigaciones, bajo objetivo de aprovechar su potencial de forma segura y eficaz.

La Microcistina LW, por su parte, pertenece a una familia de heptapéptidos cíclicos producidos por cianobacterias y liberado a las aguas superficiales de lagos y embalses durante las floraciones de cianobacterias (Bulc Rozman et al., 2017; Levizou et al., 2020); las cuales son favorecidas por algunas condiciones climáticas como lluvias intensas, aumento del CO<sub>2</sub> atmosférico, eutrofización y el cambio climático (Drobac Backović & Tokodi, 2024; Levizou et al., 2020). Las zanahorias, al ser cultivos de raíz, pueden absorber estas toxinas si se riegan con aguas contaminadas con cianobacterias, las cuales pueden adherirse a los tejidos vegetales y, por lo tanto, las microcistinas producidas pueden ser absorbidas (Drobac Backović & Tokodi, 2024; Van Hassel et al., 2022). Las grandes

precipitaciones y prácticas agrícolas posiblemente relacionadas con sistemas de agua de riego y agua de embalse utilizadas en C2 podrían influenciar la presencia de Microcistina LW en la biomasa residual de zanahoria. La Microcistina LW es una toxina biológica potente, con efectos hepatotóxicos, la cual altera la función hepática, induciendo la muerte de los hepatocitos. La exposición prolongada al agua contaminada puede provocar daño hepático grave tanto en humanos como en animales (Kh. Kelini et al., 2023; N. Wei et al., 2024). Efectos neurotóxicos también han sido observados, en estudios donde indican citotoxicidad selectiva en astrocitos de ratas, lo que conduce a una menor viabilidad celular y un aumento de la apoptosis (Bulc Rozman et al., 2017). Además, esta toxina altera la integridad del citoesqueleto en los astrocitos, comprometiendo la homeostasis crítica para el funcionamiento adecuado del cerebro (Bulc Rozman et al., 2017).

En términos ecológicos, la Microcistina LW presenta riesgos significativos, ya que se acumula en organismos acuáticos y puede ingresar a la cadena alimentaria, impactando niveles tróficos superiores, incluyendo a los humanos (Kh. Kelini et al., 2023). Su presencia en sistemas agrícolas, por ejemplo, a través del agua de riego contaminada, también puede afectar negativamente a los cultivos, con consecuencias ecológicas más amplias (Kh. Kelini et al., 2023). Estos hallazgos subrayan la importancia de monitorear y gestionar las fuentes de agua utilizadas para riego, particularmente en regiones como C2, donde las altas precipitaciones pueden exacerbar la contaminación por cianobacterias y la absorción de toxinas en los cultivos.

Finalmente, la Feruloiltiramina es una fenolamina reportada como un compuesto polifenólico con actividad antioxidante (Forino et al., 2016; W. J. Li et al., 2012). Las fenolaminas son metabolitos secundarios derivados de la conjugación de una fracción fenólica con poliaminas. Su función en las plantas está relacionada con el reforzamiento de la pared celular y la defensa frente a patógenos y depredadores debido a su toxicidad (Grandmaison et al., 1993; Gupta et al., 2013). En general, las poliaminas cumplen un papel en el desarrollo de la tolerancia al estrés, incluyendo resistencia a la salinidad, temperaturas extremas (altas y bajas), hipoxia, hiperosmolaridad y contaminantes atmosféricos (Gupta et al., 2013). Las características climáticas locales pueden

incrementar las condiciones de estrés abiótico en C2, considerando su mayor altitud, precipitación y velocidad del viento, lo que podría mediar la producción de Feruloiltiramina.

Más allá de su función en plantas, la N-trans-feruloiltiramina (NTF), un derivado de la Feruloiltiramina, exhibe una variedad de actividades biológicas, incluyendo neuroprotección, efectos antioxidantes y propiedades antiinflamatorias. Estudios indican que la NTF puede mitigar la disfunción colinérgica y el deterioro de la memoria, particularmente en modelos de neurodegeneración como el déficit cognitivo inducido por escopolamina en ratas (Thangnipon et al., 2021). Este efecto neuroprotector involucra la reducción de especies reactivas de oxígeno (ROS) y de marcadores de apoptosis en tejidos cerebrales (Thangnipon et al., 2021). La NTF también demuestra capacidades antioxidantes significativas al reducir los niveles intracelulares de ROS en células de neuroblastoma. Asimismo, revierte la apoptosis inducida por H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> mediante la modulación de proteínas proapoptóticas y antiapoptóticas, destacando su potencial citoprotector (Soinampornkul et al., 2022). Además, la NTF exhibe mecanismos antiinflamatorios al suprimir mediadores inflamatorios como iNOS y COX-2 en macrófagos, a través de la inhibición de las rutas de señalización AP-1 y MAPK (Jiang et al., 2015). Si bien el potencial terapéutico de la NTF es prometedor, se requieren estudios adicionales para explorar completamente su perfil farmacológico y su seguridad en aplicaciones clínicas. La interacción entre factores locales de estrés abiótico en C2 y el enriquecimiento de Feruloiltiramina resalta su potencial como fuente de compuestos bioactivos, sugiriendo que factores climáticos podrían impulsar la producción de metabolitos como este con aplicaciones relevantes en neuroprotección, terapias antioxidantes y manejo de la inflamación.

Algunos estudios sobre el metaboloma de la zanahoria han reportado un número similar de metabolitos anotados, aunque son muy pocas las investigaciones que se han enfocado en evaluar el efecto directo de la localidad o el microclima sobre el metaboloma, reportando la anotación de hasta 86 metabolitos que incluyen ácidos orgánicos, compuestos fenólicos y carotenoides, entre otros (Chevalier et al., 2021; Koudela et al., 2021), sin que se haya reportado ninguno de los compuestos mencionados previamente. Otros trabajos se han centrado en analizar la riqueza en terpenos como factor relevante en el sabor de la zanahoria (Qi et al., 2024), o en la evaluación del efecto de distintos sistemas de producción y procesos de transformación simples (Schulzova et al., 2022; Zhou et al., 2024); sin embargo, hasta la fecha no se ha reportado ningún estudio que enfoque sus

---

esfuerzos en el efecto del microclima asociado a la localidad de cosecha sobre la biomasa residual de zanahoria.

El metabolismo del ácido  $\alpha$ -linolénico, involucrado en la biosíntesis de ácidos grasos insaturados, ha sido reportado como particularmente enriquecido bajo condiciones de estrés por frío o baja temperatura y disponibilidad reducida de agua ((W. Liu et al., 2021; Zi et al., 2022). Esta ruta, que incluye al ácido oleico y al ácido linoleico, sirve como punto de partida para la biosíntesis de diversos ácidos grasos insaturados (W. Liu et al., 2021), y está estrechamente relacionada con la producción de antioxidantes y la biosíntesis del ácido jasmónico (Zi et al., 2022). Por otro lado, los niveles elevados de humedad atmosférica y mayores precipitaciones tienen efectos variables sobre la acumulación de carotenoides, reportando un impacto negativo sobre el contenido de  $\beta$ -caroteno y un efecto positivo sobre los carotenoides de la rama  $\alpha$  y sobre el contenido total de carotenoides, respectivamente. Además, la duración del fotoperiodo y la intensidad lumínica se han identificado como factores diferenciales en la biosíntesis de carotenoides  $\alpha$  o  $\beta$ , con una mayor duración e intensidad de radiación asociadas positivamente con la acumulación de carotenoides de la rama  $\alpha$ , mientras que la exposición a baja intensidad de luz favorece el contenido de  $\beta$ -caroteno (Chevalier et al., 2022).

Otras rutas metabólicas, como la ferroptosis, un proceso de muerte celular programada dependiente de hierro, y la síntesis de ácidos grasos omega-3/omega-6, también mostraron un enriquecimiento considerable. La ferroptosis, cumple una función fisiológica en la regulación de la muerte celular en respuesta al estrés térmico en plantas (Distéfano et al., 2017; Liang et al., 2022). Además, la susceptibilidad celular a la ferroptosis está significativamente influenciada por la absorción y metabolismo de ácidos grasos poliinsaturados, así como por la síntesis de fosfolípidos derivados de estos (Pope & Dixon, 2023), siendo el ácido linolénico el principal ácido graso poliinsaturado obtenido de fuentes vegetales (Liang et al., 2022). Otras rutas metabólicas, aunque con niveles de significancia más bajos —como las relacionadas con el metabolismo de vitaminas y micronutrientes—, también resultaron estadísticamente relevantes. Por ejemplo, se ha identificado el alfa-tocoferol como un inhibidor natural de la ferroptosis, actuando como antioxidante lipofílico atrapador de radicales libres (Pope & Dixon, 2023). Este hallazgo sugiere que también

podría existir una regulación diferencial en estas rutas, aunque con menor impacto en las diferencias observadas. Otras rutas con niveles de significancia más bajos, como las relacionadas con el metabolismo de vitaminas y micronutrientes, también son estadísticamente relevantes; por ejemplo, el alfa-tocoferol, que inhibe la ferroptosis, es el típico antioxidante endógeno que atrapa radicales lipófilos (Pope & Dixon, 2023). Este resultado sugiere que también podría existir una regulación diferencial de estas rutas metabólicas, aunque con menor impacto en las diferencias observadas.

La capacidad fisiológica de las plantas para adaptarse a sus microclimas locales se relaciona con su habilidad para modificar las rutas biosintéticas de compuestos secundarios, como polifenoles y terpenoides, adaptándose a las variaciones ambientales mediante un proceso conocido como plasticidad fenotípica. Esta plasticidad permite a las plantas mantener su estabilidad metabólica y sintetizar compuestos bioactivos con propiedades antioxidantes y nutracéuticas (Pott et al., 2019; Savoi et al., 2016). De forma destacada, la plasticidad ha sido observada principalmente en moléculas terpénicas y compuestos fenólicos (como miristicina, 6-metoximelleína y D-germacreno) en diferentes variedades de zanahoria y localidades, lo que sugiere un mecanismo de co-regulación en su acumulación, evidenciando patrones similares entre variedades y entornos comunes (Chevalier et al., 2021).

Asimismo, las rutas metabólicas enriquecidas identificadas ofrecen importantes oportunidades para la bioprospección, principalmente a través del metabolismo del ácido  $\alpha$ -linolénico, la biosíntesis de carotenoides, la ferroptosis y la síntesis de ácidos grasos omega-3/omega-6. La ruta del ácido  $\alpha$ -linolénico cumple un papel central en la biosíntesis de ácidos grasos insaturados, precursores de compuestos antioxidantes (W. Liu et al., 2021; Zi et al., 2022). Esta ruta podría explorarse para el desarrollo de productos biofuncionales o nutracéuticos basados en la biomasa residual de zanahoria. La biosíntesis de carotenoides, influenciada por factores ambientales como la intensidad de la luz y la humedad, tiene potencial en programas de biofortificación que optimicen los niveles de carotenoides  $\alpha$  y  $\beta$  en los cultivos (Chevalier et al., 2022), siendo especialmente relevante para mejorar el aporte dietario de vitamina A y la actividad antioxidante en condiciones agroclimáticas variables. La ruta de ferroptosis, mediada por estrés oxidativo dependiente de hierro, permite estudiar mecanismos de muerte celular inducida por estrés en plantas de zanahoria. Su interacción con el metabolismo de ácidos grasos poliinsaturados y el

---

papel del alfa-tocoferol como inhibidor endógeno de la ferroptosis refuerza su potencial para el desarrollo de herramientas biotecnológicas que aumenten la tolerancia al estrés y la resiliencia de los cultivos (Liang et al., 2022; Pope & Dixon, 2023). Finalmente, la ruta de síntesis de ácidos grasos omega-3/omega-6 resalta su importancia en el uso de biomasa residual de zanahoria para la producción de ácidos grasos esenciales con beneficios para la salud humana. En conjunto con el metabolismo de micronutrientes, estas rutas podrían constituirse en objetivos clave para aplicaciones agrícolas, nutracéuticas y farmacéuticas, apoyando la producción sostenible de cultivos y la nutrición humana.

No obstante, es necesario resaltar que la limitación importante de este estudio radica en la influencia que pueden tener las condiciones agroclimáticas heterogéneas sobre la expresión metabólica de los excedentes de zanahoria. La presencia y la abundancia relativa de metabolitos bioactivos podrían variar no solo por factores climáticos como la precipitación, la altitud, la luminosidad, entre otros mencionados de forma previa, sino además por el régimen hídrico aplicado, las prácticas agronómicas (Akhatou et al., 2016; Medina-Meza et al., 2021) y las características del suelo no controladas en el experimento (Chevalier et al., 2022; Cornara et al., 2023). A pesar de que el análisis por clúster climático posibilitó la observación de agrupaciones de localidades diferentes, futuras investigaciones deberían considerar diseños experimentales que bloqueen o controlen las posibles influencias del ambiente y/o prácticas agronómicas en términos de la estabilidad y predictibilidad de los perfiles químicos.

## 2.7 Conclusiones

Este estudio resalta el impacto significativo que tienen las condiciones agroclimáticas sobre los perfiles metabólicos de la biomasa residual de zanahoria proveniente de tres localidades colombianas. Las diferencias metabólicas observadas entre los clústeres C1 (Rionegro y El Santuario) y C2 (Marinilla) evidencian la influencia de factores ambientales como la altitud, la precipitación, la temperatura y la radiación solar en la configuración de los perfiles metabólicos. De manera destacada, metabolitos como la Nuciferina y la Criptotanshinona fueron más abundantes en C1, lo cual concuerda con las temperaturas más cálidas y la mayor radiación solar en estas localidades. En contraste,

metabolitos como 4'-metoxiflavonol, N-hexadecanoilpirrolidina, Microcistina LW y Feruloyltyamina se encontraron enriquecidos en C2, en correlación con una mayor altitud y los niveles más elevados de precipitación en Marinilla.

El potencial de bioprospección de estos metabolitos es considerable. Compuestos como la Nuciferina y la Criptotanshinona muestran un alto potencial para aplicaciones farmacéuticas y nutracéuticas debido a sus propiedades antioxidantes, antiinflamatorias y anticancerígenas. De manera similar, los metabolitos enriquecidos en C2, como el 4'-metoxiflavonol y la N-hexadecanoilpirrolidina, presentan un potencial prometedor para su uso en alimentos funcionales e innovaciones en el sector agroquímico. Rutas metabólicas como la del ácido  $\alpha$ -linolénico y la biosíntesis de carotenoides refuerzan aún más el valor de la zanahoria residual como un recurso sostenible para la producción de compuestos bioactivos.

Estos hallazgos representan un avance en la agregación de valor en residuos agrícolas, especialmente en los excedentes de producción de zanahoria, ofreciendo una base para futuras innovaciones en biotecnología y agricultura. Además, este estudio es pionero en evaluar los efectos del microclima sobre la biomasa residual de zanahoria asociada al lugar de cosecha.



# **3. Capítulo 3: Marco metodológico para el apoyo a la investigación en bioprospección fitoquímica: Un caso de estudio sobre los subproductos de la cosecha de zanahoria (*Daucus carota* L.)**

## **3.1 Resumen**

Las zanahorias están entre los vegetales más importantes y preferidos a nivel mundial, ampliamente reconocidas por su importancia como fuente de fitonutrientes, incluyendo compuestos fenólicos, carotenoides, poliacetilenos y ácido ascórbico. Sin embargo, en su fase de producción se generan pérdidas sustanciales, estimadas en un 30%; estas zanahorias descartadas suelen usarse como la alimentación animal, material de compostaje o se convierten en residuos orgánicos. Por lo tanto, este estudio tiene como objetivo desarrollar un marco metodológico centrado en la aplicación de un proceso de bioprospección fitoquímica basado en la vigilancia científica; utilizando los subproductos de la cosecha de zanahorias como ejemplo fundamental. Se emplearon metodologías avanzadas, como análisis bibliométricos, cienciométricos y de patentes, apoyadas por herramientas tecnológicas como VOSviewer y Patent Inspiration. Esto implicó la creación de paisajes científicos, mapas de tendencias y redes de co-ocurrencia, con el objetivo de explorar el potencial de los subproductos de la cosecha de zanahoria, su aplicabilidad en la generación de nuevo conocimiento y su utilización en la industria. Este enfoque facilitó la identificación de tendencias emergentes en la investigación científica, proporcionando una visión integral de las áreas comerciales e industriales de interés, con un enfoque en los principios de la economía circular. Además, el estudio enfatizó la importancia de la bioprospección, respaldada por estas metodologías y herramientas tecnológicas, como un factor clave en el proceso de investigación sobre los usos potenciales de los subproductos

de la cosecha de zanahoria, la cual podría extenderse a otras matrices agroalimentarias.

**Palabras clave:** zanahoria, bioprospección, vigilancia científica, economía circular, subproducto, análisis bibliométrico, análisis cientométrico, análisis de patentes

### 3.2 Abstract

Carrots are among the most crucial and globally preferred vegetables, widely recognized for their importance as a source of phytonutrients, including phenolic compounds, carotenoids, polyacetylenes, and ascorbic acid. However, its production phase incurs substantial losses, estimated at 30%; these discarded carrots typically find application in animal feed, composting material or organic waste. Therefore, this study aims to develop a methodological framework focusing on the application of a phytochemical bioprospecting process based on scientific surveillance; using carrot crop by-products as a foundational example. Advanced methodologies, such as bibliometric, scientometric, and patent analyses, supported by technological tools such as VOSviewer and Patent Inspiration, were employed. This involved the creation of scientific landscapes, trend maps and co-occurrence networks, intending to explore the potential of carrot crop by-products, their applicability in generating new knowledge, and their utilization in the industry. This approach facilitated the identification of emerging trends in scientific research, providing a comprehensive view of commercial and industrial areas of interest, with a focus on circular economic principles. Furthermore, the study emphasized the importance of bioprospecting, supported by these methodologies and technological tools, as a key factor in the research process on the potential uses of carrot crop by-products, which could extend to other matrices.

**Keywords:** carrot, bioprospecting, scientific surveillance, circular economy, by-product, bibliometric analysis, scientometric analysis, patent analysis

### 3.3 Introducción

La búsqueda sistemática y permanente de nuevas fuentes biológicas con un valor comercial potencial, constituye un objetivo clave para el manejo sostenible de los recursos naturales, por lo cual, el aprovechamiento de los subproductos o excedentes de producción generados en la agroindustria se presenta como una alternativa de gran interés (Rodrigues et al., 2022). Se estima que aproximadamente el 14,8% de los residuos relacionados a la industria de alimentos son generados en la producción y transformación de frutas y verduras (Nayak & Bhushan, 2019). Estos desechos, subproductos o coproductos son un tema de interés y gran preocupación para la industria de alimentos en la actualidad, debido a los impactos ambientales y económicos inherentes (Domínguez et al., 2020; Sarmiento-García et al., 2023). Por lo tanto, es necesario realizar esfuerzos para la reintegración de los mismos a la cadena de producción, aún más, cuando una parte significativa sigue siendo útil y segura (García-Hernández et al., 2023).

La zanahoria (*Daucus carota L.*), es uno de los vegetales más importantes y de mayor preferencia de consumo a nivel mundial (Luca et al., 2022), con una producción de 41,7 millones de toneladas, las cuales correspondieron a 1,1 millones de hectáreas cultivadas en el 2021 (FAOSTAT, 2023). La zanahoria se ha reconocido como una fuente importante de fitonutrientes y con alto potencial nutracéutico, los cuales comprenden principalmente cuatro tipos; compuestos fenólicos, carotenoides, poli acetilenos y ácido ascórbico; además de vitaminas, fibra dietética, minerales y compuestos antioxidantes (Ahmad et al., 2019; Que et al., 2019; Średnicka-Tober et al., 2022). No obstante, las pérdidas relacionadas sólo a la etapa de producción (cosecha y postcosecha), pueden ser cercanas al 30% (Kaur et al., 2020; Rodrigues et al., 2022), lo que equivaldría a 12,5 millones de toneladas solo en el año 2021 (FAOSTAT, 2023); estas pérdidas hacen referencia a zanahorias descartadas debido a su singularidad en tamaño, longitud, forma, color o daños mecánicos (Jyot Kaur et al., 2020). En Colombia, la zanahoria debe ser clasificada bajo tres categorías, categoría extra: sin defectos, con forma regular, libre de efectos de congelación, sin magulladuras ni quemaduras; categoría primera, con buena apariencia, se aceptan defectos leves; y categoría segunda, donde se aceptan defectos que no afecten

la calidad como heridas cicatrizadas y quemaduras (Cámara de comercio de Bogotá, 2015; ICONTEC, 1994). Las zanahorias que no cumplen con estos criterios de selección, o se comercializan a muy bajos precios, con un valor máximo que puede estar alrededor de 0,14 USD/kg, en comparación con el precio máximo registrado de la zanahoria extra, 1,55 USD/kg (Agronet, 2023; Centrales de Abasto, 2023); o por el contrario no se comercializan y se convierten en un excedente de producción; es decir, son descartadas, normalmente dispuestas para alimentación animal, material de compostaje o se convierten en desecho orgánico (Clementz et al., 2019; Jyot Kaur et al., 2020).

Rudke et al. en el 2022, indica que el aumento en la producción de residuos o subproductos es consecuencia directa de la creciente demanda de alimentos, a esto se suma, la falta de información en relación con la composición nutraceútica y/o fitoquímica de dichos subproductos; por lo cual, la aplicación de los principios de la economía circular es fundamental para la recuperación de moléculas de alto valor añadido. De hecho, es ampliamente reconocido que los residuos del procesamiento de vegetales aún incluyen una cantidad significativa de compuestos bioactivos de interés, lo que proporciona un suministro accesible de productos químicos de alto valor para la industria alimentaria (animal y humana), agroindustrial, farmacéutica, cosmética, entre otras (Domínguez et al., 2020; Georganas et al., 2020; Jyot Kaur et al., 2020; Rudke et al., 2022; Sarmiento-García et al., 2023). Baiano en el 2014, centra su atención en los componentes potencialmente comercializables presentes en los desechos y subproductos de la industria alimentaria, cuyo objetivo se ajusta en explorar y explotar las moléculas de alto valor; proteínas, polisacáridos, fibras, saborizantes y fitoquímicos como ingredientes nutricionales y farmacológicamente funcionales; de hecho, estos residuos están siendo utilizados como fuente de compuestos bioactivos (Brivaldo Viana Da Silva et al., 2023; Domínguez et al., 2020; Okino Delgado & Fleuri, 2015), en la generación de productos con alto valor agregado, como es el caso de insumos químicos y farmacéuticos (Chandra Nath et al., 2023; Jyot Kaur et al., 2020; Nayak & Bhushan, 2019), o en la producción de

biocombustibles y otros productos de biorrefinería (Ramos-Andrés et al., 2021; Salvañal et al., 2021).

En el caso particular de la zanahoria, los residuos o subproductos han comenzado a implementarse como materia prima o fuente de obtención de moléculas de alto valor. Autores como Clementz et al. (2019) y Jyot Kaur et al. (2020) han desarrollado metodologías de valorización en excedentes de producción, mediante la extracción de carotenos, fibra y azúcares fermentables, para la producción de biocombustibles; a su vez se reportan estudios acerca del uso del bagazo de zanahoria en polvo como una fuente abundante de fibra, carbohidratos y minerales, lo que indica su capacidad para mejorar el valor nutricional de los alimentos a los que se pueda incorporar (Luca et al., 2022). Por consiguiente, es esencial identificar y recuperar moléculas de alto valor en los residuos y subproductos provenientes de la cadena productiva de la zanahoria; en otras palabras, mediante el desarrollo de un estudio de bioprospección.

La bioprospección es el estudio exploratorio de la biodiversidad, en relación a la búsqueda de sustancias biológicamente activas que tengan un uso potencial en la industria, la agricultura y la medicina (Dixit et al., 2021); por consiguiente, para alcanzar un proceso eficaz de bioprospección, es fundamental conocer la tendencia actual del mercado, mediante la exploración de las publicaciones, artículos de investigación, revisión y patentes relacionadas (de Andrade & de Magalhães, 2023; Otero et al., 2022); para lograr esto, es necesaria la aplicación de herramientas tecnológicas que faciliten el análisis de la información existente y publicada en relación a la matriz de interés (Durán-Aranguren et al., 2021; Flórez-Martínez et al., 2021). Por ende, una vigilancia tecnológica o científica bien direccionada, puede convertirse en el punto de partida clave dentro de un proceso de bioprospección. Dado que es un proceso sistemático, organizado y selectivo de monitoreo del entorno tecnológico y científico, cuyo objetivo se centra en la búsqueda, recopilación y análisis de información, transformándola en conocimiento, el cual ayudará a la toma de decisiones (Filho et al., 2022; Flórez-Martínez & Uribe-Galvis, 2020; López et al., 2016). Esta búsqueda puede estar desarrollada bajo dos tipos de enfoques: La recolección, normalización y análisis de datos cuantitativos, relacionados con publicaciones

científicas, como artículos; y datos patentométricos, relacionados con mecanismos de protección de la propiedad intelectual, como las patentes (Caprarulo et al., 2022).

Actualmente existen múltiples estudios de desarrollo e implementación de procesos de vigilancia tecnológica, vigilancia científica o análisis bibliométrico o de patentes; en donde enfocan sus esfuerzos en la determinación de la literatura emergente, la productividad científica, de patentes y sus tendencias, aplicaciones o vocaciones de uso, además de los principales actores de un determinado sector industrial o científico, en diversas matrices agroalimentarias (Abdelwahab & Mohamed, 2022; Durán-Aranguren et al., 2021; Shinde et al., 2019; Tofiño-Rivera et al., 2017); e inclusive, estudios que proponen una hoja de ruta para la valorización de las mismas (Flórez-Martínez et al., 2023). Sin embargo, son muy pocos los estudios que ponen en práctica esta metodología como base para la aplicación de un proceso de bioprospección (de Andrade & de Magalhães, 2023), sin importar si se trata de una matriz agroalimentaria, sus excedentes de producción, subproductos o residuos. Es por lo anterior, que el presente trabajo pretende desarrollar un marco metodológico que se centre en la aplicación de un proceso de bioprospección basado en el desarrollo de una vigilancia científica, el cual permita determinar las posibles aplicaciones industriales y comerciales (vocaciones de uso) de los excedentes de producción de zanahoria, estableciendo las pautas para la replicación de estas metodologías en diferentes matrices agroalimentarias.

## **3.4 Materiales y métodos**

### **3.4.1 Estrategia de búsqueda y recopilación de datos**

La estrategia de búsqueda fue establecida tomando como base una ecuación de búsqueda en donde se fijó el término de zanahoria como el objeto de estudio de la ecuación, estableciendo un primer constructo que incluyó los términos “*Daucus carota*”, “carrot” y “zanahoria”; un segundo constructo enfocado al objeto de trabajo, en este caso, en relación a los términos asociados a los subproductos del cultivo de zanahoria, su caracterización

química y aplicaciones dentro de la industria de alimentos y la industria cosmético-farmacéutica. Un tercer constructo fue establecido como elemento focalizador, donde fueron incluidos términos relacionados con la economía circular y bioeconomía; un cuarto constructo donde se aplicaron exclusiones temáticas o conceptuales, en esta instancia, haciendo énfasis a terminología asociada a los aspectos agronómicos del cultivo de la zanahoria. Finalmente, se aplicaron restricciones en relación con la ventana de tiempo implementada en la ecuación de búsqueda.

El desarrollo de esta estrategia de búsqueda permite una recolección de datos focalizada y asertiva en términos la exploración y aplicación de un proceso de bioprospección, en este caso, en los subproductos del cultivo de la zanahoria. Por lo cual, la ecuación establecida fue empleada tanto para la búsqueda de los datos bibliométricos, recolectados en su gran mayoría de artículos científicos y artículos de revisión, utilizando la base de datos Scopus®; y la recolección de los datos patentométricos, utilizando la herramienta PatentInspiration®.

### **3.4.2 Análisis bibliométrico**

La información relacionada al número de publicaciones, área de investigación, autores, entre otras, perteneciente a los artículos seleccionados, fue recopilada directamente de la base de datos Scopus®. Esta herramienta recopila y organiza información desde una amplia variedad de fuentes, como revistas científicas, artículos de investigación y de revisión, patentes y libros; mediante la extracción de metadatos alojados en sus títulos, autores, resúmenes y palabras claves. Esto es posible gracias al uso de algoritmos de búsqueda y análisis semántico, los cuales tienen en cuenta factores como las palabras clave utilizadas, la relevancia del documento, la calidad de la revista y las citas recibidas (Elsevier, 2023); los mismos son descritos a través de los indicadores bibliométricos que Scopus® implementa. Por su parte, Scimago Journal Rank (SJR), proporciona rankings por áreas de conocimiento y países con relación al número de citas recibidas por cada revista en un determinado período, Source Normalized Impact Paper (SNIP), evalúa el impacto de una cita considerando las características de cada campo científico y CiteScore, calcula el promedio de citas recibidas por cada artículo publicado en esa revista en los tres

años anteriores (García-Villar & García-Santos, 2021). Además, a través de la opción "analizar resultados", Scopus® proporciona herramientas de visualización y análisis como gráficos de tendencias de publicación, citas, redes de coautoría, entre otras; para la exploración y comprensión de la información recopilada (Elsevier, 2023).

### **3.4.3 Análisis de redes científicas**

La información relacionada con las publicaciones encontradas fue recopilada y analizada en el programa de construcción de paisajes científicos, VOSviewer® versión 1,6,19, desarrollado por van Eck & Waltman (2009); generando una serie de redes de coocurrencia, las cuales fueron realizadas a partir del análisis de las palabras clave, términos en títulos-resúmenes y compuestos de interés químico haciendo uso de las visualizaciones de red, sobreposición y el mapa de densidad. VOSviewer® permite organizar y generar las interacciones entre los metadatos obtenidos en una búsqueda bibliométrica, mediante la construcción de mapas de coocurrencia visual, los cuales representan las relaciones y los patrones de coocurrencia entre diferentes elementos, como palabras clave, autores o revistas, dentro de un conjunto de datos, utilizando técnicas de análisis de redes y algoritmos de agrupamiento; lo que facilita el descubrimiento de patrones y la comprensión de las conexiones entre los elementos analizados (van Eck & Waltman, 2009).

### **3.4.4 Análisis de patentes**

Los datos recopilados con relación a la publicación de patentes de interés fueron obtenidos y analizados directamente en la herramienta PatentInspiration®, mediante el uso de algoritmos de búsqueda y análisis semántico de términos relacionados, dentro un sistema de búsqueda en contexto y basado en datos de patentes (Patent Inspiration, 2023). Además de lo anterior, la información recopilada en relación con los códigos de clasificación internacional de patentes (IPC), fue utilizada para el análisis de los mismos

mediante la creación de redes de coocurrencia, las cuáles fueron construidas en el programa de mapeo bibliométrico VOSviewer® versión 1,6,19.

Las principales restricciones del marco metodológico empleado en esta investigación incluyen el acceso a bases de datos para enriquecer la cantidad y diversidad de publicaciones científicas sobre productos de valor añadido derivados de la zanahoria; la calidad de los metadatos de las publicaciones científicas, principalmente debido a las fuentes de origen y la heterogeneidad de los protocolos de indexación de revistas; y la exhaustividad de los datos de patentes según las fuentes de origen (bases de datos regionales de patentes). Finalmente, en este estudio se utilizaron todos los metadatos de las publicaciones científicas; en contraste, la información de los reclamos de patentes se limitó a las patentes concedidas.

## 3.5 Resultados

### 3.5.1 Estrategia de búsqueda y recopilación de datos

La búsqueda fue realizada en el primer cuatrimestre del 2023. La ecuación de búsqueda fue establecida para la recolección de datos bibliométricos y patentométricos; para la cual, términos asociados a la zanahoria como matriz central de interés, sus subproductos, caracterización y aplicaciones fueron incluidos. Para la búsqueda realizada en Scopus®, los términos utilizados en la ecuación fueron incluidos en los parámetro semánticos de títulos, resúmenes y palabras claves, además, de una ventana de tiempo superior al año 2011; de la siguiente manera:

```
TITLE-ABS-KEY ( ( "daucus  
carota" OR "carrot" OR "zanahoria" ) AND ( "byproduct*" OR "by-  
product*" OR "coproduct*" OR "bioactive compound*" OR "compound*  
character*" OR "application*" OR "cosmetic application*" OR "food  
application*" OR "bioeconom*" OR "circular econom*" ) AND NOT ( "soil*" ) ) AND  
PUBYEAR > 2011 ).
```

En el caso de la búsqueda de los datos patentométricos en PatentInspiration®, la ecuación de búsqueda fue incluida en los parámetros semánticos de títulos, resúmenes y reivindicaciones, teniendo en cuenta una ventana de tiempo de diez años a partir de junio del 2013; de la siguiente manera:

TITLE-ABS-CLAIMS ( ( "daucus carota" OR "carrot" OR "zanahoria" ) AND ( "byproduct\*" OR "by-product\*" OR "coproduct\*" OR "bioactive compound\*" OR "compound\* character\*" OR "application\*" OR "cosmetic application\*" OR "food application\*" OR "bioeconom\*" OR "circular econom\*" ) AND NOT ( "soil\*" ) ).

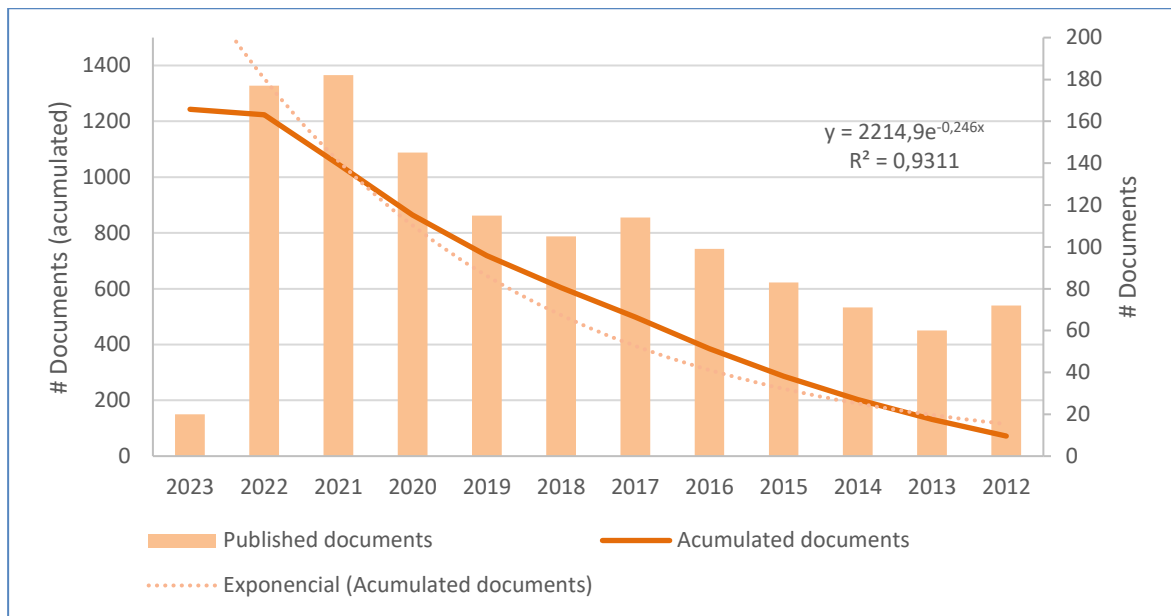
En ambos casos, en los parámetros de búsqueda, la palabra clave “soil” fue excluida con el propósito de prevenir la búsqueda de artículos o patentes relacionadas a aspectos agronómicos del cultivo de la zanahoria. El resultado de esta búsqueda arrojó una cantidad de 1.234 publicaciones en Scopus®, y un total de 706 patentes en PatentInspiration®.

### **3.5.2 Análisis bibliométrico**

Las 1.234 publicaciones encontradas incluyeron en su mayoría artículos científicos, artículos de revisión, conferencias y capítulos de libros; publicados por un total de 159 autores y pertenecientes a 160 instituciones. En la Figura 3-1 se observa el número de publicaciones anuales a lo largo de los últimos 10 años, donde se evidencia que, la dinámica de publicación ha tenido un crecimiento sustancial a partir del año 2013, presentando un punto máximo de publicaciones en el año 2021 para un total de 182 documentos, y una tendencia exponencial general en la acumulación de publicaciones relacionadas; esto se puede constatar a través del cálculo de la tasa de crecimiento y el tiempo de duplicación (de Solla Price, 1976; Flórez-Martínez et al., 2021), la cual para este caso, la tasa de crecimiento es igual a un 28%, y el tiempo de duplicación de las publicaciones, equivalente a 2,8 años. Lo anterior indica un crecimiento en la producción

científica y en el interés hacia la exploración de alternativas para el uso de subproductos ligados al cultivo de zanahoria, su caracterización y sus posibles aplicaciones.

**Figura 3-1:** Distribución de las publicaciones en el tiempo. Elaboración propia en Excel con base a información disponible en Scopus®. Fecha de consulta, abril del 2023.



La ley de Price del crecimiento exponencial de la ciencia identifica la tasa de crecimiento y el período en el que se duplica el número de publicaciones. Esta ley permite identificar, con base en el aumento acumulado de artículos publicados cada año, el período de años en el que los registros se duplican y la tasa de crecimiento. Para calcular estos dos indicadores, se realiza un análisis de la tendencia exponencial de cada una de las curvas de la Figura 3-1, utilizando la ecuación 3.1, como sigue:

$$y = ae^{bx} \tag{3.1}$$

Donde b es la constante que relaciona la velocidad de crecimiento de la ciencia con el tamaño ya alcanzado (número de publicaciones iniciales del período de estudio) y donde

---

la tasa de crecimiento anual promedio representa el porcentaje de crecimiento de las publicaciones basado en el parámetro  $b$ . Así, esta tasa se calcula con la ecuación 3.2:

$$R = 100(e^b - 1) \quad (3.2)$$

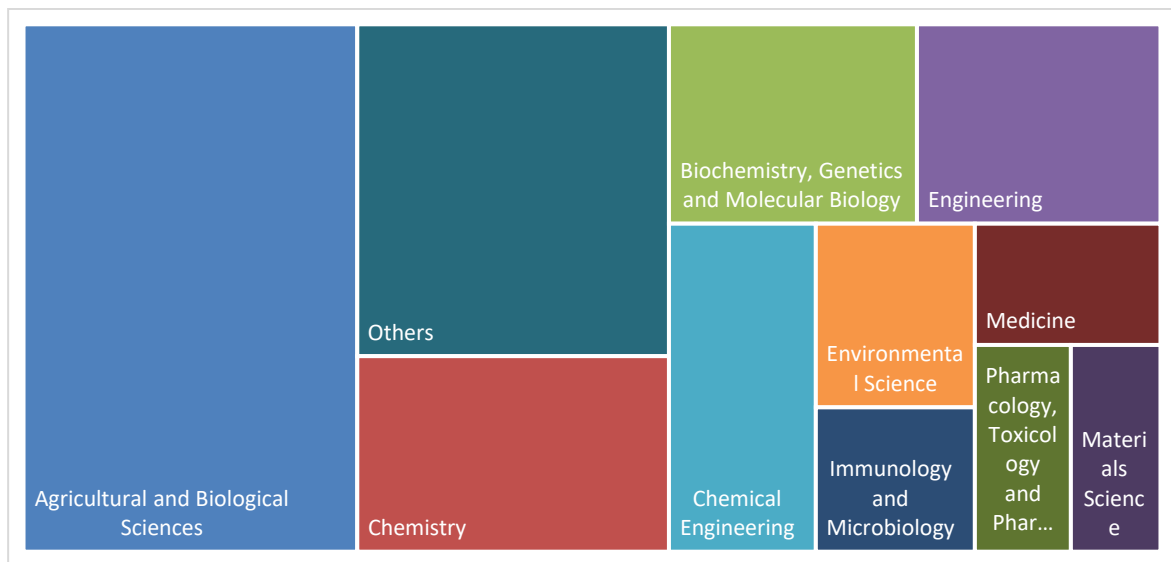
Por su parte, el tiempo de duplicación establece los períodos iguales en los que la ciencia o la magnitud en estudio relacionada con ella crece el doble. La ecuación 3.3 mide este tiempo en función del parámetro  $b$  y se define como:

$$D = \ln(2)/b \quad (3.3)$$

En adición, fue posible determinar las principales áreas de estudio, encontrando el mayor número de publicaciones en relación a las ciencias biológicas y agrícolas con un 29,4%, un 10,1% con respecto a la química, 8,3% a bioquímica, genética y biología molecular y un 3,3% respecto a la farmacología, toxicología y farmacéutica, entre otras (Figura 3-2); lo cual permite establecer una relación entre la tendencia actual de las publicaciones en términos de las áreas de investigación y el objeto de interés del presente estudio. Lo anterior se puede constatar a través de la identificación de las revistas con mayor número de publicaciones, las cuales permiten comprender los enfoques que tienen actualmente dichas publicaciones y sus autores, y la relación de las mismas con la presente investigación, desde un enfoque de bioprospección y con base en los subproductos del cultivo de zanahoria; así mismo, al identificar su posición o el cuartil al que pertenecen en el ranking SCImago, es posible comprender el índice de impacto de sus publicaciones y la relevancia de las mismas. Por consiguiente, las cinco revistas con mayor número de publicaciones y su respectivo cuartil son Journal Of Food Processing And Preservation (Q2 y 47 publicaciones), Food Chemistry (Q1 y 37 publicaciones), Acta Horticulturae (Q4 y 30 publicaciones), Foods (Q1 y 30 publicaciones) y Journal Of Food Process Engineering (Q2 y 25 publicaciones) (*Scimago Journal & Country Rank, 2023*). Estas revistas permiten entender el direccionamiento de los artículos y otras publicaciones hacia los fundamentos

químicos, bioquímicos y funcionales de los alimentos, ligados al procesamiento y la preservación de estos, sus propiedades, calidad y producción bajo un enfoque ingenieril.

**Figura 3-2:** Principales áreas de estudio. Elaboración propia en Excel con base a información disponible en Scopus®. Fecha de consulta, abril del 2023



### 3.5.3 Análisis de redes cientiométricas

#### 3.5.3.1 Análisis semántico de palabras clave

Se construyó un paisaje científico basado en las palabras claves encontradas pertenecientes a las publicaciones recuperadas de la búsqueda en Scopus® (Figura 3-3), utilizando el programa de mapeo bibliométrico VOSviewer® (versión 1,6,19). Permitiendo visualizar e interpretar de manera más intuitiva la tendencia general de las publicaciones, es este caso, la información relacionada a las palabras claves y su frecuencia, la cual se representa por el tamaño del nodo correspondiente, a mayor tamaño del nodo, mayor es su frecuencia y su importancia en relación a otras; además de esto, esta red permite visualizar la interacción entre palabras claves y la agrupación de las mismas en clústeres, siendo estos últimos, los que permiten identificar las áreas de investigación donde las



El clúster rojo - Compuestos bioactivos, engloba diferentes sustancias químicas como carotenoides, beta caroteno, fenoles y polifenoles, antocianinas, flavonoides, ácidos ascórbico, entre otros, identificados como compuestos de interés en la zanahoria (Ahmad et al., 2019; Christensen & Brandt, 2006); junto a una propiedad funcional principal, la actividad antioxidante (Figura 3); por medio de la cuál, es posible afirmar una relación estrecha y directa entre los diferentes compuestos bioactivos presentes en la zanahoria y esta propiedad (Bhandari et al., 2023; Idrovo Encalada et al., 2019). Además de lo anterior, estos compuestos bioactivos y su actividad antioxidante presentan una relación directa con palabras claves que corresponden a pigmentos presentes en el zumo de zanahoria (Bhandari et al., 2023; Perez et al., 2022; Szczepańska et al., 2022); señalando un vínculo con términos como alimentos funcionales, lo que permite interpretar la adición de los mismos en otras matrices, como un proceso de fortificación; similar al trabajo descrito por Camargo-Herrera et al. en el 2022, en donde formula una bebida láctea probiótica a partir de la adición de fitoquímicos provenientes de la zanahoria como caotenoides, fibra y polifenoles. A su vez, es posible identificar términos en relación con la caracterización fisicoquímica de la zanahoria como el contenido de fibra, azúcares, grasa, pH, vitaminas, entre otros (A. Vaz et al., 2022; Nicolle et al., 2004).

En el clúster verde – Propiedades funcionales, se agrupan palabras claves que hacen referencia a extractos de zanahoria, como el aceite esencial, o términos asociados a medicamentos sin clasificar (Figura 3); que se encuentran relacionados al metabolismo de la zanahoria y que presentan efectos antifúngicos, antiinfectivos, antimicrobianos o antioxidantes (Chiboub et al., 2019; Ma et al., 2014; Vodnar et al., 2017). Estas relaciones, además, permiten asociar dichas propiedades con términos como planta medicinal, fitoterapia y fitoquímica; lo cual podría indicar una relación entre estas propiedades y algunos beneficios para la salud debido a su composición nutracéutica (Ahmad et al., 2019; Anbualakan et al., 2023; Średnicka-Tober et al., 2022; Theodosiou et al., 2010). El clúster azul - Transformación y extracción de compuestos, congrega términos relacionados al procesamiento de alimentos, su producción y preservación; al mismo tiempo, algunas técnicas de transformación asociadas a la zanahoria como procesos de secado (convección, solar, microondas, liofilización, entre otras) (Gong et al., 2015; H. Wang et al.,

2021). En adición, es posible identificar relaciones entre técnicas de extracción, como la sonicación o la aplicación de ultrasonido, con los diferentes compuestos bioactivos y su respectiva actividad antioxidante (Jabbar et al., 2014).

El clúster amarillo - Bioprospección, relaciona diversos términos que se asocian con la química, los análisis químicos y el análisis de alimentos, junto a técnicas de detección e identificación de compuestos, como cromatografía, espectrofotometría, espectrometría de masas, entre otras (Figura 3-3) ampliamente utilizadas en caracterización de zanahoria y sus coproductos (Cubero-Leon et al., 2018; Koudela et al., 2021; Schulzova et al., 2022), sin embargo, en términos generales, estas técnicas han sido implementadas comúnmente como herramientas en procesos de caracterización y bioprospección fitoquímica (Dixit et al., 2021); por lo cual, pueden ser descritas como las metodologías más asertivas para dicho procesos. Cabe agregar que, analizar estas técnicas, permite entender la interacción entre los compuestos bioactivos, sus propiedades y las metodologías de obtención de los mismos. Finalmente, el clúster cian - Bioeconomía circular, recoge términos que son interdisciplinarios a toda la red, como economía circular, impacto ambiental, biocompatibilidad, aprovechamiento de residuos, entre otros.

Desde otra perspectiva, la Figura 3-4 permite identificar fácilmente el nivel de novedad en el uso de las palabras claves, es decir, cuáles tópicos son de uso reciente y cuales ya se encuentran consolidados en el marco de la búsqueda.



no tienen la mayor frecuencia ni la mayor cantidad de conexiones, debido a que son áreas emergentes dentro del foco de estudio del presente trabajo; entre los cuales se encuentran las propiedades fisicoquímicas de la zanahoria, áreas de interés como la fitoquímica, el análisis de nanocompuestos y metabolitos como los carotenoides y flavonoides provenientes de los extractos vegetales (Ahmad et al., 2019; Meléndez-Martínez et al., 2022; K. D. Sharma et al., 2012); metodologías de encapsulación o microencapsulación, los cuales están siendo utilizados como métodos de preservación de carotenoides de zanahoria y otros compuestos bioactivos, además de la estabilidad de los mismos (Esposito et al., 2022; W. Lu et al., 2021); uso de metodologías de secado como la liofilización en la preservación de carotenoides en la producción de colorantes naturales (Gong et al., 2015; Ramos-Andrés et al., 2021), y la asistencia por microondas; el uso de coproductos de zanahoria, el polvo y el bagazo, como fuente de beta caroteno, fibra, carbohidratos o aplicaciones de los mismos (Gong et al., 2015; Luca et al., 2022). Además, términos asociados a tecnologías de empaques de alimentos, como nanofibras, biopolímeros, biofilms y algunos conceptos relacionados a los residuos alimenticios o agroindustriales, la valorización de estos, y la economía circular (A. Vaz et al., 2022; Rodrigues et al., 2022).

### **3.5.3.2 Red cuantitativa de tendencias de investigación**

Paralelamente, se construyó un paisaje científico de textos clave, es decir, basado en los términos asociados a los títulos y resúmenes, permitiendo analizar las tendencias específicas en relación a las publicaciones recuperadas de la base de datos Scopus®, dentro del marco del presente estudio; en donde es posible evidenciar la formación de seis clústeres (Figura 3-5).



---

terpenos, mono terpenos o biomasa, enmarcada en la producción agrícola o los desechos vegetales o alimentarios y su biodegradación (Georganas et al., 2020; Nayak & Bhushan, 2019).

El clúster verde – Fitoquímica de la zanahoria, tiene como término central la palabra antioxidante (Figura 3-5), denotando interacciones con familias químicas de interés como fenoles, los carotenoides, flavonoides, antocianinas, entre otros; los cuales, a través de términos como la fitoquímica, se relacionan con extractos y pigmentos provenientes de la zanahoria y sus derivados (Ahmad et al., 2019; Ma et al., 2014). Inclusive, técnicas como la encapsulación y microencapsulación se presentan como metodologías de obtención para este tipo de compuestos (Esposito et al., 2022; W. Lu et al., 2021). Este clúster presenta grandes similitudes con el clúster de compuestos bioactivos (rojo) presente en el paisaje científico de tendencias generales (Figura 3-3), este último presenta relaciones entre los diferentes compuestos bioactivos presentes en la zanahoria con una propiedad funcional antioxidante, similar a lo encontrado en este paisaje científico de tendencias específicas, lo cual indica, una reiterada relación entre los diferentes metabolitos de la zanahoria y su capacidad antioxidante (Bhandari et al., 2023).

El clúster azul - Transformación y preservación de alimentos, y el clúster amarillo - Bioprospección, presentes en el paisaje científico de tendencias específicas (Figura 3-5), tienen grandes similitudes con los descritos en el paisaje científico de tendencias generales (Figura 3), con términos principales relacionados al procesamiento de alimentos, y las técnicas de determinación y cuantificación de metabolitos, respectivamente; esto brinda una claridad en la aplicación de metodologías y técnicas enfocadas a la transformación de la zanahoria, la inclusión de la misma o sus subproductos en otras matrices, y la detección de los compuestos bioactivos clave que la conforman (Baiano, 2014; Camargo-Herrera et al., 2022; Georganas et al., 2020). A pesar de estas similitudes, el clúster cian - Caracterización y aplicaciones de la zanahoria, demuestra una diferencia marcada al relacionar aspectos de la industria de alimentos (Figura 3-5), como la vida útil, el manejo,

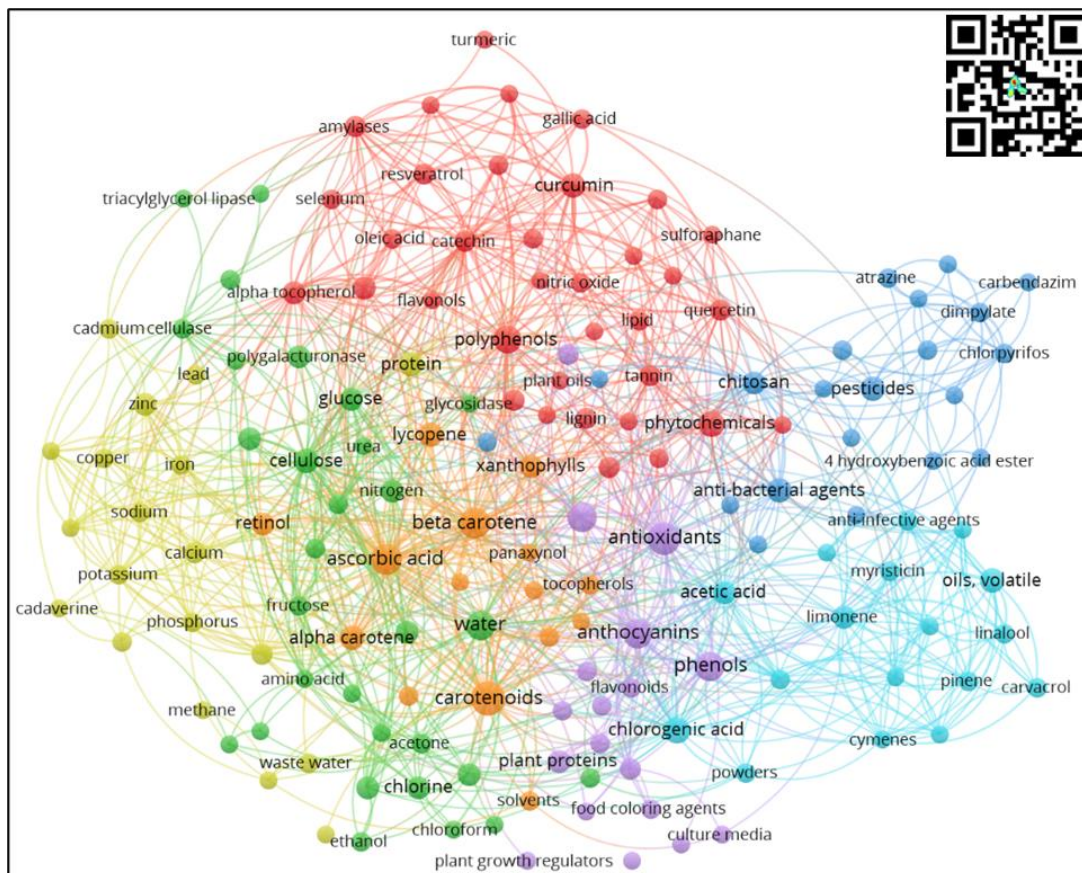
control, la microbiología y la calidad de los alimentos, entre otros, con el valor nutricional y los parámetros fisicoquímicos de la zanahoria (A. Vaz et al., 2022; K. D. Sharma et al., 2012); términos que aunque han sido identificados en el clúster rojo del paisaje científico de tendencias generales (Figura 3-3), en este paisaje se encuentran aislados en nuevo clúster. Finalmente, el clúster morado - Otras aplicaciones, permite relacionar la actividad antioxidante que puede presentar la zanahoria con una actividad anti-bacterial que se liga directamente a microorganismos patógenos como la *Escherichia coli* (Balahbib et al., 2021; Ricci et al., 2019).

En adición, es posible observar la relación entre técnicas como la microscopía de barrido de electrones con el tamaño de partícula y la celulosa proveniente de la zanahoria; además de algunos términos aislados como la biocompatibilidad, los biopolímeros y el embalaje de alimentos; este clúster se relaciona con el clúster de bioeconomía presente en el paisaje científico de tendencias generales (Figura 3-3), en donde es posible localizar algunos términos relacionados al embalaje y la biocompatibilidad, aunque en menor frecuencia.

### **3.5.3.3 Red de compuestos bioactivos de interés**

Teniendo en cuenta el registro del número de identificación química CAS, se construyó un mapa de tendencias complementaria con relación a los compuestos químicos referenciados en las publicaciones consultadas (Figura 3-6), el mismo, permite generar una red de coocurrencias de potenciales compuestos bioactivos; de manera similar al análisis de palabras clave y los términos asociados a títulos y resúmenes, en el presente mapa, el tamaño del nodo indica su frecuencia y relevancia dentro de la red.

**Figura 3-6:** Red de coocurrencias de compuesto químicos. Elaboración propia en VOSviewer® con base a información disponible en Scopus®. Fecha de consulta, abril del 2023.



Es interesante observar las interacciones presentes en los diferentes clústeres de esta red y las agrupaciones que se logran observar en relación con los tipos o familias químicas. Por ejemplo, los compuestos químicos agrupados en el clúster rojo están asociados a la familia química de los polifenoles, en los cuáles se logra observar, la catequina, epigallocatequina, quercitina, reportados en el bagazo zanahoria (Jabbar et al., 2014) los cuales son considerados como los principales flavonoides en la dieta humana (Anbualakan et al., 2023); por su parte, los taninos, el ácido gálico y el alfa tocoferol, son considerados

como la forma de vitamina E más abundante en la zanahoria (Bhandari et al., 2023; Pereira et al., 2022); además de compuestos fenólicos como el resveratrol o el ácido fólico.

El clúster verde aloja compuestos químicos pertenecientes a los polisacáridos, como celulosa, pectina, almidón y algunos monosacáridos; lo que posibilita el uso de la zanahoria y sus coproductos como fuente de carbohidratos y fibra dietaria (A. Vaz et al., 2022; Luca et al., 2022). El clúster azul contiene el término asociado a agentes antibacteriales, el cual se encuentra ligado a compuestos químicos diversos presentes en diferentes clústeres, como ácido acético, carvacrol, taninos, terpenos y ácido ascórbico; además del ácido clorogénico, el cual puede representar hasta el 82% del total de ácidos fenólicos presentes en la fibra dietaria proveniente de la zanahoria (A. Vaz et al., 2022). El clúster amarillo agrupa diversos elementos metálicos, con importancia en la dieta humana, como lo son el calcio, manganeso, potasio, magnesio, zinc, entre otros.

En el clúster morado, el término antioxidantes se presenta con mayor frecuencia dentro de la red, este término conecta las grandes familias de compuestos químicos que poseen esta propiedad, entre ellos los fenólicos, poli fenólicos y flavonoides presentes en la zanahoria y sus coproductos (Bhandari et al., 2023; Jabbar et al., 2014; Tiwari et al., 2022); además de compuestos químicos asociados a pigmentos como los carotenoides y las antocianinas ligados a aplicaciones en aditivos alimenticios como preservantes y colorantes (Camargo-Herrera et al., 2022; Rodrigues et al., 2022).

En el clúster cian, se agrupan una serie de terpenos como el pineno, carvacrol, cimeno, cariofileno, limoneno entre otros; los cuales comparte conexión con el término agente anti infectivo (Balahbib et al., 2021; Chiboub et al., 2019; Vodnar et al., 2017); Finalmente, el clúster naranja recoge como término central y con la mayor frecuencia a los carotenoides, donde se encuentran ligados compuestos como beta caroteno, alfa caroteno, licopeno y xantofilas, moléculas con gran capacidad antioxidantes, que a su vez se les atribuye propiedades que podrían proteger la piel contra el daño de los rayos UV y reducir el riesgo de contraer cáncer de piel, debido a su estructura y características fisicoquímicas (Ahmad et al., 2019; Anbualakan et al., 2023; Walter & Strack, 2011). Adicionalmente en este

clúster, se encontraron otros compuestos químicos como el panaxinol (tocoferol) y la vitamina A o el retinol, compuesto de gran importancia en la dieta humana, y cuyo precursor más potente es el betacaroteno (Theodosiou et al., 2010); además del ácido ascórbico, reconocido como un compuesto bioactivo de la zanahoria (Schulzova et al., 2022). Los diferentes compuestos bioactivos de los subproductos del cultivo de zanahoria y sus beneficios para la salud están presentes en la Tabla 3-1.

**Tabla 3-1:** Principales compuestos bioactivos presentes en la zanahoria.

<i>Familia química</i>	<i>Componentes bioactivos</i>	<i>Beneficios para la salud</i>
Carotenoides	Betacaroteno, alfacaroteno, licopeno y xantofilas.	Protección de la piel y actividad antioxidante.
Polifenoles	Catequina, epigallocatequina, quercetina, curcumina, ácido gálico, alfa-tocoferol, resveratrol o ácido fólico, ácido clorogénico y otros flavonoides o taninos.	Actividad antioxidante y antiinflamatoria.
Terpenos	Pineno, carvacrol, cimeno, cariofileno, terpineno y limoneno.	Actividad antibacteriana y antiinfecciosa.
Sacáridos	Celulosa, pectina, almidón, carboximetilcelulosa, fructosa, sacarosa y glucosa.	Fuente de fibra.
Minerales	Calcio, manganeso, potasio, magnesio, cobre, hierro, cadmio, fósforo y zinc.	Componentes estructurales y reguladores de procesos corporales.
Ácidos orgánicos	Ácido acético, ácido cumárico, ácido cinámico y ácido ascórbico.	Actividad antibacteriana, antioxidante y antiinfecciosa.
Otros	Antocianinas, clorofila, retinol y quitosano.	

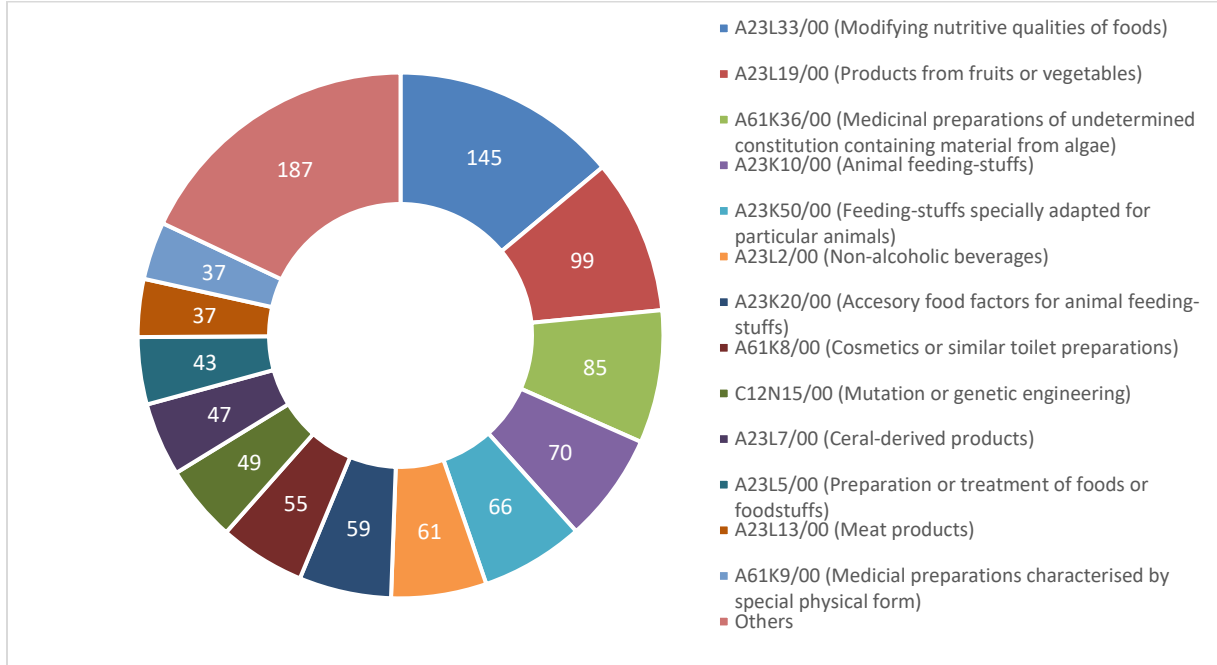
### 3.5.4 Búsqueda y análisis de patentes

A partir de la recuperación de 706 patentes relacionadas a los coproductos de zanahoria, su caracterización y posibles aplicaciones, se realizó un análisis de las mismas en la herramienta PatentInspiration®. Teniendo en cuenta los códigos de clasificación

internacional de patentes (IPC), se pudo determinar las áreas o los grupos principales de agrupamiento de las patentes consultadas; resultando el grupo mayoritario, con un total de 145 patentes, relacionado a la modificación de las cualidades nutritivas de los alimentos (Figura 3-7); donde es posible identificar patentes que incluyen zanahoria fresca o coproductos como cáscara, pulpa, bagazo o jugo en la formulación de alimentos fermentados o enriquecidos con probióticos (L. Li et al., 2022; X. Yi et al., 2020), o en matrices alimentarias cuyo fin es generar un beneficio a la salud; entre los cuales se destaca, la disminución de la fatiga visual (Feng et al., 2020) o los niveles de glucosa en sangre (Hansi et al., 2019).

Otra área de particular interés es la relacionada a la alimentación animal, la cual se encuentra conformada por tres subáreas que suman un total de 189 patentes; en esta área es posible encontrar patentes enfocadas a la formulación de piensos, específicamente con un enfoque en el mercado de mascotas, y con características relevantes como funciones nutricionales y de resistencia oxidativa, mediada por el uso de harina de zanahoria y los compuestos bioactivos presentes en esta, como carotenoides, vitaminas, minerales, entre otros (Jia & Xiaolin, 2018); o la utilización de los mismos en formulaciones de aditivos alimentarios, en este caso, con la propiedad de eliminar o reducir el daño y los residuos de metales pesados nocivos en los organismos animales (Z. Yi et al., 2023). El análisis de estos dos grandes grupos de patentes permite comprender la importancia del área de producción y transformación de alimentos y piensos, como un área de tendencia dentro de la generación de nuevo conocimiento y tecnología, bajo el marco de interés del presente estudio.

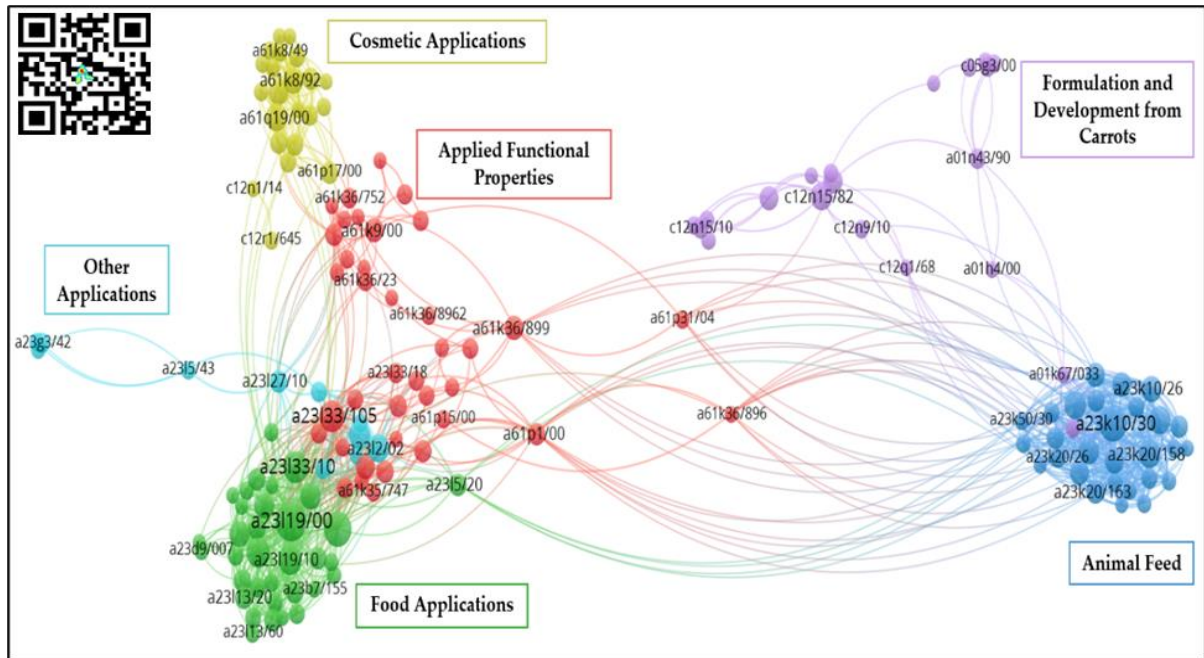
**Figura 3-7:** Tendencias en la publicación de patentes. Elaboración propia Excel con base a información disponible en PatentInspiration®. Fecha de consulta, junio del 2023.



En adición, las preparaciones cosméticas y medicinales son dos grupos de interés que también fueron identificados, aunque en menor proporción, con un total de 55 y 37 patentes, respectivamente. En estas áreas es posible encontrar patentes que incluyen desde la formulación de productos para el cuidado de la piel y el cuerpo con beneficios sobre la eliminación de arrugas, pecas, blanqueamiento o preservación de la humedad de la piel, entre otros (Lai, 2016; Yongjun, 2021); hasta la producción de fracciones de polisacáridos de zanahoria con actividad potenciadora de la función inmunológica del cuerpo (Hyuk et al., 2018).

A su vez, se construyó un paisaje científico de patentes, a través del uso una red de coocurrencias basada en los códigos IPC de las patentes consultadas, en la cual, fue posible determinar la existencia de 6 clústeres que permiten comprender en mayor medida la relación entre las diferentes tendencias de publicación de patentes (Figura 3-8).

**Figura 3-8:** Paisaje científico de patentes. Elaboración propia en VOSviewer® con base a información disponible en PatentInspiration®. Fecha de consulta, junio del 2023.

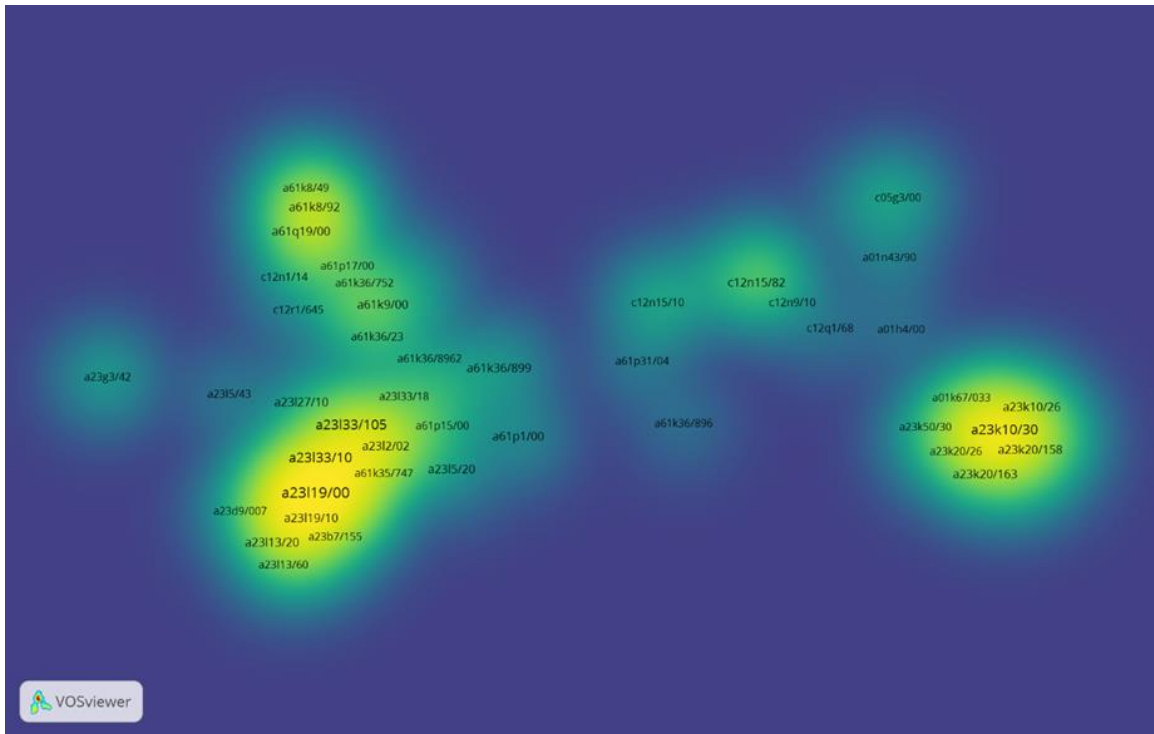


A primera vista, es posible identificar un clúster que presenta una separación notoria con respecto a los demás, el clúster azul - Alimentación animal, el mismo reúne diferentes patentes que están enfocadas a la formulación y producción de piensos animales a partir de la inclusión de zanahoria, o coproductos de la misma; entre las cuales, se encuentran patentes con un enfoque especial en el mercado de mascotas, las cuales se enfocan en la formulación de alimentos con efectos antioxidantes o mejoras en su sistema inmunitario, es decir, alimentos animales nutracéuticos (Zhoun et al., 2018; Zhoun & Xiaolin, 2018). En el clúster verde – Aplicaciones alimentarias, se agrupan las patentes relacionadas a la preparación, formulación y producción de alimentos procesados, o la modificación de los mismos, que incluyen la participación de la zanahoria o sus coproductos. El clúster amarillo - Aplicaciones cosméticas, recoge las patentes que están directamente relacionadas a la industria cosmética, entre las cuáles es posible encontrar la formulación y aplicación de productos a base, o con inclusión de zanahoria como tratamiento para la piel, cabello o el rostro, en donde es posible encontrar desarrollo de productos como cremas y máscaras

enfocados en la remoción del acné, manchas o con efectos antioxidantes (Guangyu & Jue, 2019; Shuming, 2020; Yongjun, 2021); entre otras.

Estos tres clústeres presentan el mayor número de patentes asociadas, por ende, las áreas que generan mayor interés en la actualidad, en términos de la generación de nuevo conocimiento y tecnología; esto se puede apreciar mejor en la Figura 3-9, en donde a través de un mapa de densidades, es posible corresponder las áreas de interés presentes en los clústeres, azul, verde y amarillo con las mayores intensidades, en esta ocasión, representadas por tonalidades intensas de amarillo.

**Figura 3-9:** Mapa de densidades de códigos IPC. Elaboración propia en VOSviewer® con base a información disponible en PatentInspiration®. Fecha de consulta, junio del 2023.



El clúster rojo – Propiedades funcionales aplicadas, es interesante debido a que es el clúster que genera las conexiones entre los clústeres amarillo, verde y azul (Figura 8); esto se comprende al analizar las patentes que se encuentran allí, patentes que se relacionan a una composición bioactiva o una propiedad funcional con beneficios para la salud humana, algunas de ellas con un enfoque hacia formulaciones de alimentos funcionales, y otras, hacia los efectos benéficos de productos cosméticos; todas ellas con inclusión de zanahoria, sus subproductos o extractos (Hansi et al., 2019; Lai, 2016; Shuming, 2020). Esto indica, que par de las patentes no solo tienen un enfoque hacia la industria de alimentos o de cosméticos, si no que, a su vez, la aplicación de estas proporciona algún efecto benéfico para la salud.

El clúster morado - Formulación y desarrollo a partir de zanahoria, reúne patentes alrededor de la formulación de bebidas a base de zanahoria o a partir de la inclusión de algún extracto de esta; y del desarrollo de aditivos alimentarios como colorantes o fibras (Figura 8). Finalmente, el clúster cian – Otras aplicaciones, reúne patentes en relación a aplicaciones de biología molecular o aspectos de fitomejoramiento del cultivo de zanahoria.

La Figura 3-10 abarca la red de coocurrencia de títulos y reclamos de patentes concedidas que especifica las características de valor añadido relacionadas con los productos, procesos y tecnologías utilizados en las actividades de transformación de la zanahoria. Además, el mapa define tres nichos de mercado principales para los resultados de investigación, desarrollo e innovación, el mercado de alimentos saludables para consumo humano, el de piensos funcionales para la nutrición animal (tanto para uso doméstico como pecuario) y el mercado de biocosméticos.

**Figura 3-10:** Red de coocurrencia de títulos y reclamos de patentes concedidas. Elaboración propia en VOSviewer® basada en la información disponible en PatentInspiration®. Fecha de consulta: junio de 2023.



relacionadas con el rendimiento digestivo, la protección de piel y pelaje, la ganancia muscular y el rendimiento tisular, así como la resistencia a enfermedades. Uno de los principales beneficios saludables de la zanahoria en las fórmulas para alimentación animal es la mejora del correcto funcionamiento hepático.

El mercado cosmético se ha diversificado durante la última década mediante el desarrollo de soluciones de base biológica en productos para el cuidado de la piel (clústeres amarillo y azul), incluyendo alternativas sostenibles a los derivados de la industria petroquímica, como aceites esenciales de coco, aguacate, lavanda, linaza, clavo, argán, macadamia, almendra, geranio y, más recientemente, aceite de zanahoria o aceite de semilla de zanahoria. Los extractos oleosos se han empleado en el diseño de productos novedosos para el cuidado de la piel con funciones como curación de quemaduras, hidratación, acción antienvjecimiento y regeneración celular intensiva. Además, extractos de zanahoria combinados con otras semillas, vegetales y frutas (principalmente por su contenido en compuestos bioactivos y aporte de vitaminas activas), se utilizan en la formulación de cosméticos para el cabello, la limpieza diaria y con propiedades regenerativas.

Finalmente, se identifican algunos usos exploratorios en los clústeres amarillo, cian y rosa. El clúster amarillo propone un mercado altamente especializado en la industria farmacéutica, particularmente en fuentes alternativas de vitaminas y minerales para suplementos nutricionales, excipientes, recubrimientos y películas para cápsulas y nanocápsulas. El clúster cian hace énfasis en el uso de compuestos bioactivos de zanahoria en formulaciones médicas (farmacología biológica) para el tratamiento de enfermedades neurodegenerativas. Por último, el clúster rosa agrupa propiedades funcionales relacionadas con actividad antibacteriana y antimicrobiana.

### 3.6 Discusión

El aumento sustancial en el número de publicaciones científicas (Figura 3-1) sobre estos temas de investigación puede atribuirse a la confluencia de diversos factores de orden social, ambiental, político y económico, los cuales reflejan un cambio hacia tecnologías orientadas a la prevención de la generación de residuos, la economía regenerativa y un incremento generalizado en la conciencia ambiental. Desde el ámbito social, la creciente demanda de los consumidores por productos sostenibles ha fomentado colaboraciones intersectoriales profundas y el desarrollo de nuevas tecnologías de caracterización y transformación que permiten aprovechar de manera efectiva los residuos agrícolas, como se refleja en el volumen considerable de literatura científica disponible al respecto (Venkatesh & Se, 2021).

Desde la perspectiva ambiental, la urgencia por hacer frente al cambio climático y reducir la acumulación de residuos como un problema de especie ha impulsado a gobiernos y centros de investigación a buscar nuevos desarrollos para convertir subproductos agrícolas, como la zanahoria, en materias primas o productos finales de valor para industrias como la alimentaria y la cosmética (Venkatesh & Se, 2021). En el ámbito político, las regulaciones y políticas implementadas tanto en países desarrollados como en desarrollo, que promueven la economía circular y la bioeconomía, han proporcionado un marco sólido de apoyo para la investigación y la innovación en este campo. Esto incluye incentivos como subvenciones y políticas públicas que impulsan la valorización de residuos agrícolas en productos de alto valor, reflejando así un entorno político favorable a la transición hacia prácticas más sostenibles (P. Sharma et al., 2021).

Desde el punto de vista económico, la bioeconomía circular se presenta como una estrategia eficaz para transformar residuos en productos de base biológica, lo que no solo reduce los costos asociados a la gestión de residuos, generando incluso beneficios tributarios derivados de la responsabilidad ambiental, sino que también abre nuevas posibilidades para el crecimiento económico y el desarrollo de mercados verdes. Esta correlación entre sostenibilidad y productividad se manifiesta de manera clara en el

aumento de publicaciones científicas sobre el tema (Kardung et al., 2021; P. Sharma et al., 2021; Venkatesh & Se, 2021). La interacción de estos factores impulsa la generación de conocimiento y promueve un marco colaborativo e interdisciplinario, que resulta fundamental para el avance científico en esta área. A su vez, esto refleja un movimiento global orientado hacia la integración de prácticas sostenibles y regenerativas, concebidas como un propósito colectivo de la especie humana.

En el caso de las publicaciones relacionadas con los subproductos del cultivo de zanahoria, el análisis cuantitativo permite establecer tendencias generales, específicas y complementarias, entre ellas la identificación de compuestos bioactivos clave. El análisis de patentes también permite detectar nuevos desarrollos con aplicaciones comerciales en el ámbito del presente estudio. De este modo, es posible comprender la relación entre la generación de conocimiento científico, su nivel de madurez, sus aplicaciones comerciales y su impacto en la industria a partir de la integración de ambas evaluaciones. La Tabla 3-2 proporciona información que facilita la comprensión de este análisis integrado.

**Tabla 3-2:** Integración de tendencias científicas y comerciales en la bioprospección de los subproductos del cultivo de zanahoria.

<i>Tendencia General</i>	<i>Tendencia Específica</i>	<i>Tendencia Complementaria (Compuestos bioactivos clave)</i>	<i>Vocaciones de uso</i>
Compuestos Bioactivos y antioxidantes	Industria de alimentos, alimentos funcionales, alimentación animal, efectos benéficos para la salud, extractos y pigmentos.	Carotenoides (betacaroteno, alfa caroteno, licopeno y xantofilas), polifenoles (catequina, epigallocatequina, quercitina), ácido ascórbico, flavonoides y antocianinas	Alimentos funcionales, aditivos alimentarios, piensos con énfasis en salud animal, productos cosméticos (cuidado de la piel y el cabello); encapsulación de productos.
Propiedades funcionales, fitoterapia y	Actividades antimicrobianas, antifúngicas, desarrollo	Ácido acético, ácido ascórbico, ácido clorogénico, carvacrol, taninos, terpenos, ácido gálico,	Aplicaciones medicinales, desarrollo de productos

desarrollo de aplicaciones medicinales	de productos cosméticos y aplicaciones medicinales	alfa tocoferol, resveratrol y ácido fólico	medicinales y suplementos para la salud ocular.
Transformación, preservación de alimentos y extracción de compuestos	Estudio e implementación de técnicas de extracción y secado	Fenoles, polifenoles y flavonoides, terpenos y fitoesteroles	Desarrollo de tecnologías de procesamiento y conservación; caracterización y aplicación de extractos y aceites esenciales.
Bioprospección, fitoquímica y análisis químico	Estudio e implementación de técnicas de detección e identificación de metabolitos	Carotenoides, polifenoles, ácido ascórbico, flavonoides y antocianinas, polisacáridos	Aplicaciones en la industria farmacéutica, formulación de productos para el cuidado de la piel y el cabello.
Sostenibilidad y bioeconomía circular	Biotecnología, bioeconomía, y economía circular	Polisacáridos como celulosa, pectina, almidón y algunos monosacáridos	Desarrollo de procesos de producción y transformación sostenibles; obtención de compuestos valiosos como fuente de carbohidratos y fibra dietaria.

Las cinco tendencias generales presentadas en la Tabla 3-2, recogen las áreas principales de interés y desarrollo dentro del marco del presente estudio. Los compuestos bioactivos de la zanahoria, su efecto antioxidante y las propiedades funcionales asociadas a estos han demostrado una base científica sólida, como se evidencia en la Figura 3-2, que muestra un aumento en la producción científica en torno al interés por explorar los posibles usos de los subproductos del cultivo de zanahoria.

La primera tendencia general es visible en los principales clústeres mostrados en las Figuras 3-3 y 3-5, donde las propiedades antioxidantes y funcionales de los subproductos

de zanahoria representan las áreas de mayor interés y la mayor cantidad de publicaciones científicas. Los compuestos que conforman la tendencia complementaria (carotenoides, polifenoles, ácido ascórbico, flavonoides y antocianinas), relacionados con la tendencia general de compuestos bioactivos, están siendo empleados en patentes orientadas a la creación de alimentos funcionales, aditivos, productos medicinales y suplementos. Esto podría indicar que el conocimiento científico ha sido transferido con éxito al sector comercial, donde es posible encontrar patentes vinculadas a subproductos de zanahoria en matrices alimentarias con intención de ofrecer beneficios para la salud (Hansi et al., 2019), productos para el cuidado de la piel y corporal (Lai, 2016), o con propiedades antioxidantes (Shuming, 2020).

Por otro lado, las propiedades funcionales de la zanahoria y sus bien conocidas actividades positivas, antioxidantes, antimicrobianas, antifúngicas, entre otras, evidencian una relación estrecha con la industria alimentaria tanto humana como animal. Esto incluye la elaboración de alimentos balanceados, la adición de subproductos, residuos y extractos de zanahoria a otras matrices alimenticias, así como la publicación de patentes para productos que mejoran la salud de personas y animales. Como se muestra en la Figura 3-3, el clúster verde conecta diversas propiedades funcionales con el término “fitoterapia” y algunos beneficios para la salud. De manera similar, la Figura 3-10 presenta de forma clara estos dos nichos de mercado principales para la investigación, el desarrollo y la innovación: el mercado de alimentos saludables para consumo humano y el mercado de alimentación funcional para nutrición animal.

La implementación de metodologías de extracción y secado con el objetivo de maximizar el aprovechamiento de los subproductos del cultivo de zanahoria fortalece las investigaciones sobre técnicas de procesamiento y conservación de alimentos con aplicaciones comerciales. Estas metodologías permiten de forma adicional el desarrollo e implementación de estrategias para la detección y cuantificación de metabolitos. El análisis químico y la bioprospección fitoquímica se encuentran en el núcleo de estos enfoques, en

los cuales la red de coocurrencia de compuestos químicos (Figura 3-6) es un factor determinante, no solo para identificar los principales compuestos bioactivos (Tabla 3-1), sino también para comprender sus interacciones con otros compuestos, la riqueza química de un alimento o producto y sus propiedades funcionales inherentes. Para facilitar su uso en aplicaciones comerciales, estos procedimientos resultan esenciales tanto para la identificación de compuestos bioactivos como para la caracterización integral de la zanahoria y sus subproductos. Esto se enmarca en una tendencia creciente en la intersección entre la sostenibilidad ambiental y la ciencia, es decir, en sistemas de producción influenciados por los principios de la bioeconomía circular.

Por tanto, resulta esencial comprender el estado de madurez científica de un área de investigación a partir del análisis de las publicaciones relacionadas, ya que establecer tanto las tendencias generales como las específicas del campo se vuelve crucial para sustentar el desarrollo de productos y aplicaciones comerciales o industriales, es decir, el desarrollo de patentes. En este sentido, la aplicación de un marco metodológico para la bioprospección fitoquímica, como el propuesto en este trabajo, permite comprender los distintos niveles de madurez tecnológica (TRL) en diversos desarrollos científicos y tecnológicos (Mankins, 1995; Olechowski et al., 2020).

Esta comprensión no solo se aplica a los subproductos del cultivo de zanahoria, sino también a cualquier otra matriz agroalimentaria. Los análisis bibliométricos y cientiométricos ayudan a identificar avances de investigación correspondientes a los niveles iniciales de TRL, mientras que los desarrollos comerciales e industriales determinados a través del análisis de patentes podrían ubicarse en niveles TRL 6 o superiores. Adicionalmente, este enfoque permite entender que la ausencia de áreas de desarrollo comercial o industrial en un análisis de patentes puede estar asociada con vacíos existentes en la investigación, lo cual representa una oportunidad para la generación de nuevo conocimiento.

Si bien se identificaron diversas vocaciones de uso para los excedentes de producción de zanahoria, esos podrían implicar el uso de metodologías o tecnologías no solo de alta

---

demanda si no, de alto costo adquisitivo y operativo, por lo cual, una limitación importante podría ser la falta de una evaluación detallada sobre la viabilidad de los procesos de extracción de compuestos químicos, el aprovechamiento de sus propiedades biofuncionales inherentes, la transformación y comercialización de prototipos o productos desarrollados. La adopción de ciertas tecnologías podría representar un escenario complejo para las pequeñas industrias, gremios o asociaciones agropecuarias y productores, esto debido a sus elevados costos adquisitivos, operativos y requisitos técnicos. Por lo tanto, es necesaria la integración de los diferentes actores de la cadena productiva y otras cadenas para el establecimiento de esquemas de valorización sostenible y rentable, en los cuales a través de procesos de innovación abierta y/o transferencia tecnológica entre el sector académico, centros de investigación y desarrollo tecnológico, agroindustrias locales, especialmente aquellas involucradas en transformación con infraestructura adecuada y productores primarios; permitiendo así la generación de enlaces de cooperación y abriendo las posibilidades a oportunidades de transformación, diversificación y generación de valor agregado de la zanahoria que impulse el desarrollo bioeconómico de la región (Moreno-Rodríguez et al., 2025).

### **3.7 Conclusiones**

La bioprospección respaldada por una vigilancia científica, en donde se incluyen metodologías como análisis bibliométrico, cienciométrico, de patentes, mediado por el uso de herramientas tecnológicas, es una estrategia poderosa para explorar y explotar el potencial de los excedentes de producción y subproductos de la zanahoria; y en general, de otras matrices alimentarias. Esto no solo beneficia a la investigación científica, al identificar las tendencias en la generación de conocimiento o las nuevas áreas de interés, al mismo tiempo, puede impulsar la innovación en las diferentes industrias mediante el desarrollo de nuevos productos y procesos; mientras se promueve la sostenibilidad, al aprovechar de manera más eficiente los recursos disponibles. A través de esta integración, se demuestra cómo la investigación científica está impulsando la innovación en la industria,

la creación de productos y la aplicación de tecnologías de vanguardia, mediado por un proceso de bioprospección fitoquímica basado en el desarrollo de una vigilancia científica, la cual ha tomado los subproductos del cultivo de zanahoria como punto de partida; sin embargo, en términos generales, una aplicación de este marco metodológico puede permitir el desarrollo de un proceso de bioprospección fitoquímica en cualquier matriz agroalimentaria.

El marco metodológico para la bioprospección fitoquímica implementado ha identificado una serie de compuestos bioactivos presentes en las zanahorias, como carotenoides, flavonoides, polifenoles, entre otros; los cuales se han relacionado con diversas propiedades funcionales y beneficios para la salud, lo que sugiere un fuerte potencial en la industria alimentaria, farmacéutica y en áreas como la cosmetología y la medicina; mediante el desarrollo de alimentos funcionales, productos relacionados con el cuidado de la piel y la salud, además de la alimentación animal.

A lo largo de la última década, se observó un crecimiento constante en la investigación relacionada con los subproductos del cultivo de zanahoria, este aumento en la producción científica sugiere un creciente interés en explorar las oportunidades y aplicaciones de estos en una amplia variedad de áreas, desde las ciencias biológicas, agrícolas y alimentarias, hasta la fitoquímica y la medicina. Esta diversidad de áreas de interés refleja el potencial versátil de la zanahoria y los subproductos de su cultivo.



## 4. Conclusiones y recomendaciones

### 4.1 Conclusiones

La presente tesis permitió demostrar el potencial de valorización de los excedentes de producción de zanahoria (*Daucus carota* L.) a través de una aproximación multidimensional que integra caracterización fisicoquímica, análisis metabolómico y vigilancia científica orientada a la bioprospección fitoquímica.

Los excedentes de producción de zanahoria generados en el oriente del Departamento de Antioquia representan una fuente estratégica de biomasa vegetal con alto valor funcional y un potencial de aprovechamiento en múltiples industrias. A través de una aproximación integrada que combinó caracterización multidimensional (fisicoquímica, bromatológica y biofuncional), análisis metabolómico y vigilancia científica, se evidenció, que aunque es poca o nula su comercialización directa en la actualidad, presentan una riqueza química y unas características funcionales comparables e incluso superiores a las de las zanahorias estándares comerciales, sus altos contenidos de fibra dietaria, carotenoides, compuestos fenólicos totales y una actividad antioxidante destacable, evidencia su relevancia como materia prima funcional o fuente de compuestos químicos y nutraceuticos de alto valor, posicionando a los excedentes de producción de zanahoria como insumos viables para el desarrollo de ingredientes funcionales, suplementos alimentarios y productos cosméticos naturales para distintos sectores industriales.

El perfil metabolómico obtenido permitió identificar 90 metabolitos diferenciadores entre tipologías y localidades de origen, revelando la presencia de compuestos de alto interés, tales como flavonoides, alcaloides, terpenoides y ácidos fenólicos, cuya expresión varía según las condiciones microclimáticas de esta biomasa residual, destacándose compuestos como Nuciferina, Criptotanshinona, Feruloiltiramina y Microcistina LW, todos ellos con propiedades bioactivas relevantes. Este hallazgo no solo confirma el valor

fitoquímico de los subproductos, sino que también abre la posibilidad de desarrollar estrategias de producción y aprovechamiento diferenciadas por zona de cultivo, para la valorización selectiva de compuestos bioactivos, contribuyendo a la optimización y valorización de la misma cadena productiva.

El diseño e implementación de un marco metodológico como guía para el establecimiento de procesos de bioprospección fitoquímica, permitió mapear el estado actual del conocimiento y las aplicaciones emergentes de los excedentes de producción de zanahoria, revelando un panorama de creciente interés científico y comercial en torno a su valorización, además, de identificar vacíos investigativos y oportunidades de innovación en sectores como la alimentación funcional, la industria cosmética, farmacéutica, nutraceútica y la nutrición animal. Permitiendo, además, mediante de la integración de herramientas de análisis bibliométrico, cuantitativo y patentométrico, extrapolar esta metodología a otras matrices agroalimentarias.

En conjunto, los hallazgos de esta investigación respaldan la transición hacia modelos de producción más sostenibles basados en los principios de la economía circular y fundamentados en la revalorización de residuos agrícolas mediante ciencia, tecnología e innovación. Este enfoque contribuye a la reducción de pérdidas en la producción primaria agrícola y en la etapa de poscosecha, y además promueve la articulación entre conocimiento científico, la innovación industrial y el desarrollo territorial.

## 4.2 Recomendaciones

Se recomienda que futuras investigaciones profundicen en la evaluación toxicológica y funcional de los compuestos identificados, así como en el escalamiento de procesos de extracción, purificación y formulación de productos biofuncionales. Igualmente se sugiere articular estos resultados con políticas públicas que promuevan la reducción de pérdidas en la producción primaria agrícola y en la etapa de poscosecha, además del fomento de procesos de transformación e industrialización basados en el uso de residuos agroalimentarios como fuente de materia prima.

Si bien este estudio se centró en el análisis de documentos científicos (artículos, artículos de revisión, capítulos de libros, entre otros) provenientes de la base de datos Scopus®, los resultados obtenidos permiten identificar tendencias clave en la bioprospección fitoquímica de la zanahoria. Sin embargo, es necesario realizar investigaciones futuras más amplias que incluyan otras bases de datos como Web of Science®, PubMed®, Google Scholar o Dimensions®, con el objetivo de fortalecer el conocimiento en esta área y avanzar en la bioprospección fitoquímica. Esto permitirá construir una base de conocimiento más completa y ampliar el horizonte para futuras investigaciones más robustas, no solo en zanahoria, si no en cualquier otra matriz agroalimentaria.



## 5. Bibliografía

*1-Hexadecanoylpyrrolidine* | C<sub>20</sub>H<sub>39</sub>NO | CID 247220 - PubChem. (n.d.). Retrieved January 12, 2025, from <https://pubchem.ncbi.nlm.nih.gov/compound/247220#section=2D-Structure>

*3-Hydroxy-4'-methoxyflavone (4'-Methoxyflavonol)* | C<sub>32</sub>H<sub>24</sub>O<sub>8</sub> | CID 171036846 - PubChem. (n.d.). Retrieved January 12, 2025, from <https://pubchem.ncbi.nlm.nih.gov/compound/171036846#section=2D-Structure>

A. Vaz, A., Odriozola-Serrano, I., Oms-Oliu, G., & Martín-Belloso, O. (2022). Physicochemical Properties and Bioaccessibility of Phenolic Compounds of Dietary Fibre Concentrates from Vegetable By-Products. *Foods*, 11(17). <https://doi.org/10.3390/foods11172578>

Abdelfatah, S., Naß, J., Knorz, C., Klauck, S. M., Küpper, J. H., & Efferth, T. (2022). Pyrrolizidine alkaloids cause cell cycle and DNA damage repair defects as analyzed by transcriptomics in cytochrome P450 3A4-overexpressing HepG2 clone 9 cells. *Cell Biology and Toxicology*, 38(2), 325–345. <https://doi.org/10.1007/S10565-021-09599-9/FIGURES/12>

Abdelwahab, S. I., & Mohamed, M. M. E. T. (2022). A comprehensive bibliometric analysis of *Catha edulis* (Vahl) Endli (Khat) research (1961–2021). *Bulletin of the National Research Centre*, 46(1). <https://doi.org/10.1186/S42269-022-00967-X>

*Agronet*. (2023). <https://www.agronet.gov.co/Paginas/inicio.aspx>

*Agronet*. (2025, March 25). <https://www.agronet.gov.co/estadistica/Paginas/home.aspx?cod=1>

Ahmad, T., Cawood, M., Iqbal, Q., Ariño, A., Batool, A., Sabir Tariq, R. M., Azam, M., & Akhtar, S. (2019). Phytochemicals in *daucus carota* and their health benefits—review article. In *Foods* (Vol. 8, Issue 9). MDPI Multidisciplinary Digital Publishing Institute. <https://doi.org/10.3390/FOODS8090424>

Akhatou, I., González-Domínguez, R., & Fernández-Recamales, Á. (2016). Investigation of the effect of genotype and agronomic conditions on metabolomic profiles of selected strawberry cultivars with different sensitivity to environmental stress. *Plant*

---

*Physiology and Biochemistry*, 101, 14–22.  
<https://doi.org/10.1016/J.PLAPHY.2016.01.016>

- Alessandro, M. S., Galmarini, C. R., Iorizzo, M., & Simon, P. W. (2013). Molecular mapping of vernalization requirement and fertility restoration genes in carrot. *Theoretical and Applied Genetics*, 126(2), 415–423. <https://doi.org/10.1007/s00122-012-1989-1>
- Almeida, J., Perez-Fons, L., & Fraser, P. D. (2021). A transcriptomic, metabolomic and cellular approach to the physiological adaptation of tomato fruit to high temperature. *Plant Cell and Environment*, 44(7), 2211–2229. <https://doi.org/10.1111/PCE.13854>
- Anbualakan, K., Tajul Urus, N. Q., Makpol, S., Jamil, A., Mohd Ramli, E. S., Md Pauzi, S. H., & Muhammad, N. (2023). A Scoping Review on the Effects of Carotenoids and Flavonoids on Skin Damage Due to Ultraviolet Radiation. In *Nutrients* (Vol. 15, Issue 1). MDPI. <https://doi.org/10.3390/nu15010092>
- Aniszewski, T. (2015). Biology of alkaloids. In *Alkaloids* (second, pp. 195–258). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-444-59433-4.00003-1>
- AOAC Official Method 932.12Solids (Soluble) in Fruits and Fruit Products: Refractometer Method. (2023). *Official Methods of Analysis of AOAC INTERNATIONAL*. <https://doi.org/10.1093/9780197610145.003.3368>
- AOAC Official Method 934.06Loss on Drying (Moisture) in Dried Fruits. (2023). *Official Methods of Analysis of AOAC INTERNATIONAL*. <https://doi.org/10.1093/9780197610145.003.3363>
- AOAC Official Method 981.12pH of Acidified Foods. (2023). *Official Methods of Analysis of AOAC INTERNATIONAL*. <https://doi.org/10.1093/9780197610145.003.3563>
- AOAC Official Method 991.43Total, Soluble, and Insoluble Dietary Fiber in Foods: Enzymatic-Gravimetric Method, MES-TRIS Buffer. (2023). *Official Methods of Analysis of AOAC INTERNATIONAL*. <https://doi.org/10.1093/9780197610145.003.2941>
- AOAC Official Method 2018.16Sugar Profile in Food, Dietary Supplements, Pet Food, and Animal Feeds: High-Performance Anion-Exchange Chromatography with Pulsed Amperometric Detection. (2023). *Official Methods of Analysis of AOAC INTERNATIONAL*. <https://doi.org/10.1093/9780197610145.003.3664>
- Babar, M., Buzdar, J. A., Zaheer, A., Nizam-ud-din, N., Mustafa, G., Khan, B. A., Hanif, M., Asghar, T., & Qadeer, A. (2025). Carotenoids as a nutraceutical and health-promoting dietary supplement for human and animals: an updated review. *Traditional Medicine Research*, 10(3), 14. <https://doi.org/10.53388/TMR20240831001>

- Babic, I., Amiot, M. J., Nguyen-The, C., & Aubert, S. (1993). Changes in Phenolic Content in Fresh Ready-to-use Shredded Carrots during Storage. *Journal of Food Science*, 58(2).
- Baiano, A. (2014). Recovery of Biomolecules from Food Wastes — A Review. *Molecules* 2014, Vol. 19, Pages 14821-14842, 19(9), 14821–14842. <https://doi.org/10.3390/MOLECULES190914821>
- Balahbib, A., Omari, N. El, Hachlafi, N. El, Lakhdar, F., Menyiy, N. El, Salhi, N., Mrabti, H. N., Bakrim, S., Zengin, G., & Bouyahya, A. (2021). Health beneficial and pharmacological properties of p-cymene. *Food and Chemical Toxicology*, 153, 112259. <https://doi.org/10.1016/j.fct.2021.112259>
- Benzie, I. F. F., & Strain, J. J. (1996). The Ferric Reducing Ability of Plasma (FRAP) as a Measure of “Antioxidant Power”: The FRAP Assay. *Analytical Biochemistry*, 239(1), 70–76. <https://doi.org/10.1006/ABIO.1996.0292>
- Bhandari, S. R., Choi, C. S., Rhee, J., Shin, Y. K., Song, J. W., Kim, S. H., Kang, S., & Lee, J. G. (2023). Influence of Root Color and Tissue on Phytochemical Contents and Antioxidant Activities in Carrot Genotypes. *Foods*, 12(1). <https://doi.org/10.3390/foods12010120>
- Blois, M. S. (1958). Antioxidant determinations by the use of a stable free radical [10]. *Nature*, 181(4617), 1199–1200. <https://doi.org/10.1038/1811199A0;KWRD>
- Brahmi, F., Lounis, N., Mebarakou, S., Guendouze, N., Yalaoui-Guellal, D., Madani, K., Boulekbache-Makhlouf, L., & Duez, P. (2022). Impact of Growth Sites on the Phenolic Contents and Antioxidant Activities of Three Algerian Mentha Species (*M. pulegium* L., *M. rotundifolia* (L.) Huds., and *M. spicata* L.). *Frontiers in Pharmacology*, 13, 886337. <https://doi.org/10.3389/FPHAR.2022.886337/BIBTEX>
- Brivaldo Viana Da Silva, P., Brenelli, B., Regina, L., & Mariutti, B. (2023). Waste and by-products as sources of lycopene, phytoene, and phytofluene-Integrative review with bibliometric analysis. *Food Research International*, 169, 112838. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2023.112838>
- Bulc Rozman, K., Jurič, D. M., & Šuput, D. (2017). Selective cytotoxicity of microcystins LR, LW and LF in rat astrocytes. *Toxicology Letters*, 265, 1–8. <https://doi.org/10.1016/J.TOXLET.2016.11.008>
- Cámara de comercio de Bogotá. (2015). *Manual zanahoria*.
- Camargo-Herrera, Á. D., Bernal-Castro, C., Gutiérrez-Cortes, C., Castro, C. N., & Díaz-Moreno, C. (2022). Bio-yogurt with the inclusion of phytochemicals from carrots (*Daucus carota*): a strategy in the design of functional dairy beverage with probiotics. In *Journal of Food Science and Technology*. Springer. <https://doi.org/10.1007/s13197-022-05510-4>

- 
- Caprarulo, V., Ventura, V., Amatucci, A., Ferronato, G., & Gilioli, G. (2022). Innovations for Reducing Methane Emissions in Livestock toward a Sustainable System: Analysis of Feed Additive Patents in Ruminants. *Animals*, 12(20). <https://doi.org/10.3390/ani12202760>
- Caruso, G., Floris, R., Serangeli, C., & Di Paola, L. (2020). Fishery Wastes as a Yet Undiscovered Treasure from the Sea: Biomolecules Sources, Extraction Methods and Valorization. *Marine Drugs* 2020, Vol. 18, Page 622, 18(12), 622. <https://doi.org/10.3390/MD18120622>
- Centrales de Abasto. (2023). *Plaza En Vivo*. <https://plazaenvivo.com/>
- Chandra Nath, P., Ojha, A., Debnath, S., Neetu, K., Bardhan, S., Mitra, P., Sharma, M., Sridhar, K., & Kumar Nayak, P. (2023). Recent advances in valorization of pineapple (*Ananas comosus*) processing waste and by-products: A step towards circular bioeconomy. *Trends in Food Science & Technology*, 136, 100–111. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2023.04.008>
- Chauhan, C., Dhir, A., Akram, M. U., & Salo, J. (2021). Food loss and waste in food supply chains. A systematic literature review and framework development approach. *Journal of Cleaner Production*, 295, 126438. <https://doi.org/10.1016/J.JCLEPRO.2021.126438>
- Chelghoum, M., Guenane, H., Tahri, D., Laggoun, I., Marfoua, F. Z., Rahmani, F. Z., Khenifer, F., & Yousfi, M. (2021). Influence of altitude, precipitation, and temperature factors on the phytoconstituents, antioxidant, and  $\alpha$ -amylase inhibitory activities of *Pistacia atlantica*. *Journal of Food Measurement and Characterization*, 15(5), 4411–4425. <https://doi.org/10.1007/S11694-021-01006-5/TABLES/7>
- Chen, Q., Liu, Y., Zhu, Y., Zhu, Z., Zou, J., Pan, Y., Lu, Y., & Chen, W. (2024). Cryptotanshinone inhibits PFK-mediated aerobic glycolysis by activating AMPK pathway leading to blockade of cutaneous melanoma. *Chinese Medicine (United Kingdom)*, 19(1), 1–14. <https://doi.org/10.1186/S13020-024-00913-1/FIGURES/8>
- Chevalier, W., Moussa, S. A., Ottoni, M. M. N., Dubois-Laurent, C., Huet, S., Aubert, C., Desnoues, E., Navez, B., Cottet, V., Chalot, G., Jost, M., Barrot, L., Freymark, G., Uittenbogaard, M., Chaniet, F., Gauffreteau, A., Suel, A., Merlet, M. H. B., Hamama, L., ... Geoffriau, E. (2022). Evaluation of pedoclimatic factors and cultural practices effects on carotenoid and sugar content in carrot root. *European Journal of Agronomy*, 140, 126577. <https://doi.org/10.1016/J.EJA.2022.126577>
- Chevalier, W., Moussa, S. A., Ottoni, M. M. N., Dubois-Laurent, C., Huet, S., Aubert, C., Desnoues, E., Navez, B., Cottet, V., Chalot, G., Jost, M., Barrot, L., Freymark, G., Uittenbogaard, M., Chaniet, F., Suel, A., Merlet, M. H. B., Hamama, L., Le Clerc, V.,

- ... Geoffriau, E. (2021). Multisite evaluation of phenotypic plasticity for specialized metabolites, some involved in carrot quality and disease resistance. *PLOS ONE*, *16*(4), e0249613. <https://doi.org/10.1371/JOURNAL.PONE.0249613>
- Chiboub, W., Sassi, A. Ben, Amina, C. M. hamed, Souilem, F., El Ayeb, A., Djlassi, B., Ascrizzi, R., Flamini, G., & Harzallah-Skhiri, F. (2019). Valorization of the Green Waste from Two Varieties of Fennel and Carrot Cultivated in Tunisia by Identification of the Phytochemical Profile and Evaluation of the Antimicrobial Activities of Their Essentials Oils. *Chemistry and Biodiversity*, *16*(1). <https://doi.org/10.1002/cbdv.201800546>
- Christensen, L. P., & Brandt, K. (2006). Bioactive polyacetylenes in food plants of the Apiaceae family: Occurrence, bioactivity and analysis. *Journal of Pharmaceutical and Biomedical Analysis*, *41*(3), 683–693. <https://doi.org/10.1016/J.JPBA.2006.01.057>
- Clementz, A., Torresi, P. A., Molli, J. S., Cardell, D., Mammarella, E., & Yori, J. C. (2019). Novel method for valorization of by-products from carrot discards. *LWT*, *100*, 374–380. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2018.10.085>
- Cornara, L., Sgrò, F., Raimondo, F. M., Ingegneri, M., Mastracci, L., D'Angelo, V., Germanò, M. P., Trombetta, D., & Smeriglio, A. (2023). Pedoclimatic Conditions Influence the Morphological, Phytochemical and Biological Features of *Mentha pulegium* L. *Plants*, *12*(1), 24. <https://doi.org/10.3390/PLANTS12010024/S1>
- Cryptotanshinone* | C<sub>19</sub>H<sub>20</sub>O<sub>3</sub> | CID 160254 - PubChem. (n.d.). Retrieved January 12, 2025, from <https://pubchem.ncbi.nlm.nih.gov/compound/160254#section=2D-Structure>
- Cubero-Leon, E., De Rudder, O., & Maquet, A. (2018). Metabolomics for organic food authentication: Results from a long-term field study in carrots. *Food Chemistry*, *239*, 760–770. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2017.06.161>
- DANE. (2017). *INSUMOS Y FACTORES ASOCIADOS A LA PRODUCCIÓN AGROPECUARIA, Características relevantes en el cultivo de la zanahoria (Daucus carota L.) en Colombia y estudios de caso sobre costos de producción en los municipios de Madrid (Cundinamarca) y Ventaquemada (Boyacá)*. [https://www.dane.gov.co/files/investigaciones/agropecuario/sipsa/Bol\\_Insumos\\_jun\\_2017.pdf](https://www.dane.gov.co/files/investigaciones/agropecuario/sipsa/Bol_Insumos_jun_2017.pdf)
- Davis, R. M. (2004). Carrot Diseases and their Management. In *Diseases of Fruits and Vegetables Volume I* (pp. 397–439). Springer, Dordrecht. [https://doi.org/10.1007/1-4020-2606-4\\_10](https://doi.org/10.1007/1-4020-2606-4_10)
- de Andrade, É., & de Magalhães, A. M. T. (2023). Bioprospecting and potential of cactus mucilages: A bibliometric review. *Food Chemistry*, *401*, 134121. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2022.134121>

- 
- de Solla Price, D. (1976). *A General Theory of Bibliometric and Other Cumulative Advantage Processes*.
- Distéfano, A. M., Martín, M. V., Córdoba, J. P., Bellido, A. M., D'Ippólito, S., Colman, S. L., Soto, D., Roldán, J. A., Bartoli, C. G., Zabaleta, E. J., Fiol, D. F., Stockwell, B. R., Dixon, S. J., & Pagnussat, G. C. (2017). Heat stress induces ferroptosis-like cell death in plants. *Journal of Cell Biology*, 216(2), 463–476.  
<https://doi.org/10.1083/JCB.201605110/VIDEO-4>
- Dixit, S., Shukla, A., Singh, V., & Kumar, S. (2021). Bioprospecting of Natural Compounds for Industrial and Medical Applications. In S. Kumar Upadhyay & S. P. . Singh (Eds.), *Bioprospecting of Plant Biodiversity for Industrial Molecules*, (1st ed., pp. 53–71). John Wiley & Sons Ltd.
- Do Socorro Chagas, M. S., Behrens, M. D., Moragas-Tellis, C. J., Penedo, G. X. M., Silva, A. R., & Gonçalves-De-Albuquerque, C. F. (2022). Flavonols and Flavones as Potential anti-Inflammatory, Antioxidant, and Antibacterial Compounds. *Oxidative Medicine and Cellular Longevity*, 2022(1), 9966750.  
<https://doi.org/10.1155/2022/9966750>
- Domínguez, R., Munekata, P. E. S., Pateiro, M., Maggiolino, A., Bohrer, B., & Lorenzo, J. M. (2020). Red Beetroot. A Potential Source of Natural Additives for the Meat Industry. *Applied Sciences* 2020, Vol. 10, Page 8340, 10(23), 8340.  
<https://doi.org/10.3390/APP10238340>
- Drobac Backović, D., & Tokodi, N. (2024). Cyanotoxins in food: Exposure assessment and health impact. *Food Research International*, 184, 114271.  
<https://doi.org/10.1016/J.FOODRES.2024.114271>
- Durán-Aranguren, D. D., Robledo, S., Gomez-Restrepo, E., Valencia, J. W. A., & Tarazona, N. A. (2021). Scientometric overview of coffee by-products and their applications. In *Molecules* (Vol. 26, Issue 24). MDPI.  
<https://doi.org/10.3390/molecules26247605>
- Eliopoulos, C., Markou, G., Langousi, I., & Arapoglou, D. (2022). Reintegration of Food Industry By-Products: Potential Applications. In *Foods* (Vol. 11, Issue 22). MDPI.  
<https://doi.org/10.3390/foods11223743>
- Elsevier. (2023). *How Scopus works: Information about Scopus product features*.  
<https://www.elsevier.com/solutions/scopus/how-scopus-works>
- El-Shabasy, R. M., F. Eissa, T., Emam, Y., Zayed, A., Fayek, N., & Farag, M. A. (2024). Valorization potential of Egyptian mango kernel waste product as analyzed via GC/MS metabolites profiling from different cultivars and geographical origins.

- Scientific Reports* 2024 14:1, 14(1), 1–14. <https://doi.org/10.1038/S41598-024-53379-4>
- Esposito, B. S., Guarda, S., Pinho, B., Thomazini, M., Ramos, A. P., Tapia-Blácido, R., & Martelli-Tosi, M. (2022). TPP-chitosomes as potential encapsulation system to protect carotenoid-rich extract obtained from carrot by-product: A comparison with liposomes and chitosomes. *Food Chemistry*, 397. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2022.133857>
- Fang, Z., Jiang, X., Wang, S., Tai, W., Jiang, Q., Loo, J. J., Yu, H., Hao, X., Chen, M., Shao, Q., Song, Y., Lei, L., Liu, G., Du, X., & Li, X. (2024). Nuciferine protects bovine hepatocytes against free fatty acid-induced oxidative damage by activating the transcription factor EB/peroxisome proliferator-activated receptor  $\gamma$  coactivator 1 alpha pathway. *Journal of Dairy Science*, 107(1), 625–640. <https://doi.org/10.3168/JDS.2022-22801>
- FAOSTAT. (2023). Cultivos y Productos de Ganadería. <https://www.fao.org/faostat/es/#data>
- FAOSTAT. (2025). <https://www.fao.org/faostat/es/#data/QCL>
- Feng, L., Tao, M., Shuai, S., Yuhao, Z., & Haixuan, W. (2020). *Carrot fermentation liquor and beverage for relieving asthenopia, and preparation method and application thereof* (Patent CN110651919A). <https://patents.google.com/patent/CN110651919A/en?q=CN110651919A>
- Fick, S. E., & Hijmans, R. J. (2017). WorldClim 2: new 1-km spatial resolution climate surfaces for global land areas. *International Journal of Climatology*, 37(12), 4302–4315. <https://doi.org/10.1002/JOC.5086>
- Filho, D. S. M. P., de Macedo, D. D. J., & Dutra, M. L. (2022). Technological Surveillance in Big Data Environments by using a MapReduce-based Method. *Mobile Networks and Applications*, 27(5), 1931–1940. <https://doi.org/10.1007/s11036-022-01962-2>
- Flórez-Martínez, D. H., Contreras-Pedraza, C. A., Escobar-Parra, S., & Rodríguez-Cortina, J. (2023). Key Drivers for Non-Centrifugal Sugar Cane Research, Technological Development, and Market Linkage: A Technological Roadmap Approach for Colombia. *Sugar Tech*, 25(2), 373–385. <https://doi.org/10.1007/s12355-022-01200-9>
- Flórez-Martínez, D. H., Contreras-Pedraza, C. A., & Rodríguez, J. (2021). A systematic analysis of non-centrifugal sugar cane processing: Research and new trends. *Trends in Food Science & Technology*, 107, 415–428. <https://doi.org/10.1016/J.TIFS.2020.11.011>
- Flórez-Martínez, D. H., & Uribe-Galvis, C. P. (2020). Fourth industrial revolution technologies for agriculture sector: A trend analysis in agriculture 4.0. *Proceedings of*

*the LACCEI International Multi-Conference for Engineering, Education and Technology*. <https://doi.org/10.18687/LACCEI2020.1.1.11>

- Forino, M., Tartaglione, L., Dell'Aversano, C., & Ciminiello, P. (2016). NMR-based identification of the phenolic profile of fruits of *Lycium barbarum* (goji berries). Isolation and structural determination of a novel N-feruloyl tyramine dimer as the most abundant antioxidant polyphenol of goji berries. *Food Chemistry*, *194*, 1254–1259. <https://doi.org/10.1016/J.FOODCHEM.2015.08.129>
- Fukusaki, E. (2015). Application of Metabolomics for High-Resolution Phenotype Analysis. In *Rinsho byori. The Japanese journal of clinical pathology* (Vol. 63, Issue 6, pp. 736–745). <https://doi.org/10.5702/massspectrometry.s0045>
- García-Hernández, Á., Roldán-Cruz, C., Vernon-Carter, E. J., & Alvarez-Ramirez, J. (2023). Stale bread waste recycling as ingredient for fresh oven-baked white bread: effects on dough viscoelasticity, bread molecular organization, texture, and starch digestibility. *Journal of the Science of Food and Agriculture*. <https://doi.org/10.1002/jsfa.12442>
- García-Villar, C., & García-Santos, J. M. (2021). Indicadores bibliométricos para evaluar la actividad científica. *Radiología*, *63*(3), 228–235. <https://doi.org/10.1016/J.RX.2021.01.002>
- Georganas, A., Giamouri, E., Pappas, A. C., Papadomichelakis, G., Galliou, F., Manios, T., Tsiplakou, E., Fegeros, K., & Zervas, G. (2020). Bioactive Compounds in Food Waste: A Review on the Transformation of Food Waste to Animal Feed. *Foods 2020*, Vol. 9, Page 291, *9*(3), 291. <https://doi.org/10.3390/FOODS9030291>
- Gerardi, C., Tommasi, N., Albano, C., Blando, F., Rescio, L., Pinthus, E., & Mita, G. (2015). Prunus mahaleb L. fruit extracts: a novel source for natural food pigments. *European Food Research and Technology*, *241*(5), 683–695. <https://doi.org/10.1007/S00217-015-2495-X/METRICS>
- Gong, Y., Deng, G., Han, C., & Ning, X. (2015). *Process optimization based on carrot powder color characteristics*. <https://doi.org/10.1016/j.eaef.2015.07.005>
- Granato, D., Katayama, F. C. U., & De Castro, I. A. (2011). Phenolic composition of South American red wines classified according to their antioxidant activity, retail price and sensory quality. *Food Chemistry*, *129*(2), 366–373. <https://doi.org/10.1016/J.FOODCHEM.2011.04.085>
- Grandmaison, J., Olah, G. M., Van Calsteren, M. R., & Furlan, V. (1993). Characterization and localization of plant phenolics likely involved in the pathogen resistance

- expressed by endomycorrhizal roots. *Mycorrhiza*, 3(4), 155–164.  
<https://doi.org/10.1007/BF00203609/METRICS>
- Guangyu, Y., & Jue, Y. (2019). A kind of refined even facial mask and preparation method thereof with acne-removing (Patent CN109276496A). In 2019 (CN109276496A).  
<https://patents.google.com/patent/CN109276496A/en?q=CN109276496A>
- Gupta, K., Dey, A., & Gupta, B. (2013). Plant polyamines in abiotic stress responses. *Acta Physiologiae Plantarum* 2013 35:7, 35(7), 2015–2036.  
<https://doi.org/10.1007/S11738-013-1239-4>
- Han, X., Whitfield, S., & Cotten, J. (2020). Synthesis, characterization and CO-releasing property of palladium(II) bipyridine flavonolate complexes. *Transition Metal Chemistry*, 45(4), 217–225. <https://doi.org/10.1007/S11243-019-00373-9/METRICS>
- Hansen, S. L., Purup, S., & Christensen, L. P. (2003). Bioactivity of falcarinol and the influence of processing and storage on its content in carrots (*Daucus carota* L.). *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 83(10), 1010–1017.  
<https://doi.org/10.1002/jsfa.1442>
- Hansi, Y., Bo, W., & Danping, L. (2019). A kind of vegetables compounding powder and its application (Patent CN109805315A).  
<https://patents.google.com/patent/CN109805315A/en?q=CN109805315A>
- Hashim, A. M., Alharbi, B. M., Abdulmajeed, A. M., Elkelish, A., Hassan, H. M., & Hozzein, W. N. (2020). Oxidative Stress Responses of Some Endemic Plants to High Altitudes by Intensifying Antioxidants and Secondary Metabolites Content. *Plants* 2020, Vol. 9, Page 869, 9(7), 869. <https://doi.org/10.3390/PLANTS9070869>
- He, C. E., Wei, J., Jin, Y., & Chen, S. (2010). Bioactive components of the roots of *Salvia miltiorrhiza*: Changes related to harvest time and germplasm line. *Industrial Crops and Products*, 32(3), 313–317. <https://doi.org/10.1016/J.INDCROP.2010.05.009>
- He, C., Han, T., Liu, C., Sun, P., Liao, D., & Li, X. (2023). Deciphering the effects of genotype and climatic factors on the performance, active ingredients and rhizosphere soil properties of *Salvia miltiorrhiza*. *Frontiers in Plant Science*, 14, 1110860. <https://doi.org/10.3389/FPLS.2023.1110860/BIBTEX>
- Higgins, D. S., & Hausbeck, M. K. (2023). *Diseases of Carrot*. 1–54.  
[https://doi.org/10.1007/978-3-030-35512-8\\_34-1](https://doi.org/10.1007/978-3-030-35512-8_34-1)
- Hoffmann, J. F., Carvalho, I. R., Barbieri, R. L., Rombaldi, C. V., & Chaves, F. C. (2017). *Butia* spp. (Arecaceae) LC-MS-based metabolomics for species and geographical origin discrimination. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 65(2), 523–532.  
<https://doi.org/10.1021/acs.jafc.6b03203>

- 
- Hole, C. C., Drew, R. L. K., Smith, B. M., & Gray, D. (1999). Tissue properties and propensity for damage in carrot (*Daucus carota* L.) storage roots. *Journal of Horticultural Science and Biotechnology*, 74(5), 651–657. <https://doi.org/10.1080/14620316.1999.11511168>
- Huang, X., Hao, N., Chen, G., Liu, S., & Che, Z. (2022). Chemistry and biology of nuciferine. *Industrial Crops and Products*, 179, 114694. <https://doi.org/10.1016/J.INDCROP.2022.114694>
- Hyuk, C., Bok, H., Yong, P., Jaeyul, K., Yeeun, K., & Pureum, S. (2018). *Polysaccharide fraction isolated from by-product of carrot with immune-enhancing activity and method for producing the same* (Patent KR101915715B1). <https://patents.google.com/patent/KR101915715B1/en?q=KR101915715B1>
- Ibrahim, I. A., Jabbour, A. A., Abdulmajeed, A. M., Elhady, M. E., Almaroai, Y. A., & Hashim, A. M. (2022). Adaptive Responses of Four Medicinal Plants to High Altitude Oxidative Stresses through the Regulation of Antioxidants and Secondary Metabolites. *Agronomy* 2022, Vol. 12, Page 3032, 12(12), 3032. <https://doi.org/10.3390/AGRONOMY12123032>
- ICONTEC. (1994, July 27). *Norma técnica colombiana NTC 1226: Frutas y hortalizas frescas: Zanahoria*. <https://ecollection-icontec-org.ezproxy.unal.edu.co/normavw.aspx?ID=538>
- ICONTEC. (2003). *Norma Técnica Colombiana NTC 5151: Determinación de los contenidos de calcio, cobre, hierro, magnesio, manganeso, potasio, sodio y zinc. Método usando espectrometría de absorción atómica*. <https://ecollection-icontec-org.ezproxy.unal.edu.co/normavw.aspx?ID=4355>
- ICONTEC. (2017). *Norma Técnica Colombiana NTC 6240: Determinación del contenido porcentual de grasa o aceite. Método soxhlet*. <https://www.icontec.org/>
- ICONTEC. (2020). *Norma Técnica Colombiana NTC 6383: Determinación del contenido de fibra dietaria total (fdt) en los alimentos. Método enzimático / gravimétrico*. <https://www.icontec.org>
- ICONTEC. (2021a). *Norma Técnica Colombiana NTC 2171: Determinación del rendimiento de cenizas por incineración*. <https://ecollection-icontec-org.ezproxy.unal.edu.co/normavw.aspx?ID=81153>
- ICONTEC. (2021b). *Norma Técnica Colombiana NTC 14084: Productos alimenticios. Determinación de elementos traza. Determinación de plomo, cadmio, cinc, cobre y hierro mediante espectrometría de absorción atómica (EAA)*. <https://www.icontec.org>

- ICONTEC. (2022). *Norma Técnica Colombia NTC 4617: Determinación del contenido de nitrógeno y cálculo del contenido de proteína cruda. Método kjeldahl*. <https://www.icontec.org>.
- Idrovo Encalada, A. M., Pérez, C. D., Calderón, P. A., Zukowski, E., Gerschenson, L. N., Rojas, A. M., & Fissore, E. N. (2019). High-power ultrasound pretreatment for efficient extraction of fractions enriched in pectins and antioxidants from discarded carrots (*Daucus carota* L.). *Journal of Food Engineering*, 256, 28–36. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2019.03.007>
- Isah, T., & Isah, T. (2019). Stress and defense responses in plant secondary metabolites production. *Biological Research*, 52(1), 39. <https://doi.org/10.1186/S40659-019-0246-3>
- Islam, M. T., & Mubarak, M. S. (2020). Pyrrolidine alkaloids and their promises in pharmacotherapy. *Advances in Traditional Medicine*, 20(1), 13–22. <https://doi.org/10.1007/S13596-019-00419-4/METRICAL>
- Jabbar, S., Abid, M., Wu, T., Hashim, M. M., Saeeduddin, M., Hu, B., Lei, S., & Zeng, X. (2014). *ULTRASOUND-ASSISTED EXTRACTION OF BIOACTIVE COMPOUNDS AND ANTIOXIDANTS FROM CARROT POMACE: A RESPONSE SURFACE APPROACH*. <https://doi.org/10.1111/jfpp.12425>
- Jayesree, N., Hang, P. K., Priyangaa, A., Krishnamurthy, N. P., Ramanan, R. N., Turki, M. S. A., Charis, M. G., & Ooi, C. W. (2021). Valorisation of carrot peel waste by water-induced hydrocolloidal complexation for extraction of carotene and pectin. *Chemosphere*, 272, 129919. <https://doi.org/10.1016/J.CHEMOSPHERE.2021.129919>
- Jia, Z., & Xiaolin, L. (2018). *Pet nutritional granular with anti-oxidation function and preparation method thereof and application method* (Patent CN108783001A). <https://patents.google.com/patent/CN108783001A/en?q=CN108783001A>
- Jiang, Y., Yu, L., & Wang, M. H. (2015). N-trans-feruloyltyramine inhibits LPS-induced NO and PGE2 production in RAW 264.7 macrophages: Involvement of AP-1 and MAP kinase signalling pathways. *Chemico-Biological Interactions*, 235, 56–62. <https://doi.org/10.1016/J.CBI.2015.03.029>
- Jyot Kaur, G., Kumar, D., Orsat, V., & Singh, A. (2020). Assessment of carrot rejects and wastes for food product development and as a biofuel. *Biomass Conversion and Biorefinery*, 12, 757–768. <https://doi.org/10.1007/s13399-020>
- Kardung, M., Cingiz, K., Costenoble, O., Delahaye, R., Heijman, W., Lovrić, M., van Leeuwen, M., M'barek, R., van Meijl, H., Piotrowski, S., Ronzon, T., Sauer, J., Verhoog, D., Verkerk, P. J., Vrachioli, M., Wesseler, J. H. H., & Zhu, B. X. (2021).

- Development of the Circular Bioeconomy: Drivers and Indicators. *Sustainability* 2021, Vol. 13, Page 413, 13(1), 413. <https://doi.org/10.3390/SU13010413>
- Kaur, G. J., Orsat, V., & Singh, A. (2020). Challenges and potential solutions to utilization of carrot rejects and waste in food processing. *British Food Journal*, 123(6), 2036–2048. <https://doi.org/10.1108/BFJ-08-2020-0741/FULL/XML>
- Kecis, H., Abdelouahab, Y., Bagues, M., Gali, L., Mekircha, F., Alloun, W., & Nagaz, K. (2023). Phenolic profile and bioactivity of the aerial part and roots of *Mentha rotundifolia* L. grown in two different localities in northeastern Algeria: A comparative study. *Biocatalysis and Agricultural Biotechnology*, 47, 102581. <https://doi.org/10.1016/J.BCAB.2022.102581>
- Kh. Kelini, W., Mahmoud, M. A. M., Zaky, Z. M., & Abdel-Mohsein, H. S. (2023). Toxicity of microcystins on human, animal and aquatic life. *International Journal of Comprehensive Veterinary Research*, 1(1), 1–13. <https://doi.org/10.21608/IJCVR.2023.352674>
- Kidmose, U., Hansen, S. L., Christensen, L. P., Edelenbos, M., Larsen, E., & Nørbaek, R. (2004). Effects of Genotype, Root Size, Storage, and Processing on Bioactive Compounds in Organically Grown Carrots (*Daucus carota* L.). In *S388 JOURNAL OF FOOD SCIENCE* (Vol. 69, Issue 9). [www.ift.org](http://www.ift.org)
- Kirk, H., Vrieling, K., van der Meijden, E., & Klinkhamer, P. G. L. (2010). Species by environment interactions affect pyrrolizidine alkaloid expression in *senecio jacobaea*, *Senecio aquaticus*, and their hybrids. *Journal of Chemical Ecology*, 36(4), 378–387. <https://doi.org/10.1007/S10886-010-9772-8/TABLES/4>
- Koudela, M., Schulzova, V., Krmela, A., Chmelarova, H., Hajslova, J., & Novotny, C. (2021). Effect of agroecological conditions on biologically active compounds and metabolome in carrot. *Cells*, 10(4). <https://doi.org/10.3390/cells10040784>
- Lai, S. (2016). *Carrot body lotion and preparing method thereof* (Patent CN105726389A). <https://patents.google.com/patent/CN105726389A/en?q=CN105726389A>
- Lesma, G., Luraghi, A., Bavaro, T., Bortolozzi, R., Rainoldi, G., Roda, G., Viola, G., Ubiali, D., & Silvani, A. (2018). Phytosterol and  $\gamma$ -Oryzanol Conjugates: Synthesis and Evaluation of their Antioxidant, Antiproliferative, and Anticholesterol Activities. *Journal of Natural Products*, 81(10), 2212–2221. <https://doi.org/10.1021/ACS.JNATPROD.8B00465>
- Levizou, E., Papadimitriou, T., Papavasileiou, E., Papadimitriou, N., & Kormas, K. A. (2020). Root vegetables bioaccumulate microcystins-LR in a developmental stage-dependent manner under realistic exposure scenario: The case of carrot and radish.

- Agricultural Water Management*, 240, 106274.  
<https://doi.org/10.1016/J.AGWAT.2020.106274>
- Li, L., Yunlin, H., & Dahao, G. (2022). *Probiotic fermented carrot paste and preparation method and application thereof* (Patent CN114982947A).  
<https://patents.google.com/patent/CN114982947A/en?q=CN114982947A>
- Li, W. J., Cheng, X. L., Liu, J., Lin, R. C., Wang, G. L., Du, S. S., & Liu, Z. L. (2012). Phenolic Compounds and Antioxidant Activities of *Liriope muscari*. *Molecules* 2012, Vol. 17, Pages 1797-1808, 17(2), 1797–1808.  
<https://doi.org/10.3390/MOLECULES17021797>
- Li, Z., Shen, Y., Xin, J., Xu, X., Ding, Q., Chen, W., Wang, J., Lv, Y., Wei, X., Wei, Y., Zhang, W., Zu, X., & Wang, S. (2023). Cryptotanshinone alleviates radiation-induced lung fibrosis via modulation of gut microbiota and bile acid metabolism. *Phytotherapy Research*, 37(10), 4557–4571. <https://doi.org/10.1002/PTR.7926>
- Liang, D., Minikes, A. M., & Jiang, X. (2022). Ferroptosis at the intersection of lipid metabolism and cellular signaling. *Molecular Cell*, 82(12), 2215–2227.  
<https://doi.org/10.1016/J.MOLCEL.2022.03.022/ASSET/4127855D-58FC-4338-9661-75C4397F94BD/MAIN.ASSETS/GR5.JPG>
- Liu, W., Zhang, R., Xiang, C., Zhang, R., Wang, Q., Wang, T., Li, X., Lu, X., Gao, S., Liu, Z., Liu, M., Gao, L., & Zhang, W. (2021). Transcriptomic and Physiological Analysis Reveal That  $\alpha$ -Linolenic Acid Biosynthesis Responds to Early Chilling Tolerance in Pumpkin Rootstock Varieties. *Frontiers in Plant Science*, 12, 669565.  
<https://doi.org/10.3389/FPLS.2021.669565/FULL>
- Liu, Y. C., Wang, J. W., Li, J., Guo, Y., Han, F. J., Lu, W. H., & Wu, Q. (2024). Mechanism of cryptotanshinone to improve endocrine and metabolic functions in the endometrium of PCOS rats. *Journal of Ethnopharmacology*, 319, 117346.  
<https://doi.org/10.1016/J.JEP.2023.117346>
- Lockley, R. A. (2016). *Minimising post-harvest losses in radishes through an understanding of pre and post-harvest factors that influence root splitting*.
- López, A., Méndez, D., Paz, A., & Arboleda, H. (2016). Desarrollo e Instrumentación de un Proceso de Vigilancia Tecnológica basado en Protocolos de Revisión Sistemática de la Literatura. In *Informacion Tecnologica* (Vol. 27, Issue 4, pp. 155–164). Centro de Informacion Tecnologica. <https://doi.org/10.4067/S0718-07642016000400017>
- Lu, A. jing, Cao, L. gang, Tan, D. peng, Qin, L., Lu, Y. liu, Zhao, Y. xia, Qian, Y., Bai, C. jun, Yang, J. yong, Ling, H., Shi, J. shan, Yang, Z., & He, Y. qi. (2022). UPLC-Q/TOF-MS coupled with multivariate analysis for comparative analysis of metabolomic in *Dendrobium nobile* from different growth altitudes. *Arabian Journal of Chemistry*, 15(11), 104208. <https://doi.org/10.1016/J.ARABJC.2022.104208>

- 
- Lu, W., Yang, X., Shen, J., Li, Z., Tan, S., Liu, W., & Cheng, Z. (2021). *Choosing the appropriate wall materials for spray-drying microencapsulation of natural bioactive ingredients: Taking phenolic compounds as examples*. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2021.08.082>
- Luca, M. I., Ungureanu-luga, M., & Mironeasa, S. (2022). Carrot Pomace Characterization for Application in Cereal-Based Products. *Applied Sciences (Switzerland)*, 12(16). <https://doi.org/10.3390/app12167989>
- Luque de Castro, M. D., & Quiles-Zafra, R. (2020). Lipidomics: An omics discipline with a key role in nutrition. *Talanta*, 219, 121197. <https://doi.org/10.1016/J.TALANTA.2020.121197>
- Ma, T., Luo, J., Tian, C., Sun, X., Quan, M., Zheng, C., Kang, L., & Zhan, J. (2014). *Influence of technical processing units on chemical composition and antimicrobial activity of carrot (Daucus carota L.) juice essential oil*. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2014.08.018>
- Mandrich, L., Esposito, A. V., Costa, S., & Caputo, E. (2023). Chemical Composition, Functional and Anticancer Properties of Carrot. *Molecules*, 28(20). <https://doi.org/10.3390/MOLECULES28207161>
- Mankins, J. C. (1995). *TECHNOLOGY READINESS LEVELS*.
- Martinez-Saldarriaga, J., Henao-Rojas, J. C., Flórez-Martínez, D. H., Cadena Chamorro, E., & Yepes-Betancur, D. P. (2024). *Methodological Framework for Supporting Bioprospecting Re-Search: A Case Study on Carrot (Daucus Carota L.) Crop By-Products*. <https://doi.org/10.2139/SSRN.4760335>
- Matei, E., Râpă, M., Predescu, A. M., Țurcanu, A. A., Vidu, R., Predescu, C., Bobirica, C., Bobirica, L., & Orbeci, C. (2021). Valorization of Agri-Food Wastes as Sustainable Eco-Materials for Wastewater Treatment: Current State and New Perspectives. *Materials* 2021, Vol. 14, Page 4581, 14(16), 4581. <https://doi.org/10.3390/MA14164581>
- McGarry, A. (1993). Influence of water status on carrot (*Daucus carota* L.) fracture properties. *Journal of Horticultural Science*, 68(3), 431–437. <https://doi.org/10.1080/00221589.1993.11516370>
- McGarry, A. (1995). Cellular Basis of Tissue Toughness in Carrot (*Daucus carota* L.) Storage Roots. *Annals of Botany*, 75(2), 157–163. <https://doi.org/10.1006/ANBO.1995.1007>
- MC-LW | C54H72N8O12 | CID 16760564 - PubChem. (n.d.). Retrieved January 12, 2025, from <https://pubchem.ncbi.nlm.nih.gov/compound/16760564#section=2D-Structure>

- Medina-Meza, I. G., Vanderweide, J., Torres-Palacios, C., & Sabbatini, P. (2021). Quantitative Metabolomics Unveils the Impact of Agricultural Practices in the Grape Metabolome. *ACS Agricultural Science & Technology*, 1(3), 253–261. <https://doi.org/10.1021/ACSAGSCITECH.1C00043>
- Meléndez-Martínez, A. J., Mandić, A. I., Bantis, F., Böhm, V., Borge, G. I. A., Brnčić, M., Bysted, A., Cano, M. P., Dias, M. G., Elgersma, A., Fikselová, M., García-Alonso, J., Giuffrida, D., Gonçalves, V. S. S., Hornero-Méndez, D., Kljak, K., Lavelli, V., Manganaris, G. A., Mapelli-Brahm, P., ... O'Brien, N. (2022). A comprehensive review on carotenoids in foods and feeds: status quo, applications, patents, and research needs. In *Critical Reviews in Food Science and Nutrition* (Vol. 62, Issue 8, pp. 1999–2049). Taylor and Francis Ltd. <https://doi.org/10.1080/10408398.2020.1867959>
- MinCiencias. (2020). *MINISTERIO DE CIENCIA, TECNOLOGÍA E INNOVACIÓN-MINCIENCIAS-CONVOCATORIA PARA EL FORTALECIMIENTO DE CENTROS DE INVESTIGACIÓN AUTÓNOMOS E INSTITUTOS PÚBLICOS DE I+D ANEXO 1. DESCRIPCIÓN DE FOCOS Y LÍNEAS TEMÁTICAS*. <https://www.e-education.psu.edu/eme807/node/8>,
- Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural. (2015). *Sector Agrícola Colombiano - 2015*. <https://sioc.minagricultura.gov.co/Hortalizas/Documentos/2015-07-30%20Cifras%20Sectoriales.pdf>
- Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural. (2020). *Cadena de las Hortalizas*.
- Ministerio de Salud y Protección Social. (2021). *Normograma del Instituto Nacional de Vigilancia de Medicamentos y Alimentos - INVIMA [RESOLUCION 810 de 2021 Ministerio de Salud y Protección Social]*. RESOLUCION 810 de 2021. [https://normograma.invima.gov.co/normograma/docs/resolucion\\_minsaludps\\_0810\\_2021.htm?q=resoluci%C3%B3n+810](https://normograma.invima.gov.co/normograma/docs/resolucion_minsaludps_0810_2021.htm?q=resoluci%C3%B3n+810)
- Moreno-Rodríguez, J. M., Ceballos-Ramírez, S. L., Lukau-Quintero, C. E., Flórez-Martínez, D. H., Martínez-Saldarriaga, J., & Henao-Rojas, J. C. (2025). ¿Esta zanahoria pa' qué? Rutas de innovación para la zanahoria: conexión entre bioeconomía y agroindustria. *¿Esta Zanahoria Pa' Qué? Rutas de Innovación Para La Zanahoria: Conexión Entre Bioeconomía y Agroindustria*. <https://doi.org/10.47286/9786287767300>
- Nayak, A., & Bhushan, B. (2019). An overview of the recent trends on the waste valorization techniques for food wastes. In *Journal of Environmental Management* (Vol. 233, pp. 352–370). Academic Press. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2018.12.041>
- Neis, E. R., Covinich, M. M., & Scipioni, G. P. (2022). Polyphenol content, color and acceptability of carrot pickles added with yerba mate powder extract. *Brazilian*

*Journal of Food Technology*, 25, e2021013. <https://doi.org/10.1590/1981-6723.01321>

- Nicolle, C., Simon, G., Rock, E., Amouroux, P., & Rémésy, C. (2004). Genetic Variability Influences Carotenoid, Vitamin, Phenolic, and Mineral Content in White, Yellow, Purple, Orange, and Dark-orange Carrot Cultivars. In *J. AMER. SOC. HORT. SCI* (Vol. 129, Issue 4).
- Nissinen, A. I., Lemmetty, A., Pihlava, J. M., Jauhiainen, L., Munyaneza, J. E., & Vanhala, P. (2012). Effects of carrot psyllid (*Trioza apicalis*) feeding on carrot yield and content of sugars and phenolic compounds. *Annals of Applied Biology*, 161(1), 68–80. <https://doi.org/10.1111/J.1744-7348.2012.00551.X>
- N-Trans-feruloyltramine* | C<sub>18</sub>H<sub>19</sub>NO<sub>4</sub> | CID 5280537 - PubChem. (n.d.). Retrieved January 12, 2025, from <https://pubchem.ncbi.nlm.nih.gov/compound/5280537#section=2D-Structure>
- Nuciferine* | C<sub>19</sub>H<sub>21</sub>NO<sub>2</sub> | CID 10146 - PubChem. (n.d.). Retrieved January 12, 2025, from <https://pubchem.ncbi.nlm.nih.gov/compound/Nuciferine#section=2D-Structure>
- Odebode, A. C., & Unachukwu, N. E. (1997). Effect of storage environment on carrot root rots and biochemical changes during storage. *European Food Research and Technology*, 205(4), 277–281. <https://doi.org/10.1007/S002170050165/METRICS>
- Okino Delgado, C. H., & Fleuri, L. F. (2015). Orange and mango by-products: Agro-industrial waste as source of bioactive compounds and botanical versus commercial description—A review. *Food Reviews International*, 32(1), 1–14. <https://doi.org/10.1080/87559129.2015.1041183>
- Olechowski, A. L., Eppinger, S. D., Joglekar, N., & Tomaschek, K. (2020). Technology readiness levels: Shortcomings and improvement opportunities. *Systems Engineering*, 23(4), 395–408. <https://doi.org/10.1002/sys.21533>
- Ortiz Florez, S. A. (2023). *CONTEXTO DE CADENA, HORTALIZAS - ZANAHORIA*. <https://www.upra.gov.co/web/guest/evaluaciones-agropecuarias-municipales-eva>.
- Ortiz, J., Aranda, F. J., Teruel, J. A., & Ortiz, A. (2024). Cryptotanshinone-Induced Permeabilization of Model Phospholipid Membranes: A Biophysical Study. *Membranes* 2024, Vol. 14, Page 118, 14(6), 118. <https://doi.org/10.3390/MEMBRANES14060118>
- Otero, D. M., da Rocha Lemos Mendes, G., da Silva Lucas, A. J., Christ-Ribeiro, A., & Ribeiro, C. D. F. (2022). Exploring alternative protein sources: Evidence from patents and articles focusing on food markets. In *Food Chemistry* (Vol. 394). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2022.133486>

- Othmen, S. Ben, Boussaa, F., Hajji-Hedfi, L., Abbess, K., Dbara, S., & Chermiti, B. (2022). Effects of nymphal density (*Bactericera trigonica*) and feeding on photosynthetic pigments, proline content and phenolic compounds in carrot plants. *European Journal of Plant Pathology*, *163*(1), 51–59. <https://doi.org/10.1007/S10658-021-02456-9/TABLES/4>
- Pan, L., Yang, N., Sui, Y., Li, Y., Zhao, W., Zhang, L., Mu, L., & Tang, Z. (2023). Altitudinal Variation on Metabolites, Elements, and Antioxidant Activities of Medicinal Plant *Asarum*. *Metabolites*, *13*(12), 1193. <https://doi.org/10.3390/METABO13121193/S1>
- Patent Inspiration. (2023). *Search and Analyze Patents - Patent Inspiration*. <https://www.patentinspiration.com/>
- Pereira, R., Costa, M., Velasco, C., Cunha, L. M., Lima, R. C., Baião, L. F., Batista, S., Marques, A., Sá, T., Campos, D. A., Pereira, M., Jesus, D., Fernández-Boo, S., Costas, B., Pintado, M., & Valente, L. M. P. (2022). Comparative Analysis between Synthetic Vitamin E and Natural Antioxidant Sources from Tomato, Carrot and Coriander in Diets for Market-Sized *Dicentrarchus labrax*. *Antioxidants*, *11*(4). <https://doi.org/10.3390/antiox11040636>
- Perez, M. B., Da Peña Hamparsomian, M. J., Gonzalez, R. E., Denoya, G. I., Dominguez, D. L. E., Barboza, K., Iorizzo, M., Simon, P. W., Vaudagna, S. R., & Cavagnaro, P. F. (2022). Physicochemical properties, degradation kinetics, and antioxidant capacity of aqueous anthocyanin-based extracts from purple carrots compared to synthetic and natural food colorants. *Food Chemistry*, *387*, 132893. <https://doi.org/10.1016/J.FOODCHEM.2022.132893>
- Pope, L. E., & Dixon, S. J. (2023). Regulation of ferroptosis by lipid metabolism. *Trends in Cell Biology*, *33*(12), 1077–1087. <https://doi.org/10.1016/J.TCB.2023.05.003>
- Pott, D. M., Osorio, S., & Vallarino, J. G. (2019). From central to specialized metabolism: An overview of some secondary compounds derived from the primary metabolism for their role in conferring nutritional and organoleptic characteristics to fruit. *Frontiers in Plant Science*, *10*, 454686. <https://doi.org/10.3389/FPLS.2019.00835/BIBTEX>
- Poyraz, S., Döndaş, H. A., Döndaş, N. Y., & Sansano, J. M. (2023). Recent insights about pyrrolidine core skeletons in pharmacology. *Frontiers in Pharmacology*, *14*, 1239658. <https://doi.org/10.3389/FPHAR.2023.1239658/BIBTEX>
- Prior, R. L., Hoang, H., Gu, L., Wu, X., Bacchiocca, M., Howard, L., Hampsch-Woodill, M., Huang, D., Ou, B., & Jacob, R. (2003). Assays for hydrophilic and lipophilic antioxidant capacity (oxygen radical absorbance capacity (ORACFL)) of plasma and other biological and food samples. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, *51*(11), 3273–3279. <https://doi.org/10.1021/jf0262256>

- 
- Qi, X. Y., Kong, X. P., Zhou, H. W., & Yan, X. P. (2024). Crucial Factors Impacting Carrot Flavor Analysis Based on Broad Target Metabolomics. *Scientia Agricultura Sinica*, 57(16), 3250–3263. <https://doi.org/10.3864/J.ISSN.0578-1752.2024.16.012>
- Que, F., Hou, X. L., Wang, G. L., Xu, Z. S., Tan, G. F., Li, T., Wang, Y. H., Khadr, A., & Xiong, A. S. (2019). Advances in research on the carrot, an important root vegetable in the Apiaceae family. In *Horticulture Research* (Vol. 6, Issue 1). Nature Publishing Group. <https://doi.org/10.1038/s41438-019-0150-6>
- Ramos-Andrés, M., Aguilera-Torre, B., & García-Serna, J. (2021). Biorefinery of discarded carrot juice to produce carotenoids and fermentation products. *Journal of Cleaner Production*, 323, 129139. <https://doi.org/10.1016/J.JCLEPRO.2021.129139>
- Ricci, A., Bernini, V., Maoloni, A., Cirilini, M., Galaverna, G., Neviani, E., & Lazzi, C. (2019). Vegetable By-Product Lacto-Fermentation as a New Source of Antimicrobial Compounds. *Microorganisms*. <https://doi.org/10.3390/microorganisms7120607>
- Rodrigues, J. P. B., Liberal, Â., Petropoulos, S. A., Ferreira, I. C. F. R., Oliveira, M. B. P. P., Fernandes, Â., & Barros, L. (2022). Agri-Food Surplus, Waste and Loss as Sustainable Biobased Ingredients: A Review. In *Molecules* (Vol. 27, Issue 16). MDPI. <https://doi.org/10.3390/molecules27165200>
- Romero, H., Pott, D. M., Vallarino, J. G., & Osorio, S. (2021). Metabolomics-Based Evaluation of Crop Quality Changes as a Consequence of Climate Change. *Metabolites*, 11(7). <https://doi.org/10.3390/METABO11070461>
- Rosales-Mendoza, S., & Tello-Olea, M. A. (2015). Carrot Cells: A Pioneering Platform for Biopharmaceuticals Production. In *Molecular Biotechnology* (Vol. 57, Issue 3, pp. 219–232). Humana Press Inc. <https://doi.org/10.1007/s12033-014-9837-y>
- Rudke, C. R. M., Zielinski, A. A. F., & Ferreira, S. R. S. (2022). From Biorefinery to Food Product Design: Peach (*Prunus persica*) By-Products Deserve Attention. In *Food and Bioprocess Technology*. Springer. <https://doi.org/10.1007/s11947-022-02951-9>
- SAC. (2023). SAC - Sociedad de Agricultores de Colombia. <https://sac.org.co/>
- Salvañal, L., Clementz, A., Guerra, L., Yori, J. C., & Romanini, D. (2021). L-lactic acid production using the syrup obtained in biorefinery of carrot discards. *Food and Bioprocess Technology*, 127, 465–471. <https://doi.org/10.1016/J.FBP.2021.04.002>
- Sarmiento-García, A., Olgun, O., Kiliç, G., Sevim, B., & Gökmen, S. A. (2023). Reuse of vegetable wastes in animal feed: the influence of red beet powder supplementation on performance, egg quality, and antioxidant capacity of layer quails. *Tropical Animal Health and Production*, 55(3), 153. <https://doi.org/10.1007/s11250-023-03556-w>

- Savoi, S., Wong, D. C. J., Arapitsas, P., Miculan, M., Bucchetti, B., Peterlunger, E., Fait, A., Mattivi, F., & Castellarin, S. D. (2016). Transcriptome and metabolite profiling reveals that prolonged drought modulates the phenylpropanoid and terpenoid pathway in white grapes (*Vitis vinifera* L.). *BMC Plant Biology*, *16*(1). <https://doi.org/10.1186/S12870-016-0760-1>
- Schramm, S., Köhler, N., & Rozhon, W. (2019). Pyrrolizidine Alkaloids: Biosynthesis, Biological Activities and Occurrence in Crop Plants. *Molecules*, *24*(3), 498. <https://doi.org/10.3390/MOLECULES24030498>
- Schulz, K., Machaj, G., Knox, P., Hancock, R. D., Verrall, S. R., Korpinen, R., Saranpää, P., Kärkönen, A., Karpinska, B., & Foyer, C. H. (2023). Restraining Quiescence Release-Related Ageing in Plant Cells: A Case Study in Carrot. *Cells*, *12*(20), 2465. <https://doi.org/10.3390/CELLS12202465/S1>
- Schulzova, V., Koudela, M., Chmelarova, H., Hajslova, J., & Novotny, C. (2022). Assessment of Carrot Production System Using Biologically Active Compounds and Metabolomic Fingerprints. *Agronomy*, *12*(8). <https://doi.org/10.3390/agronomy12081770>
- Scimago Journal & Country Rank*. (2023). <https://www.scimagojr.com/index.php>
- Sharma, K. D., Karki, S., Thakur, N. S., & Attri, S. (2012). Chemical composition, functional properties and processing of carrot-A review. In *Journal of Food Science and Technology* (Vol. 49, Issue 1, pp. 22–32). <https://doi.org/10.1007/s13197-011-0310-7>
- Sharma, P., Gaur, V. K., Sirohi, R., Varjani, S., Hyoun Kim, S., & Wong, J. W. C. (2021). Sustainable processing of food waste for production of bio-based products for circular bioeconomy. *Bioresource Technology*, *325*, 124684. <https://doi.org/10.1016/J.BIORTECH.2021.124684>
- Shinde, P., Banerjee, P., & Mandhare, A. (2019). Marine natural products as source of new drugs: a patent review (2015–2018). In *Expert Opinion on Therapeutic Patents* (Vol. 29, Issue 4, pp. 283–309). Taylor and Francis Ltd. <https://doi.org/10.1080/13543776.2019.1598972>
- Shuming, G. (2020). *Herbal activation energy cream and preparation method thereof* (Patent CN111329821A). <https://patents.google.com/patent/CN111329821A/en?q=CN111329821A>
- Singleton, V. L., & Rossi, J. A. (1965). Colorimetry of Total Phenolics with Phosphomolybdic-Phosphotungstic Acid Reagents. *American Journal of Enology and Viticulture*, *16*(3), 144–158. <https://doi.org/10.5344/AJEV.1965.16.3.144>
- Soi-ampornkul, R., Myint, E. E. P., Thangnipon, W., Tantarungsee, N., Mitrpant, C., Tuchinda, P., Nobsathian, S., & Vatanashevanopakorn, C. (2022). N-trans-

feruloyltyramine Protects Human Neuroblastoma SK-N-SH Cell Line Against H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>-Induced Cytotoxicity. *Natural Product Communications*, 17(8).

[https://doi.org/10.1177/1934578X221117312/ASSET/IMAGES/LARGE/10.1177\\_1934578X221117312-FIG3.JPEG](https://doi.org/10.1177/1934578X221117312/ASSET/IMAGES/LARGE/10.1177_1934578X221117312-FIG3.JPEG)

Song, R., Ismail, M., Baroutian, S., & Farid, M. (2018). Effect of Subcritical Water on the Extraction of Bioactive Compounds from Carrot Leaves. *Food and Bioprocess Technology*, 11(10), 1895–1903. <https://doi.org/10.1007/S11947-018-2151-0/TABLES/2>

Średnicka-Tober, D., Kopczyńska, K., Góralska-Walczak, R., Hallmann, E., Barański, M., Marszałek, K., & Kazimierczak, R. (2022). Are Organic Certified Carrots Richer in Health-Promoting Phenolics and Carotenoids than the Conventionally Grown Ones? *Molecules*, 27(13). <https://doi.org/10.3390/molecules27134184>

Srivastava, P. (2022). Use of alkaloids in plant protection. *Plant Protection: From Chemicals to Biologicals*, 337–351. <https://doi.org/10.1515/9783110771558-013/HTML>

Stanković, M., & Jakovljević, D. (2021). Phytochemical Diversity of Halophytes. *Handbook of Halophytes: From Molecules to Ecosystems towards Biosaline Agriculture*, 2089–2114. [https://doi.org/10.1007/978-3-030-57635-6\\_125](https://doi.org/10.1007/978-3-030-57635-6_125)

Su, Y., Yang, W., Yang, X., Zhang, R., & Zhao, J. (2018). Visible Light-Induced CO-Release Reactivity of a Series of ZnII–Flavonolate Complexes. *Australian Journal of Chemistry*, 71(8), 549–558. <https://doi.org/10.1071/CH18192>

Sutliff, A. K., Saint-Cyr, M., Hendricks, A. E., Chen, S. S., Doenges, K. A., Quinn, K., Westcott, J., Tang, M., Borengasser, S. J., Reisdorph, R. M., Campbell, W. W., Krebs, N. F., & Reisdorph, N. A. (2021). Lipidomics-based comparison of molecular compositions of green, yellow, and red bell peppers. *Metabolites*, 11(4). <https://doi.org/10.3390/metabo11040241>

Szczepańska, J., Skąpska, S., Połaska, M., & Marszałek, K. (2022). High pressure homogenization with a cooling circulating system: The effect on physiochemical and rheological properties, enzymes, and carotenoid profile of carrot juice. *Food Chemistry*, 370. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2021.131023>

Thangnipon, W., Ngampramuan, S., Suthprasertporn, N., Jantrachotechatchawan, C., Tuchinda, P., & Nobsathian, S. (2021). Protective Roles of N-trans-feruloyltyramine Against Scopolamine-Induced Cholinergic Dysfunction on Cortex and Hippocampus of Rat Brains. *Siriraj Medical Journal*, 73(6), 413–422. <https://doi.org/10.33192/SMJ.2021.55>

- Theodosiou, M., Laudet, V., & Schubert, M. (2010). From carrot to clinic: An overview of the retinoic acid signaling pathway. In *Cellular and Molecular Life Sciences* (Vol. 67, Issue 9, pp. 1423–1445). Birkhauser Verlag AG. <https://doi.org/10.1007/s00018-010-0268-z>
- Tian, Z., Dong, T., Wang, S., Sun, J., Chen, H., Zhang, N., & Wang, S. (2024). A comprehensive review on botany, chemical composition and the impacts of heat processing and dehydration on the aroma formation of fresh carrot. *Food Chemistry: X*, 22, 101201. <https://doi.org/10.1016/J.FOCHX.2024.101201>
- Tiwari, S., Yawale, P., & Upadhyay, N. (2022). Carotenoids: Extraction strategies and potential applications for valorization of under-utilized waste biomass. *Food Bioscience*, 48. <https://doi.org/10.1016/j.fbio.2022.101812>
- Tofiño-Rivera, A. P., Ortega-Cuadros, M., Melo-Ríos, A., & Mier-Giraldo, H. J. (2017). Vigilancia tecnológica de plantas aromáticas: de la investigación a la consolidación de la agrocadena colombiana. *Ciencia y Tecnología Agropecuaria*, 18(2), 353–377. [https://doi.org/10.21930/rcta.vol18\\_num2\\_art:636](https://doi.org/10.21930/rcta.vol18_num2_art:636)
- Tülek, S., & Dolar, F. S. (2015). DETECTION AND IDENTIFICATION OF ALTERNARIA SPECIES CAUSING DISEASES OF CARROT IN ANKARA PROVINCE, TURKEY. *Horticulture*, 263–268. <https://horticulturejournal.usamv.ro/pdf/2015/art42.pdf>
- Van Dyk, J. S., Gama, R., Morrison, D., Swart, S., & Pletschke, B. I. (2013). Food processing waste: Problems, current management and prospects for utilisation of the lignocellulose component through enzyme synergistic degradation. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 26, 521–531. <https://doi.org/10.1016/J.RSER.2013.06.016>
- van Eck, N. J., & Waltman, L. (2009). Software survey: VOSviewer, a computer program for bibliometric mapping. *Scientometrics*, 84(2), 523–538. <https://doi.org/10.1007/S11192-009-0146-3>
- Van Hassel, W. H. R., Masquelier, J., Andjelkovic, M., & Rajkovic, A. (2022). Towards a Better Quantification of Cyanotoxins in Fruits and Vegetables: Validation and Application of an UHPLC-MS/MS-Based Method on Belgian Products. *Separations*, 9(10), 319. <https://doi.org/10.3390/SEPARATIONS9100319/S1>
- Varshney, K., & Mishra, K. (2022). An Analysis of Health Benefits of Carrot. *International Journal of Innovative Research in Engineering & Management*, 211–214. <https://doi.org/10.55524/IJIREM.2022.9.1.40>
- Večeřová, K., Oravec, M., Puranik, S., Findurová, H., Veselá, B., Opoku, E., Ofori-Amanfo, K. K., Klem, K., Urban, O., & Sahu, P. P. (2022). Single and interactive effects of variables associated with climate change on wheat metabolome. *Frontiers in Plant Science*, 13, 1002561. <https://doi.org/10.3389/FPLS.2022.1002561/BIBTEX>

- Venkatesh, G., & Se, V. G. (2021). Circular Bio-economy—Paradigm for the Future: Systematic Review of Scientific Journal Publications from 2015 to 2021. *Circular Economy and Sustainability* 2:1, 2(1), 231–279. <https://doi.org/10.1007/S43615-021-00084-3>
- Viant, M. R., Kurland, I. J., Jones, M. R., & Dunn, W. B. (2017). How close are we to complete annotation of metabolomes? *Current Opinion in Chemical Biology*, 36, 64–69. <https://doi.org/10.1016/j.cbpa.2017.01.001>
- Vigneshwar, S. S., Swetha, A., Gopinath, K. P., Goutham, R., Pal, R., Arun, J., SundarRajan, P., Bhatnagar, A., Lan Chi, N. T., & Pugazhendhi, A. (2022). Bioprocessing of biowaste derived from food supply chain side-streams for extraction of value added bioproducts through biorefinery approach. *Food and Chemical Toxicology*, 165, 113184. <https://doi.org/10.1016/J.FCT.2022.113184>
- Vodnar, D. C., Călinoiu, L. F., Dulf, F. V., Ștefănescu, B. E., Crișan, G., & Socaciu, C. (2017). Identification of the bioactive compounds and antioxidant, antimutagenic and antimicrobial activities of thermally processed agro-industrial waste. *Food Chemistry*, 231, 131–140. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2017.03.131>
- Walter, M. H., & Strack, D. (2011). Carotenoids and their cleavage products: Biosynthesis and functions. In *Natural Product Reports* (Vol. 28, Issue 4, pp. 663–692). <https://doi.org/10.1039/c0np00036a>
- Wang, H., Fang, X. M., Sutar, P. P., Meng, J. S., Wang, J., Yu, X. L., & Xiao, H. W. (2021). Effects of vacuum-steam pulsed blanching on drying kinetics, colour, phytochemical contents, antioxidant capacity of carrot and the mechanism of carrot quality changes revealed by texture, microstructure and ultrastructure. *Food Chemistry*, 338. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2020.127799>
- Wang, T., Yin, S., Gu, J., Li, J., Zhang, M., Shan, J., Wu, X., & Li, Y. (2023). Study on the Intervention Mechanism of Cryptotanshinone on Human A2780 Ovarian Cancer Cell Line Using GC-MS-Based Cellular Metabolomics. *Pharmaceuticals* 2023, Vol. 16, Page 861, 16(6), 861. <https://doi.org/10.3390/PH16060861>
- Wei, F., Nian, Q., Zhao, M., Wen, Y., Yang, Y., Wang, J., He, Z., Chen, X., Yin, X., Wang, J., Ma, X., Chen, Y., Feng, P., & Zeng, J. (2023). Natural products and mitochondrial allies in colorectal cancer therapy. *Biomedicine & Pharmacotherapy*, 167, 115473. <https://doi.org/10.1016/J.BIOPHA.2023.115473>
- Wei, H., Yin, Y., Yang, W., Zhu, J., Chen, L., Guo, R., Yang, Z., & Li, S. (2023). Nuciferine induces autophagy to relieve vascular cell adhesion molecule 1 activation via repressing the Akt/mTOR/AP1 signal pathway in the vascular endothelium. *Frontiers*

- in Pharmacology*, 14, 1264324.  
<https://doi.org/10.3389/FPHAR.2023.1264324/BIBTEX>
- Wei, N., Hu, C., Dittmann, E., Song, L., & Gan, N. (2024). The biological functions of microcystins. *Water Research*, 262, 122119.  
<https://doi.org/10.1016/J.WATRES.2024.122119>
- Wei, X., Ruan, W., & Vrieling, K. (2021). Current Knowledge and Perspectives of Pyrrolizidine Alkaloids in Pharmacological Applications: A Mini-Review. *Molecules* 2021, Vol. 26, Page 1970, 26(7), 1970.  
<https://doi.org/10.3390/MOLECULES26071970>
- Xing, Z., Bi, G., Li, T., Zhang, Q., & Knight, P. R. (2024). Effect of Harvest Time on Growth and Bioactive Compounds in *Salvia miltiorrhiza*. *Plants*, 13(13), 1788.  
<https://doi.org/10.3390/PLANTS13131788/S1>
- Xu, Y., Miao, Y., & Li, R. (2024). Nuciferine Promotes Longevity and Fitness in *Caenorhabditis elegans* through the Regulation of the Insulin/IGF-1 Signaling Pathway. *Journal of Food Biochemistry*, 2024(1), 2779989.  
<https://doi.org/10.1155/2024/2779989>
- Yang, L., Wen, K. S., Ruan, X., Zhao, Y. X., Wei, F., & Wang, Q. (2018). Response of Plant Secondary Metabolites to Environmental Factors. *Molecules* 2018, Vol. 23, Page 762, 23(4), 762. <https://doi.org/10.3390/MOLECULES23040762>
- Yi, X., Huili, W., Jie, X., & Yanke, M. (2020). *New application of fermentation type active lactobacillus carrot juice beverage* (Patent CN111972582A).  
<https://patents.google.com/patent/CN111972582A/en?q=CN111972582A>
- Yi, Z., Jinlong, L., Xuenan, L., Jianxin, W., & Mingshan, C. (2023). *Feed additive for removing heavy metal residues and preparation method and application thereof* (Patent CN115736097A).  
<https://patents.google.com/patent/CN115736097A/en?q=CN115736097A>
- Yongjun, M. (2021). *External application paste for removing freckles, whitening skin, removing wrinkles and tightening skin* (Patent CN113350242A).  
<https://patents.google.com/patent/CN113350242A/en?q=CN113350242A>
- Zhang, C. lu, Liang, Z. suo, Guo, H. bo, Liu, J. ling, Liu, Y., Liu, F. hua, & Wei, L. zhu. (2015). Correlation analysis between meteorological factors, biomass, and active components of *Salvia miltiorrhiza* in different climatic zones. *Zhongguo Zhong Yao Za Zhi = Zhongguo Zhongyao Zazhi = China Journal of Chinese Materia Medica*, 40(4), 607–613. <https://doi.org/10.4268/cjcmm20150407>
- Zhao, T., Zhu, Y., Zhao, R., Xiong, S., Sun, J., Zhang, J., Fan, D., Deng, J., & Yang, H. (2023). Structure-activity relationship, bioactivities, molecular mechanisms, and

---

clinical application of nuciferine on inflammation-related diseases. *Pharmacological Research*, 193, 106820. <https://doi.org/10.1016/J.PHRS.2023.106820>

Zhao, Z., Wang, L., Chen, J., Zhang, N., Zhou, W., & Song, Y. (2024). Altitudinal variation of dragon fruit metabolite profiles as revealed by UPLC-MS/MS-based widely targeted metabolomics analysis. *BMC Plant Biology*, 24(1), 1–12. <https://doi.org/10.1186/S12870-024-05011-W/FIGURES/7>

Zhou, N., Ma, S., Zhang, M., & Wang, J. (2024). Effects of Different Cutting Styles on Physiological Properties in Fresh-Cut Carrots. *Plants* 2024, Vol. 13, Page 1665, 13(12), 1665. <https://doi.org/10.3390/PLANTS13121665>

Zhoun, J., & Xiaolin, L. (2018). *Pet nutritional granular with anti-oxidation function and preparation method thereof and application method* (Patent CN108783001A). <https://patents.google.com/patent/CN108783001A/en?q=CN108783001A>

Zhoun, J., Xiaolin, L., Chao, T., & Shiyuan, Z. (2018). *Improve nutritional granular of immunity of pets and preparation method thereof and application method* (Patent CN108783002A). <https://patents.google.com/patent/CN108783002A/en?q=CN108783002A>

Zhu, J., Wang, H., Chen, F., Fu, J., Xu, Y., Hou, Y., Kou, H. H., Zhai, C., Nelson, M. B., Zhang, Q., Andersen, M. E., & Pi, J. (2016). An overview of chemical inhibitors of the Nrf2-ARE signaling pathway and their potential applications in cancer therapy. *Free Radical Biology and Medicine*, 99, 544–556. <https://doi.org/10.1016/J.FREERADBIOMED.2016.09.010>

Zi, X., Zhou, S., & Wu, B. (2022). Alpha-Linolenic Acid Mediates Diverse Drought Responses in Maize (*Zea mays* L.) at Seedling and Flowering Stages. *Molecules*, 27(3), 771. <https://doi.org/10.3390/MOLECULES27030771>

## A. Anexo: Metabolitos anotados provenientes de los excedentes de producción de zanahoria

<i>ID</i>	<i>PubChem COD</i>	<i>Average Mz</i>	<i>Average Rt(min)</i>
Fumonisin B1	<u>2733487</u>	721,51245	9,236
PS O-35:0	<u>52926100</u>	763,5727	9,29
Heteratisine	<u>431671</u>	391,28796	5,504
2',5-Dimethoxyflavone	<u>4231835</u>	282,28143	4,463
20-Hydroxyecdysone 20,22-acetonide	<u>11060391</u>	520,43823	8,646
Bupirimate	<u>38884</u>	316,33536	1,732
1-Cyclohexylpyrrolidin-2-one	<u>81278</u>	167,03421	5,504
2',3'-Dideoxyadenosine	<u>20039</u>	235,17035	2,097
Demecolcine	<u>220401</u>	371,31857	5,606
Lycaconitine	<u>441745</u>	668,62463	10,654
Ergosine	<u>105137</u>	547,44916	8,633
Flavanomarein	<u>101781</u>	450,35989	5,507
2,6-Dichlorobenzamide	<u>16183</u>	189,16443	2,098
(3R,8aS)-Cyclo(phenylalanylprolyl)	<u>6427771</u>	244,26486	1,492
2-Aminobenzimidazol	<u>13624</u>	133,10211	6,090
3-carboxy-4-methyl-5-pentyl-2-furanpropanoic acid	<u>194501</u>	291,12286	2,570
5,6-Benzoflavone	<u>2361</u>	272,29550	2,099
Yellow OB	<u>8578</u>	279,16040	5,503
Nostoxanthin	<u>16061239</u>	600,42004	4,083
Tomatidine	<u>65576</u>	415,21451	1,352
Benzaldehyde	<u>240</u>	106,08667	2,023
Erucamide	<u>5365371</u>	337,20239	3,996
Cer(d18:1/2:0)	<u>5497136</u>	342,30145	3,023
alpha-Tocopherol	<u>14985</u>	430,39081	5,606
Fluorescein	<u>16850</u>	332,31833	1,433
N-Hexadecanoylpyrrolidine	<u>247220</u>	310,31152	5,245
3,7,4'-Trihydroxyflavone	<u>5281611</u>	270,31702	4,109

Nuciferine	<u>10146</u>	295,22827	0,903
Mesaconitine	<u>441747</u>	631,47290	9,857
Cryptotanshinone	<u>160254</u>	296,29578	2,730
2,4-dimethylphenylformamid	<u>92363</u>	149,02458	5,503
tetracosahexaenoic acid	<u>6439582</u>	357,20416	2,097
D-Glucosamine 6-phosphate	<u>440997</u>	259,19110	5,607
2',6-Dihydroxyflavanone	<u>5106787</u>	256,26474	4,302
(R)Semiovioxanthin	<u>194344</u>	274,27530	1,201
7-O-acetyldaphnoretin	<u>1269245</u>	394,29648	2,099
8-hydroxy-2-oxo-1(10),3-guaiadiene-12,6-olide	<u>139292029</u>	304,28546	1,566
Olitoriside	<u>94348</u>	696,65247	9,027
1-Aminocyclopropane-1-carboxylic acid	<u>535</u>	101,05958	5,606
PA(12:0/PGD1)	<u>156966192</u>	690,8000	2,13
Cytochalasin	<u>21672263</u>	507,27289	4,007
1,1,3,3-Tetrabutylurea	<u>20691</u>	284,29596	5,147
Metformin	<u>4091</u>	129,05437	5,607
Ajmaline	<u>6100671</u>	326,34473	5,550
Isovaleronitrile	<u>12244</u>	83,05003	2,418
Bacopaside X	<u>10629555</u>	898,75159	11,641
Bacopaside II	<u>9876264</u>	928,76697	11,173
Feruloyltyramine	<u>5280537</u>	313,27487	4,550
Nona-2,4,6-trienal	<u>92083</u>	136,0888	2,13
C17 Sphinganine	<u>3247037</u>	270,28131	1,429
Enniatin B	<u>164754</u>	653,45581	8,698
CE(DiMe(11,5))	<u>131770397</u>	360,32407	6,134
Oleoyl Ethanolamide-d4	<u>24762160</u>	330,33762	2,794
Afzelin	<u>5316673</u>	432,23941	1,352
Benzophenone-3	<u>4632</u>	228,26959	1,641
8-Benzylcanadine	<u>322372</u>	429,24142	5,504
3-[2-(3,7-dimethylocta-2,6-dien-1-yl)-3,4-dihydroxyphenyl]propanoic acid		319,19217	4,443
4'-Methoxyflavonol	<u>5281666</u>	268,20731	3,770
2-Butenedioic acid (2Z)	<u>444266</u>	340,32230	6,264
9-ribosyl-trans-zeatin	<u>6440982</u>	351,18088	3,783
1H-Isoindole-1,3(2H)-dione	<u>6809</u>	147,06520	5,606
DL-3,4-Dihydroxymandelic acid	<u>85782</u>	184,16966	6,137
Zeaxanthin	<u>5280899</u>	568,43237	5,211
DGGA 49:3	<u>138161818</u>	976,7579	10,95
Quercetin-3'-glycoside	<u>5280804</u>	610,55206	9,858

17-alpha-Estradiol	<u>68570</u>	272,29523	1,863
Antheraxanthin	<u>5281223</u>	584,42468	4,681
L-threonine	<u>6288</u>	119,08596	2,099
2,3-Quinolinedicarboxylic acid	<u>69508</u>	217,15953	2,098
Isopropyl dodecylfluorophosphonate	<u>24762154</u>	277,21716	0,903
Epiequisetin	<u>54708686</u>	373,17841	2,099
Noscapine	<u>275196</u>	413,26797	5,503
2'-Hydroxygenistein 4',7-O-diglucoside	<u>101644597</u>	610,18530	8,933
NAPE 54:1		848,5832	11,23
Kanamycin	<u>6032</u>	484,30887	4,369
2',3',6-Trimethoxyflavone	<u>688801</u>	312,32755	5,471
4-Hydroxy-2',3,4',6'-tetramethoxychalcone	<u>9974764</u>	344,35266	3,151
Reserpine	<u>5770</u>	608,52722	9,293
Alpinetin	<u>154279</u>	270,28064	1,958
Auraptene	<u>1550607</u>	298,31213	2,311
Malonyldaidzin	<u>9913968</u>	502,32516	3,784
10-Deacetylbaccatin III	<u>154272</u>	544,36511	4,707
Bromacil	<u>9411</u>	260,23792	4,239
zeta-Carotene	<u>5280788</u>	540,44452	7,934
Genistein 4',7-O-diglucoside malonylated		680,38678	5,652
3(2'-Chlorophenyl)-7-ethoxycoumarin	<u>689007</u>	300,32602	1,832
Cyclo(phenylalanylleucyl), (3S,6S)-form		260,23807	2,413
Amarouciaxanthin A	<u>16061220</u>	614,48529	3,982
Microcystin LW	<u>16760564</u>	1024,80676	11,976
Enniatin A	<u>57339252</u>	681,47644	7,613