

**EVALUACIÓN DE LA FACTIBILIDAD TÉCNICO-FINANCIERA PARA EL  
PROCESO DE EXTRACCIÓN DE  $\beta$ -CAROTENO PARTIENDO DE DESECHOS  
DE ZANAHORIA VARIEDAD CHANTENAY (*Daucus carota L.*)**

**DANIEL OTÁLORA ORREGO**

**FUNDACIÓN UNIVERSIDAD DE AMÉRICA  
FACULTAD DE INGENIERÍAS  
PROGRAMA DE INGENIERÍA QUÍMICA  
BOGOTÁ D.C  
2019**

**EVALUACIÓN DE LA FACTIBILIDAD TÉCNICO-FINANCIERA PARA EL  
PROCESO DE EXTRACCIÓN DE  $\beta$ -CAROTENO PARTIENDO DE DESECHOS  
DE ZANAHORIA VARIEDAD CHANTENAY (*Daucus carota L.*)**

**DANIEL OTÁLORA ORREGO**

**Proyecto integral de grado presentado para optar por el título de:  
INGENIERO QUÍMICO**

**Director**

**DARIO ALONSO MARTÍN GORDO**

**Químico de alimentos**

**FUNDACIÓN UNIVERSIDAD DE AMÉRICA**

**FACULTAD DE INGENIERÍAS**

**PROGRAMA DE INGENIERÍA QUÍMICA**

**BOGOTÁ D.C**

**2019**

Nota de Aceptación:

---

---

---

---

---

---

---

Felipe Correa Mahecha

---

Javier Francisco Rey

Bogotá D.C., Agosto de 2019

## **DIRECTIVAS DE LA UNIVERSIDAD**

Presidente institucional y Rector del Claustro

**DR. MARIO POSADA GARCÍA - PEÑA**

Vicerrector de Desarrollo y Recursos Humanos

**DR. LUIS JAIME POSADA GARCÍA PEÑA**

Vicerrectora Académica y de Posgrados

**ING. ANA JOSEFA HERRERA VARGAS**

Decano Facultad de Ingeniería

**ING. JULIO CÉSAR CIFUENTES ARISMENDI**

Director Programa Ingeniería

**ING. LEONARDO DE JESÚS HERRERA GUTIÉRREZ**

Las directivas de la Universidad de América, los jurados calificadores y el cuerpo docente no son responsables por los criterios e ideas expuestas en el presente documento. Estos corresponden únicamente al autor.

## DEDICATORIA

En primer lugar, a Dios por darme salud y la oportunidad de llegar a este momento. Dedicado a mis padres, Pastor y Liliana. Gracias por acompañarme y apoyarme incondicionalmente para superar los retos y las dificultades y disfrutar de los logros y momentos de regocijo a lo largo de estos años. Ustedes son el motor de mi vida, los amo mucho y espero que estén a mi lado en mis futuros proyectos.

A mi hermana Juliana, por darle buen humor a mi vida en esta nueva ciudad, por darme ánimo para ser mejor cada día y por ser mi modelo a seguir como profesional y como persona. Te admiro y me enorgullece tener a mi lado una persona tan íntegra y única.

A la Universidad de América, conformada por sus excelentes docentes, gracias por brindarme las herramientas necesarias para crecer como profesional y como persona.

A Renzo por unir más a nuestra familia y por hacer más ameno el desarrollo de este trabajo cuando me distraía para jugar.

A todos mis amigos que me acompañaron a lo largo de mi recorrido por la universidad y especialmente a mis amigos Aleja, Mafe y Gustavo, gracias por su amistad, humor y compromiso con el estudio. Les deseo los mayores éxitos en el futuro. Gracias por hacer tan divertido el tiempo que estuve en la ciudad y en la universidad.

Otra etapa de mi proyecto de vida se materializa, es hora de continuar la historia.

Daniel

## **AGRADECIMIENTOS**

Agradezco en primer lugar a la empresa Hortalizas Boyacá S.A.S. en representación del ingeniero Javier Arturo Moreno y conformada por los socios y demás directivos por permitirme ampliar mi conocimiento del campo y la agroindustria y brindar el apoyo técnico y financiero para el desarrollo de este proyecto, abriendo nuevos horizontes hacia el mejoramiento y crecimiento del campo colombiano.

También quiero agradecer especialmente al químico de alimentos y MSc en Química, Dario Alonso Martín Gordo, por su gentileza de impartir su amplio conocimiento y por su valiosa disposición y apoyo como director del presente proyecto desde el inicio hasta la culminación del mismo.

A la Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia de la ciudad de Tunja, por intermediación del PhD Jovanny Arlés Gómez Cataño, por permitirme hacer parte del grupo de investigación QUIMOL y permitirme el acceso al centro de laboratorios para llevar a cabo el desarrollo experimental de este proyecto.

Quiero agradecer de igual forma a la química de alimentos María del Carmen Camargo, por su amable disposición y ayuda para el inicio de este proyecto y por su profesionalismo en el gran aporte de la caracterización de la materia prima.

A Aleja Rodríguez por su apoyo incondicional en todo momento y por ayudarme más de una vez en los obstáculos que se me presentaron durante la etapa de experimentación.

De igual forma, agradezco al ingeniero químico Felipe Correa Mahecha, por su interés en el proyecto desde el comienzo, y por sus aportes importantes en la formulación y el desarrollo del mismo. Asimismo, a la ingeniera Sandra Liliana Mesa, por su dedicación y acompañamiento a lo largo de este proceso de aprendizaje.

Finalmente agradezco a mi familia y amigos por acompañarme durante esta etapa de la vida y ser ese soporte valioso, sin el cual, no habría podido llegar a cumplir este proyecto.

## CONTENIDO

	pág.
<b>INTRODUCCIÓN</b>	<b>26</b>
<b>OBJETIVOS</b>	<b>27</b>
<b>1. MARCO TEÓRICO</b>	<b>28</b>
1.1 GENERALIDADES DE LA ZANAHORIA CHANTENAY	28
1.1.1 Clasificación Taxonómica y Morfológica de la zanahoria.	29
1.1.2 Requerimientos edafológicos.	30
1.1.3 Plagas y enfermedades.	30
1.1.4 Propiedades físicas y químicas.	32
1.2 MERCADO DE LA ZANAHORIA CHANTENAY	33
1.2.1 Características de la cosecha y la postcosecha.	33
1.2.2 Cifras del mercado nacional y regional.	34
1.2.3 Producción en el departamento de Boyacá.	36
1.2.4 Producción y procesamiento en la empresa Hortalizas Boyacá S.A.S.	37
1.3 CONCEPTOS GENERALES DEL $\beta$ -CAROTENO	42
1.3.1 Clasificación de los carotenoides.	43
1.3.2 El $\beta$ -caroteno.	43
1.4 MERCADO DEL $\beta$ -CAROTENO	45
1.5 PROCESO DE EXTRACCIÓN DEL $\beta$ -CAROTENO NATURAL	46
1.5.1 Calidad de la zanahoria Chantenay ( <i>Daucus carota L.</i> ).	46
1.5.2 Tratamiento de la muestra.	46
1.5.3 Análisis proximal.	48
1.5.4 Técnicas de extracción del $\beta$ -caroteno.	50
1.5.4.1 Extracción Soxhlet.	51
1.5.4.2 Extracción asistida con ultrasonido (UAE).	52
1.6 CUANTIFICACIÓN ESPECTROFOTOMÉTRICA DEL $\beta$ -CAROTENO	55
<b>2. ANTECEDENTES</b>	<b>58</b>
2.1 MUESTREO	58
2.2 TRATAMIENTO DE LA MUESTRA	58
2.3 CARACTERIZACIÓN DE LA MUESTRA (ANÁLISIS PROXIMAL)	60
2.4 PARÁMETROS DE EXTRACCIÓN	64
2.4.1 Solvente o agente de extracción.	65
2.4.2 Extracción convencional Soxhlet.	67
2.4.2.1 Relación sólido – solvente.	68
2.4.2.2 Tiempo y temperatura de extracción.	69
2.4.2.3 Purificación o concentración del extracto.	70
2.4.3 Extracción asistida con ultrasonido (UAE).	70



2.4.3.1	Parámetros experimentales.	72
2.5	CUANTIFICACIÓN MEDIANTE LA ESPECTROFOTOMETRÍA UV-VIS	79
<b>3.</b>	<b>METODOLOGÍA</b>	<b>81</b>
3.1	SELECCIÓN DE ESPECIE	81
3.2	TRATAMIENTO DE LA MUESTRA	81
3.3	CARACTERIZACIÓN DE LA MUESTRA	82
3.3.1	Muestreo.	82
3.3.2	Análisis Proximal.	82
3.4	SELECCIÓN DE PARÁMETROS DE EXTRACCIÓN	83
3.4.1	Solvente o agente de extracción.	84
3.4.2	Extracción convencional Soxhlet.	84
3.4.3	Extracción asistida con ultrasonido (UAE).	85
3.5	PARÁMETROS DE LA CUANTIFICACIÓN DEL EXTRACTO	91
3.5.1	Técnica de la espectrofotometría UV-VIS.	92
3.6	PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL	93
<b>4.</b>	<b>PROCESO DE EXTRACCIÓN DEL <math>\beta</math>-CAROTENO</b>	<b>95</b>
4.1	SELECCIÓN Y ANÁLISIS DE LA MATERIA PRIMA	95
4.1.1	Observación de la calidad de la materia prima.	95
4.1.2	Muestreo.	96
4.1.3	Propiedades físicas de la muestra.	96
4.1.3.1	Peso.	97
4.1.3.2	Longitud.	97
4.1.3.3	Calibre.	98
4.1.3.4	Daños.	99
4.1.4	Ubicación del área de estudio	100
4.1.5	Tratamiento de la muestra.	100
4.1.6	Análisis proximal.	102
4.2	DESARROLLO EXPERIMENTAL	103
4.2.1	Materiales y reactivos.	103
4.2.2	Equipos.	104
4.2.3	Procedimiento.	104
4.2.3.1	Extracción Soxhlet.	105
4.2.3.2	Extracción asistida con ultrasonido.	107
4.3	CUANTIFICACIÓN DEL EXTRACTO DE $\beta$ -CAROTENO	109
4.3.1	Procedimiento.	109
4.4	ANÁLISIS DE RESULTADOS	111
4.4.1	Propiedades físicas de las muestras.	111
4.4.2	Resultados análisis proximal.	114
4.4.3	Extracción convencional Soxhlet.	117

4.4.3.1	Concentración del extracto.	117
4.4.3.2	Rendimiento de la extracción (Extracción Soxhlet).	122
4.4.3.3	Consumo energético.	123
4.4.4	Extracción asistida con ultrasonido (UAE).	124
4.4.4.1	Concentración del extracto.	124
4.4.4.2	Rendimiento de extracción (Extracción UAE).	127
4.4.4.3	Consumo energético.	129
4.4.5	Análisis estadístico.	130
4.4.5.1	ANOVA de un solo factor (Tiempo).	130
4.4.5.2	ANOVA de un solo factor (Temperatura).	131
4.4.5.3	Diseño factorial 3 <sup>2</sup> .	132
4.4.6	Comparación del rendimiento de las técnicas de extracción.	135
<b>5.</b>	<b>DISEÑO PRELIMINAR DEL PROCESO DE EXTRACCIÓN</b>	<b>139</b>
5.1	DESCRIPCIÓN GENERAL	139
5.2	PARÁMETROS TÉCNICOS DEL PROCESO	140
5.2.1	Análisis dimensional.	141
5.2.2	Materia prima.	142
5.2.3	Balances de materia.	142
5.2.3.1	Trituración.	142
5.2.3.2	Secado.	143
5.2.3.3	Corte.	143
5.2.3.4	Extracción asistida con ultrasonido.	144
5.2.4	Balances de energía.	145
5.2.4.1	Extracción asistida con ultrasonido.	146
5.2.4.2	Almacenamiento del producto terminado.	147
5.3	ESPECIFICACIONES TÉCNICAS DE LOS EQUIPOS	148
5.3.1	Almacenamiento de la materia prima.	148
5.3.2	Corte.	149
5.3.3	Secado.	151
5.3.4	Trituración.	153
5.3.5	Extracción asistida con ultrasonido.	153
5.3.6	Almacenamiento producto terminado.	155
5.4	REQUERIMIENTOS ENERGÉTICOS	156
5.5	DIAGRAMAS DEL PROCESO	157
5.5.1	Diagrama de Gantt del proceso por lotes.	157
5.5.2	Diagrama de Bloques (BFD).	158
5.5.3	Diagrama de proceso (PFD).	158
5.5.4	Planta física.	158

<b>6. ANÁLISIS FINANCIERO</b>	<b>164</b>
6.1 CAPACIDAD DE PRODUCCIÓN	164
6.1.1 Costo de materia prima.	165
6.1.2 Precio de venta del $\beta$ -caroteno.	165
6.1.3 Potencial Económico.	166
6.1.4 Costos fijos.	168
6.1.5 Costos variables.	170
6.1.6 Costos de inversión.	170
6.2 FLUJO DE CAJA	171
6.3 INDICADORES FINANCIEROS	174
6.3.1 Valor Presente Neto (VPN).	174
6.3.2 Tasa Interna de Retorno (TIR).	175
6.3.3 Relación Beneficio – Costo (R B/C).	175
<b>7. CONCLUSIONES</b>	<b>177</b>
<b>8. RECOMENDACIONES</b>	<b>179</b>
<b>BIBLIOGRAFÍA</b>	<b>180</b>
<b>ANEXOS</b>	<b>186</b>

## LISTA DE TABLAS

	pág.
Tabla 1. Principales plagas de la zanahoria en Colombia	30
Tabla 2. Principales enfermedades de la zanahoria en Colombia	31
Tabla 3. Efectos de las plagas y enfermedades en la zanahoria	31
Tabla 4. Contenido nutricional de la zanahoria por cada 100g de producto	32
Tabla 5. Clasificación de los carotenoides según su estructura molecular	43
Tabla 6. Propiedades del $\beta$ -caroteno	44
Tabla 7. Comparación de las técnicas de extracción de carotenoides	55
Tabla 8. Contenido de $\beta$ -caroteno en zanahorias deshidratadas	60
Tabla 9. Listado de artículos sobre extracción de $\beta$ -caroteno	64
Tabla 10. Características del solvente y relación solvente –sólido.	68
Tabla 11. Parámetros de tiempo y temperatura	69
Tabla 12. Técnicas de purificación o concentración del extracto.	70
Tabla 13. Parámetros de extracción (Revisión bibliográfica)	72
Tabla 14. Parámetros óptimos, Extracción UAE con zanahoria ( <i>Daucus carota</i> ).	79
Tabla 15. Coeficientes de extinción molar del $\beta$ -caroteno.	79
Tabla 16. Especificaciones técnicas baño ultrasónico Elmasonic E 60 H	86
Tabla 17. Peso unitario de la muestra de zanahoria Chantenay	97
Tabla 18. Longitud de la muestra de zanahoria Chantenay	98
Tabla 19. Calibre o diámetro mayor de la muestra de zanahoria Chantenay	98
Tabla 20. Datos registrados etapa de tratamiento de la muestra	100
Tabla 21. Resultados del análisis proximal.	102
Tabla 22. Materiales utilizados para el desarrollo experimental.	103
Tabla 23. Reactivos usados en el desarrollo experimental.	103
Tabla 24. Comparación peso, longitud y calibre de zanahorias en buen estado.	113
Tabla 25. Comparación resultados análisis proximal.	115
Tabla 26. Datos y parámetros de la extracción Soxhlet.	117
Tabla 27. Resultados concentración del extracto diluido.	120
Tabla 28. Resultados del factor de dilución (FD).	121
Tabla 29. Concentración de $\beta$ -caroteno corregida con FD.	121
Tabla 30. Rendimiento de extracción técnica Soxhlet.	123
Tabla 31. Equipos usados por etapa.	123
Tabla 32. Consumo energético, extracción convencional Soxhlet.	124
Tabla 33. Absorbancias extracción asistida con ultrasonido (UAE).	124
Tabla 34. Estructura fina espectral (%III/II) UAE.	125
Tabla 35. Concentración del extracto, extracción asistida con ultrasonido.	126
Tabla 36. Rendimiento de extracción asistida con ultrasonido.	127
Tabla 37. Promedio del rendimiento de extracción según tratamiento aplicado.	128
Tabla 38. Consumo energético, extracción convencional Soxhlet.	130
Tabla 39. Comparación rendimiento de extracción por ambas técnicas.	136
Tabla 40. Dimensiones tanque de almacenamiento de 2000 L.	149
Tabla 41. Especificaciones técnicas, descabezadora y cortadora.	150

Tabla 42. Dimensiones horno 749 L.	152
Tabla 43. Dimensiones triturador de zanahoria seca.	153
Tabla 44. Dimensiones Baño ultrasónico 167 L.	154
Tabla 45. Dimensiones inclinador hidráulico y refrigerador de 1200 L.	155
Tabla 46. Requerimientos energéticos proceso a escala planta piloto.	156
Tabla 47. Especificaciones y propiedades de las corrientes, diagrama PFD.	161
Tabla 48. Convenciones plano de distribución de la planta piloto.	163
Tabla 49. Costos de materia prima.	165
Tabla 50. Ingresos anualizados.	166
Tabla 51. Potencial económico del proceso.	167
Tabla 52. Costo para servicio energético.	168
Tabla 53. Cálculo Costos de mano de obra.	169
Tabla 54. Resultados costo de mano de obra.	169
Tabla 55. Costos de mantenimiento.	169
Tabla 56. Costos de inversión de los equipos.	171
Tabla 57. Costos de construcción y adecuación de la planta física.	171
Tabla 58. Tabla de amortización financiación del proyecto.	172
Tabla 59. Información para la construcción del flujo de caja.	173

## LISTA DE CUADROS

	pág.
Cuadro 1. Pruebas que constituyen el análisis bromatológico o análisis próximo.	48
Cuadro 2. Propiedades organolépticas de la muestra.	99
Cuadro 3. Equipos empleados en el desarrollo experimental.	104

## LISTA DE GRÁFICAS

	pág.
Gráfica 1. Diagrama de caja y bigotes, peso unitario	112
Gráfica 2. Diagrama de caja y bigotes, longitud.	113
Gráfica 3. Diagrama de caja y bigotes, calibre.	113
Gráfica 4. Espectro de absorbancia Soxhlet 1.	118
Gráfica 5. Espectro de absorbancia Soxhlet 2.	119
Gráfica 6. Efecto de la temperatura y el tiempo en el rendimiento de extracción.	128
Gráfica 7. Efecto de las variables manipuladas con la variable de respuesta.	134
Gráfica 8. Efecto conjunto de las variables manipuladas.	135

## LISTA DE FIGURAS

	pág.
Figura 1. Anatomía general de la zanahoria	29
Figura 2. Proceso productivo de la zanahoria	33
Figura 3. Rendimiento de producción de zanahoria en Colombia	34
Figura 4. Producción y rendimiento del cultivo de zanahoria 2007 – 2015	35
Figura 5. Precios mayoristas de la zanahoria	36
Figura 6. Área sembrada del cultivo de zanahoria en 2015	36
Figura 7. Estructuras de los principales carotenoides de los alimentos	42
Figura 8. Estructura química del $\beta$ -caroteno	44
Figura 9. Crecimiento del mercado de los carotenoides más representativos	45
Figura 10. Tratamientos para la extracción de compuestos bioactivos naturales	47
Figura 11. Técnicas de extracción de carotenoides	50
Figura 12. Montaje del proceso de extracción Soxhlet	52
Figura 13. Principio de funcionamiento de la extracción asistida con ultrasonido	53
Figura 14. Esquema del montaje de extracción asistida con ultrasonido (UAE)	54
Figura 15. Espectro de absorción de carotenoides en éter de petróleo.	56
Figura 16. Proceso de extracción de carotenoides a partir del fruto de la granada.	67
Figura 17. Procedimiento de extracción convencional con solventes orgánicos.	68
Figura 18. Diseños experimentales Extracción asistida con Ultrasonido (UAE)	71
Figura 19. Procedimiento para la extracción de carotenoides de zanahoria mediante un concepto de bio – refinería.	72
Figura 20. Efecto de la potencia de ultrasonido y el tiempo de extracción en el contenido de carotenoides.	75
Figura 21. Efecto del solvente de extracción en el contenido del extracto (Luteína y $\beta$ -caroteno) a partir de la microalga <i>Desmodesmus sp.</i>	76
Figura 22. Efecto del tiempo de extracción en el contenido del extracto (Luteína y $\beta$ -caroteno) a partir de la microalga <i>Desmodesmus sp.</i>	77
Figura 23. Concentración de $\beta$ -caroteno versus tiempo de extracción a diferentes relaciones zanahoria-aceite.	78
Figura 24. Procedimiento para la extracción convencional Soxhlet.	85
Figura 25. Potencias ultrasónicas (revisión bibliográfica)	86
Figura 26. Frecuencias ultrasónicas (Revisión bibliográfica)	87
Figura 27. Relación Sólido-solvente (revisión bibliográfica)	87
Figura 28. Comparación intervalos de temperatura y temperatura óptima (revisión bibliográfica) con rango de operación equipo Elmasonic E 60 H	88
Figura 29. Comparación rangos de temperatura evaluados (revisión bibliográfica) con rango operativo Baño ultrasónico Elmasonic E 60 H.	89
Figura 30. Diseño experimental extracción asistida con ultrasonido	90



Figura 31. Procedimiento para la extracción asistida con ultrasonido.	91
Figura 32. Procedimiento para la cuantificación del $\beta$ -caroteno	93
Figura 33. Procedimiento experimental	94
Figura 34. Determinación de la estructura fina espectral (%III/II).	119
Figura 35. Diagrama de bloques etapas generales del proceso.	140
Figura 36. Balance de materia en el proceso de trituración.	142
Figura 37. Balance de materia en el proceso de secado.	143
Figura 38. Balance de materia en el proceso de corte.	144
Figura 39. Balance de materia en el proceso de extracción.	145
Figura 40. Tanque de almacenamiento de aceite de 2000 L.	149
Figura 41. Máquina descabezadora y de corte.	150
Figura 42. Curva de secado Zanahoria Chantenay a 40 y 50°C .	151
Figura 43. Horno de secado.	152
Figura 44. Triturador de zanahoria seca (molino de discos).	153
Figura 45. Baño ultrasónico 167 L.	154
Figura 46. Inclinator hidráulico y Refrigerador de 1200 L.	155
Figura 47. Diagrama de Gantt etapas por lotes.	157
Figura 48. Diagrama de bloques, extracción de $\beta$ -caroteno a escala piloto.	159
Figura 49. Diagrama de proceso, extracción de $\beta$ -caroteno a escala piloto.	160
Figura 50. Plano de distribución de la planta piloto.	162

## LISTA DE IMÁGENES

	pág.
Imagen 1. Planta de producción Hortalizas Boyacá S.A.S.	37
Imagen 2. Cultivo de zanahoria Chantenay, vereda Foraquirá, municipio de Jenesano (Boyacá).	38
Imagen 3. Deterioro de la zanahoria Chantenay por nematodos.	39
Imagen 4. Máquina rotativa de lavado	39
Imagen 5. Cinta de inspección.	40
Imagen 6. Máquina descartadora.	40
Imagen 7. Máquina clasificadora por tamaño	41
Imagen 8. Proceso de empaque de zanahoria procesada	41
Imagen 9. Baño o limpiador ultrasónico	54
Imagen 10. Recepción de la materia prima	95
Imagen 11. Muestreo de zanahorias Chantenay de desecho	96
Imagen 12. Empaque de la muestra para análisis posterior	96
Imagen 13. Secado de la zanahoria Chantenay ( <i>Daucus carota L.</i> )	101
Imagen 14. Proceso de conservación del material tratado	101
Imagen 15. Montaje de extracción Soxhlet utilizado.	105
Imagen 16. Primer sifón de la extracción Soxhlet.	106
Imagen 17. Rotulado extracto Soxhlet.	106
Imagen 18. Muestras de zanahoria triturada.	107
Imagen 19. Montaje de extracción asistida con ultrasonido.	108
Imagen 20. Muestras 1 a 6 luego de exposición a ultrasonido.	108
Imagen 21. Definición del método y variables ANOVA (Tiempo).	130
Imagen 22. Resultados ANOVA de un factor (Tiempo).	131
Imagen 23. Definición del método y variables ANOVA (Temperatura).	131
Imagen 24. Resultados ANOVA de un factor (Temperatura).	132
Imagen 25. Definición de parámetros análisis estadístico.	133
Imagen 26. Resultados análisis de varianza modelo factorial.	133

## LISTA DE ECUACIONES

	pág.
Ecuación 1. Ley de Lambert - Beer	55
Ecuación 2. Calorías como energía disponible (método cálculo)	61
Ecuación 3. Determinación de carbohidratos (método diferencia)	61
Ecuación 4. Contenido de humedad base húmeda (método gravimétrico).	61
Ecuación 5. Contenido de cenizas (método gravimétrico)	62
Ecuación 6. Cálculo de la fibra cruda (método gravimétrico).	62
Ecuación 7. Grasa o extracto etéreo (método gravimétrico).	63
Ecuación 8. Proteína cruda (método Kjeldahl)	63
Ecuación 9. Porcentaje de materia seca (método diferencia)	63
Ecuación 10. Correlación para la concentración de pigmentos en aceites vegetales.	80
Ecuación 11. Porcentaje de agua removido.	102
Ecuación 12. Cálculo de la densidad del aceite extra refinado.	109
Ecuación 13. Factor de dilución.	111
Ecuación 14. Cálculo del volumen de aceite y hexano puro.	120
Ecuación 15. Rendimiento de extracción.	122
Ecuación 16. Masa equivalente de aceite, extracción (Soxhlet 1).	122
Ecuación 17. Balance de materia proceso de trituración y datos adicionales.	143
Ecuación 18. Balance de materia proceso de secado y datos adicionales.	143
Ecuación 19. Balance de materia proceso de corte y datos adicionales.	144
Ecuación 20. Porcentaje de retención de aceite	145
Ecuación 21. Balance de materia proceso de extracción.	145
Ecuación 22. Balance de energía proceso de extracción.	146
Ecuación 23. Potencia del sistema de control de temperatura, baño ultrasónico.	147
Ecuación 24. Balance de energía proceso de refrigeración del producto terminado.	147
Ecuación 25. Potencia del refrigerador de almacenamiento del producto terminado.	148
Ecuación 26. Tasa de interés de oportunidad (Método básico).	173
Ecuación 27. Valor Presente Neto.	174
Ecuación 28. Relación Beneficio – Costo.	175

## LISTA DE ANEXOS

	pág.
Anexo A. Ficha técnica, baño ultrasónico Elmasonic E60H.	187
Anexo B. Espectros de absorbancia extracción Ultrasonido T = 30°C.	188
Anexo C. Espectros de absorbancia extracción Ultrasonido T = 40°C.	189
Anexo D. Espectros de absorbancia extracción Ultrasonido T = 50°C.	190
Anexo E. Flujo de caja con financiación.	191

## ABREVIATURAS

cm	Centímetro
nm	Nanómetro
km	Kilómetro
m.s.n.m.	Metros sobre el nivel del mar
kcal	Kilo calorías
Ton	Tonelada
°C	Grados Celsius
°Brix	Grados Brix
g	Gramo
kg	Kilogramo
mg	Miligramo
µg	Microgramo
g/cm <sup>3</sup>	Gramos por centímetro cúbico
g/mol	Gramos por mol
h	Hora
min	Minutos
s	Segundos
%	Porcentaje
pH	Potencial de hidrógeno
L	Litros
mL	Mililitros
µL	Micro litros
l <sub>0</sub>	Longitud solución
$\bar{x}$	Promedio muestral
$\sigma$	Desviación estándar
$\beta$	Beta
$\lambda$	Longitud de onda
$\rho$	Densidad
$\epsilon$	Constante de absortividad o de extinción molar
Ha	Hectárea
psi	Libra por pulgada cuadrada
mmHg	Milímetros de mercurio
kHz	Kilo Herz
MHz	Mega Herz
W	Watts
CO <sub>2</sub>	Dióxido de carbono
H <sup>+</sup>	Ion hidronio
A	Absorbancia
[C]	Concentración
N	Concentración normal
V	Volumen

T	Temperatura
UV-VIS	Ultravioleta – Visible
HR%	Humedad Relativa
UI	Intensidad Ultrasónica
PM	Peso molecular
CE	Extracción Convencional
MAE	Extracción Asistida con Microondas
UAE	Extracción Asistida con Ultrasonido
NTC	Norma Técnica Colombiana
AOAC	Asociación de Químicos Analíticos Oficiales
REACH	Registration, Evaluation, Authorisation and Restriction of Chemical Substances
VPN	Valor Presente Neto
TIO	Tasa de interés de oportunidad
TIR	Tasa interna de retorno
R B/C	Relación beneficio - costo
COP	Peso Colombiano
USD	Dólar Estadounidense
S.A.S.	Sociedad Anónima Simplificada
.	Separador de decimales
,	Separador de miles
‘	separador de millones

## GLOSARIO

**BAÑO ULTRASÓNICO:** también conocido como limpiador ultrasónico, consiste de un tanque rectangular construido en acero inoxidable resistente a la cavitación. Se encarga de difundir ondas ultrasónicas a una frecuencia determinada a una solución contenida en el mismo. Permite el control de variables como la temperatura, tiempo, potencia y frecuencia.

**BLANCO:** solución que no contiene el compuesto o sustancia que se requiere cuantificar durante un análisis espectrofotométrico.

**CHANTENAY:** variedad de zanahoria de nombre científico (*Daucus carota L.*) caracterizada por su longitud semicorta y de cuello de alto espesor.

**CONCENTRACIÓN:** medida de la cantidad de materia de un compuesto en específico en una mezcla o solvente, este se puede expresar en unidades másicas, de volumen o de ambas.

**ESPECTRO DE ABSORBANCIA:** señal de respuesta que arroja un espectrofotómetro luego de realizar la respectiva lectura de la absorción de luz de una muestra. Generalmente se expresa como una gráfica de absorbancia versus longitud de onda.

**ESPECTROFOTOMETRÍA:** técnica de cuantificación de compuestos químicos presentes en muestras en solución bajo el principio de la absorción de la luz en el espectro visible o ultravioleta – visible a diferentes longitudes de onda, obedeciendo a la ley de Lambert – Beer y permitiendo detectar el valor de la absorbancia del compuesto en específico.

**PIGMENTO:** se refiere a los compuestos colorantes de origen natural, por ejemplo, de origen vegetal, microbiano o mineral.

**RALEO:** actividad agrícola que consta de eliminar malezas y plantas intrusas en un cultivo, para evitar la afectación del producto en la etapa de crecimiento.

**RENDIMIENTO:** medida de la efectividad de un proceso químico con base en la cantidad de materia usada para el mismo.

**RICHE:** nombre coloquial que se refiere a la clasificación de última selección de los vegetales, también llamado destare o rescoje.

**SOLUCIÓN:** mezcla de compuestos constituida por el soluto, el cual se encuentra disuelto en un solvente; el primero, en su mayoría, es un sólido, mientras que el último, es un líquido.

**SOXHLET:** técnica convencional de extracción de tipo sólido líquido a través de compuestos solventes volátiles por medio de un montaje que se compone de un receptor o recipiente contenedor de solvente, un contenedor de muestra con escape tipo sifón y un condensador.

**TAXONOMÍA:** proceso de designación de nombre y clasificación de animales y plantas en grupos en un sistema estándar, teniendo en cuenta sus similitudes o diferencias.

**TETRATERPENOIDE:** compuesto conformado por 40 unidades de carbono formando una estructura química lineal, característica de los carotenoides.

**TRATAMIENTO:** hace referencia a las condiciones o circunstancias a las cuales se expone una muestra durante un experimento.

**VOLATILIDAD:** hace referencia a la variabilidad de los precios del mercado dado un sector o nicho de mercado en específico.

**β-CAROTENO:** compuesto carotenoide derivado de los hidrocarburos, conformado por ocho unidades de isopreno de 40 carbonos y de estructura bicíclica, presente en una gran variedad de plantas y caracterizado por proveer de coloración naranja o rojiza a estas. También conocido como provitamina A.

**ZANAHORIA:** planta de cultivo que produce raíces de coloración naranja comestible como vegetal.



## RESUMEN

El presente trabajo de grado se realizó con el fin de determinar la factibilidad del proceso de extracción de  $\beta$ -caroteno partiendo de zanahoria Chantenay descartada por la empresa Hortalizas Boyacá S.A.S. a partir de técnicas de extracción sólido – líquido de compuestos bioactivos.

Inicialmente se realizó una revisión de antecedentes y comparación de estudios similares dirigidos a la extracción de carotenoides y, en especial, b-caroteno mediante ultrasonido y Soxhlet, que permitió establecer los parámetros del proceso como tiempo, temperatura, relación sólido – solvente, agente de extracción. Para la primera técnica, estos parámetros fueron 6h, 70°C, 2:10 y Hexano respectivamente; mientras que para la segunda fueron (10, 20 y 30 min), (30, 40 y 50°C), 2:1 y aceite de girasol respectivamente.

Posteriormente se llevó a cabo el desarrollo experimental iniciando con la caracterización física y bromatológica de la materia prima encontrando un peso unitario, longitud y calibre promedio de 145.8 g, 10.540 cm y 5.026 cm. El contenido de humedad fue de 81.96 g, cenizas 6.24 g, fibra cruda 2.58 g, grasa 0.59 y actividad de agua  $A_w$  0.963 encontrando una diferencia significativa en los parámetros de cenizas, fibra y grasa y una pérdida de humedad asociada a los daños de las raíces. La concentración promedio de la extracción convencional Soxhlet arrojó un valor de 56.5 mg  $\beta$ -caroteno/kg aceite y un rendimiento de 21.8 mg  $\beta$ -caroteno/100 g de zanahoria seca. Mientras que, para la extracción asistida con ultrasonido, las mejores condiciones se presentaron para los tratamientos de tiempo y temperatura de 30 min y 40°C respectivamente, obteniéndose una concentración y rendimiento de extracción promedio de 2.6641  $\beta$ -caroteno/kg aceite y 1.0144 mg  $\beta$ -caroteno/100 g de zanahoria seca respectivamente.

Con los resultados del desarrollo experimental se diseñó el proceso preliminar de extracción de  $\beta$ -caroteno a escala piloto, la cual tiene una capacidad de producción de 18.9 kg/h de extracto enriquecido con  $\beta$ -caroteno, a partir de 30 kg de zanahoria fresca y 19.7 kg/h de aceite de girasol extra refinado con un consumo energético de 255.64 kWh/día y una generación de 5.695 kg/h de precipitado residual.

Finalmente se calculó la factibilidad financiera con un horizonte de proyecto de 10 años, una inversión de COP \$166´897,495, con 50% de financiación a 5 años con una tasa de interés anual del 10%; los ingresos, costos fijos y variables anuales fueron de COP \$799´904,560, COP \$80´794,460 y COP \$675´198,965 respectivamente. Encontrando un VPN = COP \$20´821,138, TIR = 26% y R(B/C) = 1.25, concluyéndose que el proyecto es financieramente factible.

**PALABRAS CLAVE:** Zanahoria,  $\beta$ -caroteno, Soxhlet, Ultrasonido.

## INTRODUCCIÓN

Actualmente el desarrollo agrícola en Colombia se encuentra en una etapa de transformación; sin embargo, ha sido un proceso lento y lleno de tropiezos principalmente por las dificultades que ha sufrido este sector gracias al hecho de que su desempeño económico depende directamente de la oferta y la demanda de los productos. Por otro lado, su desarrollo tecnológico es precario y aún se practican técnicas convencionales que limitan la productividad y calidad de los alimentos. Finalmente, las condiciones externas, en su mayoría consecuencia del cambio climático afectan la calidad de los productos generando pérdidas millonarias por la incapacidad de comercializar dichos alimentos y causando contaminación de los suelos por materia orgánica por estos productos desechados.

El presente proyecto se realizó para la empresa Hortalizas Boyacá S.A.S., la cual procesa hortalizas cosechadas en la provincia central de Boyacá siguiendo los procesos de lavado, selección, secado, clasificación por tamaño y empaque; además de comercializarlas a mercados de grandes superficies y demás supermercados en el país. La zanahoria Chantenay es uno de los productos procesados por esta empresa en una cantidad aproximada de 10 Ton diarias; no obstante, gran parte de estas resultan ser descartadas para el consumo humano por cuestiones de calidad generando pérdidas económicas a diario. Por lo anterior se decidió plantear una propuesta para el aprovechamiento de este material y de uno de sus compuestos bioactivos principales de alto valor comercial y con una participación en el mercado de la industria de alimentos y farmacéutica a nivel nacional e internacional conocido como el  $\beta$ -caroteno.

Para tal fin se realizó una evaluación del proceso de extracción de  $\beta$ -caroteno con el objetivo de aprovechar el material descartado; inicialmente, definiendo y estableciendo las características técnicas del proceso. Posteriormente comparando y evaluando las variables involucradas en el proceso mediante un desarrollo experimental a escala laboratorio utilizando dos técnicas de extracción, una convencional y otra más reciente. Seguido por el análisis del dimensionamiento de este proceso a escala piloto junto con la evaluación de la factibilidad financiera del mismo.

En el siguiente documento se presentará el planteamiento, desarrollo y evaluación de una propuesta para el proceso de extracción de  $\beta$ -caroteno a partir de desechos de zanahoria Chantenay descartados en la empresa Hortalizas Boyacá S.A.S. desde un enfoque técnico y financiero a través de técnicas y herramientas aportadas por la ingeniería química y el diseño de procesos químicos.

## **OBJETIVOS**

### **OBJETIVO GENERAL**

Evaluar la factibilidad técnico-financiera para el proceso de extracción de  $\beta$ -caroteno partiendo de desechos de zanahoria variedad Chantenay (*Daucus carota L.*).

### **OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

1. Establecer los parámetros del proceso de extracción de  $\beta$ -caroteno mediante ultrasonido y Soxhlet.
2. Comparar el rendimiento de los métodos de extracción propuestos.
3. Establecer los requerimientos técnicos del proceso a escala piloto.
4. Determinar la viabilidad financiera del proceso mediante indicadores financieros.

## 1. MARCO TEÓRICO

En este capítulo se presenta una breve descripción de los conceptos que giran en torno a la evaluación del proceso en cuestión. Una primera parte se enfoca en las generalidades de la zanahoria variedad Chantenay como fuente y materia prima del proceso haciendo hincapié en el producto de descarte o desecho de interés; seguido de las generalidades del  $\beta$ -caroteno como producto de interés. Luego, una segunda parte dedicada a la descripción de las técnicas de análisis de la materia prima iniciando desde el muestreo hasta el análisis fisicoquímico. Posteriormente, se definen las características principales de los métodos de extracción por Soxhlet y asistido con ultrasonido junto con las técnicas de caracterización y cuantificación del  $\beta$ -caroteno.

La industria de alimentos y farmacéutica se encuentran en constante desarrollo tecnológico como resultado principalmente del crecimiento poblacional a nivel mundial, dicho efecto también se ve influenciado por la aparición de nuevas tendencias en el mejoramiento de los procesos industriales en la búsqueda de la reducción del impacto ambiental y de la implementación de estrategias limpias y sostenibles que se adopten a las nuevas leyes y normas internacionales sin afectar la creciente demanda de sus productos en el mercado. Por una parte, promueve la disminución de desechos o el uso de sustancias peligrosas o tóxicas para el medio ambiente, enfocándose ahora en buscar componentes sustitutos de fuentes naturales que puedan suplir parcial o totalmente dichas sustancias convencionales. El  $\beta$ -caroteno es un colorante aditivo de uso frecuente en la industria de alimentos o la industria farmacéutica no solo por su capacidad de mejorar el aspecto de los productos sino también por su alto valor nutricional como provitamina A. Actualmente, gran parte de su producción se da por métodos o procesos químicos sintéticos; sin embargo, la aparición de nuevas propuestas industriales para producir este compuesto a partir de fuentes naturales muestra un futuro prometedor y una alternativa potencialmente efectiva para hacer frente a la problemática ambiental presente.<sup>1</sup>

### 1.1 GENERALIDADES DE LA ZANAHORIA CHANTENAY

La demanda de los productos de la canasta familiar en Colombia ha aumentado considerablemente en los últimos años por varios factores, principalmente por el crecimiento poblacional. La zanahoria es una de las hortalizas que ha mostrado crecimiento en su mercado y de manera similar el volumen de producción de la

---

<sup>1</sup> Y. Li, et al. Green ultrasound-assisted extraction of carotenoids based on the bio-refinery concept using sunflower oil as an alternative solvent. En: *Ultrasonics Sonochemistry* 20 (2013). 2012. p.12.

misma en el país, específicamente en los departamentos de Antioquia, Cundinamarca y Boyacá.<sup>2</sup>

### 1.1.1 Clasificación Taxonómica y Morfológica de la zanahoria.

**Nombre común:** Zanahoria Chantenay

**Nombre científico:** *Daucus carota* L.

**Familia botánica:** *Umbeliferae*

**Género:** *Daucus*

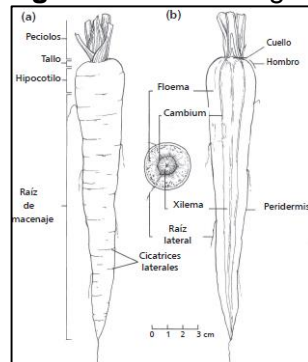
**Variedad:** *carota*

**Tipo:** raíz

La zanahoria Chantenay, es una hortaliza cuya planta se clasifica como herbácea y presenta un comportamiento bianual dado por el tiempo que tarda su desarrollo, es decir, su fase vegetativa y reproductiva ocurre en dos etapas, para lo cual requieren de frío para florecer y su ciclo es largo. Este tipo de zanahoria es característico de los climas fríos en las zonas tropicales. También se clasifica como semicorta (10 – 12cm) por su longitud promedio y por ser de tipo híbrida, es decir, es resultado de un cruce natural entre plantas similares con el objetivo de mejorar sus propiedades y la calidad del cultivo.<sup>3</sup>

Morfología: sistema radicular, raíz de forma y color variables. Tiene función almacenadora, presentando numerosas raíces secundarias con función de absorción. Estructura compuesta en el exterior por floema secundario y en el interior por el xilema y la médula<sup>4</sup>. (**Figura 1**).

**Figura 1.** Anatomía general de la zanahoria



**Fuente:** ALESSANDRO, María S. Manual de Producción de Zanahoria. Editado por GAVIOLA, Julio C. Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria.

<sup>2</sup> CÁMARA DE COMERCIO DE BOGOTÁ. Manual Zanahoria. Proyecto realizado por: Núcleo Ambiental S.A.S. Programa de apoyo agrícola y agroindustrial, vicepresidencia de fortalecimiento empresarial. 2015. p. 36.

<sup>3</sup> *Ibid*, p. 29

<sup>4</sup> PINTO, María R. *et al.* Producción Ecológica Certificada de Hortalizas de Clima Frío. Fundación Universidad de Bogotá Jorge Tadeo Lozano. ISBN 958-9029-42-3. 2003. p. 161.

**1.1.2 Requerimientos edafológicos.** Temperatura: preferencia por los climas templados, sin embargo, resiste a zonas de clima frío (15 – 21°C), las condiciones óptimas de crecimiento se encuentran a alturas comprendidas entre los 1800 y 2900 m.s.n.m.<sup>5</sup>

Suelo: arcillo-calizos, aireados y frescos, ricos en materia orgánica bien descompuesta (>3.5%); estos deben ser profundos, sueltos y bien aireados. El pH debe estar comprendido entre 5.8 y 7.0.<sup>6</sup>

**1.1.3 Plagas y enfermedades.** Una de las limitantes de la calidad de las zanahorias durante su ciclo productivo es la aparición de plagas o enfermedades causadas por condiciones ajenas al producto en sí. Es por esto que gran parte de los recursos invertidos en los cultivos de esta hortaliza están destinados al monitoreo, control y manejo de plagas con el objetivo de proveer un producto limpio y en las mejores condiciones de inocuidad. Esto se logra generalmente, empleando estrategias que impidan el crecimiento de poblaciones por encima del límite crítico evitando niveles perjudiciales.

Las plagas son los principales causantes de enfermedades en la planta, estos son generalmente insectos que se pueden presentar en forma de larvas y transformarse en el tiempo, o bien como insectos que no sufren una transformación. Las enfermedades se consideran entonces, como la alteración en el funcionamiento de las plantas, causadas por hongos, virus y/o bacterias; y se ven expresadas como pudriciones, deformaciones o manchas<sup>7</sup>. Algunas de las plagas más comunes que afectan a la zanahoria se encuentran discriminadas en la **Tabla 1**.

**Tabla 1.** Principales plagas de la zanahoria en Colombia

Clasificación	Nombre común	Nombre científico
Plagas de suelo	Gusano blanco de la zanahoria	<i>Listroderes sp</i>
	Gusano alambre	<i>Agriotis obscurus</i>
	Nematodos	<i>Meloidogyne spp; Heterodera carotae</i>
	Babosas	<i>Milax gagates</i>
Plagas de follaje y/o frutos	Mosca de la zanahoria	<i>Psylla rosae</i>
	Trips	<i>Frankiniella sp</i>
	Afidos o pulgones	<i>Myzus sp y Aphis sp</i>

**Fuente:** CÁMARA DE COMERCIO DE BOGOTÁ. Manual Zanahoria. Proyecto realizado por: Núcleo Ambiental S.A.S. 2015

Para el caso de las enfermedades del cultivo de la zanahoria más comunes en Colombia generadas como consecuencia de las plagas se muestran en la **Tabla 2**.

<sup>5</sup> CÁMARA DE COMERCIO DE BOGOTÁ. *Op Cit.* p. 29.

<sup>6</sup> *Ibid.* p. 30.

<sup>7</sup> *Ibid.* p. 30.

**Tabla 2.** Principales enfermedades de la zanahoria en Colombia

Nombre común	Agente Causal
Damping off – Mal del talluelo	Complejo de hongos: <i>Pythium sp</i> , <i>Fusarium oxysporum</i> , <i>Rhizoctonia solani</i> , <i>Sclerotium tode</i> .
Oidio	<i>Erysiphe umbelliferarum</i>
Mancha foliar	<i>Alternaria dauci</i>
Cercospora	<i>Cercospora carotae</i>
Bacteriosis	<i>Erwinia carotavora</i> y <i>xanthomonas carotae</i>

**Fuente:** CÁMARA DE COMERCIO DE BOGOTÁ. Manual Zanahoria. Proyecto realizado por: Núcleo Ambiental S.A.S. 2015.

En la **Tabla 3** se presentan las diferentes plagas y enfermedades anteriormente mencionadas junto con el efecto o afección física o visible en esta hortaliza.

**Tabla 3.** Efectos de las plagas y enfermedades en la zanahoria

Plagas	
Nombre de la plaga	Efectos
Gusano blanco de la zanahoria	Daño a nivel de la raíz y cuello de la raíz
Gusano alambre	Mortalidad de la planta por daño a la raíz
Nematodos	Aparición de nódulos (tumores), pudriciones, reducción de raicillas
Babosas	Daño al follaje, corte de las plántulas y hojas
Mosca de la zanahoria	Aparición de gallerías en la parte externa generando pudriciones
Trips	Amarillamiento de la planta y raspaduras en la zanahoria
Afidos o pulgones	Deformación y enrollamiento de la zanahoria afectando el crecimiento
Enfermedades	
Nombre de la enfermedad	Efectos
Damping off – Mal del talluelo	Amarillamiento de las hojas, marchitamiento, bifurcación de la raíz
Oidio	Manchas de color amarillento y blanco en las hojas
Mancha foliar	Manchas en tejidos maduros y lesiones irregulares de color café oscuro
Cercospora	Manchas similares a las manchas foliares
Bacteriosis	Manchas en las hojas y transmisión por semillas

**Fuente:** CÁMARA DE COMERCIO DE BOGOTÁ. Manual Zanahoria. Proyecto realizado por: Núcleo Ambiental S.A.S. 2015

Entre los defectos más comunes encontrados luego de la etapa de cosecha de la zanahoria se destacan<sup>8</sup>:

- Ataques de insectos (11.8%)
- Raíces con hombros verdes (11.3%)
- Raíces bifurcadas (8.2%)
- Raíces con hombros púrpuras (3.9%)
- Raíces rajadas (1.7%)
- Raíces florecidas prematuramente (1.5%)
- Raíces con podredumbres (1.3%)
- Raíces pálidas (0.7%)

Adicionalmente, la presencia de malezas o plantas indeseadas de crecimiento rápido, representan una gran dificultad, ya que, además de facilitar la propagación de plagas y la generación de enfermedades, también compiten por el consumo de agua, nutrientes y CO<sub>2</sub>. Por esta razón es necesario realizar aplicaciones periódicas de agroquímicos, bactericidas y fungicidas<sup>9</sup>. Estas estrategias de control no solo generan costos de mantenimiento para el agricultor, sino que también cada día son más complejas por el aumento de la resistencia de las plagas a estas.

**1.1.4 Propiedades físicas y químicas.** La zanahoria Chantenay se caracteriza por su coloración naranja brillante, de consistencia firme. Esta hortaliza se destaca por su alto contenido de carotenos, en especial de pro-vitamina A. Aproximadamente el 90% de su peso corresponde a agua. Es un tubérculo hipocalórico que le puede aportar a una dieta normal hasta el 40% de calorías.<sup>10</sup> Su composición nutricional se resume en la Tabla 4.

**Tabla 4.** Composición nutricional de la zanahoria por cada 100g de producto.

Componente	Contenido	Componente	Contenido
Calorías	36	Fósforo	30 mg
Agua	86 g	Hierro	1.5 mg
Carbohidratos	10.7 g	Vitamina A	10500 U.I.
Grasas	0.1 g	Tiamina	0.04 mg
Proteínas	0.9 g	Riboflavina	0.04 mg
Fibra	1.2 g	Niacina	0.5 mg
Cenizas	1.1 g	Ácido ascórbico	3.0 mg
Calcio	80 mg		

**Fuente:** DUKE, James A. Handbook of Energy Crops. Purdue University. 1983.

<sup>8</sup> ALESSANDRO, María S. Manual de Producción de Zanahoria. Editado por GAVIOLA, Julio C. Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria. Capítulo 2. Características botánicas y tipos varietales. p. 44.

<sup>9</sup> CÁMARA DE COMERCIO DE BOGOTÁ, 2015. *Op Cit.* p. 29.

<sup>10</sup> *Ibid.* p. 32.



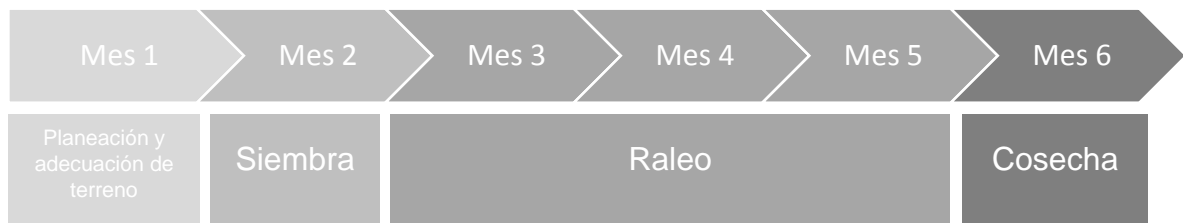
## 1.2 MERCADO DE LA ZANAHORIA CHANTENAY

Al tratarse de un producto con un valor en el mercado fluctuante como consecuencia del efecto directo de la oferta y la demanda y las condiciones climáticas extremas causadas por el Fenómeno del Niño y de La Niña; traen como resultado periodos de incertidumbre y de pérdidas económicas para los cultivadores de dicha hortaliza, afectando el mercado local y por ende la mano de obra se verá de igual forma perjudicada.

**1.2.1 Características de la cosecha y la postcosecha.** El tiempo aproximado del cultivo de la zanahoria Chantenay en Colombia es de 4 a 5 meses luego de la siembra, no obstante, se requiere verificar el diámetro de la raíz, el cual debe estar comprendido entre los 4 y 5 cm. La cosecha se lleva a cabo de forma manual aflojando la tierra usando azadón y posteriormente arrancando la raíz. De igual forma es posible encontrar una serie de máquinas que facilitan este proceso gracias a que aprovechan las hojas de la planta que se encuentran en la superficie para arrancar la raíz de la tierra.<sup>11</sup>

Después de la cosecha, se realiza una primera selección en campo, en la cual se descartan las zanahorias con defectos y no aptas para el mercado o consumo humano, identificando paralelamente las plagas o enfermedades que estas sufrieron para un control posterior en cultivos futuros. El proceso productivo de la zanahoria a grandes rasgos se representa en el diagrama de la **Figura 2**.

**Figura 2.** Proceso productivo de la zanahoria



**Fuente:** elaboración propia.

La conservación y el manejo del producto después de su recolección y hasta el momento de entrega al consumidor genera aproximadamente un 25% de pérdidas, derivadas de la forma de recolección, el manejo y el almacenamiento.<sup>12</sup> Algunos de los factores que pueden llegar a deteriorar esta hortaliza y que hacen parte de los motivos que generan grandes pérdidas en la etapa de postcosecha están relacionados con la calidad del agua en el lavado, el control de temperatura de almacenamiento y transporte y la calidad del empaque final del producto<sup>13</sup>.

<sup>11</sup> CÁMARA DE COMERCIO DE BOGOTÁ, 2015. *Op Cit.* p. 29.

<sup>12</sup> *Ibid.* p. 33.

<sup>13</sup> CÁMARA DE COMERCIO DE BOGOTÁ, 2015. *Op Cit.* p. 30.

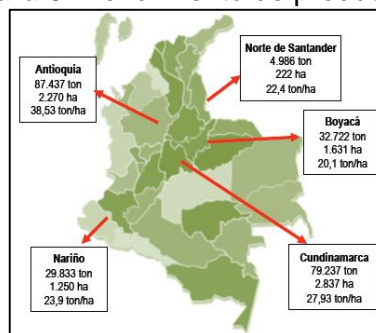
La zanahoria Chantenay al igual que las otras variedades de zanahoria en Colombia se clasifican según su aspecto y tamaño como<sup>14</sup>:

- Gruesa: comercializada en supermercados y grandes superficies
- Cero: son las de mayor tamaño; comercializadas para restaurantes
- Rescoje: de menor tamaño, comercializadas en tiendas locales y mercados de barrio
- Riche: de tamaño pequeño o irregular, destinadas al consumo animal.

Finalmente, ésta se comercializa en su gran mayoría en costales de fique de 60 kg o 50 kg. El tiempo de conservación a condiciones óptimas oscila entre las 20 y 24 semanas, comúnmente se recomienda consumir en periodo menor a los cuatro meses. Teniendo en cuenta que este tiempo límite de conservación varía dependiendo de la calidad del producto y las condiciones de transporte y almacenamiento a las cuales estas fueron expuestas.

**1.2.2 Cifras del mercado nacional y regional.** En el año 2013 se reportaron 8,466.4 ha sembradas con zanahoria y para ese mismo año se alcanzó una producción total de 236,834.2 Ton. Los departamentos más destacados para este año fueron Antioquia con 36.9% del total de la producción, seguido por Cundinamarca con 33.5%, Boyacá con 13.8%, Nariño con 12.6% y Norte de Santander con 2.1%. Sólo estos cinco departamentos representan el 98.8% de la producción total de esta hortaliza. La Figura 3 ilustra los rendimientos de producción de zanahoria de estos departamentos expresados como toneladas por hectárea (Ton/Ha).

**Figura 3.** Rendimiento de producción de zanahoria en Colombia



**Fuente:** CÁMARA DE COMERCIO DE BOGOTÁ. Manual Zanahoria. Proyecto realizado por: Núcleo Ambiental S.A.S. 2015.

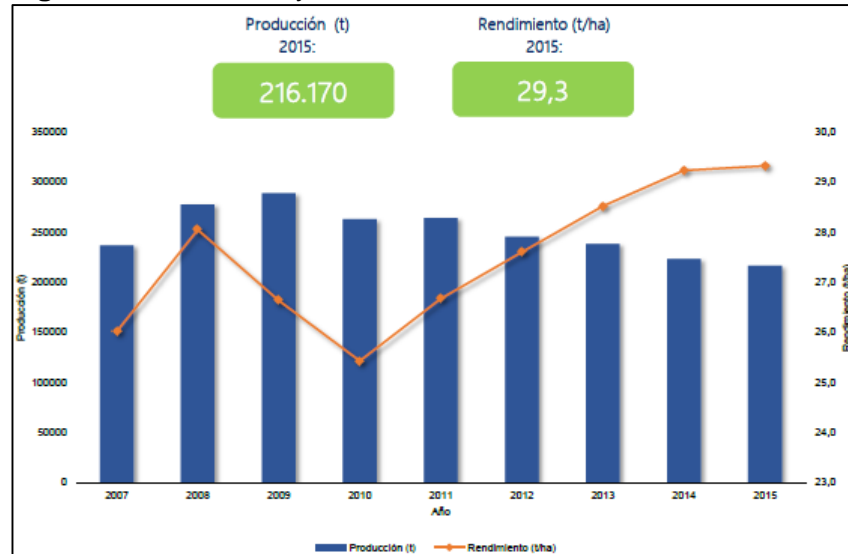
Los departamentos que muestran un mayor rendimiento por hectárea en el año 2013 fueron Antioquia y Cundinamarca. En la **Figura 4** también se puede observar

---

<sup>14</sup> *Ibid.* p. 34.

la evolución del rendimiento de producción de zanahoria por hectárea sembrada en el periodo 2007 – 2015.

**Figura 4.** Producción y rendimiento del cultivo de zanahoria 2007 – 2015

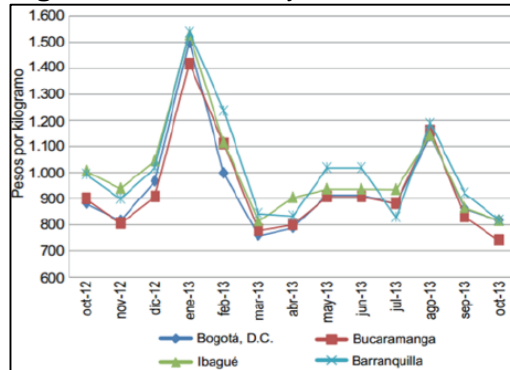


**Fuente:** MINISTERIO DE AGRICULTURA Y DESARROLLO RURAL. Zanahoria. Evaluaciones Agropecuarias Municipales. Agronet, 2015.

De este diagrama cabe resaltar que, a pesar de la disminución en la producción a partir del año 2012, el rendimiento de producción aumentó significativamente; esto se puede atribuir, a una mejor planeación y uso de técnicas de control de plagas y enfermedades, al igual que el uso de semillas de mejor calidad y resistencia a estas. Entre otros de los aspectos relevantes está el aumento en el rendimiento de producción en el departamento de Boyacá para el año 2015, el cual llegó a un valor de 22.47 Ton/Ha, comparado a las 20.1 Ton/Ha del año 2013.

La zanahoria, al igual que todos los productos hortícolas y las frutas, posee un mercado variado y dependiente directamente de la oferta y la demanda en el país; esto se ve plasmado en la variabilidad de los precios en las centrales mayoristas (ver **Figura 5**), mostrando un comportamiento aleatorio como se muestra en la siguiente gráfica que corresponde a los periodos octubre – diciembre de 2012 y enero – octubre de 2013.

**Figura 5.** Precios mayoristas de la zanahoria

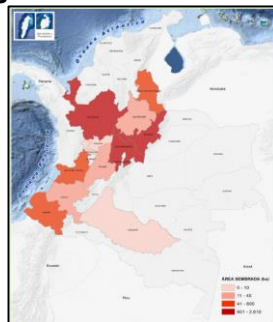


**Fuente:** Departamento Administrativo Nacional de Estadística DANE. Precio mayorista Zanahoria, Boletín mensual 2012 - 2013

Como se evidencia, para los periodos mostrados la zanahoria tuvo una variación desde los COP \$750 hasta los COP \$1,500 por kilogramo, siguiendo un comportamiento discontinuo y poco predecible. Los picos en los precios de comercialización de la zanahoria ocurren por la escasez de la misma, producto de una mala planeación en el calendario de siembras y cosechas por parte de los agricultores o bien por las condiciones climáticas que afectan el rendimiento de los cultivos, la calidad del producto y promueven la formación de plagas y la propagación de enfermedades.

**1.2.3 Producción en el departamento de Boyacá.** El departamento de Boyacá es el tercer departamento con mayor índice de producción de la zanahoria Chantenay, teniendo una participación del 17% para el año 2015<sup>15</sup>. Igualmente ocupa el tercer lugar en área sembrada alcanzando unas 1,700 ha en el mismo año. En la Figura 6 se observa la localización y cantidad de hectáreas sembradas en Colombia.

**Figura 6.** Área sembrada del cultivo de zanahoria en 2015



**Fuente:** MINISTERIO DE AGRICULTURA Y DESARROLLO RURAL. Zanahoria. Evaluaciones Agropecuarias Municipales. Agronet, 2015.

<sup>15</sup> MINISTERIO DE AGRICULTURA Y DESARROLLO RURAL. Zanahoria. Evaluaciones Agropecuarias Municipales. Agronet, 2015. p. 2.

Se observa una concentración de los departamentos productores de zanahoria que se encuentran en la región andina principalmente y una participación en la región pacífica. En el departamento de Boyacá específicamente, los municipios con mayor participación a nivel nacional son Boyacá 5.7%, Ventaquemada 5.3% y Samacá 2.7%; con un volumen de producción registrado en el año 2015 de 12,240 Ton, 11,400 Ton y 5826 Ton respectivamente. No obstante, en lo que concierne al rendimiento de producción, de los tres municipios mencionados, el municipio de Ventaquemada posee el menor rendimiento (20.0 Ton/ha), varios puntos por debajo de Boyacá y Samacá (34.0 Ton/Ha y 26.36 Ton/Ha). Esto indica que la cantidad producida de zanahoria en la región es menor respecto a la cantidad de tierra empleada para su cultivo.

Según cifras de la Encuesta Nacional Agropecuaria (ENA) la producción de zanahoria Chantenay en Boyacá ascendió a las 28,410 Ton en el año 2015<sup>16</sup>. En la región de Ventaquemada y el Puente de Boyacá se producen actualmente 100 toneladas diarias de esta hortaliza.

#### **1.2.4 Producción y procesamiento en la empresa Hortalizas Boyacá S.A.S.**

Hortalizas Boyacá S.A.S. es una empresa ubicada en el departamento de Boyacá en cercanías del Puente de Boyacá (Imagen 1) a 10 km de la ciudad de Tunja capital del departamento. Fue creada durante el año 2014 como resultado de un proyecto planteado por agricultores e ingenieros agrónomos de la región y a mediados del año 2016 inicia su operación mediante un proceso que por medio de maquinaria importada sigue las etapas de lavado, selección, separación por tamaño, secado y empaclado. La empresa inició con el procesamiento de hortalizas como la papa y la zanahoria debido a que estos eran producidos directamente por los socios dueños de la misma; luego adiciona a sus productos hortalizas como el tomate Larga Vida y Chonto, la cebolla cabezona, entre otros.

**Imagen 1.** Planta de producción Hortalizas Boyacá S.A.S.



**Fuente:** Hortalizas Boyacá S.A.S. 2018. Recuperado de: [www.hortalizasboyaca.com.co](http://www.hortalizasboyaca.com.co)

---

<sup>16</sup> Departamento Administrativo Nacional de Estadísticas (DANE). *Boletín mensual Insumos y Factores asociados a la producción agropecuaria*. Junio 2017. núm. 60 p. 2.

Uno de los productos procesado en mayor volumen es la zanahoria variedad Chantenay. Esta hortaliza es sembrada y cosechada directamente por los socios propietarios de Hortalizas Boyacá S.A.S. o proveída por campesinos y agricultores de municipios y veredas aledañas como Ventaquemada, Tierra Negra, Samacá, Jenesano (ver **Imagen 2**), Puente de Boyacá y en algunos casos de la sabana de Bogotá.

**Imagen 2.** Cultivo de zanahoria Chantenay, vereda Foraquirá, municipio de Jenesano (Boyacá)



**Fuente:** elaboración propia.

Como se mencionó anteriormente, con relación a las plagas y enfermedades de la zanahoria Chantenay; en la zona, es común que se deterioren los cultivos de esta variedad de zanahoria por causa de los nematodos, como consecuencia de una alta exposición de las raíces al agua. Ya sea por precipitaciones constantes, o bien, por un riego excesivo del cultivo, son algunos de los factores que aumentan la probabilidad de que esta plaga aparezca y cause daños más evidentes y visibles en la raíz o zanahoria en sí (**Imagen 3**).

**Imagen 3.** Deterioro de la zanahoria Chantenay por nematodos



**Fuente:** elaboración propia.

Hortalizas Boyacá S.A.S. procesa aproximadamente 10 toneladas diarias de esta variedad de zanahoria por medio del siguiente proceso:

1. Recepción de la cosecha en camiones: la zanahoria sucia arriba a la planta de procesamiento en lonas de fique de 60 kg aproximadamente en camiones. En la planta, se da inicio a las máquinas de lavado, cintas transportadoras y de separación por tamaño. También se ubican en posición las canastillas que reciben la zanahoria en las diferentes salidas de la máquina clasificadora por tamaño.
2. Operarios descargan las lonas de zanahoria en la tolva de alimentación de la máquina de lavado que consiste en un tambor cilíndrico metálico rotativo con descarga de agua interna (**Imagen 4**). Aquí se eliminan inicialmente material orgánico residual como tierra, raíces, tallos y hojas provenientes del lote donde se realizó la cosecha.

**Imagen 4.** Máquina rotativa de lavado



**Fuente:** Elaboración propia.

3. Luego de viajar a través de la máquina de lavado, las zanahorias continúan su recorrido por una cinta de inspección donde toma lugar la etapa de selección de calidad del producto (**Imagen 5**).

**Imagen 5.** Cinta de inspección.



**Fuente:** elaboración propia.

Aquí, operarios retiran manualmente el producto que muestre alguna inconsistencia o defecto en su forma, tamaño, color o morfología. En este punto del proceso se descartan las zanahorias inapropiadas para el consumo humano. Estas son introducidas en un conducto que las lleva a la máquina de descarte (**Imagen 6**), la cual finalmente lleva a un cangilón elevador que las deposita en lonas de fique de 50 kg aproximadamente.

**Imagen 6.** Máquina descartadora.



**Fuente:** elaboración propia.

4. Las zanahorias en buena condición continúan el recorrido por la cinta transportadora contigua a la máquina lavadora y son transportadas a la máquina clasificadora por tamaño (**Imagen 7**), la cual consiste en una serie de módulos



de rodillos giratorios, cuya distancia entre unos y otros aumenta a lo largo del equipo; permitiendo la separación del producto dependiendo de su calibre o tamaño.

**Imagen 7.** Máquina clasificadora por tamaño



**Fuente:** elaboración propia.

5. Las zanahorias descienden según su tamaño y finalmente son conducidas por una serie de cintas transportadoras distribuidoras terminando su recorrido por el proceso en canastillas plásticas.
6. Dependiendo del cliente o del pedido, las zanahorias son llevadas en las canastillas a tolvas empacadoras de 6 a 20 kg (ver **Imagen 8 a**)), o bien a una máquina empacadora que permite empacar el producto en bolsas de 1 a 5 kg (ver **Imagen b**)).

**Imagen 8.** Proceso de empaque de zanahoria procesada

**a)** Tolva pesadora y empacadora



**b)** Empacadora automática



**Fuente:** elaboración propia.

De las 10 toneladas procesadas, entre un 10% al 60% (dependiendo de la época del año) de la zanahoria procesada resulta ser no apta para consumo humano generalmente por efectos climáticos, plagas o enfermedades e incluso por daños mecánicos durante el proceso de lavado; por lo tanto, son rechazadas y vendidas

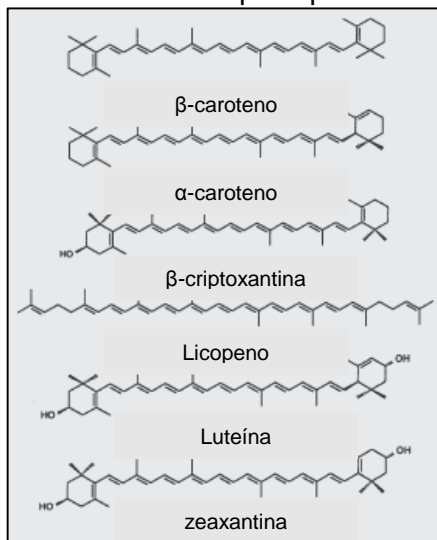
como alimento para animales o en algunos casos desechadas por completo. Lo anterior genera pérdidas de hasta COP 3.4 millones diarios. Al tratarse de un producto con un valor en el mercado fluctuante como consecuencia del efecto directo de la oferta y la demanda y las condiciones climáticas extremas causadas por el Fenómeno del Niño y de La Niña; traen como resultado periodos de incertidumbre y de pérdidas económicas para los cultivadores de dicha hortaliza, afectando el mercado local y por ende la mano de obra se ve de igual forma perjudicada.

### 1.3 CONCEPTOS GENERALES DEL $\beta$ -CAROTENO

Los carotenoides son pigmentos que presentan dos o varias unidades de hidrocarburos, sintetizados por organismos fotosintéticos<sup>17</sup>. Los carotenoides son compuestos conocidos por su gran distribución y variedad tanto en su estructura como en sus funciones. Alrededor de 600 carotenoides se han aislado y clasificado a partir de recursos naturales; sin embargo, una pequeña parte de los carotenoides están contenidos en los alimentos.

Los carotenoides son generalmente compuestos tetraterpenoides de cuarenta carbonos, formados por la unión de unidades isoprenoides logrando obtener una estructura simétrica como se muestra en la **Figura 7**.

**Figura 7.** Estructuras de los principales carotenoides de los alimentos



**Fuente:** elaboración propia, basado en. RODRIGUEZ A., Delia B; KIMURA, Mieko. HarvestPlus Handbook for Carotenoid Analysis. 2004.

<sup>17</sup> BOUKROUFA, Meryem; et al. Development of a green procedure of citrus fruits waste processing to recover carotenoids. En: RESOURCE-EFFICIENT TECHNOLOGIES. 2017. vol. 3, no. 3, p. 252.

Gracias a su estructura compuesta de dobles enlaces extendidos a lo largo de la molécula, son las responsables de permitir que la luz se absorba en diferentes frecuencias, dándole así su color atractivo y permitiendo la caracterización y cuantificación de dichas moléculas con técnicas que emplean el haz de luz visible. La estructura molecular, por otra parte, puede ser modificada mediante reacciones de deshidrogenación, hidrogenación, ciclación entre otros.

Los carotenoides son agregados en productos cosméticos gracias a sus propiedades de protección contra los rayos ultravioleta (UV)<sup>18</sup>.

**1.3.1 Clasificación de los carotenoides.** Los carotenoides se clasifican principalmente por las características en su estructura molecular y composición química como se muestra a en la Tabla 5.

**Tabla 5.** Clasificación de los carotenoides según su estructura molecular

<b>Clasificación</b>	<b>Carotenoide</b>
Carotenoides de hidrocarburos	$\beta$ -caroteno, Licopeno
Derivados oxigenados	Xantofilas
Hidroxi	B-criptoxantina
Keto-carotenos	Cantaxantina
Epoxy	Violaxantina
Aldehído	B-citraurina

**Fuente:** elaboración propia.

Además, estos se pueden clasificar según la cantidad de grupos cíclicos que tengan (acíclicos, monocíclicos o dicíclicos), al igual que por su isomería espacial dada por la posición de los enlaces dobles de la cadena principal como *cis* o *trans*.

**1.3.2 El  $\beta$ -caroteno.** El  $\beta$ -caroteno es un compuesto tetraterpenoide que pertenece a la familia de los carotenoides y al grupo de los carotenoides de hidrocarburos. El  $\beta$ -caroteno, al igual que otros compuestos carotenoides se le acredita por sus beneficios antioxidantes como provitamina A.

Además por su contribución al funcionamiento del sistema inmune y la reducción del riesgo de sufrir enfermedades degenerativas como el cáncer, enfermedades cardiovasculares y la degeneración muscular<sup>19</sup>.

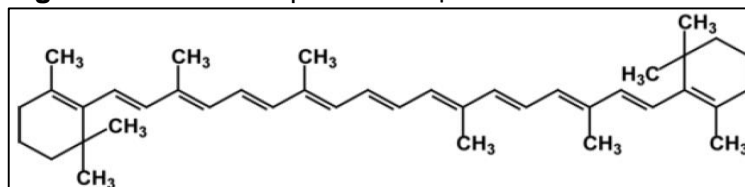
El  $\beta$ -caroteno es un compuesto no polar altamente liposoluble gracias a su estructura conjugada de hidrógeno y carbono y con ausencia de grupos funcionales

<sup>18</sup> SAINI, Ramesh Kumar; KEUM, Young-Soo. Carotenoid extraction methods: A review of recent developments. En: FOOD CHEMISTRY. 2018. vol. 240, p. 91.

<sup>19</sup> STRATI, I. F.; OREOPOULOU, V. Recovery of carotenoids from tomato processing by-products – a review. En: FOOD RESEARCH INTERNATIONAL. 2014. vol. 65, p. 311.

polares<sup>20</sup> (**Figura 8**). Este es sintetizado naturalmente por organismos fotosintéticos como las plantas y por algunos organismos no fotosintéticos como hongos. Los animales son incapaces de producir carotenoides por sí mismos, es por esto que es necesario su consumo para cumplir algunos requerimientos nutricionales y cumplir funciones metabólicas.

**Figura 8.** Estructura química del  $\beta$ -caroteno.



**Fuente:** BIN Y., MOHAMAD Z. Study on factors affecting extraction of carotene from carrot by using Soxhlet extraction method. 2013.

Algunas de las propiedades físicas del  $\beta$ -caroteno se enlistan en la **Tabla 6**.

**Tabla 6.** Propiedades del  $\beta$ -caroteno

Nombre	Beta-caroteno
Referencia CAS	7235-40-7
Fórmula	C <sub>40</sub> H <sub>56</sub>
Nombre IUPAC	3,7,12,16-tetrametil-1,18-bis(2,6,6-trimetil-1-ciclohexenil)octadeca-1,3,5,7,9,11,13,15,17-nonaeno
Peso molecular	536,873 g/mol
Fase	Sólido (a Presión y Temperatura Estándar)
Punto de fusión	181°C
Punto de inflamación	346°C
Densidad	1 g/cm <sup>3</sup>
Presión de vapor	3 X 10 <sup>-16</sup> mmHg
Solubilidad	Insoluble en agua

**Fuente:** BIN Y., MOHAMAD Z. Study on factors affecting extraction of carotene from carrot by using Soxhlet extraction method. 2013.

El color naranja característico del  $\beta$ -caroteno y de los otros pigmentos naturales en general se da gracias al sistema conjugado de dobles enlaces en sus estructuras, responsables de la absorción de la luz en el espectro visible, comprendido específicamente entre los 400 nm y 500 nm<sup>21</sup>.

<sup>20</sup> SAINI, Ramesh Kumar; KEUM, Young-Soo. 2018. *Op. cit.* p. 43.

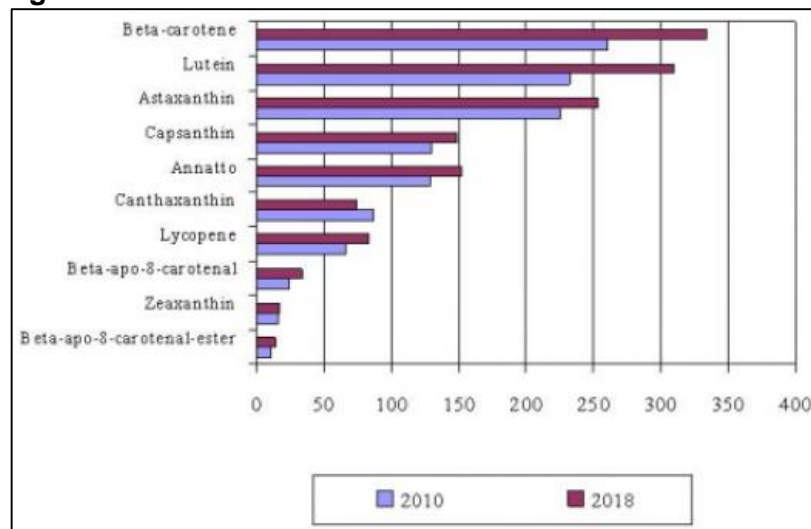
<sup>21</sup> WINGQVIST, Annica. Extraction, Isolation and Purification of  $\beta$ -Carotene. Karlstads University, 2011. p. 10.

Comercialmente se puede encontrar codificado como colorante E160a, registro al que se le atribuye tanto al colorante idéntico al natural, como al natural. Brinda las tonalidades de amarillo o amarillo naranja. Se puede obtener en presentaciones hidrosoluble u oleosoluble, en estado líquido o en polvillo fino. Entre sus aplicaciones más comunes se destacan la industria de bebidas, condimentos, mezclas en polvo, aceites, productos lácteos y quesera. Adicionalmente, en la industria farmacéutica se emplea como componente en suplementos dietarios y productos de belleza o cuidado personal.

#### 1.4 MERCADO DEL $\beta$ -CAROTENO

El  $\beta$ -caroteno hoy en día es uno de los carotenoides más representativos en el mercado mundial con un mercado anual estimado para el 2018 de \$334 millones de dólares y con una tasa de crecimiento anual del 3.1%<sup>22</sup>. En la **Figura 9** se muestra el valor en el mercado de los carotenoides más representativos comparando las cifras del año 2010 con las estimaciones respectivas para el mercado en el año 2018.

**Figura 9.** Crecimiento del mercado de los carotenoides más representativos.



**Fuente:** BBC Research. The Global Market of Carotenoids, 2011.

Si bien el  $\beta$ -caroteno, Luteína y la Astaxantina encabezan la lista de los carotenoides con mayor comercialización a nivel mundial y su crecimiento es proporcional con respecto a los datos recopilados en el 2010 y su proyección en el año 2018; el hecho más relevante es el crecimiento del desarrollo de tecnologías de extracción y síntesis.

<sup>22</sup> BBC Research. The global market for Carotenoids. M2 Presswire (Sep. 2011). Vol. FOD025D. p. 2

## 1.5 PROCESO DE EXTRACCIÓN DEL $\beta$ -CAROTENO NATURAL

Los carotenoides pueden encontrarse en la naturaleza almacenados en las plantas y en sus frutos; no obstante, también pueden encontrarse en hongos, bacterias, micro algas, almidones o desechos industriales<sup>23</sup>. La zanahoria es una fuente natural rica en colorantes de la familia de los carotenos, y a la vez, es uno de los productos agrícolas a los cuales se le ha dedicado estudios extensos e investigaciones en la ingeniería de alimentos relacionados al tema de extracción de bioproductos de alto valor agregado.

**1.5.1 Calidad de la zanahoria Chantenay (*Daucus carota L.*).** La Norma Técnica Colombiana NTC 1226 – 1 Frutas y Hortalizas Frescas – Zanahoria, la cual presenta el marco de los requisitos de calidad para la zanahoria de variedades *Daucus carota L.* con el objetivo de proveer al consumidor un producto de buena calidad. En la sección de requisitos mínimos de calidad se menciona que los parámetros de calidad para una zanahoria en buen estado deben ser<sup>24</sup>:

- Sanas. Por lo tanto, se excluyen los productos podridos o cuyo deterioro las haga impropias para el consumo.
- Limpias.
- Lavadas, libres de materias extrañas o macizas.
- Sin bifurcaciones, ni raíces secundarias.
- No deben tener consistencia leñosa.
- No deben germinar
- Libres de humedad exterior anormal; es decir, suficientemente secas luego del lavado.
- No debe presentar indicios de deshidratación.

**1.5.2 Tratamiento de la muestra.** La aplicación de procesos anteriores a la extracción de carotenoides de origen vegetal corresponde a una parte importante de la técnica que se debe tener en cuenta principalmente por el hecho de que la estructura de la planta consiste de una matriz compleja que dificulta el acceso del solvente de extracción a las células donde se aloja el compuesto de interés. En el caso de los carotenoides específicamente, estos pueden encontrarse asociados a macromoléculas como ácidos grasos y proteínas, afectando el gradiente de transferencia de masa<sup>25</sup>.

---

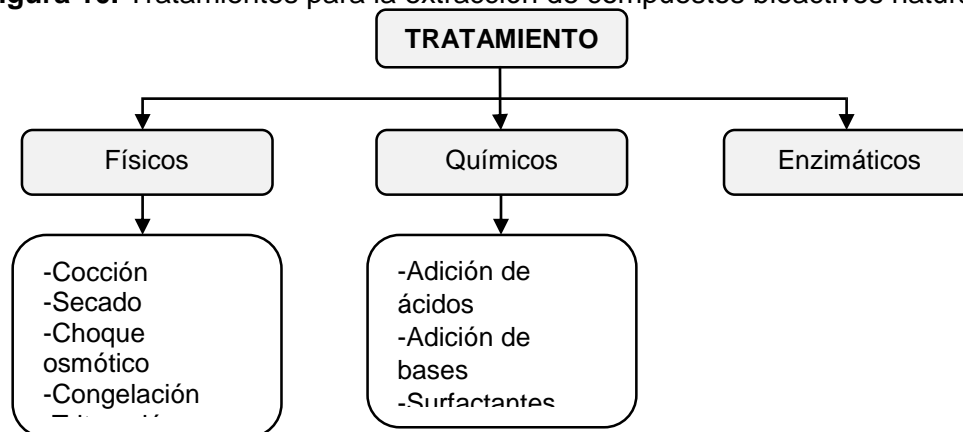
<sup>23</sup> SAINI, Ramesh Kumar; KEUM, Young-Soo. 2018. *Op. cit.* p. 43.

<sup>24</sup> Norma Técnica Colombiana. NTC 1226-1 Frutas y Hortalizas Frescas – Zanahoria, 1994. (Segunda Actualización).

<sup>25</sup> SAINI, Ramesh Kumar; KEUM, Young-Soo. *Op. cit.* p. 43.

Los tratamientos pueden clasificarse como físicos, químicos y biológicos, (**Figura 10**). Estos permiten vencer las barreras que existen en la matriz utilizando los siguientes métodos:

**Figura 10.** Tratamientos para la extracción de compuestos bioactivos naturales



**Fuente:** SAINI, Ramesh Kumar; KEUM, Young-Soo. Carotenoid extraction methods: A review of recent developments. 2018. vol. 240.

El método de cocción en algunos casos demuestra mejorar el rendimiento de la extracción de carotenoides, pues, este contribuye a la desintegración del complejo carotenoides – proteína, permitiendo una mejor separación del pigmento.<sup>26</sup>

El secado es otra alternativa para el tratamiento de las muestras vegetales, el cual se lleva a cabo en un horno a temperatura constante que varía dependiendo de la materia prima que se utilice, puesto que algunos de los compuestos tienden a desnaturalizarse o degradarse al superar un valor de temperatura específico<sup>27</sup>.

El choque osmótico consiste en exponer una muestra de células a un cambio considerable de concentración de un medio salino, generando así una lisis celular, facilitando la entrada del solvente o agente de extracción al compuesto de interés<sup>28</sup>. La congelación se conduce a temperaturas inferiores a los -3°C y permiten la conservación general del producto, evitando la oxidación y desnaturalización de compuestos activos, en este caso, el colorante de interés.

La trituración criogénica se lleva a cabo en una etapa de enfriamiento previo de 2 minutos, con una frecuencia de 5 s<sup>-1</sup>; otra etapa de trituración de 3 minutos de duración y 20 s<sup>-1</sup> de frecuencia; y finalmente una etapa intermedia de enfriamiento

<sup>26</sup> SAINI, Ramesh Kumar; KEUM, Young-Soo. 2018. *Op. cit.* p. 43.

<sup>27</sup> BARRA P., Julio S. Desarrollo de Snacks en Base a Zanahoria (*Daucus Carota L.*) Variedad Ábaco Deshidratada Osmóticamente para Consumidores Infantiles. Universidad de Chile, 2019. p. 14.

<sup>28</sup> REAL ACADEMIA DE INGENIERÍA. Diccionario Español de Ingeniería. © 2012.

con una duración y una frecuencia de 1 minuto y 5 s<sup>-1</sup> respectivamente. En la literatura se pueden encontrar aplicaciones de este método en el tratamiento de micro algas<sup>29</sup>.

Los tratamientos químicos pueden consistir de adición de ácidos como el Dimetilsulfóxido (DMSO) que muestra resultados satisfactorios en la extracción de carotenoides, pese a ello, para procesos industriales no es recomendable por la alta toxicidad de los compuestos derivados tras el tratamiento. Otra alternativa a los tratamientos químicos es el proceso de la saponificación. Esta técnica se aplica para la extracción de xantofilas unidas con ácidos grasos como el Láurico, Palmítico, Esteárico, Linoléico u Oléico en forma esterificada como mono o di ésteres. Durante la extracción, estas xantofilas esterificadas junto con los lípidos y la clorofila son removidas por la saponificación, lo cual puede interferir con el análisis cromatográfico. Sin embargo, el proceso de saponificación es innecesario para muestras que contengan bajas cantidades de lípidos y que estén casi libres de ésteres de xantofilas. Adicionalmente, la saponificación de caracteriza por las altas pérdidas cuantitativas y la degradación de los carotenoides<sup>30</sup>.

**1.5.3 Análisis proximal.** El análisis proximal en los alimentos consiste en una serie de parámetros experimentales dirigidas a una determinación bromatológica en el cual se llevan a cabo pruebas como humedad, cenizas, fibra cruda, grasa total, proteína cruda, carbohidratos, calorías y actividad de agua.

“Se da el nombre de análisis próximo al conjunto de determinaciones que describen la composición nutritiva de una sustancia alimenticia”<sup>31</sup>. Cada prueba tiene como objetivo describir los grupos de nutrientes que posee un alimento a partir de la determinación de un grupo de sustancias con características específicas. A continuación, se muestran las características principales de las pruebas que comprenden este análisis (**Cuadro 1**).

**Cuadro 1.** Pruebas que constituyen el análisis bromatológico o análisis próximo.

Prueba	Descripción
Humedad	Su importancia radica en que esta muestra la cantidad de agua contenida en el alimento que funciona como solvente de solutos polares como aminoácidos y/o electrolitos. Se calcula mediante la determinación de la pérdida de peso que sufre un alimento al calentarla a 100°C
Cenizas	Arroja el contenido de materia orgánica de una sustancia, en algunos casos se enfoca en la determinación de calcio, fósforo, potasio,

<sup>29</sup> *Ibid.* p. 48.

<sup>30</sup> SAINI, Ramesh Kumar; KEUM, Young-Soo. 2018 *Op. cit.* p. 43.

<sup>31</sup> BERNAL, Inés. Análisis de alimentos. Academia Colombiana de ciencias exactas, físicas y naturales 3 ED, 1998. p. 1



**Cuadro 1. (Continuación)**

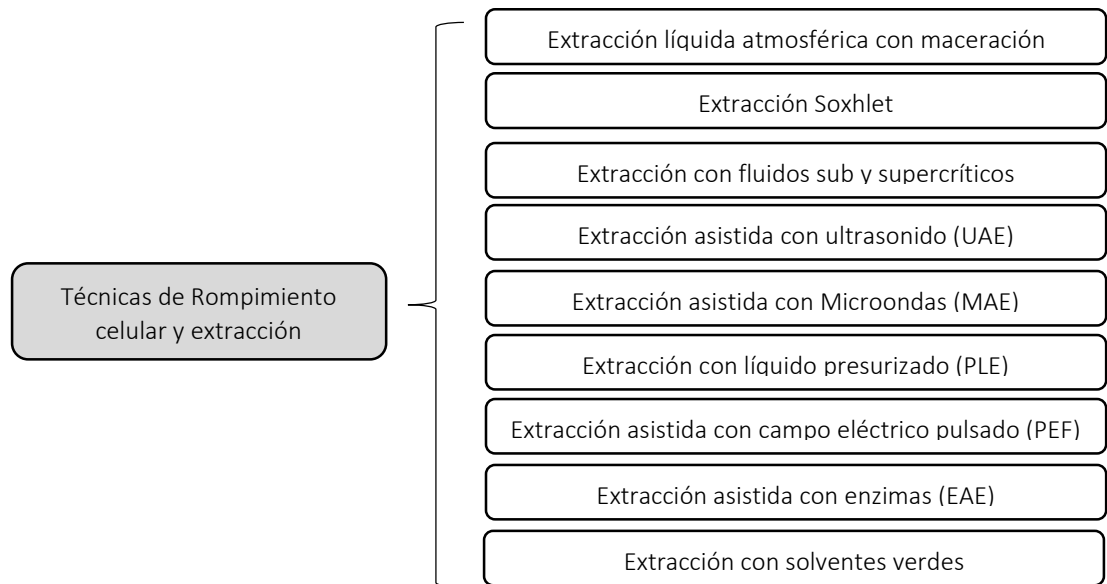
Prueba	Descripción
Cenizas	magnesio y hierro. Este análisis consiste en aumentar la temperatura de una muestra progresivamente en un horno hasta alcanzar +/- 500°C, límite recomendado para evitar la descomposición de carbonatos o compuestos del fósforo de la muestra.
Fibra cruda	Compuesta por la celulosa, pentosanas, lignina, suberina, cutina, alginatos y pectinas. El método empleado para su determinación consiste en una digestión que elimina otros compuestos como las grasas, vitaminas, proteínas, carbohidratos solubles de manera similar como ocurriría en una digestión efectuada por un organismo, facilitando así su determinación.
Grasa total	Expresa la cantidad de grasa o lípidos a los cuales pertenecen los glicéridos, fosfolípidos, esteroides, ácidos grasos libres, pigmentos carotenoides y clorofílicos y vitaminas liposolubles, presentes en el alimento. Se determina con una extracción con éter etílico o de petróleo a la muestra previamente secada.
Proteína cruda	Se basa en el principio de la importancia del elemento nitrógeno en los aminoácidos de los compuestos protéicos. El valor final se obtiene como el producto del porcentaje de nitrógeno obtenido de la muestra por un factor protéico dependiendo de la materia que se analiza.
Carbohidratos	Comprende los compuestos que van desde los compuestos más simples como los monosacáridos o disacáridos, hasta la celulosa o el almidón. Dada la complejidad de determinar estos compuestos por separado, esta prueba se divide según la solubilidad de estos en ácidos o bases "Fibra bruta" o no "Extracto no nitrogenado"
Valor calórico	Evidencia el aporte energético del alimento para los seres vivos. Este se calcula multiplicando los valores porcentuales de grasa, proteína bruta y Extracto no nitrogenado por factores teóricos, los resultados se expresan como cantidad o valor energético por cada 100 g de muestra.
Actividad de agua (Aw)	Este valor indica la cantidad de agua libre dada la diferencia de las presiones parciales del agua contenida con respecto al medio. Se expresa en un rango de 0 a 1, donde $A_w=0$ se aplica a la sustancia anhidra y $A_w=1$ al agua pura. Este parámetro depende de la temperatura al momento de la lectura, por lo cual, dicho valor se registra. En la industria de alimentos se utiliza este parámetro para determinar la estabilidad, el sabor y la caducidad.

**Fuente:** BERNAL, Inés. Análisis de alimentos. Academia Colombiana de ciencias exactas, físicas y naturales 3 ED, 1998

**1.5.4 Técnicas de extracción del  $\beta$ -caroteno.** La extracción es una operación que tiene como objetivo separar sustancias contenidas en un material sólido o líquido con el fin de purificarla mediante el uso de disolvente inmiscible con el material o la matriz que lo contiene. Este proceso se aplica comúnmente en la purificación de vitaminas, alcaloides, grasas, hormonas, colorantes, extractos de esencias y aromas. Se puede clasificar como extracción continua o discontinua. En la primera el solvente circula a través del sistema y de la muestra extrayendo constantemente la sustancia de interés; este es el caso de la extracción Soxhlet, con arrastre con vapor o la destilación; mientras que, en la segunda, el disolvente es inicialmente mezclado con la muestra y luego se lleva a cabo la extracción, como por ejemplo la decantación. Una de los aspectos principales de la extracción continua es que esta extrae un conjunto de compuestos orgánicos en forma de mezcla, por lo cual, se requiere un proceso de separación posterior para obtener la sustancia objetivo en estado puro o en una concentración mayor.

El proceso de extracción de compuestos carotenoides se ha desarrollado a lo largo del tiempo iniciando desde los métodos convencionales, hasta las nuevas tecnologías asistidas con solventes verdes. En la **Figura 11** se muestran las diferentes técnicas basadas en el principio de rompimiento celular y extracción para los carotenoides.

**Figura 11.** Técnicas de extracción de carotenoides



**Fuente:** elaboración propia, basado en. STRATI, I. F.; OREOPOULOU, V. Recovery of carotenoids from tomato processing by-products – a review. 2014.

**1.5.4.1 Extracción Soxhlet.** Este método hace parte del gran grupo de técnicas convencionales empleadas para la extracción de componentes bioactivos de origen vegetal. Estos se basan en la separación de determinados compuestos de una matriz, sólida o líquida, fundamentándose en el principio que constata que el solvente se difunde en la matriz y disuelve los compuestos solubles. En la extracción sólido-líquido, el compuesto objetivo debe ser afín con el solvente seleccionado teniendo en cuenta los demás componentes presentes en la matriz<sup>32</sup>. El solvente o agente de extracción es el encargado de extraer el soluto contenido en una muestra sólida.

El fundamento principal del funcionamiento de esta técnica se basa en el flujo constante de un solvente puro o agente de extracción dentro del montaje por efecto de la ebullición del mismo y su recirculación por condensación a través de una serie de conductos retornando al matraz inferior. El líquido condensado gotea sobre la muestra, la cual se encuentra contenida en una cámara porosa o dedal y en algunos casos se utiliza papel filtro como suplente. Es aquí, entonces, donde la extracción toma lugar. Luego de que el solvente pasa a través del dedal el solvente condensado junto con el extracto pasan por un sifón o tubo en “u” el cual conduce la mezcla finalmente nuevamente al matraz de ebullición. Este proceso se repite las veces que sea necesario; al final, en el matraz de ebullición quedará la mezcla del solvente con el compuesto de interés.

El montaje consta generalmente de un matraz de vidrio de fondo redondo en la parte inferior que contiene el solvente, una cámara de extracción acoplada sobre el matraz y un condensador de vidrio de flujo continuo (**Figura 12**). Este montaje adicionalmente requiere de un sistema de refrigeración continuo, que en su mayoría se hace con agua fría en circulación y este es de gran importancia pues, es el encargado de controlar la temperatura del proceso evitando así la ebullición violenta del solvente.

La extracción Soxhlet es una técnica general y establecida que sobrepasa en eficiencia a otros tipos de extracción convencional; dicha eficiencia depende de las características de la planta o materia prima, así como el tamaño de partícula y la difusión interna<sup>33</sup>. Por otra parte, entre algunas de las desventajas de esta técnica se encuentran los largos tiempos de extracción, el uso extensivo de solventes dando como resultado al aumento generalizado de los costos. Adicionalmente, las altas temperaturas a las cuales se expone el sistema pueden causar la degradación o descomposición de los carotenoides por isomerización *cis - trans*<sup>34</sup>.

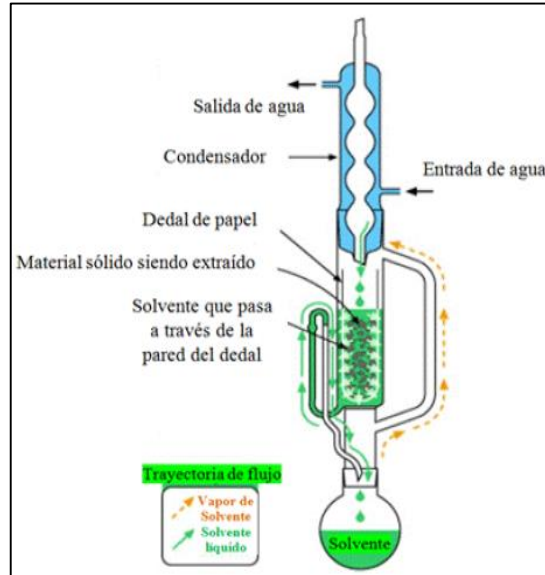
---

<sup>32</sup> STRATI, I. F.; OREOPOULOU, V. 2014. *Op. cit.*, p. 43.

<sup>33</sup> STRATI, I. F.; OREOPOULOU, V. 2018. *Op. cit.* p. 43.

<sup>34</sup> SAINI, Ramesh Kumar; KEUM, Young-Soo. 2018. *Op. cit.* p. 43.

**Figura 12.** Montaje del proceso de extracción Soxhlet.



**Fuente:** RIVAS M., Andrea P. Obtención y caracterización del entrecruzante natural genipina a partir del fruto del caruto (*Genipa americana L.*), 2014.

El funcionamiento de esta técnica convencional promueve un equilibrio de fases dirigido a una mayor separación del componente bioactivo por el contacto repetitivo de la muestra con el agente de extracción, además no se requiere de una filtración posterior para el análisis del extracto y la construcción y manipulación del montaje es sencillo por lo cual es un método convencional estandarizado.

**1.5.4.2 Extracción asistida con ultrasonido (UAE).** La extracción de carotenoides asistida por ultrasonido es causada por la interacción entre las ondas ultrasónicas, el líquido, y el gas disuelto que puede ser generada en líquidos en un rango de frecuencias entre 20 kHz – 1 MHz<sup>35</sup>. Esta técnica ha sido reconocida como una de los métodos más prácticos para la escala industrial gracias a su disponibilidad de los equipos, su conveniente operación y la alta eficiencia de extracción, reduciendo la cantidad de solvente empleado y disminuyendo el tiempo de extracción comparado con los métodos convencionales conocidos. La disipación calorífica generada puede ser cuantificada con medidas colorimétricas y expresada como la intensidad ultrasónica (IU).

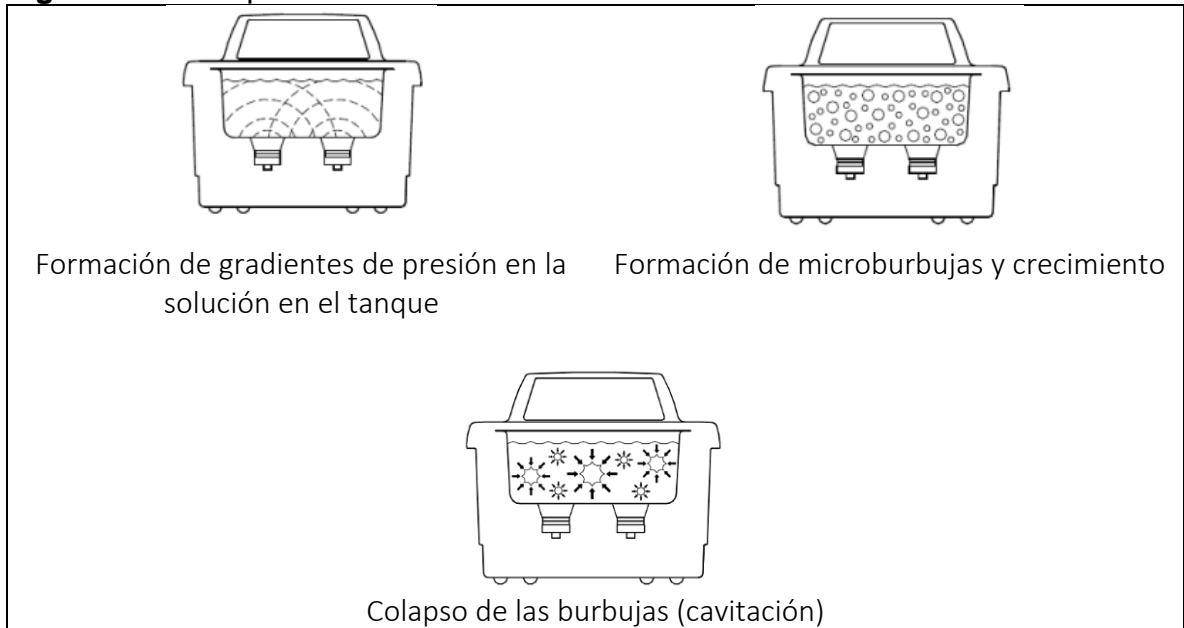
Se basa en el uso de ondas de ultrasonido que produce el fenómeno de cavitación, el cual crea, hace crecer y colapsar micro burbujas de gases disueltos en el líquido por el efecto de la compresión y descompresión de moléculas que componen el medio (**Figura 13**). El colapso de estas burbujas induce la formación de focos

---

<sup>35</sup> STRATI, I. F.; OREOPOULOU, V. 2018. *Op cit.* p. 43.

transitorios de alta temperatura y presión, los cuales pueden acelerar la actividad reactiva del medio, facilitando e rompimiento de la pared celular de la matriz acelerando el proceso de extracción.

**Figura 13.** Principio de funcionamiento de la extracción asistida con ultrasonido



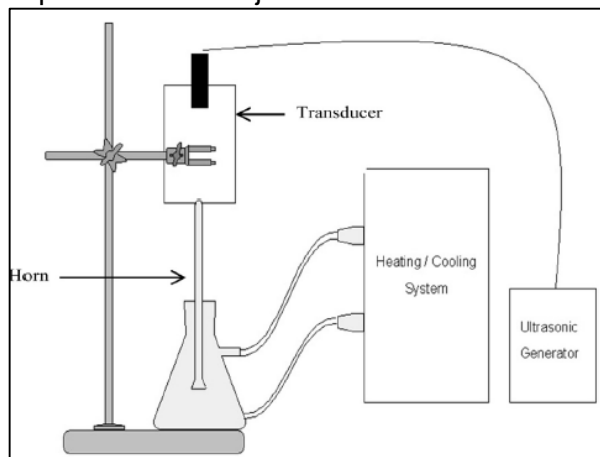
**Fuente:** Branson Ultrasonics Corporation. Ultrasonic cleaners. Operator's Manual. 2015.

La extracción asistida con ultrasonido (UAE) aumenta la cantidad de carotenoides extraídos a bajas temperaturas, ya que la cavitación acústica hace más eficiente este proceso. El ultrasonido de baja frecuencia (16 – 100 kHz) puede ser utilizada para la extracción de componentes como flavonoides hidrofílicos (antocianinas, taninas) y carotenoides hidrofóbicos (licopeno,  $\beta$ -caroteno, capsaicina y luteína) de productos agrícolas como la zanahoria, el tomate, las uvas y el jengibre.

En la práctica se pueden encontrar equipos de ultrasonido tipo sonda, el cual consta de un dispositivo con una frecuencia de operación específica medida en kilo Herz (kHz) y una potencia de operación máxima expresada en vatios W (**Figura 14**). Se utiliza también una columna con un diámetro determinado y un sistema de control de temperatura mediante un Erlenmeyer con desprendimientos laterales por los cuales circula agua de refrigeración<sup>36</sup>.

<sup>36</sup> BOUKROUFA, 2017. *Op. cit.* p. 42.

**Figura 14.** Esquema del montaje de extracción asistida con ultrasonido (UAE)



**Fuente:** BOUKROUFA, Meryem; et al. Development of a green procedure of citrus fruits waste processing to recover carotenoids. 2017.

Otro equipo utilizado para la extracción de sustancias químicas se le conoce como baño ultrasónico o también llamado limpiador ultrasónico (**Imagen 9**). Se usa comúnmente para la limpieza de material de vidrio del laboratorio, o bien, para la desgasificación de muestras. Últimamente se ha evidenciado un gran potencial de este dispositivo para aplicaciones en la química analítica. Este consta de un recipiente de acero inoxidable anticorrosivo cuyo volumen puede variar entre los 1.5 y los 6.5 L a escala laboratorio. Estos poseen un control digital para la manipulación y el control de variables como la temperatura o el tiempo de extracción. Utiliza cerámica como material de calentamiento y un material especial en la cubierta para reducir el ruido. El principio de funcionamiento es similar al dispositivo de ultrasonido tipo sonda, pero en este caso el transductor ultrasónico se ubica en el fondo del recipiente.

**Imagen 9.** Baño o limpiador ultrasónico



**Fuente:** Instrumentos Técnicos S.A.S.

La cantidad total de  $\beta$ -caroteno cuantificada como la cantidad en mg de  $\beta$ -caroteno por cada 100 g de materia prima en base seca, comparada con el método (MAE) o

asistida con microondas y los de extracción convencional (CE) se muestran en la **Tabla 7**.

**Tabla 7.** Comparación de las técnicas de extracción de carotenoides

Método	MAE	UAE	CE
Producción total de carotenoide (mg/100 g DW)	262.3 ± 3.5	267.7 ± 1.2	271.1 ± 8.5
Capacidad antioxidante del producto (µmol/L TE/100 g DW)	715.8 ± 18.1	819.9 ± 26.5	737.3 ± 23.8
Tiempo de extracción (min)	25	80	150
Consumo de energía (kcal)	43	229	3.5

**Fuente:** CHUYEN, Hoang V., et al. Microwave-assisted extraction and ultrasound-assisted extraction for recovering carotenoids from Gac peel and their effects on antioxidant capacity of the extracts. 2018

Se puede observar que la extracción asistida con ultrasonido presenta rendimientos de extracción similares a los otros dos métodos y un tiempo de extracción considerablemente menor a las técnicas convencionales, sin embargo, el consumo energético de la extracción con ultrasonido es considerablemente mayor que los otros métodos. Entre los beneficios de la extracción asistida con ultrasonido (UAE) se encuentra:

- Mejoramiento en general de la cantidad de componentes bioactivos extraídos a temperaturas menores.
- Posibilidad de utilizar solventes alternativos y de mejorar su rendimiento.
- Reducción de los tiempos de extracción.
- Uso de frecuencias bajas de ultrasonido.

## 1.6 CUANTIFICACIÓN ESPECTROFOTOMÉTRICA DEL $\beta$ -CAROTENO

El contenido de carotenoides en una muestra es determinado mediante técnicas espectrofotométricas dentro del rango visible comprendido entre los 400 nm y 700 nm. Generalmente el valor obtenido a través de este método se expresa como mg de  $\beta$ -caroteno por litro. Esto se logra una vez se realice la respectiva curva de calibración preparada usando un estándar de  $\beta$ -caroteno comercial, seguido del cálculo de la concentración usando la ecuación de la ley de Lambert - Beer como se presenta en la **Ecuación 1**<sup>37</sup>.

**Ecuación 1.** Ley de Lambert - Beer

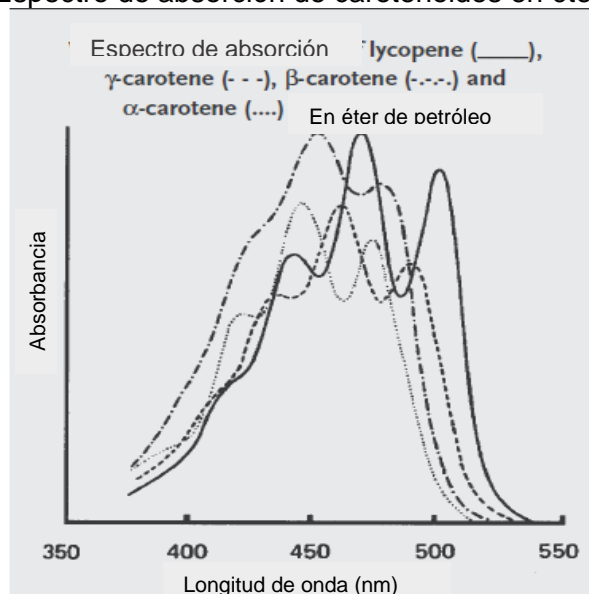
$$A = \log_{10} \frac{I_0}{I} = \epsilon lc$$

<sup>37</sup> BOUKROUFA, 2017. *Op. cit.* p. 42.

Donde  $A$  es la absorbancia,  $\epsilon$  la constante de absorbatividad o también llamada como la constante específica de extinción molar,  $l$  es la longitud de la celda por la cual el haz de luz atraviesa y  $c$  es la concentración de la solución. La absorbancia es un valor adimensional, la constante específica de extinción molar  $\epsilon$  en ( $L \text{ mol}^{-1} \text{ cm}^{-1}$ ) y  $l$  en (cm). Gracias al hecho de que los compuestos carotenoides obedecen a esta ley, es posible cuantificar la concentración de los mismos en una solución determinada.

Otra forma común de expresar el contenido de carotenoides en la muestra a través de técnicas espectrofotométricas es como mg de  $\beta$ -caroteno equivalente por cada 100 g del peso seco de la muestra<sup>38</sup>. En el caso del  $\beta$ -caroteno, al igual que la mayoría de los compuestos carotenoides se caracteriza por tener un espectro de absorción definido compuesto por 2 picos definidos y una elevación leve u “hombro” a 450, 477 y 425 nm respectivamente en solución con hexano o éter de petróleo (ver **Figura 15**). Esto se debe, gracias a la estructura química de los carotenoides, específicamente por los enlaces dobles conjugados de la cadena principal, los cuales tienen una relación directamente proporcional con la longitud de onda máxima ( $\lambda_{\text{máx}}$ ) que absorbe el pigmento.

**Figura 15.** Espectro de absorción de carotenoides en éter de petróleo.



**Fuente:** elaboración propia, basado en. RODRIGUEZ A., Delia B; KIMURA, Mieko. HarvestPlus Handbook for Carotenoid Analysis. HarvestPlus Technical Monograph 2, 2004.

---

<sup>38</sup> CHUYEN, Hoang V., et al. Microwave-assisted extraction and ultrasound-assisted extraction for recovering carotenoids from Gac peel and their effects on antioxidant capacity of the extracts. En: Food Science & Nutrition. 2018. vol. 6, no. 1. p. 256.



Otro factor que influye en la capacidad de absorbanza es la presencia de estructuras cíclicas en la molécula; caso particular del  $\beta$ -caroteno, el cual presenta una estructura bicíclica en los extremos de la misma. Este tipo de estructura causa una disminución en la capacidad de absorbanza máxima  $\lambda_{\text{máx}}$  y, por consiguiente, a diferencia del licopeno que es una molécula acíclica pero tiene una cadena principal de igual longitud, el  $\beta$ -caroteno se caracteriza por su coloración naranja-amarilla a diferencia de la coloración rojiza del licopeno.

La isomerización de los carotenoides es una consecuencia directa de la degradación causada por varios factores que van desde un cambio en la estructura de *cis* a *trans* que pueden ocurrir por una mala manipulación y almacenamiento de los mismos, hasta los errores que pueden ocurrir durante la extracción o cuantificación de estos en el espectrofotómetro. Este fenómeno se ve reflejado en los espectros de absorción obtenidos donde se pueden evidenciar translaciones horizontales del espectro y de los valores de absorbanza máximos característicos de cada carotenoide, o bien, compresiones verticales de los picos máximos de absorbanza

## 2. ANTECEDENTES

En este capítulo se exponen y resumen los aspectos más relevantes y pertinentes relacionados con el desarrollo experimental que se pretende llevar a cabo, a partir de una revisión o recopilación bibliográfica de artículos y publicaciones de carácter científico, tesis y libros donde se especifica la técnica y se resaltan los hallazgos más significativos del proceso de extracción de carotenoides a partir de fuentes naturales. El enfoque de este capítulo abarca desde la técnica para la recepción de la materia prima, seguido por el tratamiento y caracterización de la misma, y por último, por las técnicas de extracción Soxhlet y asistida con ultrasonido y la técnica de cuantificación del carotenoide en el extracto.

### 2.1 MUESTREO

El muestreo consiste en la selección inicial de la muestra del producto o materia prima. Al tratarse de un producto perecedero, ya que consta de un alimento fresco y sin procesar, es importante realizar una cuidadosa identificación de los factores que pueden afectar esta fase de análisis. La muestra debe ser representativa, según la cantidad requerida para los análisis posteriores; la selección debe ser aleatoria y debe ser tomada en diferentes puntos del área de muestra. Dependiendo del alimento que esté bajo investigación, entre 200 g a 1kg de la muestra es llevada al laboratorio y posteriormente, en el laboratorio, algunas porciones no comestibles son descartadas<sup>39</sup>.

Una vez seleccionadas las muestras se acostumbra anotar las condiciones climáticas locales como la humedad relativa (HR%) y la temperatura (T). Para evitar errores consiguientes, es indispensable pesar la muestra en el sitio donde se toma, anotando el peso obtenido y empacarla en una bolsa de un material adecuado<sup>40</sup>. Por ejemplo, en una bolsa de papel o una malla y evitar el contacto directo con el sol durante el transporte.

### 2.2 TRATAMIENTO DE LA MUESTRA

El contenido de humedad de la zanahoria varía de 86 a 89%<sup>41</sup>. De todas las técnicas de tratamiento de la muestra mencionada en el capítulo anterior, varios autores destacan la técnica de secado, puesto que, al tratarse de productos vegetales frescos, esta alternativa resulta ser muy útil, pues al ser secada, disminuye la actividad de agua de la misma, disminuyendo la probabilidad de la aparición de

---

<sup>39</sup> RODRIGUEZ A., Delia B; KIMURA, Mieko. HarvestPlus Handbook for Carotenoid Analysis. Breeding Crops for Better Nutrition. HarvestPlus Technical Monograph 2, 2004. 409-467 p.

<sup>40</sup> BERNAL, Inés. 1998. *Op cit.* p. 48.

<sup>41</sup> K. D. Sharma et al. Chemical composition, functional properties and processing of carrot – a review. Association of Food Scientists & Technologists. India, 2011. DOI 10.1007/s13197-011-0310-7. 22 - 32 p.

actividad microbiana. Como resultado, se puede conservar una mayor cantidad de la materia necesaria durante más tiempo para el desarrollo experimental planteado. Para la zanahoria Chantenay (*Daucus carota L.*) se recomienda llevar a cabo este proceso a temperaturas comprendidas entre los 40 y 60 °C principalmente para evitar, por una parte, la desnaturalización de la molécula de  $\beta$ -caroteno y, por otra parte, promover la inactivación completa de las enzimas encargadas de oxidar los compuestos antioxidantes de esta hortaliza.

El contenido de carotenoides según el departamento de agricultura de Estados Unidos para diferentes fuentes, en las cuales destacan que el proceso de secado controlado de la zanahoria puede aumentar el contenido de  $\beta$ -caroteno de 8.285  $\mu\text{g}/100\text{ g}$  hasta 33.954  $\mu\text{g}/100\text{ g}$ <sup>42</sup>. No obstante, el tiempo de secado, es otra variable que se debe especificar teniendo en cuenta que esta tiene un comportamiento directamente proporcional con la temperatura seleccionada. Por ejemplo, en el trabajo de Mohamad Z. Bin Y<sup>43</sup>. se evaluó el efecto del tiempo de secado frente la cantidad de  $\beta$ -caroteno extraído de una muestra de zanahoria Chantenay mediante un montaje Soxhlet, encontrando que las condiciones óptimas de operación de la etapa de secado fueron 60°C y 12 h.

Para el caso del ciclo de vida de las técnicas de extracción de  $\beta$ -caroteno de la zanahoria, las zanahorias son recolectadas y deshidratadas en secadores de aire a temperaturas entre los 40°C y los 65°C y una velocidad del aire de entre 0.3 – 1  $\text{m}^3/\text{s}$  hasta alcanzar una humedad de la raíz de alrededor de 6% en base húmeda. Específicamente, para el caso de una temperatura de secado de 40°C el secado se lleva a cabo en 24 h con una velocidad de aire de secado de 1 $\text{m}^3/\text{s}$  y un consumo energético neto de 90.9 MJ/kg de agua evaporada<sup>44</sup>. Temperaturas superiores a los 65°C son consideradas dañinas puesto que los carotenoides son compuestos termosensibles.

En el artículo de revisión de K. D. Sharma *et al*<sup>45</sup>, mencionan que los métodos de secado de la zanahoria independientemente de su principio físico de funcionamiento, resultan en una pérdida ineludible del contenido de  $\beta$ -caroteno comparado con el contenido natural de zanahorias frescas como se muestra en la **Tabla 8**.

---

<sup>42</sup> SAINI, Ramesh Kumar; KEUM, Young-Soo. 2018. *Op. cit.* p. 43.

<sup>43</sup> BIN Y., MOHAMAD Z. Study on factors affecting extraction of carotene from carrot by using Soxhlet extraction method. Facultad de Ingeniería Química y de Recursos Naturales. Universidad de Malaysia Pahang. 2013.

<sup>44</sup> KYRIAKOPOULOU, Konstantina et al. Life cycle analysis of  $\beta$ -carotene extraction techniques. En: Journal of Food Engineering. 2015.

<sup>45</sup> K. D., Sharma, *et al.* 2011. *Op cit.* p. 58.

**Tabla 8.** Contenido de  $\beta$ -caroteno en zanahorias deshidratadas

	$\beta$ -caroteno, mg/100 g	Pérdida de caroteno, %
Zanahorias frescas	39.8 $\pm$ 0.81	0
Cortes de zanahoria deshidratada	24.7 $\pm$ 0.73	37.0
Tiras de zanahoria deshidratada	22.5 $\pm$ 0.68	43.0
Zanahoria pulverizada	23.9 $\pm$ 0.24	40.0

**Fuente:** K. D. Sharma et al. Chemical composition, functional properties and processing of carrot – a review. Association of Food Scientists & Technologists. India, 2011

De esta tabla se puede inferir que, si bien, cualquier tipo de tratamiento asociado a la eliminación del agua de las zanahorias representa una pérdida en el contenido de sus compuestos bioactivos, en este caso, el  $\beta$ -caroteno; este tratamiento es esencial, puesto que este compuesto es oleosoluble y el rendimiento de extracción final se vería comprometido. Las zanahorias son normalmente secadas hasta alcanzar un valor de 10% de humedad y luego son llevadas a cámaras de terminado de secado para completar la deshidratación a 44°C<sup>46</sup>.

### 2.3 CARACTERIZACIÓN DE LA MUESTRA (ANÁLISIS PROXIMAL)

H. Greenfield y D. A. T. Southgate establecen, que a pesar de que algunos métodos usados históricamente en el sistema proximal de análisis no son recomendables para la creación de bases de datos de composición de alimentos, resulta útil considerar los conceptos involucrados, pues tienen visiones acertadas en la composición de alimentos y en el análisis de alimentos, además estos métodos son empleados actualmente como base del análisis de alimentación con propósitos legales en muchos países<sup>47</sup>.

Este análisis consiste de 10 pruebas, cuyo fundamento técnico se basa en las normas establecidas por la Asociación de Químicos Analíticos Oficiales o AOAC (por sus siglas en inglés) y de las cuales se describe su técnica a continuación:

- **Calorías (método cálculo).** Se basa en el cálculo de la energía disponible de un alimento a partir de una serie de factores equivalentes para los indicadores de proteína, carbohidratos y grasa, 4.0, 4.0 y 9.0 kcal/g<sup>48</sup> respectivamente y a partir de la siguiente **Ecuación 2**. Este parámetro se expresa como kcal aportadas por cada 100 g de alimento.

---

<sup>46</sup> K. D., Sharma, *et al.* 2011. *Op cit.* p. 58.

<sup>47</sup> H. Greenfield; D.A.T. Southgate. Food Composition Data, Production, management and use. FAO. Capítulo 7. Review of methods of analysis. "The proximate system of analysis". Roma, 2003. ISBN 92-5-104949-1.

<sup>48</sup> MASSON, Lina. Capítulo 14. Métodos Analíticos para la Determinación de Humedad, Alcohol, Energía, Materia Grasa y Colesterol en Alimentos. FAO. p. 51

## Ecuación 2. Calorías como energía disponible (método cálculo)

$$\text{Calorías} \frac{\text{kcal}}{100\text{g alimento}} = [(\text{Proteína} * 4.0) + (\text{Carbohidratos} * 4.0) + (\text{Grasa} * 9.0)]$$

- **Carbohidratos (método diferencia).** El método de diferencia para la determinación de carbohidratos consiste en aplicar la **Ecuación 3** que se muestra a continuación con base en los resultados obtenidos en las diferentes pruebas que componen el análisis proximal.

## Ecuación 3. Determinación de carbohidratos (método diferencia)

$$\% \text{Carbohidratos} = 100 - \% \text{Agua} - \% \text{Proteína} - \% \text{Cenizas} - \% \text{Extracto étereo}$$

**Fuente:** CURAN R., Nuria J. Identificación de las Propiedades Físico-químicas de la Zanahoria Amarilla (*Daucus carota* L) variedad Chantenay, en dos estados de madurez (Inmaduro-maduro) proveniente de Antonio Ante-Imbabura, 2009.

- **Humedad (método gravimétrico).** Establecido por la norma A.O.A.C. No.931.04.<sup>49</sup> Un crisol vacío es pesado (**P.C.V.**), luego 10 g de muestra (**P.M.**) son pesadas y secadas en estufa convencional a  $105 \pm 0.2$  °C hasta alcanzar un peso constante (**P.C.M.**) El resultado se reporta como contenido de humedad en base húmeda  $X_{bh}$  según la **Ecuación 4**.

## Ecuación 4. Contenido de humedad base húmeda (método gravimétrico).

$$\text{Contenido de humedad}_{bh}(X_{bh}) = \frac{P.M. - (P.C.M. - P.C.V.)}{P.M.}$$

**Fuente:** CURAN R., Nuria J. Identificación de las Propiedades Físico-químicas de la Zanahoria Amarilla (*Daucus carota* L) variedad Chantenay, en dos estados de madurez (Inmaduro-maduro) proveniente de Antonio Ante-Imbabura, 2009.

- **Cenizas (método gravimétrico).** Inicialmente se llevan los crisoles a la mufla a 550°C durante 2 h, se dejan enfriar hasta  $\pm 40$  °C en la mufla, luego llevar a desecador y pesar a temperatura ambiente **C<sub>0</sub>**. En este crisol pesar exactamente 5 g de muestra y registrar como **C<sub>1</sub>**. Colocar los crisoles en la mufla a 550°C hasta conseguir cenizas blancas y grisáceas. Pre enfriar en la mufla hasta  $\pm 40$  °C, llevar a desecador y pesar a temperatura ambiente **C<sub>2</sub>**. El contenido de cenizas se calcula según la (**Ecuación 5**).

---

<sup>49</sup> AOAC INTERNATIONAL. AOAC Official Method 931.04. Moisture in Cacao Products. Gravimetric Method. 2000. JAOAC 14, 529(1931)

**Ecuación 5.** Contenido de cenizas (método gravimétrico)

$$\text{Contenido de cenizas} = \frac{C_2 - C_0}{C_1}$$

**Fuente:** CURAN R., Nuria J. Identificación de las Propiedades Físico-químicas de la Zanahoria Amarilla (*Daucus carota* L) variedad Chantenay, en dos estados de madurez (Inmaduro-maduro) proveniente de Antonio Ante-Imbabura, 2009.

- **Fibra cruda (método gravimétrico).** Esta técnica está establecida según el método No. 930.20 de la Norma A.O.A.C.<sup>50</sup> con algunas modificaciones. Inicialmente la muestra se somete a calentamiento a 105 °C durante 1 h hasta peso constante o hasta 5-10% de humedad final. Se pesan exactamente 0.3 g de muestra en cada uno de los crisoles y se registra el valor como **W<sub>0</sub>**. Se adicionan a los crisoles asegurados en el equipo 125 mL de H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> (1.25%) previamente calentados hasta ebullición y 3-5 gotas de n-octanol como antiespumante. Se lleva la mezcla a ebullición y se deja en reposo la digestión por 30 min. Luego el ácido es drenado y se ejecutan 3 lavados con agua caliente. Tras el último lavado se adicionan 150 mL de KOH (1.25%) en ebullición y se repite el mismo procedimiento anterior con variación de que el último lavado se hace con agua fría y al final se adicionan 25 mL de acetona fría. Se repite el proceso por triplicado y se llevan los crisoles al horno a 105°C hasta peso constante y se pesan, registrando el valor como **W<sub>1</sub>**. Finalmente, se llevan los crisoles a la mufla a 550°C por 3 h, los crisoles se pesan por último registrando el valor como **W<sub>2</sub>**. El contenido de fibra cruda se calcula por medio de la **Ecuación 6**.

**Ecuación 6.** Cálculo de la fibra cruda (método gravimétrico).

$$\text{Fibra cruda} = \frac{W_1 - W_2}{W_0}$$

**Fuente:** CURAN R., Nuria J. Identificación de las Propiedades Físico-químicas de la Zanahoria Amarilla (*Daucus carota* L) variedad Chantenay, en dos estados de madurez (Inmaduro-maduro) proveniente de Antonio Ante-Imbabura, 2009.

- **Grasa (método gravimétrico).** Este procedimiento consiste en una extracción con solventes orgánicos. 1g de muestra seca se introduce en los dedales y se pesan **W<sub>1</sub>**, luego se introduce en el equipo de extracción. Se pesa el recipiente del solvente vacío y se registra como **W<sub>2</sub>**, se añade el disolvente y se da inicio a la extracción por alrededor de 1 h. Se realiza una destilación para recuperar el solvente, se extrae el recipiente y el dedal, se llevan a la estufa a secado y

---

<sup>50</sup> AOAC INTERNATIONAL. AOAC Official Method 930.20. Crude Fiber in Cacao products. 2000. JAOAC 13, 482 (1930); 14, 526, 530 (1931); 16, 66(1933).

finalmente se pesan  $W_3$ . La grasa o extracto etéreo se calcula según la **Ecuación 7**.

**Ecuación 7.** Grasa o extracto etéreo (método gravimétrico).

$$\text{Grasa o Extracto etéreo} = \frac{W_3 - W_2}{W_1}$$

**Fuente:** CURAN R., Nuria J. Identificación de las Propiedades Físico-químicas de la Zanahoria Amarilla (*Daucus carota* L) variedad Chantenay, en dos estados de madurez (Inmaduro-maduro) proveniente de Antonio Ante-Imbabura, 2009.

- **Proteína (método Kjeldahl).** Se pesan 10 g de muestra desecada y se llevan a un tubo de digestión donde se agregan 30 mL de ácido sulfúrico concentrado y 2 g de mezcla catalizadora. Luego este tubo se lleva a la unidad de digestión a 450°C por 3 h. Luego, la muestra es llevada a destilación donde se agregan 50 mL de NaOH 50% y se retira el amoniaco desprendido sobre el ácido bórico al 3% con indicador de mezcla. Finalmente se hace una titulación con ácido sulfúrico 0.15 N, hasta conseguir viraje del indicador. La proteína cruda se calcula mediante la **Ecuación 8**.

**Ecuación 8.** Proteína cruda (método Kjeldahl)

$$\% \text{Proteína} = \frac{(V \text{ (ml)} H_2SO_4 * N H_2SO_4) \times 0.014 \times 6.25}{g \text{ muestra}} \times 100$$

**Fuente:** CURAN R., Nuria J. Identificación de las Propiedades Físico-químicas de la Zanahoria Amarilla (*Daucus carota* L) variedad Chantenay, en dos estados de madurez (Inmaduro-maduro) proveniente de Antonio Ante-Imbabura, 2009.

- **Materia seca (método diferencia).** Procedimiento establecido por la norma de la A.O.A.C. 925.45. Primero se debe pesar y tarar el recipiente a utilizar  $P_1$ , luego añadir la muestra homogenizada, volver a pesar  $P_2$ , congelar y liofilizar para eliminar el contenido de agua de la muestra. Para muestras con alto contenido de azúcares, desecar en una estufa hasta peso constante. Tras este procedimiento, pesar nuevamente los recipientes  $P_3$  y calcular el porcentaje de materia seca como se muestra a continuación (ver **Ecuación 9**).

**Ecuación 9.** Porcentaje de materia seca (método diferencia)

$$\text{Materia seca (\%)} = \frac{P_3 - P_1}{P_2 - P_1} \times 100$$

**Fuente:** NUNES D., Marlene. Caracterización y procesado de kiwi y fresa cultivados por diferentes sistemas. Universidad Santiago de Compostela, 2007.

- **Actividad de agua (método de medición con higrómetro).** La actividad de agua ( $A_w$ ) se mide directamente con un higrómetro o medidor de agua. Para este análisis se tiene a disposición un higrómetro de referencia Testo 650 de sonda 0628.0024 con precisión de 0.01  $A_w$  y rango de medición de 0 – 1.000  $A_w$ . El procedimiento para la medición de este parámetro consiste en triturar una muestra de zanahoria fresca cruda, de la cual se toma una cantidad determinada y se deposita en una cámara de vacío, la cual se sella y posteriormente con la sonda acoplada al dispositivo controlador se hace la lectura introduciendo esta sonda en la cámara con la muestra. El dispositivo entrega la lectura respectiva del valor medido de la actividad de agua con tres cifras significativas junto con la temperatura de referencia al momento de la lectura.

## 2.4 PARÁMETROS DE EXTRACCIÓN

A causa de la poca disponibilidad de información de proyectos similares en Colombia, se optó por acudir a artículos y publicaciones científicas de otros países donde se especifica la técnica de los procesos extractivos con el objetivo de establecer los rangos de las condiciones recomendadas para llevar a cabo el desarrollo experimental. Para esta etapa se consultaron los siguientes artículos enlistados en la **Tabla 9**.

**Tabla 9.** Listado de artículos sobre extracción de  $\beta$ -caroteno

#	Título	Autor	País	Año
1	Microwave-assisted extraction and ultrasound-assisted extraction for recovering carotenoids from Gac peel and their effects on antioxidant capacity of the extracts.	CHUYEN, Hoang V., et al.	Australia	2018
2	Green ultrasound-assisted extraction of carotenoids from pomegranate wastes using vegetable oils.	GOULA, Athanasia M., et al	Grecia	2017
3	Development of a green procedure of citrus fruits waste processing to recover carotenoids.	BOUKROUFA, Meryem et al.	Rusia	2017
4	Improvement of the Extraction Process for High Commercial Value Pigments from <i>Desmodesmus sp. Microalgae</i> .	SOARES, Aline T., et al.	Brasil	2016
5	Recovery of carotenoids from tomato processing by-products – a review.	STRATI, I. F. y OREOPOULOU, V.	Grecia	2014



**Tabla 9. (Continuación)**

#	Título	Autor	País	Año
6	Ultrasound-Assisted extraction of Lycopene and $\beta$ -carotene from tomato-processing wastes.	T.,Yilmaz, <i>et al.</i>	Turquía	2017
7	Obtención del Beta-Caroteno a partir de la Zanahoria y su Aplicación en la Industria Alimenticia.	ORTIZ V., Ana C. y MAMANI S., María L.	Bolivia	2015
8	Carotenoid extraction methods: A review of recent developments.	SAINI, Ramesh Kumar y KEUM, Young-Soo.	Corea	2018
9	Study on factors affecting extraction of carotene from carrot by using Soxhlet extraction method.	BIN Y., Mohamad Z. <sup>51</sup>	Malaysia	2013
10	Life cycle analysis of $\beta$ -carotene extraction techniques	KYRIAKOPOULOU, Konstantina <i>et al.</i>	Grecia	2015
11	Extraction, isolation and purification of $\beta$ -carotene	WINGQVIST Annica	Suecia	2011
12	Green ultrasound-assisted extraction of carotenoids based on the bio-refinery concept using sunflower oil as an alternative solvent.	Y. Li, et al.	Francia	2012

**Fuente:** elaboración propia.

**2.4.1 Solvente o agente de extracción.** Entre los solventes que comúnmente se emplean se encuentra el acetato de etilo y metanol. También se puede usar hexano, acetona, etanol, cloroformo y éter de petróleo, al igual que mezclas de estos componentes en diferentes proporciones<sup>52</sup>. La acetona y el etanol son preferidos para la extracción de carotenoides a partir de materias primas con alto contenido de humedad<sup>53</sup>.

Investigaciones enfocadas al uso de solventes biodegradables amigables con el medio ambiente y de menor riesgo se han convertido en una prioridad para la academia y la industria teniendo en cuenta que el n-hexano, uno de los mayores constituyentes de los agentes de extracción, es derivado de recursos fósiles y

<sup>51</sup> BIN Y., MOHAMAD Z. 2013. *Op Cit.* p.59.

<sup>52</sup> STRATI, I. F.; OREOPOULOU, V. 2014. *Op. cit.*, p. 43.

<sup>53</sup> SAINI, Ramesh Kumar; KEUM, Young-Soo. 2018. *Op. cit.* p. 43.

registrado por la regulación REACH como reprotóxico categoría 2 y como tóxico acuático crónico categoría 2<sup>54</sup>.

Es por esto, que la búsqueda de solventes parcial o totalmente sustituyentes a los reactivos convencionales ha crecido constantemente a lo largo de los últimos años, obteniendo resultados satisfactorios. A estos procesos se les denomina hoy en día como “Green extraction” o extracción verde. Esta técnica junto con la extracción con líquidos iónicos son una tendencia en crecimiento y hacen parte de las nuevas tecnologías que buscan aumentar la sustentabilidad y reducir el impacto ambiental. Para el método convencional de extracción Soxhlet, como Solvente de extracción convencionalmente se usan solventes orgánicos como la acetona, el cloroformo, benceno; por ejemplo, BIN Y., Mohamad Z<sup>55</sup>. encontró en su estudio de extracción de  $\beta$ -caroteno a partir de zanahoria el mejor rendimiento al utilizar 2-propanol como solvente en proporción sólido-solvente de 1:10. No obstante, uno de los propósitos del proyecto fue utilizar un solvente no tóxico y considerado como solvente verde. En el artículo de revisión “Carotenoid extraction methods A review of recent developments” de Kumar Ramesh S. y Young-Soo Keum<sup>56</sup> destacan el estudio de Yara-Varón *et al.*, en el cual evaluaron el rendimiento en la extracción de  $\beta$ -caroteno de zanahorias deshidratadas haciendo uso de solventes verdes como el Ciclopentil metil Éter (CPME), el Carbonato de dimetilo (DMC), el acetato de etilo (EA), el Alcohol isopropílico (IPA) y el 2-metiltetrahidrofurano (2-MeTHF) puesto que su origen u obtención proviene de fuentes renovables o material biológico. Encontrando un mayor rendimiento de extracción con el CPME y el 2-MeTHF.

GOULA, Athanasia M., *et al.*<sup>57</sup> llevaron a cabo una extracción de carotenoides de la granada utilizando aceites vegetales como solvente sustituto a los solventes convencionales, encontrando un porcentaje de extracción entre 85.7 y 93.8% del total de carotenoides presente en la materia prima con un rendimiento óptimo de 0.3255 mg de carotenoides por 100 g de muestra y una reducción en el consumo energético, pues no fue necesario utilizar un proceso posterior a la extracción para purificar el extracto. Las extracciones de carotenoides usando aceites vegetales ofrece ventajas claras para aplicaciones alimenticias en comparación a las técnicas tradicionales, puesto que el aceite vegetal rico en carotenoides puede ser usado directamente en la formulación de alimentos<sup>58</sup>. No obstante, los estudios recientes no dan información precisa de la factibilidad financiera del método, por lo cual se requiere de estudios enfocados en los costos de manufactura a condiciones óptimas de extracción para determinar la mejor alternativa para aplicación industrial.

---

<sup>54</sup> BOUKROUFA, 2017. *Op. cit.*, p. 42.

<sup>55</sup> BIN Y., MOHAMAD Z. 2013. *Op cit. p.* 59.

<sup>56</sup> SAINI, Ramesh Kumar; KEUM, Young-Soo. 2018. *Op. cit.* p. 43

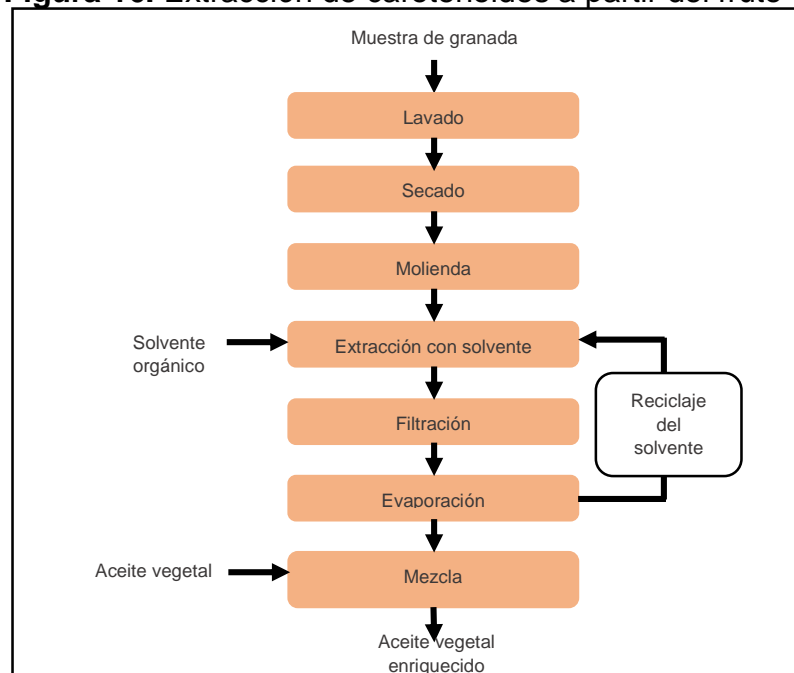
<sup>57</sup> GOULA, Athanasia M., *et al.* Green ultrasound-assisted extraction of carotenoids from pomegranate wastes using vegetable oils. 2017a. 821-830 ISBN 1350-4177. 1-10 p

<sup>58</sup> SAINI, Ramesh Kumar; KEUM, Young-Soo. 2018. *Op. cit.* p. 43

**2.4.2 Extracción convencional Soxhlet.** La extracción Soxhlet es una técnica convencional que provee la mayor recuperación de carotenoides, por esta razón, es comúnmente usada para evaluar el rendimiento de otros métodos<sup>59</sup>. GOULA, Athanasia M., *et al.* propuso la siguiente topología (Figura 16) para el proceso de extracción de carotenoides del fruto de la granada destinados a la producción de aceites vegetales enriquecidos con estos mismos compuestos.

Las etapas que componen este proceso corresponden de manera similar a las establecidas en el proceso estándar de extracción Soxhlet con solventes orgánicos y de esta cabe resaltar la presencia de una etapa de evaporación que permite, no solo purificar o concentrar el extracto, sino que también, permite reciclar parte del solvente o la mezcla de solventes disminuyendo así el consumo del mismo y evitando la degradación del compuesto bioactivo de interés.

**Figura 16.** Extracción de carotenoides a partir del fruto de la granada.



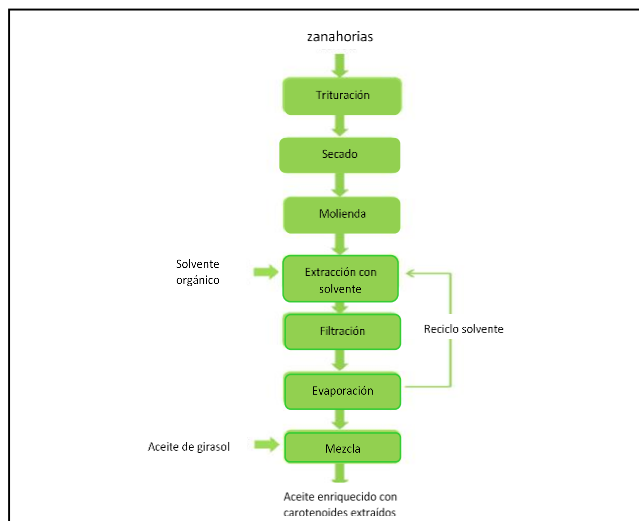
**Fuente:** elaboración propia, basado en GOULA, Athanasia M., *et al.* Green ultrasound-assisted extraction of carotenoids from pomegranate wastes using vegetable oils. 2017.

De manera similar Y. Li, *et al.* desarrollo un proceso de extracción de carotenoides a partir de zanahoria Chantenay, ilustra la técnica del método de extracción convencional con solventes orgánicos **Figura 17** donde se puede observar que este

<sup>59</sup> Macías-Sánchez, M. D. *et al.* (2009). Comparison of supercritical fluid and ultrasound-assisted extraction of carotenoids and chlorophyll a from *Dunaliella salina*. *Talanta*, 77(3), 948–952. Citado por: *Ibid.* p.66.

coincide con el mismo expuesto por GOULA, Athanasia M., *et al.* mostrado anteriormente en la **Figura 16**.

**Figura 17.** Procedimiento de extracción convencional con solventes orgánicos.



**Fuente:** elaboración propia, basado en. Y. Li, et al. Green ultrasound-assisted extraction of carotenoids based on the bio-refinery concept using sunflower oil as an alternative solvent. (2013). 2012.

**2.4.2.1 Relación sólido – solvente.** Gracias a los artículos mostrados en la Tabla 9; es posible conocer un rango de valores posibles que se pueden adoptar en el desarrollo experimental y estos también funcionarán como guía que proveerá reproducibilidad y confiabilidad de los resultados ya que permite establecer un marco de comparación con otros estudios similares. En la Tabla 10 se sintetizan los parámetros aplicados por cada estudio.

**Tabla 10.** Características del solvente y relación solvente –sólido.

<i>Técnica</i>	<i>Autor(es)</i>	<i>Parámetros</i>	
<b>SOXHLET</b>	WINGQVIST Annica	Solvente(s)	Etanol
		Volumen solvente	200 mL
		Cantidad muestra	20 g
	BIN Y., Mohamad Z.	Solvente(s)	2-Propanol
		Volumen solvente	150, 200 y 250 mL
		Cantidad muestra	25 g
	GOULA, Athanasia M.	Solvente(s)	Hexano : Isopropanol
		Volumen solvente	25 mL (60:40 v/v)
		Cantidad muestra	5 g

**Tabla 10.** (Continuación)

<i>Técnica</i>	<i>Autor(es)</i>	<i>Parámetros</i>	<i>Técnica</i>
Soxhlet	CARDENAS Toro, <i>et al.</i> Citado por: SAINI, Ramesh Kumar y KEUM, Young-Soo.	Solvente(s)	Etanol y Hexano
		Volumen solvente	100 mL
		Cantidad muestra	5 g

**Fuente:** elaboración propia.

**2.4.2.2 Tiempo y temperatura de extracción.** Se clasificaron los parámetros empleados en los diferentes artículos científicos y demás documentos consultados y se organizaron en la **Tabla 11**.

**Tabla 11.** Parámetros de tiempo y temperatura

<i>Materia prima</i>	<i>Autor(es)</i>	<i>Parámetros</i>	
Zanahoria	WINGQVIST Annica	Tiempo de extracción	60 min
		Temperatura	70 °C
Zanahoria	BIN Y., Mohamad Z.	Tiempo de extracción	300 min
		Temperatura	82 °C
Granada	GOULA, Athanasia M.	Tiempo de extracción	N/A
		Temperatura	35 °C
Fibra de palma	CARDENAS Toro, <i>et al.</i> Citado por: SAINI, Ramesh Kumar y KEUM, Young-Soo.	Tiempo de extracción	360 min
		Temperatura	78.4 °C

**Fuente:** elaboración propia.

WINGQVIST, Annica<sup>60</sup> obtuvo un rendimiento de  $\beta$ -caroteno de 17.6 mg/100 g zanahoria y encontró un rendimiento mayor que las técnicas de ebullición, ebullición con reflujo y con fluido presurizado. Mientras que en el estudio de GOULA, Athanasia M., *et al.* se llevó a cabo una extracción Soxhlet convencional optimizada en cantidades: 5g de materia seca con 25 ml de Hexano e Isopropanol. CARDENAS Toro, *et al.* Citado por: SAINI, Ramesh Kumar y KEUM, Young-Soo., lograron extraer  $\alpha$  y  $\beta$ -caroteno de la fibra de palma a través de la técnica estandarizada Soxhlet obteniendo una concentración final de  $30 \pm 2 \mu\text{g } \beta\text{-caroteno/g Palma}$  (base seca) siendo la técnica más efectiva junto con la extracción con líquido presurizado.

<sup>60</sup> WINGQVIST, Annica. 2011. *Op Cit.* p. 44.

**2.4.2.3 Purificación o concentración del extracto.** La técnica empleada comúnmente es la evaporación simple del solvente mediante un rotavapor por un tiempo determinado; sin embargo, se ha desarrollado nuevas estrategias que facilitan el propósito de esta etapa. En la Tabla 12 se resumen algunas de estas técnicas y sus características principales.

**Tabla 12.** Técnicas de purificación o concentración del extracto.

<i>Autor(es)</i>	<i>Técnica de purificación</i>	<i>Parámetros</i>	
BIN Y., Mohamad Z. <sup>61</sup>	Separación con rotavapor	Pre-acondicionamiento	Filtración
		Temperatura	82 °C
GOULA, Athanasia M. <sup>62</sup>	Evaporación al vacío	Temperatura	35°C
		Post-acondicionamiento	4 mL acetona

**Fuente:** elaboración propia.

En los artículos y publicaciones mencionados anteriormente se resalta que la aplicación de estas técnicas logra aumentar la concentración del extracto significativamente, pero estas etapas adicionales prolongan el tiempo global del proceso y aumentan el consumo energético y los costos variables.

**2.4.3 Extracción asistida con ultrasonido (UAE).** En años recientes, la UAE de antioxidantes ha sido aplicada ampliamente gracias a su alta eficiencia y velocidad de extracción<sup>63</sup>. Numerosos estudios recientes han mostrado una reducción considerable en el consumo de energía y tiempo en los procesos de extracción de carotenoides en comparación a los métodos convencionales. Por ejemplo, KUMCUOGLU Yilmaz & Tavman<sup>64</sup> observaron una reducción en el tiempo de extracción de licopeno de desechos de tomate, temperaturas reducidas y volúmenes pequeños de solvente, obteniendo un rendimiento de extracción mayor comparado a los métodos convencionales. En el estudio de CHUYEN, Hoang V., *et al.* realizaron una extracción asistida con ultrasonido UAE del fruto Gac apoyándose en el diseño experimental propuesto que se observa en la Figura 18 a. Paralelamente se realiza una comparación con el modelo propuesto por GOULA, Athanasia M. Figura 18 b diseñado para la extracción de carotenoides del fruto de la granada con aceites vegetales. En esta se puede observar una similitud en las etapas experimentales de ambos autores, específicamente en las primeras etapas que consisten en el acondicionamiento y tratamiento de la materia prima.

<sup>61</sup> BIN Y., MOHAMAD Z. 2013. *Op cit.* p.59.

<sup>62</sup> GOULA, Athanasia M, *et al.* 2017. *Op cit.* p. 66.

<sup>63</sup> L.A. Pérez-Serradilla, F. Priego-Capote, M.D. Luque de Castro, Simultaneous ultrasound-assisted emulsification – Extraction of polar and nonpolar compounds from solid plant samples, *Analytical Chemistry* 79 (2007). Citado por: Y. Li, *et al.* *Op cit.* p. 28.

<sup>64</sup> T. Yilmaz, *et al.* 2014. *Op cit.* p.70.. Citado por: CHUYEN, Hoang V., *et al.* 2018. *Op cit.* p. 56.

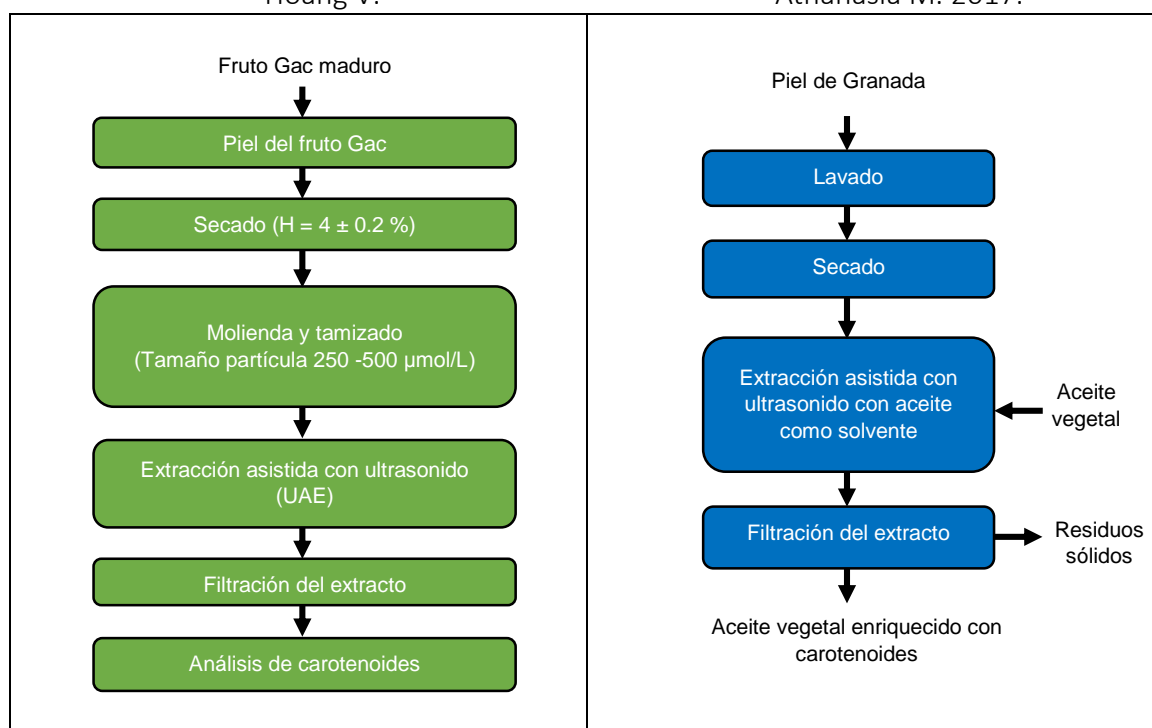
Continuando con el rastreo bibliográfico fue encontrado el estudio realizado por Y. Li, *et al.*<sup>65</sup>, en el cual se realizó una extracción asistida con ultrasonido partiendo de zanahoria Chantenay utilizando aceite de girasol como solvente. El diseño experimental y los procedimientos realizados se muestran en la **Figura 19**.

Se puede concluir que la técnica de extracción asistida con ultrasonido (UAE) tiene una metodología similar independientemente de la materia prima que se tome. Y que para el caso de la zanahoria y del fruto de granada los procedimientos experimentales son muy similares al usarse aceites vegetales como solvente alternativo a los solventes convencionales. Del proceso experimental cabe resaltar lo compacto y útil de este proceso ya que se reducen las etapas del proceso comparando con las técnicas convencionales y que se obtiene una serie de co-productos que podrían tener también una aplicación comercial.

**Figura 18.** Procedimientos experimentales, Extracción (UAE)

a) Modelo propuesto por CHUYEN, Hoang V.

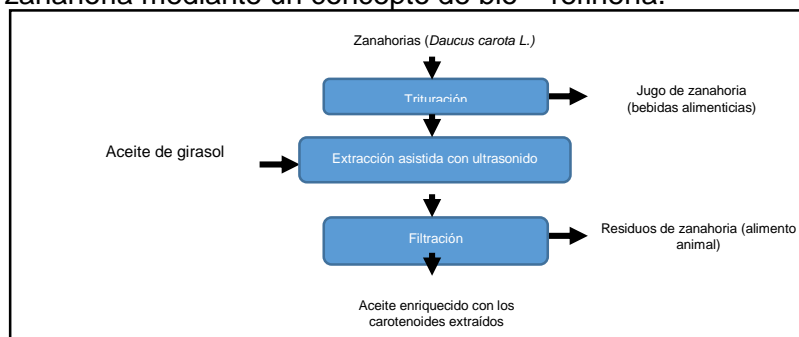
b) Modelo propuesto por GOULA, Athanasia M. 2017.



**Fuentes:** elaboración propia, basado en. **a)** CHUYEN, Hoang V., et al. Microwave-assisted extraction and ultrasound-assisted extraction for recovering carotenoids from Gac peel and their effects on antioxidant capacity of the extracts. 2018. **b)** GOULA, Athanasia M., et al. Green ultrasound-assisted extraction of carotenoids from pomegranate wastes using vegetable oils. 2017.

<sup>65</sup> Y. Li *et al.* 2012. *Op cit.* p.28.

**Figura 19.** Procedimiento para la extracción de carotenoides de zanahoria mediante un concepto de bio – refinería.



**Fuente:** elaboración propia, basado en. Y. Li, et al. Green ultrasound-assisted extraction of carotenoids based on the bio-refinery concept using sunflower oil as an alternative solvent. (2013). 2012.

**2.4.3.1 Parámetros experimentales.** Entre los estudios consultados se encontró una amplia variedad de metodologías, enfoques y análisis del efecto de diferentes variables con respecto al rendimiento de la extracción.

Lo anterior dependiendo de las características y especificaciones técnicas de los equipos de extracción ultrasónicos, debido a que algunos no permiten modificar las variables involucradas en su totalidad. No obstante, para esta fase de selección, se tabularon las distintas alternativas encontradas recopilando esencialmente los parámetros de cantidad de muestra, tipo de solvente, volumen de solvente, tipo de equipamiento ultrasónico, potencia y frecuencia. Adicionalmente, en esta sección se tabularon las variables de tiempo y temperatura, las cuales el equipo ultrasónico al cual se tuvo acceso para el desarrollo de este proyecto permite modificar y controlar (**Tabla 13**). Cabe mencionar, que algunas de estas variables no pudieron ser modificadas durante el proyecto; sin embargo, servirán de apoyo para el análisis de resultados en el siguiente capítulo.

**Tabla 13.** Parámetros de extracción (Revisión bibliográfica)

<i>Autor(es)</i>	<i>Materia prima</i>	<i>Equipo ultrasónico</i>	<i>Parámetros</i>	
CHUYEN, Hoang V., et al.	Fruto Gac	Baño ultrasónico	Potencia	150, 200, 250 W
			Frecuencia	43.2 kHz
			Solvente	Acetato de etilo
			Volumen solvente	40 mL
			Cantidad muestra	0.5 g
			Tiempo	10 -100 min
			Temperatura	20 ±1 °C



**Tabla 13. (Continuación)**

<i>Autor(es)</i>	<i>Materia prima</i>	<i>Equipo ultrasónico</i>	<i>Parámetros</i>	<i>Autor(es)</i>
GOULA, Athanasia M.	Granada	Sonda	Potencia	130 W
			Frecuencia	20 kHz
			Solvente	Aceite girasol/soya
			Volumen solvente	200 mL
			Tiempo	10 – 60 min
			Temperatura	20 – 60 °C
BOUKROUFA, Meryem <i>et al.</i>	Naranja	Sonda	Potencia	200 W
			Frecuencia	26 kHz
			Solvente	D-limonelo
			Relación Ste:Sto	1:10
			Tiempo	5 – 35 min
SINGH, et al. <sup>66</sup>	Microalga <i>Chlorella saccharophila</i>	No especifica	Potencia	500 W
			% de potencia	27.82 %
			Tiempo	13.48 min
			Solvente	Acetona
YAN, et al. <sup>67</sup>	<i>Brassica napus L.</i>	No especifica	Solventes	Éter de petróleo, acetona, metanol y cloroformo
			Potencia	252.9 W
			Temperatura	49.6 °C
			Tiempo	48.5 min
SOARES, Aline T., et al.	Microalga <i>Desmodemus sp.</i>	Baño ultrasónico	Solvente:Sólido	41.4 mL/g
			Potencia	200 W
			Cantidad muestra	500 mg
			Solvente	Hexano, acetona, etanol

<sup>66</sup> Singh, D., Barrow, C. J., Mathur, A. S., Tuli, D. K., & Puri, M. (2015). Optimization of zeaxanthin and  $\beta$  carotene extraction from *Chlorella saccharophila* isolated from New Zealand marine waters. *Biocatalysis and Agricultural Biotechnology*. Citado por: SAINI, Ramesh Kumar; KEUM, Young-Soo. 2018. *Op cit.* p. 43.

<sup>67</sup> Yan, F., Fan, K., He, J., & Gao, M. (2015). Ultrasonic-assisted solvent extraction of carotenoids from rapeseed meal: optimization using response surface methodology. *Journal of Food Quality*. Citado por: SAINI, Ramesh Kumar; KEUM, Young-Soo. 2018. *Op cit.* p. 43.

**Tabla 13.** (Continuación)

<i>Autor(es)</i>	<i>Materia prima</i>	<i>Equipo ultrasónico</i>	<i>Parámetros</i>	<i>Autor(es)</i>
SOARES, Aline T., et al.	Microalga <i>Desmodesmus</i> <i>sp.</i>	Baño ultrasónico	Volumen solvente	10 mL
			Tiempo	120 - 320 min
			Temperatura	23 ±2 °C
STRATI, I. F. y OREOPOULOU, V.	Sub-productos de tomate procesado	No especifica	Tiempo	45.6 min
			Temperatura	47.6 °C
			Solventes	n-hexano: etanol: acetona
			Relación solventes	(2:1:1, v/v/v)
			Frecuencia	37 kHz
T.,Yilmaz, <i>et al.</i>	Desechos de tomate procesado	Sonda	Potencia	400 W
			Frecuencia	24 kHz
			Tiempo	1 – 30 min
			Temperatura	15 ±5 °C
			Solventes	Hexano: acetona: etanol
			Relación solventes	(2:1:1 v/v/v)
			Sólido: Líquido	1:35 p/v
Y. Li, et al.	Zanahoria ( <i>Daucus carota</i> )	Sonda	Solvente	Aceite de girasol
			Sólido: Solvente	1:10 – 3: 10
			Volumen solvente	1 L
			Frecuencia	20 kHz
			Potencia	1000 W
			Temperatura	20, 40, 60 °C
			Tiempo	5, 20 y 35 min

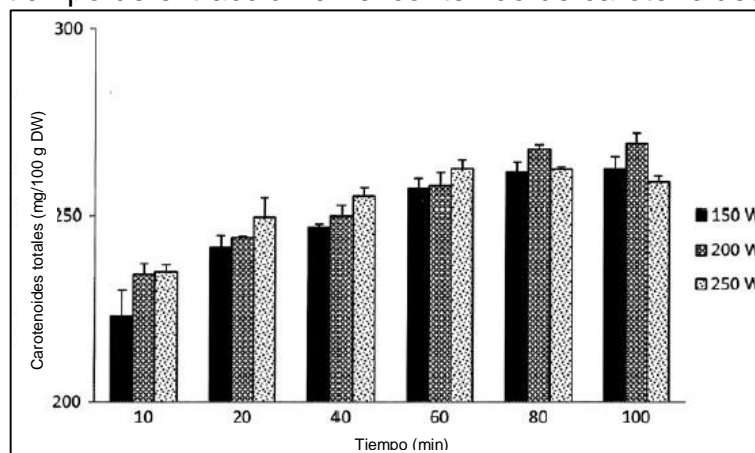
**Fuente:** elaboración propia.

Como se puede observar, cada artículo consultado expone una técnica diferente en relación con los parámetros inicialmente propuestos, lo cual se debe a la naturaleza de la materia prima, el tipo de equipo de extracción ultrasónico, el compuesto de interés a extraer y el tipo de estudio (evaluación, optimización o comparación). Sin embargo, a lo largo de estos se expusieron los efectos de estos parámetros inicialmente seleccionados en el rendimiento de concentración del extracto, llevando a cabo un análisis posterior dirigido a encontrar los parámetros óptimos o los cuales maximizaran la concentración del producto final a través de modelos estadísticos, modelos cinéticos de extracción o comparación con técnicas convencionales estandarizadas. Los resultados más relevantes encontrados por los autores se resumen a continuación.

Los resultados encontrados por CHUYEN, Hoang V., et al. **Figura 20** muestran que el comportamiento del contenido total de carotenoides es directamente proporcional con la potencia ultrasónica entre las pruebas conducidas a 10, 20, 40 y 60 min.

Por otra parte, se puede observar un cambio en el comportamiento de las variables para los tiempos de extracción de 80 y 100 min donde los mejores valores de concentración de carotenoides se obtuvieron con potencias de extracción de 150 y 200 W (262 y 268 mg/100g respectivamente). Esto ocurre ya que la luteína y el  $\beta$ -caroteno son degradados significativamente mayores por los tratamientos de ultrasonido al aumentar la potencia<sup>68</sup>.

**Figura 20.** Efecto de la potencia de ultrasonido y el tiempo de extracción en el contenido de carotenoides.



**Fuente:** CHUYEN, Hoang V., et al. Microwave-assisted extraction and ultrasound-assisted extraction for recovering carotenoids from Gac peel and their effects on antioxidant capacity of the extracts. 2018

GOULA, Athanasia M. *et al.* concluyeron en su estudio que lograron extraer entre el 85.7 y el 93.8% de los carotenoides totales presentes en el material de desecho de la granada; además, en lo que concierne al tiempo de extracción que maximiza el rendimiento fue de 30 min. Asimismo, observaron que el rendimiento incrementó al aumentar la temperatura de extracción de 20 a 40 °C y finalmente, el valor óptimo conseguido fue de 0.3255 mg carotenoides/100g de fruto seco.

Por otra parte, BOUKROUFA, Meryem, *et al.* encontraron que las condiciones óptimas para la extracción de carotenoides a partir de frutas cítricas fueron:

- Potencia: 208 W/cm<sup>2</sup>
- Temperatura: 20°C

<sup>68</sup> Sun, Y., Ma, G., Ye, X., Kakuda, Y., & Meng, R. (2010). Stability of all-trans- $\beta$ -carotene under ultrasound treatment in a model system: Effects of different factors, kinetics and newly formed compounds. *Ultrasonics Sonochemistry*, Citado por: CHUYEN, Hoang V. *et al.* 2018. *Op cit.* p.56.

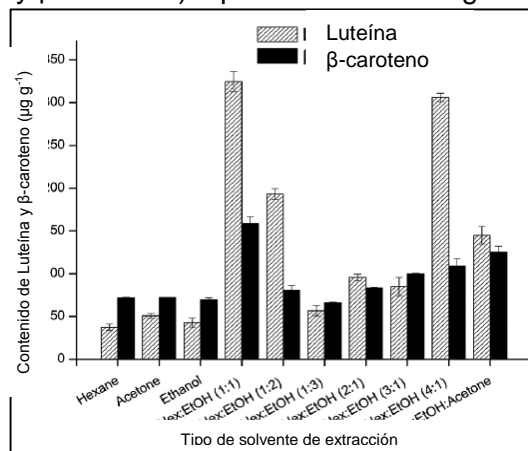
- Tiempo: 5 min
- Contenido de carotenoides 11.25 mg/L
- Incremento de contenido de carotenoides en el extracto: 40%

En el estudio de SOARES, Aline T., *et al.* se evaluó el efecto del uso de solventes como acetona, hexano y cloroformo en estado puro y en mezcla en distintas proporciones **Figura 21** y el efecto del tiempo de extracción **Figura 22** para la extracción de carotenoides de la microalga *Desmodesmus sp.* Pudiendo observar un alto rendimiento de extracción de  $\beta$ -caroteno para la combinación Hexano: Etanol (EtOH) en relación 1:1 con una concentración de  $158.44 \pm 8.51 \mu\text{g/g}$ .

Para el caso del estudio del efecto del tiempo de extracción se replicaron las condiciones óptimas encontradas en la mezcla de solventes mencionadas anteriormente observa un pico en el contenido de  $\beta$ -caroteno para un tiempo de extracción de 280 min (equivalente a 7 repeticiones de 40 min) con un contenido del carotenoide aproximado de  $200 \mu\text{g/g}$ ; concluyendo que, un tiempo de extracción alto conduce a un contenido mayor de extracto porque el contacto entre los pigmentos y el solvente facilita el proceso de extracción hasta el punto en el que el gradiente de concentración entre la célula de la microalga y el solvente alcanzan el equilibrio<sup>69</sup>.

En el modelo de extracción desarrollado por T., Yilmaz, *et al.* a partir de desechos de tomate procesado fue evidenciado un crecimiento exponencial del rendimiento de extracción dentro de los primeros 2 min, y un crecimiento gradual en los siguientes 10 min. Luego de esto el rendimiento mostró un comportamiento constante durante el resto del tiempo de extracción.

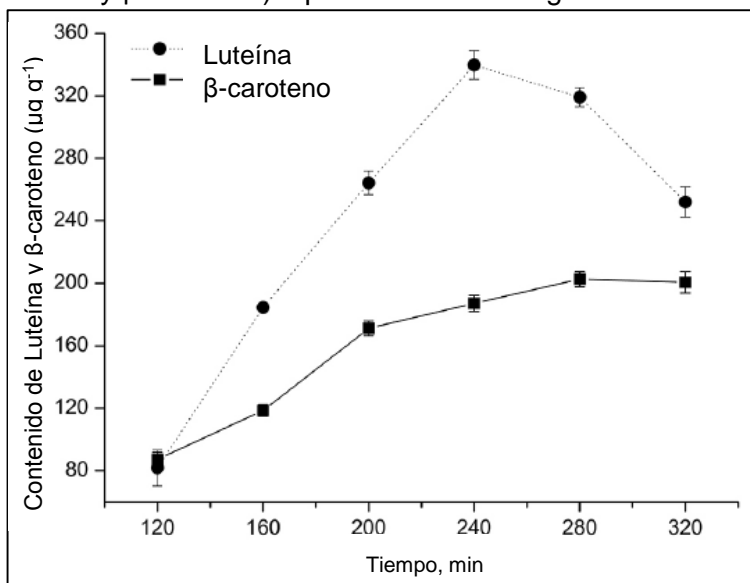
**Figura 21.** Efecto del solvente de extracción en el contenido del extracto (Luteína y  $\beta$ -caroteno) a partir de la microalga *Desmodesmus sp.*



<sup>69</sup> SOARES, Aline T., et al. Improvement of the Extraction Process for High Commercial Value Pigments from *Desmodesmus sp.* Microalgae. En: Journal of The Brazilian Chemical Society. 2016. vol. 27, no. 6.

**Fuente:** elaboración propia, basado en. SOARES, Aline T., et al. Improvement of the Extraction Process for High Commercial Value Pigments from *Desmodesmus* sp. Microalgae. 2016.

**Figura 22.** Efecto del tiempo de extracción en el contenido del extracto (Luteína y  $\beta$ -caroteno) a partir de la microalga *Desmodesmus* sp.



**Fuente:** elaboración propia, basado en. SOARES, Aline T., et al. Improvement of the Extraction Process for High Commercial Value Pigments from *Desmodesmus* sp. Microalgae. 2016.

Este fenómeno fue atribuido a que, inicialmente, la diferencia del gradiente de concentración entre el solvente y las células era mayor, sin embargo, con el paso del tiempo, este gradiente disminuye y la extracción se dificulta por la morfología de las células donde están contenidos los carotenoides haciendo más difícil el acceso del solvente a la matriz. En estudios anteriores, fueron observados resultados similares para la extracción ultrasónica de todos los *trans*-licopeno, y se encontró que el tiempo es el factor más importante que afecta el rendimiento de extracción. Se reportó también que la mayoría de todos los *trans*-licopeno pueden ser extraídos durante 1/3 del periodo total de extracción (30 min), y luego, la cantidad de licopeno se reduce por la degradación o isomerización causada por los efectos secundarios del tratamiento con ultrasonido<sup>70</sup>.

Y. Li, *et al.* lograron extraer  $\beta$ -caroteno a partir de zanahoria Chantenay (*Daucus carota*) utilizando un equipo ultrasónico tipo sonda. Posteriormente, realizaron una optimización de dicho proceso tomando en consideración 2 características

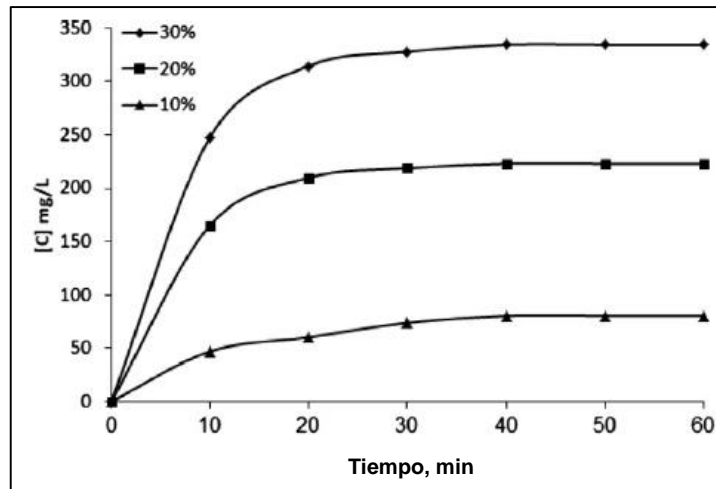
---

<sup>70</sup> Wang L. and Weller C.L. 2006. Recent advances in extraction of nutraceuticals from plants. Trends Food Sci. Technol. Citado por: T., Yilmaz, *et al.* 2014. *Op cit.* p.70.

principales: la relación zanahoria – aceite y los parámetros controlados óptimos que se exponen a continuación.

- **Relación zanahoria – aceite.** En la **Figura 23** se puede evidenciar que la concentración del  $\beta$ -caroteno extraído casi se triplicó al aumentar la relación zanahoria- aceite de 1:10 (10%) a 2:10 (20%), pero luego esta tendencia se vio disminuida una vez se llegó a una relación de 3:10 (30%).

**Figura 23.** Concentración de  $\beta$ -caroteno versus tiempo de extracción a diferentes relaciones zanahoria-aceite.



**Fuente:** elaboración propia, basado en. Y. Li, et al. Green ultrasound-assisted extraction of carotenoids based on the bio-refinery concept using sunflower oil as an alternative solvent. (2013). 2012.

Esto se atribuyó al hecho de que el aceite de girasol se saturó gradualmente generando una disminución en la solubilidad del mismo, por lo cual se seleccionó como parámetro óptimo la relación 2:10 y teniendo en cuenta, igualmente, que el 80% del proceso de extracción ocurrió dentro de los primeros 30 min de la experimentación, pues, se observa una tendencia constante de la concentración [C] alcanzado este valor de tiempo. Es por esto que se establece como tiempo máximo de experimentación un valor de 35 min para la siguiente etapa.

- **Parámetros controlados óptimos.** Esta sección de la optimización del método fue realizada a través de un diseño de experimentos siguiendo un modelo estadístico de análisis de varianza ANOVA tomando los resultados de 20 pruebas aleatorias comprendidas entre los rangos de relación zanahoria – aceite (2:10), tiempo (5 – 35 min) e intensidad ultrasónica ( $9.5 - 22.5 \text{ W/cm}^{-1}$ ) establecidas en la primera fase de la experimentación con un nivel de confianza de 95%.

El modelo arrojó como parámetros óptimos los siguientes resultados que se resumen en la **Tabla 14**.

**Tabla 14.** Parámetros óptimos, Extracción UAE con zanahoria Chantenay

<i>Parámetro</i>	<i>Valor</i>
Intensidad ultrasónica (UI)	22.5 W/cm <sup>2</sup>
Temperatura (T)	40 °C
Tiempo de extracción (t)	20 min
Valor β-caroteno estimado [C]	334 mg/L
Valor real β-caroteno extraído [C]	334.74 mg/L

**Fuente:** Y. Li, et al. Green ultrasound-assisted extraction of carotenoids based on the bio-refinery concept using sunflower oil as an alternative solvent. (2013). 2012.

## 2.5 CUANTIFICACIÓN MEDIANTE LA ESPECTROFOTOMETRÍA UV-VIS

GOULA, Athanasia M. *et al.*, el cual, se apoya en la técnica de la espectrofotometría UV-VIS en conjunto con una correlación matemática desarrollada por MINGUEZ M., M. Isabel. *et al.* y un estudio de la clasificación de aceites vírgenes del oeste de Grecia publicado por I. Karabagias, *et al.*

Los compuestos carotenoides en solución obedecen la ley de Lambert - Beer, la cual establece, que su absorbancia es directamente proporcional a la concentración<sup>71</sup>. En la teoría fue posible encontrar los coeficientes de extinción ( $E^{1\%}$ ) específicos para el β-caroteno en diferentes solventes reportados por diferentes autores (**Tabla 15**). Es común encontrar en la teoría que algunos autores utilizan diferentes valores de estos coeficientes para algunas sustancias, lo que puede generar incertidumbre o variación en los resultados analíticos. El valor del coeficiente específico de extinción molar depende del solvente y de la longitud de onda de medición.

**Tabla 15.** Coeficientes de extinción molar del β-caroteno.

<i>Solvente</i>	<i>Longitud de onda (λ), nm</i>	<i>E<sup>1%</sup> (cm<sup>-1</sup>)</i>
n-hexano	453	2592 <sup>a</sup>
n-hexano	450	2590 <sup>b</sup>
n-hexano	452	2592 <sup>c</sup>
Ciclohexano	457	2505 <sup>d</sup>
Éter de petróleo	450	2590 <sup>b</sup>

a. MULLER, Lars; BOHM, Volker. Antioxidant Activity of β-Carotene Compounds in Different in Vitro Assays. Alemania, 2011. 1064 p.

b. D. M. Sahabi, et al. Screening for Total Carotenoids and β-Carotene in Some Widely Consumed Vegetables in Nigeria. En: Nigerian Journal of Basic and Applied Science. 2012. ISSN 0794-5698. 226 p.

c. HAGIWARA, Teruhiko, et al. Determination of Lycopene, α-Carotene and β-Carotene in Vegetable Juice by Liquid Chromatography / Atmospheric Pressure Chemical Ionization-Mass Spectrometry. En: J. Food Hyg. Soc. Japan Vol. 38, No. 4. Tokyo, Japón, 1996. 213 p.

d. The United States Pharmacopeial Convention. Revision Bulletin. Beta Carotene. 2012. 1 p.

<sup>71</sup> RODRIGUEZ A., Delia B; KIMURA, Mieko. 2004. *Op cit.* p. 58.

La mayoría de carotenoides absorben tres longitudes de onda, resultando en un espectro con tres picos. Para el caso del  $\beta$ -caroteno en hexano o éter de petróleo estos valores máximos de absorción ( $\lambda_{\text{máx}}$ ) del espectro son 425, 450 y 477 nm. En su estudio I. Karabagias, et al. usó el método de correlación de la concentración de pigmentos en aceites vegetales descrito por la **Ecuación 10**.

**Ecuación 10.** Correlación para la concentración de pigmentos en aceites vegetales.

$$C = \frac{A_{450 \text{ nm}} \times 10^6}{E_{1 \text{ cm}}^{1\%} \times 100 \times d}$$

**Fuente:** I. Karabagias, *et al.*, 2013.

Donde “C” es el contenido del pigmento de carotenoide en mg/kg de aceite del carotenoide (ppm), “A” corresponde a la absorbancia a una determinada longitud de onda (nm), “d” representa el espesor de la celda del espectrofotómetro (1cm) y  $E^{1\%}$  es el coeficiente específico de extinción molar para el carotenoide en  $\text{cm}^{-1}$ .

Este método permite conocer el contenido de pigmentos en una solución de aceite y un solvente en específico sin necesidad de construir una curva de calibración del pigmento de interés mediante la preparación de una solución stock con un estándar comercial.



### 3. METODOLOGÍA

En este capítulo se describe detalladamente la técnica que se adoptó para la ejecución del desarrollo experimental, a partir de la selección de los parámetros y variables más relevantes para el proceso de extracción de  $\beta$ -caroteno mediante Soxhlet y ultrasonido, considerando la revisión bibliográfica presentada en el capítulo anterior y las limitaciones técnicas o especificaciones de los equipos, a los cuales se tuvo acceso para el desarrollo de la etapa experimental.

#### 3.1 SELECCIÓN DE ESPECIE

Para la selección de especie se realizó una búsqueda conjunta con la descrita en el capítulo anterior con respecto a la producción y el mercado de la zanahoria en todas sus variedades en Colombia y se concluyó que teniendo en cuenta la información consultada y según la revista Agronegocios<sup>72</sup>, a pesar de la introducción de nuevas especies de zanahoria en el mercado colombiano como la Nantes o la Cartean; la especie de zanahoria con mayor presencia a nivel nacional sigue siendo la zanahoria Chantenay. Adicionalmente, en el libro “Bioactive Foods in Promoting Health” de KOPSELL, Dean A. y KOPSELL, David E.<sup>73</sup> se menciona que la zanahoria de cultivo de raíz (*Daucus carota L.*) tiene una de las mayores concentraciones de  $\beta$ -caroteno. Específicamente, para el año 2018 la producción total de zanahoria Chantenay llegó a un valor estimado de 85,507 Ton, ubicándose en el primer lugar, seguido por el departamento de Cundinamarca, Antioquia y Nariño.

Según lo previamente mencionado se puede constatar que la especie (*Daucus carota L.*) es la clase de zanahoria que, a través de este proyecto, se utilizó para evaluar una nueva alternativa de aprovechamiento de sus desechos, dado el fácil acceso de la misma en la zona y la relevancia de los volúmenes de producción nacional. Su estudio se fundamentará en investigaciones realizadas en Colombia, India, Estados Unidos, Malaysia, Indonesia, Holanda, Brasil, Ecuador e Irán; brindando la posibilidad de aprovechar este producto descartado y darle un valor agregado que ayude a mejorar la economía del sector agro en Colombia.

#### 3.2 TRATAMIENTO DE LA MUESTRA

Gracias a la revisión de los antecedentes de los procesos de tratamiento de la materia prima y apoyándose en los hallazgos descritos en los mismos, se selecciona la técnica de secado para el proyecto en cuestión. Por una parte, esta técnica permite disminuir el contenido de humedad de la materia prima facilitando la

---

<sup>72</sup> CARDONA, Andrés O. “La Producción Estimada de la Zanahoria Alcanzó Récord Nacional en el Último Año”. Revista Agronegocios. Editorial La República S.A.S. 8 de agosto de 2018.

<sup>73</sup> KOPSELL, Dean A.; KOPSELL, David E. Bioactive Foods in Promoting Health. Capítulo 4. 4.1 Vegetable Sources of  $\beta$ -carotene and its impact on Human Health. 2010

concentración del carotenoide objetivo y, por otra parte, existe una cantidad considerable de estudios que emplearon esta técnica que permiten realizar una amplia comparación de los resultados por su reproducibilidad. Este proceso se lleva a cabo en un horno de secado. La temperatura de secado seleccionada es de 40°C, ubicándose en los valores inferiores a los recomendados en la literatura y con el fin de evitar la degradación del  $\beta$ -caroteno. El tiempo de secado seleccionado es de 72h, ya que este va ligado directamente a la temperatura y es inversamente proporcional a esta.

### 3.3 CARACTERIZACIÓN DE LA MUESTRA

La caracterización de la muestra es un paso muy importante para el desarrollo experimental y la evaluación técnica de este proyecto, pues permite conocer si existe o no alguna diferencia en la composición y el contenido nutricional de una zanahoria en buen estado con una en mal estado, tomando en consideración aspectos cuantitativos y no únicamente cualitativos. Además, este análisis servirá como base fundamental del análisis de los procesos de extracción que se realizarán posteriormente.

**3.3.1 Muestreo.** La zanahoria de descarte proporcionada por la empresa Hortalizas Boyacá S.A.S. se encuentra dispuesta en costales o lonas de fibra de 60 kg. Por este motivo, se opta por llevar a cabo un muestreo aleatorio simple sin reposición, el cual se define como un tipo de muestreo en el cual los objetos de una población poseen previamente la misma probabilidad de ser escogidas para hacer parte de la muestra<sup>74</sup>, es decir, se selecciona un número definido de raíces tomadas de manera aleatoria, ubicados en diferentes secciones del saco de zanahoria brindado.

**3.3.2 Análisis Proximal.** Esta etapa para la caracterización de la materia prima se seleccionó básicamente bajo el criterio de la comparación de la calidad de la zanahoria Chantenay (*Daucus carota L.*) en su estado óptimo de consumo y no apto para el consumo, con el objetivo de poseer información de soporte y un punto de referencia en caso de que los resultados del proceso de extracción en cuestión mostraran una diferencia significativa. Cabe resaltar que los estudios y las publicaciones consultadas en el rastreo bibliográfico estaban enfocadas en el análisis del proceso de extracción de  $\beta$ -caroteno a partir de zanahorias en buen estado.

Por lo tanto, se compararán los valores arrojados por el análisis proximal de las muestras analizadas en este proyecto con información relacionada al contenido

---

<sup>74</sup> UNIVERSIDAD DE LAS PALMAS DE GRAN CANARIA. Muestreo Aleatorio Simple. Tema 2. Métodos de Muestreo. Métodos Estadísticos Avanzados en Ciencias Marinas. 2017. En: dma.uplgc.es

nutricional y las propiedades fisicoquímicas de la zanahoria de la misma especie disponible en artículos científicos, tesis, etcétera.

La determinación bromatológica se solicitó como servicio particular en la Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia UPTC de la ciudad de Tunja (Boyacá).

### **3.4 SELECCIÓN DE PARÁMETROS DE EXTRACCIÓN**

Para la selección de los parámetros de extracción de  $\beta$ -caroteno a partir de ultrasonido y Soxhlet se realiza una revisión bibliográfica dirigida principalmente a la metodología de los antecedentes relacionados a este tipo de técnicas de extracción y específicamente asociadas a la zanahoria Chantenay como se expuso en el capítulo 2 “Antecedentes”. Lo anterior, con la intención de llevar a cabo un diseño de experimentos para determinar la influencia de las variables manipuladas del proceso. Una vez realizado el análisis de la técnica de las diferentes etapas del proceso de extracción a escala laboratorio a continuación se procedió a reunir los parámetros más relevantes proporcionados por la revisión bibliográfica para establecer la técnica que se adoptará para el desarrollo experimental, que se llevará a cabo en el siguiente capítulo, identificando las ventajas y desventajas del método y limitaciones técnicas como materia prima, disponibilidad de reactivos con el fin de asegurar tanto confiabilidad como reproducibilidad de los resultados.

La metodología del proceso de selección se basa en la comparación de los valores fijos o rangos óptimos de los parámetros encontrados en la revisión bibliográfica teniendo en cuenta las limitaciones ya mencionadas y comparando estos valores o rangos con las especificaciones técnicas del baño ultrasónico y del equipo de extracción Soxhlet.

Las limitaciones técnicas de este proceso están relacionadas con el baño ultrasónico al que se tuvo acceso, ya que este permite modificar únicamente las variables de temperatura y tiempo. Es por esto que se establece que estas serán las únicas variables a analizar en esta técnica de extracción para así realizar una comparación completa que permita tanto repetibilidad como reproducibilidad para mejorar la confiabilidad de los resultados, que servirán de base para el análisis del proceso a escala piloto posteriormente.

Otra limitación que se encontró tiene que ver con la disponibilidad de artículos enfocados únicamente a la zanahoria Chantenay, por lo cual, se opta por recurrir a artículos donde se utilicen otras fuentes naturales de  $\beta$ -caroteno como materia prima, pero la técnica esté enfocada a las tecnologías de extracción que se implementarán.

**3.4.1 Solvente o agente de extracción.** La selección del solvente de extracción es una tarea muy importante, ya que de esta dependerá la efectividad del método. Es crucial conocer la naturaleza del compuesto de interés principalmente su carácter polar o apolar, factor inicial del cual se escogerá el solvente afín.

Gracias al rastreo bibliográfico, se opta por usar el solvente Hexano como agente de extracción para la técnica convencional Soxhlet, dado que, esta posee un procedimiento estandarizado y, además, se dispone de información de varios estudios que utilizaron este solvente que permitirán una comparación confiable y un análisis de resultados fiable. Con respecto a la extracción asistida con ultrasonido, fue posible constatar en la literatura la importante efectividad de este método a partir de solventes verdes, en especial con los aceites vegetales, por lo cual se selecciona el aceite de girasol como agente de extracción. Adicionalmente se opta por escoger un aceite de girasol de coloración tenue, o bien, extra refinado, que permita observar cualitativamente el enriquecimiento del mismo con el pigmento y, de igual forma, no interfiera con las lecturas espectrofotométricas en la etapa de cuantificación.

**3.4.2 Extracción convencional Soxhlet.** La técnica para la extracción convencional Soxhlet se fundamentará en los artículos de GOULA, Athanasia M. y Y. Li, et al. El criterio de selección para llegar a esta conclusión se basa en el hecho de que estos autores especifican la técnica de extracción convencional con solventes orgánicos, con la distinción de que sus estudios se enfocan en la obtención al final de un aceite enriquecido en carotenoides. Esto último permite llevar a cabo una comparación de las técnicas de extracción de manera más acorde a los parámetros e intervalos de variables que se seleccionarán para la extracción asistida con ultrasonido.

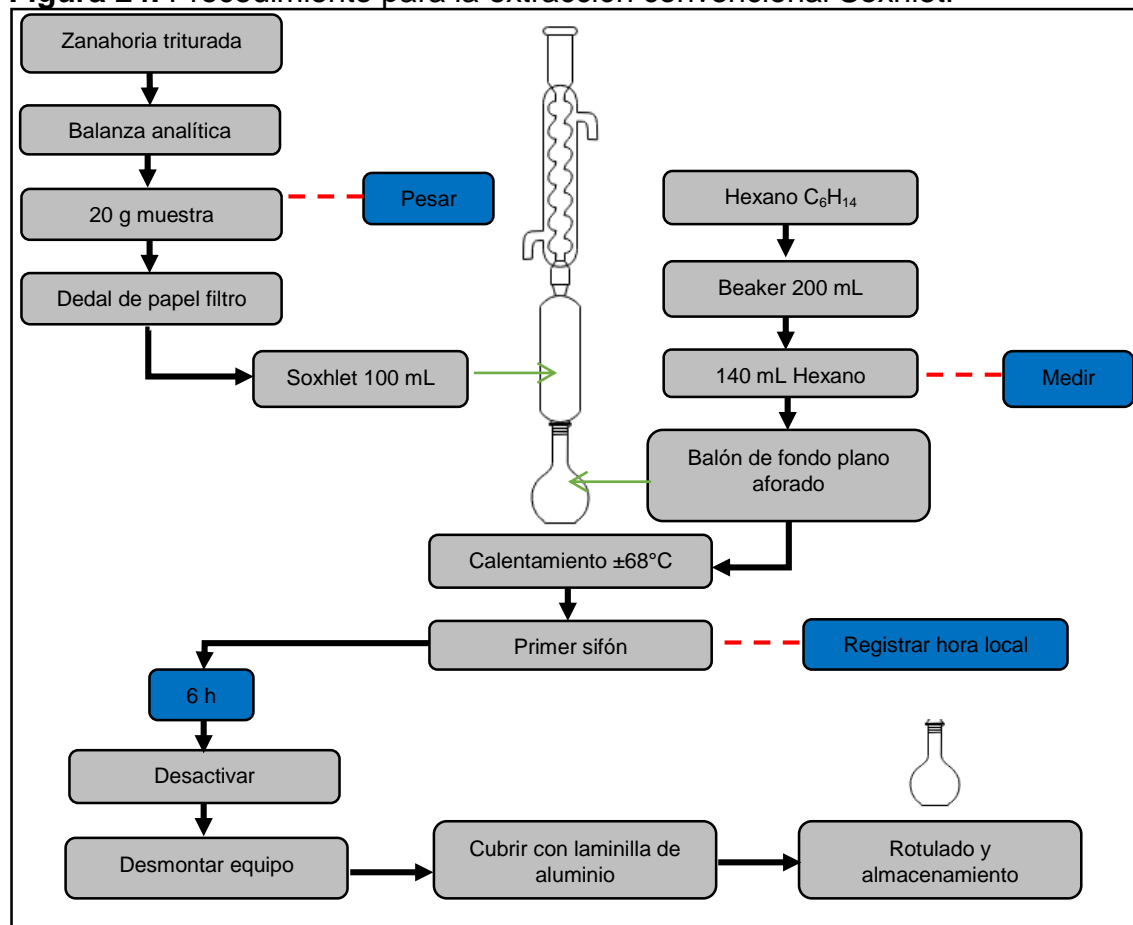
Entre las limitaciones técnicas que se tuvieron en cuenta para la selección de parámetros para este método se encontró que el volumen de solvente debía ser como mínimo de 100 mL y a temperatura de extracción debía mantenerse constante en las repeticiones del experimento, pues, esta depende de la naturaleza del solvente, específicamente de su punto de ebullición.

Como solvente de extracción se seleccionó el hexano, ya que, según el rastreo bibliográfico, junto con el ciclohexano, es uno de los solventes más comunes tanto en este tipo de extracción como en los análisis de cuantificación del extracto con la técnica de espectrofotometría UV-VIS.

La relación sólido-solvente permite definir tanto la cantidad de muestra que se debe tomar y tratar, como el volumen y tamaño del montaje requerido para llevar a cabo la extracción. Para tal fin, se realizó un rastreo bibliográfico dirigido a la técnica utilizada. Según los artículos consultados, varió entre los valores 1:20 y 2:10, por lo tanto, se escogió un valor de 2:10 (sólido:solvente), buscando semejanza con las relaciones sólido-líquido que se seleccionarán en la técnica ultrasónica.

El tiempo de extracción recomendado por los autores varía entre los 60 – 360 min, para los proyectos enfocados en la zanahoria, estos valores corresponden a 60 min y 300 min, por lo cual, en el desarrollo experimental se seleccionó un valor de 360 minutos, o bien, 6 horas. Para proveer el actual proyecto de repetibilidad, reproducibilidad y confiabilidad, se llevará a cabo cada extracción por duplicado. El procedimiento experimental de esta etapa de experimentación se muestra en la **Figura 24**.

**Figura 24.** Procedimiento para la extracción convencional Soxhlet.



**Fuente:** elaboración propia.

**3.4.3 Extracción asistida con ultrasonido (UAE).** Uno de los puntos de partida que servirá como criterio de selección es el equipo ultrasónico al que se tuvo acceso. En el Anexo A, se muestran la ficha técnica de este baño ultrasónico (Elmasonic E 60 H) y como se puede observar en la Tabla 16 se enlistan las especificaciones técnicas que contienen las variables de selección y de estudio según el análisis de parámetros anteriormente expuesto.

**Tabla 16.** Especificaciones técnicas baño ultrasónico Elmasonic E 60 H

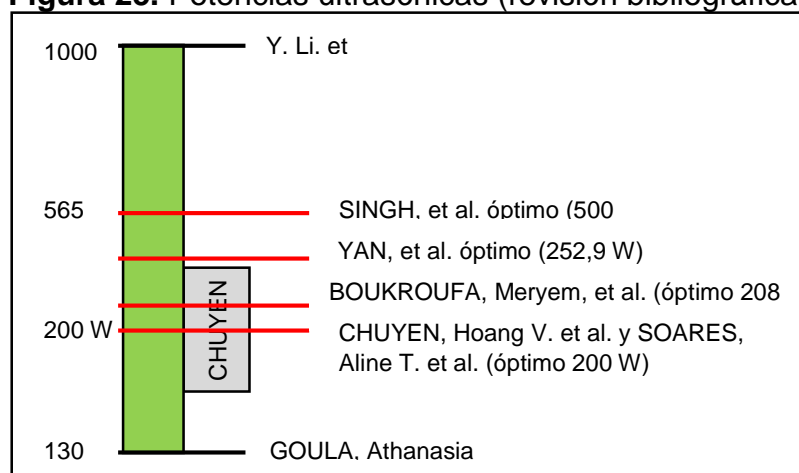
<i>Parámetro</i>	<i>Valor</i>
Voltaje	100 – 120 V
Frecuencia de la red	50 / 60 Hz
Frecuencia ultrasónica	37 kHz
Potencia total de consumo	500 W
Potencia ultrasónica efectiva	100 W
Rendimiento ultrasónico máximo	400 W
Potencia de calentamiento	400 W
Control de tiempo	1 – 30 min
Control de temperatura	30 – 80°C (paso 5°C)

**Fuente:** elaboración propia.

Para cada parámetro se realizó un diagrama de barra vertical agrupando todos los valores sugeridos por los autores señalando, cuando se da el caso, el valor óptimo y paralelamente comparándolos con el intervalo o rango de operación del baño ultrasónico como se muestra a continuación.

- **Potencia ultrasónica.** En la **figura 25** se ilustran los valores de potencia ultrasónica evaluados por los autores en la revisión bibliográfica y en algunos casos se especifican los valores óptimos encontrados por los mismos.

**Figura 25.** Potencias ultrasónicas (revisión bibliográfica)

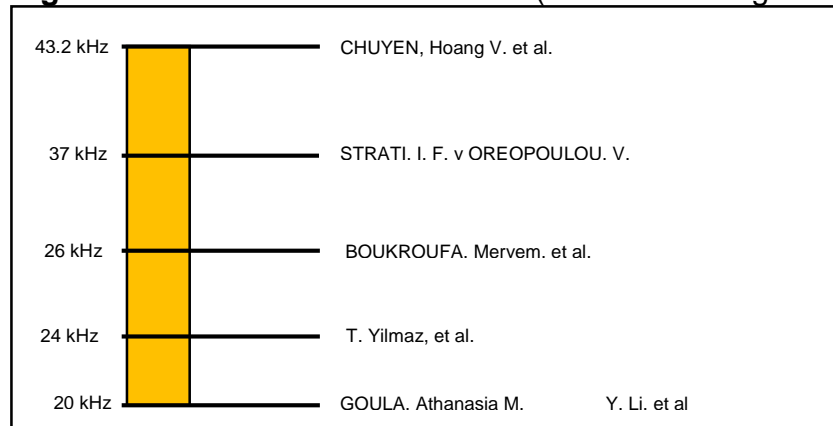


**Fuente:** elaboración propia.

Se evidencia que los valores óptimos de potencia ultrasónica se concentran en el rango comprendido entre los 130 y 500 W. Para el desarrollo experimental de este proyecto, sin embargo, el baño ultrasónico sólo opera con una intensidad ultrasónica de 100 W; no obstante, es un valor bajo que puede tener un efecto similar a los valores bajos óptimos recomendados por los autores.

- **Frecuencia.** Para el caso de la frecuencia ultrasónica (**Figura 26**), los valores están comprendidos entre los 43.2 kHz y los 20 kHz, en los artículos de estos autores, por otra parte, no se especifican las condiciones óptimas para este parámetro puesto que sus estudios se centraron en evaluar el efecto de otras variables en el rendimiento de extracción.

**Figura 26.** Frecuencias ultrasónicas (Revisión bibliográfica)

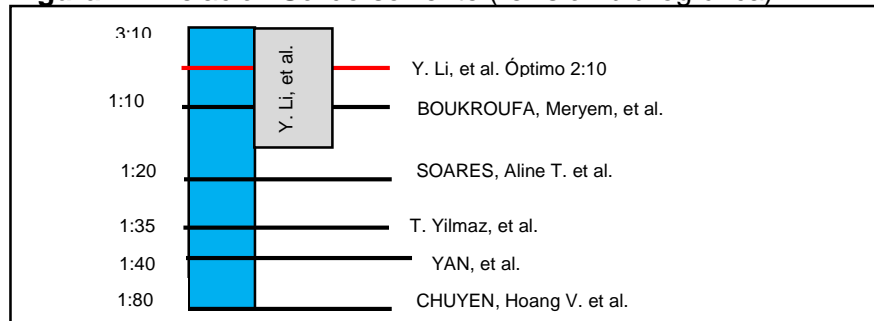


**Fuente:** elaboración propia.

El baño ultrasónico que se usará para extraer el  $\beta$ -caroteno, también impide la modificación de esta variable, este opera a un valor de frecuencia ultrasónica fija de 37 kHz coincidiendo por el valor tomado por STRATI, I. F. y OREOPOULOU, V. y, además, este se encuentra dentro del rango de datos propuestos por los demás autores.

- **Relación sólido – solvente.** De la **Figura 27** se puede afirmar que, si bien la mayoría de los autores consultados tuvieron en cuenta la relación sólido solvente en sus procesos extractivos, solamente Y. Li, et al. llegaron a la conclusión que el valor óptimo de este parámetro fue de 2:10 o 20% sólido líquido.

**Figura 27.** Relación Sólido-solvente (revisión bibliográfica)

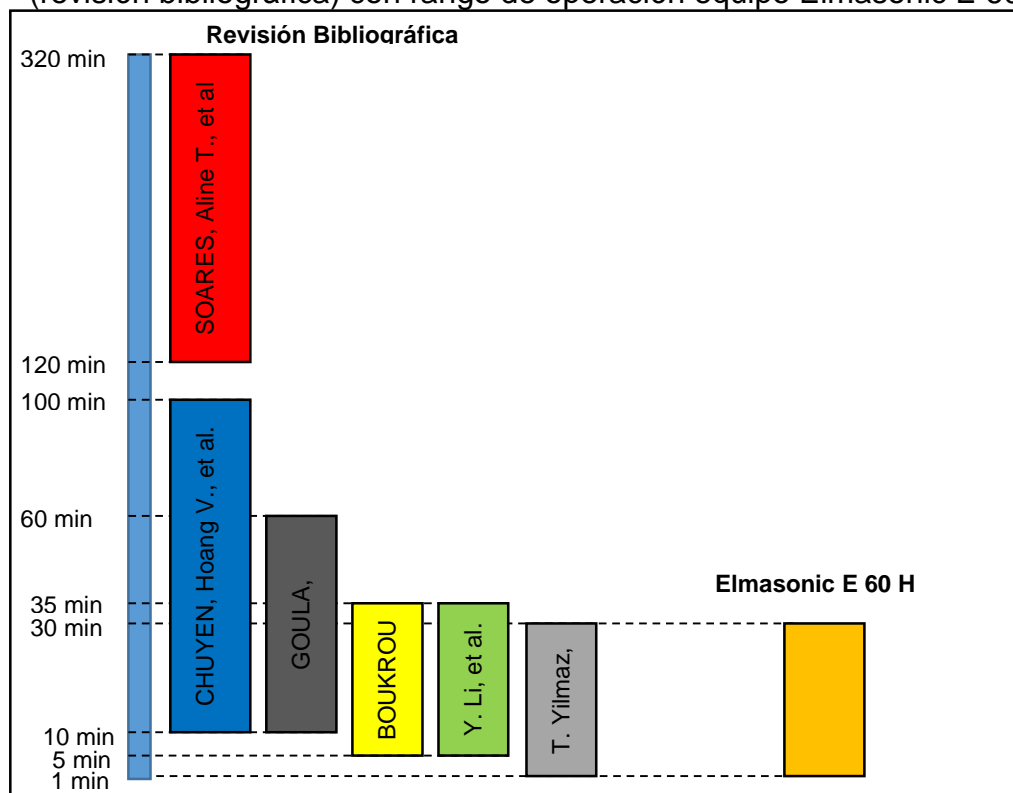


**Fuente:** elaboración propia.

Adicionalmente el hecho de que estos autores hayan realizado la evaluación del proceso de extracción de  $\beta$ -caroteno con zanahoria variedad Chantenay utilizando aceites vegetales, justifica la selección de este parámetro para proveer de reproducibilidad al presente proyecto y poseer un marco de referencia para el análisis y comparación de resultados.

- **Tiempo de extracción.** Esta variable resultó ser una de las más estudiadas y evaluadas en los procesos de extracción asistidos con ultrasonido y afortunadamente el baño ultrasónico Elmasonic E 60 H permite su manipulación y control. En la **Figura 28** se presentan los rangos de tiempo que los autores emplearon en sus investigaciones y paralelamente los valores óptimos encontrados según las diferentes herramientas técnicas que desarrollaron, comparado con el rango de temperatura que permite manipular el equipo ultrasónico que se usará en el desarrollo experimental del proyecto.

**Figura 28.** Comparación intervalos de temperatura y temperatura óptima (revisión bibliográfica) con rango de operación equipo Elmasonic E 60 H



**Fuente:** elaboración propia.

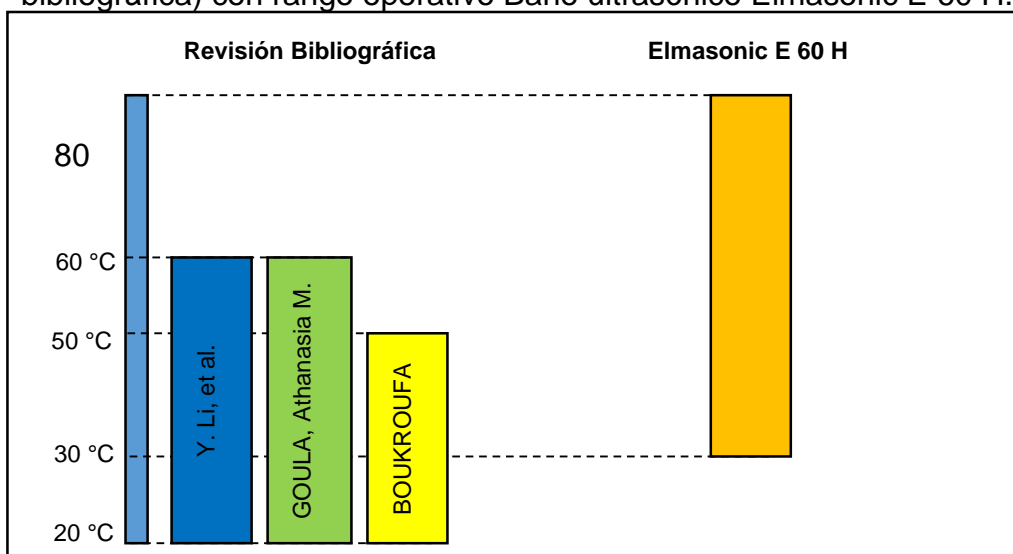
Se evidencia una tendencia para los tiempos de extracción concentrados en los intervalos de entre 1 y 35 min y, por otra parte, dentro de este rango se encuentran la mayoría de los valores óptimos encontrados por los autores como son los casos de BOUKROUFA Meryem, et al. (5 min), SINGH, et al. (13.48 min), Y. Li, et al. (20



min) y GOULA, Athanasia M. et al. y T. Yilmaz, et al. (30 min). Este intervalo que contiene dichos valores óptimos de tiempo de extracción coincide, además, con el rango de operación del baño ultrasónico Elmasonic E 60 H que se utilizará en este proyecto. Por lo cual se establece, como conclusión, que se seleccionarán valores aleatorios dentro de dicho rango para el desarrollo experimental y para llevar a cabo la evaluación de esta técnica.

- **Temperatura de extracción.** En el rastreo bibliográfico se concluyó que esta variable, al igual que el tiempo de extracción, tiene una gran relevancia en esta técnica de extracción puesto que muchos de los autores realizaron una evaluación u optimización para maximizar el rendimiento de extracción y de la concentración de determinado compuesto carotenoide dependiendo de la materia prima empleada. En la **Figura 29** se realiza una comparación de los rangos de temperatura evaluados en los artículos e investigaciones analizadas con el rango de temperatura que permite controlar y manipular el equipo ultrasónico al que se tuvo acceso para el desarrollo del proyecto en cuestión.

**Figura 29.** Comparación rangos de temperatura evaluados (revisión bibliográfica) con rango operativo Baño ultrasónico Elmasonic E 60 H.



**Fuente:** elaboración propia.

Se observa una tendencia similar para los intervalos de temperatura encontrados (20 – 60 °C), además, si se tienen en cuenta los valores óptimos establecidos por los autores como GOULA, Athanasia M. y Y. Li, et al. (40 °C), YAN, et al. (49.6 °C) y STRATI, I. F. y OREOPOULOU, V. (47.6 °C), se puede percibir que estos valores también están contenidos dentro del mismo intervalo descrito. Asimismo, con relación al intervalo de operación del baño ultrasónico Elmasonic E 60 H, se puede distinguir que este permite operar entre gran parte del intervalo óptimo encontrado y hasta temperaturas cercanas a los 80°C.

Para el desarrollo experimental de este proyecto se establece entonces, que se tomarán valores aleatorios comprendidos entre el intervalo de 30 – 50 °C, teniendo en cuenta las limitaciones técnicas que no permiten evaluar el proceso de extracción a temperaturas menores a los 30 °C y las limitaciones químicas expuestas en los artículos de la revisión bibliográfica donde se resaltan los efectos de la degradación de los compuestos carotenoides y del  $\beta$ -caroteno en específico como consecuencia de exponer los pigmentos a temperaturas altas durante el proceso de extracción.

Al igual que en la extracción Soxhlet, como se mencionó en el numeral anterior, para proveer el actual proyecto de repetibilidad, reproducibilidad y confiabilidad, se llevará a cabo cada extracción por triplicado.

Para concluir, como diseño experimental se propone el siguiente modelo de extracción (**Figura 30**) donde se incluyen y reúnen los intervalos de variables de extracción seleccionados y los valores tentativos de dichas variables que se evaluarán en el desarrollo experimental.

**Figura 30.** Diseño experimental extracción asistida con ultrasonido

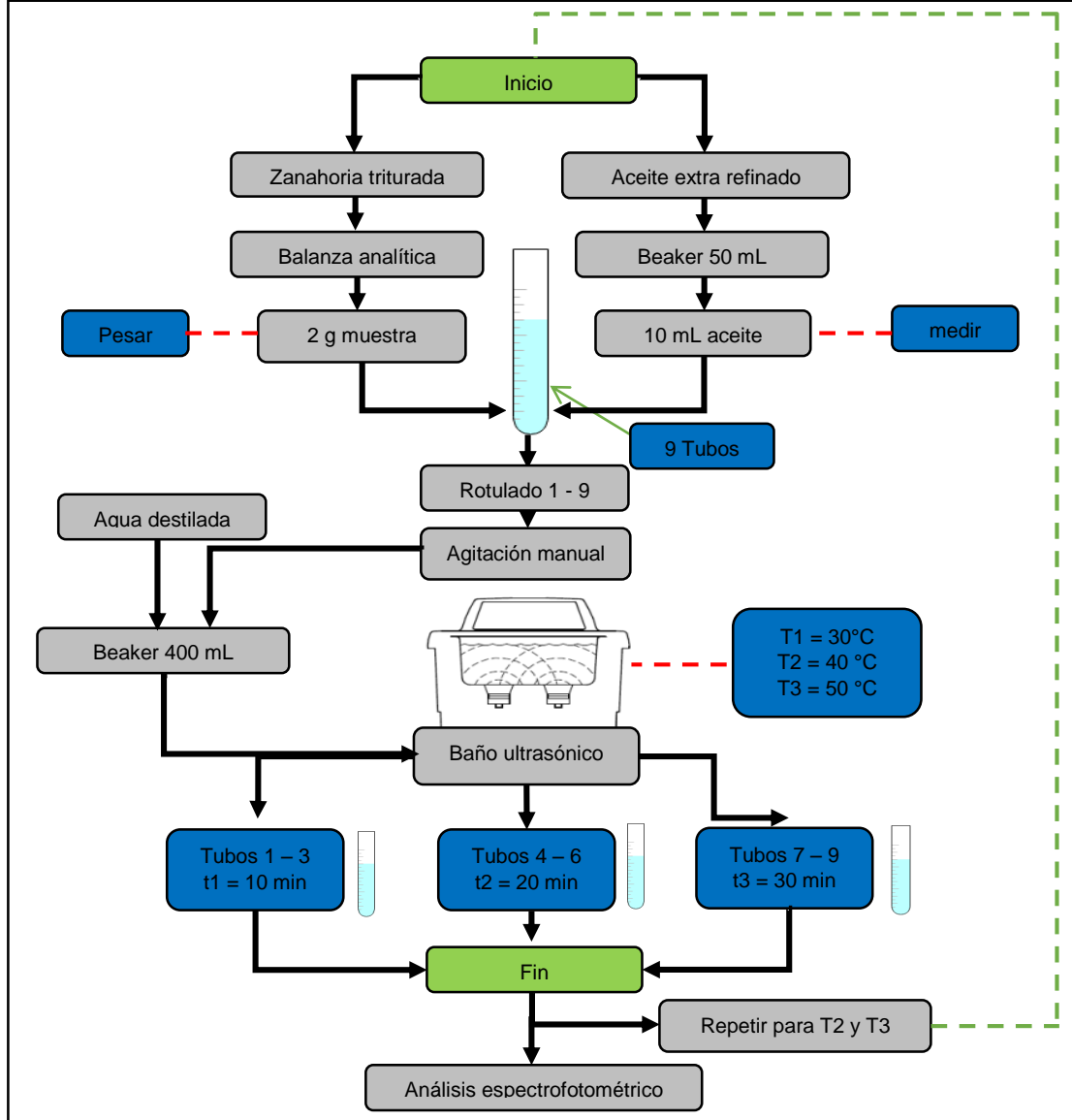
		Temperatura		
		30 °C	40 °C	50 °C
Tiempo	10 (min)	A1	D1	G1
		A2	D2	G2
		A3	D3	G3
	20 (min)	B1	E1	G1
		B2	E2	G2
		B3	E3	G3
	30 (min)	C1	F1	G1
		C2	F2	G2
		C3	F3	G3

**Fuente:** elaboración propia.

Donde A, B, C, D, E, F y G corresponden a los bloques por tratamiento Tiempo – Temperatura y el numeral 1,2 y 3 se refiere a las réplicas por triplicado que se pretenden hacer por cada tratamiento a la muestra de zanahoria en aceite de girasol.

Por último, en la **figura 31** se ilustra el procedimiento experimental, donde se resumen y reúnen los parámetros anteriormente descritos.

**Figura 31.** Procedimiento para la extracción asistida con ultrasonido.



Fuente: elaboración propia.

### 3.5 PARÁMETROS DE LA CUANTIFICACIÓN DEL EXTRACTO

La cuantificación del extracto corresponde a el último paso en el proceso del desarrollo experimental para la extracción de  $\beta$ -caroteno y cualquier otro tipo de carotenoide. Diversas técnicas han sido desarrolladas y algunas ya existentes fueron adaptadas para permitir conocer la concentración de este colorante disuelto en muestras líquidas. Las técnicas más destacadas encontradas en la revisión bibliográfica son la espectrofotometría UV-VIS y la cromatografía líquida de alta

eficiencia HPLC<sup>75</sup>, las cuales requieren de un blanco o solvente de referencia junto con el componente estándar que se va a cuantificar para construir una curva de calibración que permite calcular el contenido de la muestra extraída arrojando valores de alta confiabilidad y permitiendo cuantificar el valor aproximado de cada carotenoide por separado. Sin embargo, una de las limitaciones presentadas durante el desarrollo de este proyecto fue obtener el estándar de  $\beta$ -caroteno, por problemas de disponibilidad en el país, puesto que este debía ser importado con un tiempo estimado de entrega de 45 a 90 días.

**3.5.1 Técnica de la espectrofotometría UV-VIS.** El procedimiento consiguiente habitualmente consiste en disolver el extracto líquido en una cantidad conocida de solvente y a continuación se realiza la lectura en el espectrofotómetro. Lo anterior, habiendo previamente utilizado un blanco o solución stock que consiste de únicamente del solvente orgánico que se usará para el análisis. Por ejemplo, GOULA, Athanasia M., *et al*<sup>76</sup>. tomaron 3 g de aceite y este fue disuelto en ciclohexano hasta completar un volumen de 10 mL, y finalmente hicieron la lectura con un espectrofotómetro a 470 nm (valor máximo de absorción para la luteína) al igual que I. Karabagias, *et al.*, quienes tomaron 3 g de aceite de oliva y también lo disolvieron en ciclohexano hasta completar 10 mL. En el caso de Y. Li, *et al.*, llevaron a cabo la lectura del espectro de absorción del  $\beta$ -caroteno en una celda de cuarzo con longitud óptica de 1 cm en un espectrofotómetro a 450 nm.

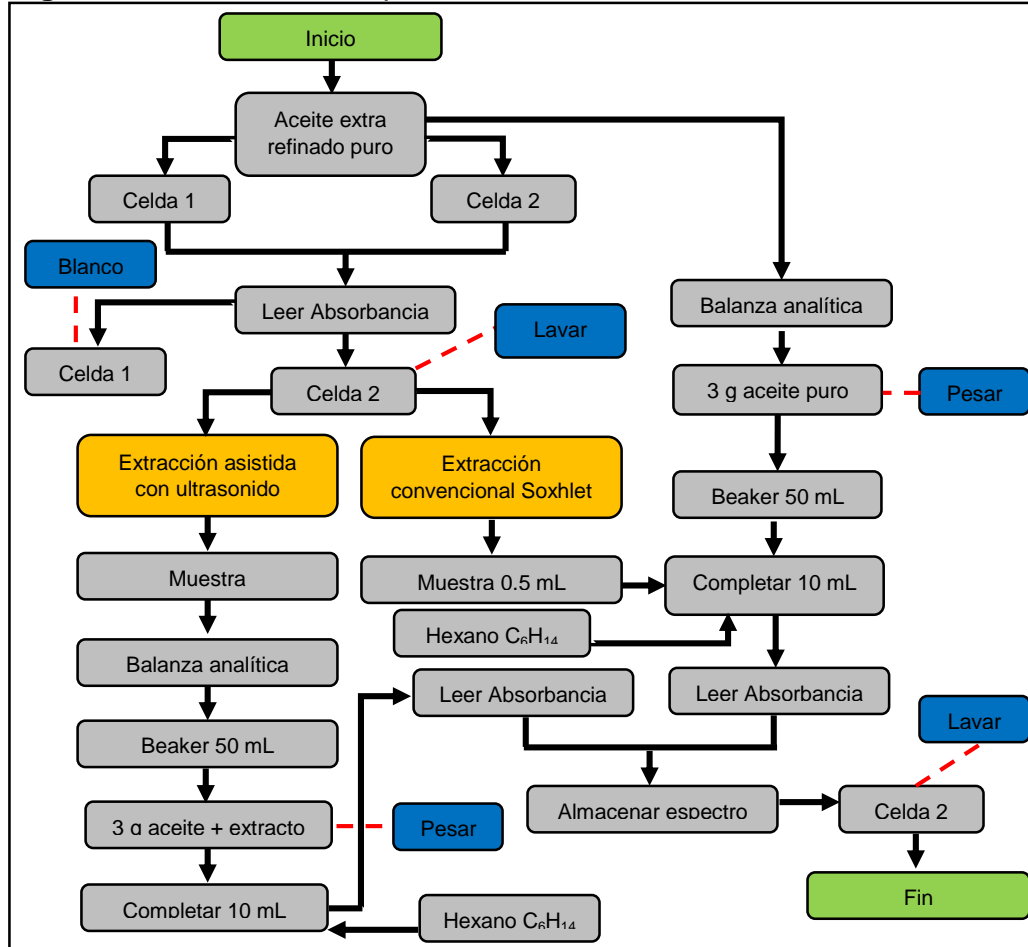
Puesto que el objetivo principal de la etapa experimental es comparar el rendimiento de extracción de los métodos propuestos, para ambas técnicas se seguirá la técnica propuesta por GOULA, Athanasia M., *et al.* y I. Karabagias, *et al.* con algunas modificaciones relacionadas con el solvente de extracción y los valores de lectura en el espectrofotómetro. Inicialmente se tomarán 3 g de aceite con extracto, para el caso de la extracción asistida con ultrasonido; o bien, 3 g de aceite puro, para el caso de la extracción Soxhlet, y luego se disolverán en hexano puro para el primer caso o hexano para el segundo caso con aceite hasta completar un volumen de 10 mL, y finalmente se hará la lectura con un espectrofotómetro UV-VIS centrándose en los valores de absorción específicos para el  $\beta$ -caroteno (425, 450 y 477 nm) según el espectro que arroje el equipo espectrofotométrico. El procedimiento de cuantificación del extracto previamente descrito se ilustra en la **figura 32**.

---

<sup>75</sup> RODRIGUEZ A., Delia B; KIMURA, Mieko. 2004. *Op cit.* p. 58.

<sup>76</sup> GOULA, Athanasia M. *et al.* 2017. *Op cit.* p. 66.

**Figura 32.** Procedimiento para la cuantificación del  $\beta$ -caroteno

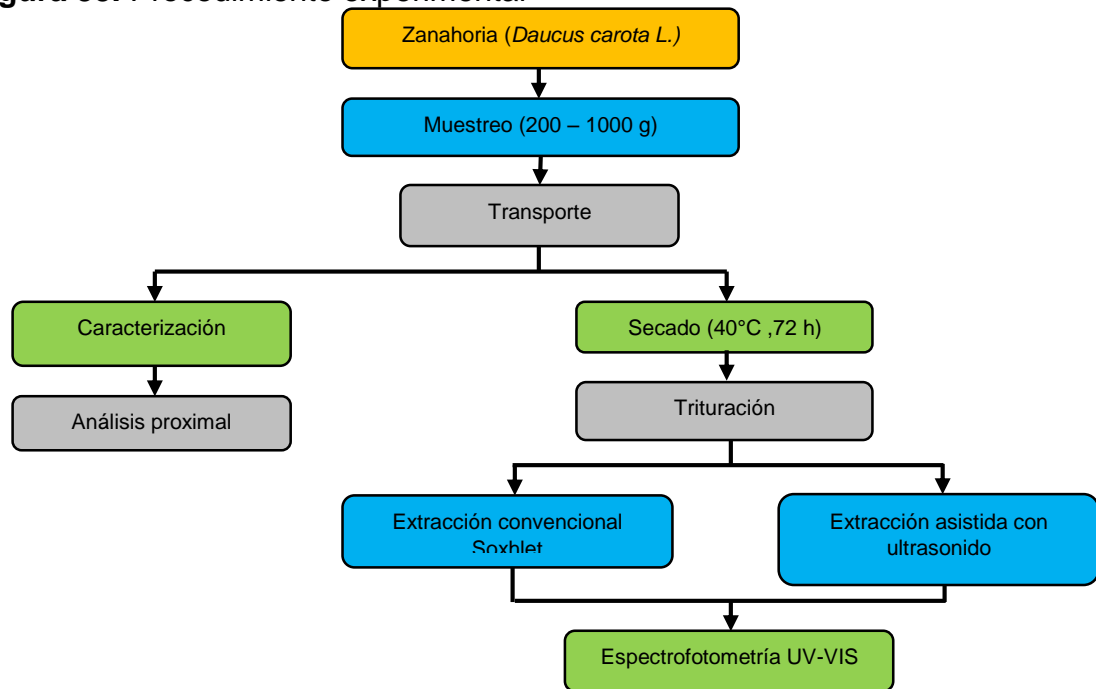


Fuente: elaboración propia.

### 3.6 PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

Para concluir, se presenta el procedimiento que se muestra a continuación (**Figura 33**), el cual reúne las etapas principales que se llevarán a cabo en el desarrollo experimental tomando en consideración los parámetros y la técnica seleccionadas en este capítulo. Este proceso experimental está sujeto a modificaciones dependiendo de los resultados y dificultades que se puedan presentar a lo largo de este.

**Figura 33.** Procedimiento experimental



**Fuente:** elaboración propia

## 4. PROCESO DE EXTRACCIÓN DEL $\beta$ -CAROTENO

En este capítulo se muestra el conjunto de pasos y procedimientos que se llevan a cabo para realizar el análisis y comparación del proceso de extracción de  $\beta$ -caroteno a través de la técnica de extracción convencional con un equipo Soxhlet y un montaje asistido con ultrasonido. Este proceso comprende inicialmente la etapa de análisis y descripción de la materia prima; a continuación, la caracterización de la materia prima; posteriormente, el desarrollo experimental, la etapa de cuantificación del extracto obtenido por ambos métodos realizando conjuntamente la comparación de los mismos.

### 4.1 SELECCIÓN Y ANÁLISIS DE LA MATERIA PRIMA

El procedimiento de selección de la materia prima se realiza en la planta de procesamiento de Hortalizas Boyacá S.A.S. donde, luego de que se realiza el proceso de recepción, lavado, selección y separación por tamaño de la zanahoria como se describe en el capítulo anterior; se recibe una muestra de zanahoria tipo desecho o no apta para consumo comercial humano para el posterior análisis (**Imagen 10**).

**Imagen 10.** Recepción de la materia prima



**Fuente:** elaboración propia.

**4.1.1 Observación de la calidad de la materia prima.** Luego de seleccionar y recibir las muestras de la materia prima, se prosigue con la observación cualitativa de las características físicas de estas. Como un primer acercamiento en planta, se decide efectuar una descripción de la calidad del producto teniendo en cuenta la Norma Técnica Colombiana NTC 1226 – 1 Frutas y Hortalizas Frescas – Zanahoria.

**4.1.2 Muestreo.** El muestreo tuvo lugar en la empresa Hortalizas Boyacá S.A.S. el día 28 de febrero de 2019 a las 8:14 a.m. La temperatura registrada fue de 11°C con humedad relativa de 79%. Para la selección de la materia prima se tomó una cantidad representativa de 10 zanahorias Chantenay de desecho o llamadas coloquialmente como rescoje, destare o riche, seleccionando aleatoriamente cada una en diferentes zonas de la lona recibida (**Imagen 11**).

**Imagen 11.** Muestreo de zanahorias Chantenay de desecho



**Fuente:** elaboración propia.

Finalmente, se procede a empaclar la muestra en una malla de lona comercial teniendo en cuenta que se trata de una muestra de hortalizas frescas que pueden perder parte de su humedad natural y deteriorarse si se llegasen a empaclar en bolsas plásticas. Se pesó la muestra utilizando una balanza electrónica registrando un peso de 1.460 kg **Imagen 12**.

**Imagen 12.** Empaque de la muestra para análisis posterior



**Fuente:** elaboración propia.

**4.1.3 Propiedades físicas de la muestra.** A través de un análisis físico se observaron características como longitud, forma de la raíz, calibre, color, olor y daños físicos o mecánicos de la muestra de zanahoria de descarte recibida.



Por otra parte, se hizo un análisis estadístico donde se calculó el promedio y la desviación estándar muestral para las medidas, de manera tal, que se lograra caracterizar de forma más completa las muestras. En este análisis se estableció un nivel de confiabilidad del 95% para el cálculo de la desviación estándar como lo hizo en su estudio (CUARAN R., Nuria J.)<sup>77</sup>. Los resultados de este análisis estadístico se muestran a continuación.

**4.1.3.1 Peso.** Se determinó utilizando una Balanza Analítica SHIMADZU AX500 máx. 500g d=0.1g. Se tomaron las 10 muestras previamente seleccionadas y se pesó cada una en dos ocasiones consecutivas y registrando cada dato como se muestra en la Tabla 17.

**Tabla 17.** Peso unitario de la muestra de zanahoria Chantenay

Peso unitario (g)		
Muestra	R1	R2
1	116.1	116.3
2	182.5	180.1
3	166.4	167.2
4	200.9	199.7
5	202.0	201.6
6	190.3	190.0
7	98.3	98.5
8	106.2	106.6
9	104.7	104.1
10	92.3	92.2
Promedio por repetición	145.9	145.6
Promedio	145.8 g	
Desviación estándar promedio	43.6 g	

**Fuente:** elaboración propia.

**4.1.3.2 Longitud.** Se midió empleando un calibrador o vernier digital de 150 mm/ 6 in marca Ubermann de acero inoxidable de alta precisión con lector de 0.01 mm. Se midió la distancia del eje longitudinal siguiendo un procedimiento similar a la prueba del peso unitario obteniéndose los resultados de la Tabla 18.

---

<sup>77</sup> CURAN R., Nuria J. Identificación de las Propiedades Físico-químicas de la Zanahoria Amarilla (*Daucus carota* L) variedad Chantenay, en dos estados de madurez (Inmaduro-maduro) proveniente de Antonio Ante-Imbabura. Universidad Técnica del Norte, 2009. p. 28

**Tabla 18.** Longitud de la muestra de zanahoria Chantenay

Longitud (cm)		
Muestra	R1	R2
1	6.830	6.850
2	7.775	7.670
3	9.435	9.320
4	9.870	9.855
5	10.270	10.220
6	10.755	10.760
7	11.660	11.755
8	12.645	12.700
9	12.910	13.230
10	13.245	13.050
Promedio por repetición	10.54	10.541
Promedio	10.540 cm	
Desviación estándar promedio	2.067 cm	

**Fuente:** elaboración propia.

**4.1.3.3 Calibre.** Se estimó usando también el calibrador o vernier digital de 150 mm/ 6 in marca Ubermann de acero inoxidable de alta precisión con lector de 0.001 mm. Se midió la distancia del diámetro mayor en la parte superior de cada raíz, de manera similar a las pruebas anteriores, para así lograr una caracterización física completa de las zanahorias al igual que en el estudio de estudio (CUARAN R., Nuria J.). Los resultados se encuentran en la **Tabla 19**.







**Tabla 19.** Calibre o diámetro mayor de la muestra de zanahoria Chantenay

Calibre (diámetro mayor) (cm)		
Muestra	R1	R2
1	3.770	3.965
2	3.865	3.845
3	4.220	4.230
4	4.825	5.080
5	4.940	5.070
6	5.020	5.075
7	5.275	5.430
8	5.560	5.620
9	6.000	6.310
10	6.270	6.150
Promedio por repetición	4.975	5.076
Promedio	5.026 cm	
Desviación estándar promedio	0.806 cm	

**Fuente:** elaboración propia.

**4.1.3.4 Daños.** Se clasificaron las 10 raíces seleccionadas inicialmente en dos grupos según la naturaleza del daño o deterioro visible **Cuadro 2. a) y b)**. Luego se llevó a cabo una clasificación más específica teniendo en cuenta el tipo de enfermedad detectada en la zanahoria Cuadro 2. c), d), e) y f). Describiendo sus características y posibles causas.

**Cuadro 2.** Propiedades organolépticas de la muestra

a) Defecto 1	b) Defecto 2
	
<p>Oscurecimiento del cuello de la zanahoria por quemado del sol</p>	<p>Daños morfológicos o deformaciones por efectos climáticos</p>
c) Defecto 3	d) Defecto 4
	
<p>Daño por efectos climáticos causantes de herida abierta permitiendo el ingreso de bacterias del suelo</p>	<p>Malformación estructural por efecto de nematodos (múltiples raíces)</p>
e) Defecto 5	f) Defecto 6
	
<p>Aparición de cinturones como respuesta por estrés del clima (cambios bruscos de las condiciones climáticas) o por malezas en el suelo.</p>	<p>Ruptura de la pared de la raíz y cicatrización posterior.</p>

**Fuente:** elaboración propia.

El color predominante de todas las muestras es el naranja; no obstante, su brillo y tonalidades varían. Entre las tonalidades de naranja observadas se encuentra el naranja pálido, el naranja salmón y el naranja claro brillante. Algunas de las áreas afectadas por enfermedades en las raíces se forman en las heridas abiertas o cicatrizadas en la pared de la zanahoria mostrando una coloración grisácea, rojiza o en algunos casos tonalidades marrón.

#### 4.1.4 Ubicación del área de estudio

**Departamento:** Boyacá  
**Ciudad:** Tunja  
**Lugar:** Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia (UPTC)  
**Temperatura:** 18°C  
**Altitud:** 2860 m.s.n.m.

**4.1.5 Tratamiento de la muestra.** Luego de realizar la caracterización física de las muestras, estas son transportadas a la ciudad de Tunja y conducidas al Laboratorio de Análisis de Alimentos de la Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia. Aquí se realizó un corte de las zanahorias en delgadas rodajas usando un cuchillo de cocina, descartando la cabeza de la raíz, puesto que esta contiene parte de los tallos de la planta que no son relevantes en el estudio. Seguido a esto, se pesó una cantidad de muestra y se establecieron los parámetros de secado específicos (**Tabla 20**). Seguidamente, se introdujeron las rodajas en un horno de secado marca MLW (Medizin-, Labor- und Wägetechnik) de 2160 W y 110 V ubicándolas en bandejas de rejillas cubiertas con papel Kraft (ver **Imagen 13**).

**Tabla 20.** Datos registrados etapa de tratamiento de la muestra

Parámetro	Unidad	Valor
Peso inicial	kg	1.460
Peso luego de corte	kg	1.255
Cantidad seleccionada	kg	1.000
Temperatura horno	°C	40
Tiempo de secado	h	72

**Fuente:** elaboración propia.

**Imagen 13.** Secado de la zanahoria Chantenay (*Daucus carota L.*)



**Fuente:** elaboración propia.

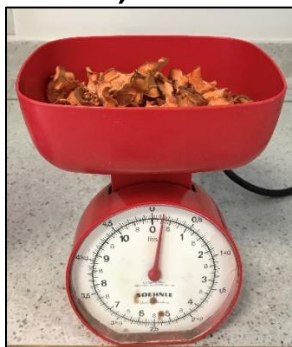
Transcurrido el tiempo especificado en la **Tabla 20** se procedió a extraer el material tratado (**Imagen 14. a**) el cual fue inmediatamente pesado utilizando una balanza de alimentos **b** y finalmente empacado en una bolsa de polietileno con cierre hermético **c** con el fin de evitar el ingreso de la humedad que pueda promover la formación de hongos y el deterioro la muestra.

**Imagen 14.** Proceso de conservación del material tratado

**a)** Muestra seca



**b)** Pesado



**c)** Empaque sellado



**Fuente:** elaboración propia.

Se puede evidenciar la reducción considerable del tamaño de las rodajas de zanahoria, de igual manera, una reducción considerable del peso de la muestra arrojando un valor de 0.19 kg, de lo cual se puede concluir que la exposición de la muestra al secado generó una pérdida o eliminación de 0.81 kg de agua del producto por efecto de este tratamiento. El porcentaje de agua removido fue calculado como la masa de agua removida sobre la masa de agua o humedad inicial en el material (ver **Ecuación 11**) arrojando un valor del 98.82%.

### Ecuación 11. Porcentaje de agua removido.

$$\% \text{Agua removida} = \frac{\text{Masa agua removida (g)}}{\text{Masa agua inicial en el material (g)}} \times 100$$

**Fuente:** G.V. REKLAITIS. Balances de Materia y Energía. 1 Edición. John Wiley & Sons, Inc. 1986.

Posteriormente, se tomó la muestra seca de zanahoria y se trituró utilizando un triturador SAMURAI de 650 W hasta obtener un polvillo fino, el cual fue pesado nuevamente en su totalidad arrojando un valor de 0.1874 kg, mostrando un porcentaje de pérdida de material del 1.37%; por último, este fue almacenado en bolsas de cierre hermético para evitar el ingreso de humedad al material y se almacenó en un lugar fresco y alejado de la luz directa.

**4.1.6 Análisis proximal.** Para realizar esta prueba se tomó parte de las muestras previamente secadas en el horno y se solicitó en el laboratorio de Análisis de Alimentos de la Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia, el servicio de pruebas bromatológicas o análisis próximo con el objetivo inicial de comparar los grupos de nutrientes y los componentes principales de la zanahoria Chantenay denominada como desecho frente a las zanahorias de condiciones óptimas para el consumo. La muestra es ingresada como Zanahoria cruda rastrojo, Muestra 01.

Los resultados de la determinación bromatológica de la muestra, dependiendo del parámetro, son expresados en base seca o base húmeda a excepción del parámetro de la actividad de agua. Los resultados además especifican el método empleado y advierten que dichos resultados dependen del estado de la materia prima. A continuación, en la **Tabla 21** se muestran los resultados que arrojó esta prueba.

**Tabla 21.** Resultados del análisis proximal.

PARÁMETRO	MUESTRA 01	MÉTODO
CALORÍAS (Kcal/100g)	39.83	Cálculo
CARBOHIDRATOS (g/100 d de alimento)	7.30	Diferencia
HUMEDAD (g/100 g de alimento)	81.96	Gravimétrico
CENIZAS (g/100 g de alimento)	6.24	Gravimétrico
FIBRA CRUDA (g/100 g de alimento)	2.58	Gravimétrico
GRASA (g/100 g de alimento)	0.59	Gravimétrico
PROTEÍNA EN BASE HÚMEDA (g/100 g de alimento) (F=6.25)	1.33	Kjeldahl
PROTEÍNA EN BASE SECA (g/100 g de alimento) (F=6.25)	7.37	Kjeldahl
MATERIA SECA	18.04	Diferencia

**Tabla 21.** (Continuación)

PARÁMETRO	MUESTRA 01	MÉTODO
ACTIVIDAD DE AGUA (AW/T°C)	0.963/21.4°C	Higrómetro o Medidor de Agua TESTO 650

**Fuente:** elaboración propia.

## 4.2 DESARROLLO EXPERIMENTAL

Siguiendo la propuesta del procedimiento del desarrollo experimental establecida en el capítulo 3 “Metodología”, se procedió a realizar los procesos de extracción en cuestión, teniendo en cuenta la metodología ya descrita como se describe en los siguientes numerales. En este numeral, además, se presentan las características generales y el procedimiento detallado que se llevó a cabo para cada análisis en el laboratorio.

**4.2.1 Materiales y reactivos.** En la Tabla 22 se enlistan los diferentes materiales y en la Tabla 23 los reactivos empleados a lo largo del desarrollo experimental, especificando las características de algunos de estos.

**Tabla 22.** Materiales utilizados para el desarrollo experimental.

Material	Cantidad	Característica
Tubo de ensayo con tapa plástica	9	15 mL
Vaso de precipitado	1	50 mL
Vaso de precipitado	2	200 mL
Vaso de precipitado	1	400 mL
Pipeta graduada	2	10 mL
Balón de fondo plano	1	100 mL
Condensador de vidrio	1	De bolas
Extractor Soxhlet	1	100 mL
Manguera	2	silicona
Soporte universal	1	Acero
Picnómetro	1	25 mL
Papel filtro	5	Convencional

**Fuente:** elaboración propia.





**Tabla 23.** Reactivos usados en el desarrollo experimental.

Reactivo	Cantidad
Aceite de girasol extra refinado (Premier)	Envase 1 L
Hexano C <sub>6</sub> H <sub>14</sub> grado industrial	Recipiente 3 L
Agua destilada	Uso periódico
Acetona	Recipiente 500 mL

**Fuente:** elaboración propia

**4.2.2 Equipos.** En el Cuadro 3 se enlistan los equipos dispuestos para la etapa de extracción y de cuantificación, especificando sus características y funciones.

**Cuadro 3.** Equipos empleados en el desarrollo experimental.

<i>Nombre</i>	<i>Ilustración</i>	<i>Características</i>
Baño ultrasónico Elmasonic E 60 H D-78224 Singen/Htw		100 – 120 V /AC F 50/60 Hz P 500 W 5.68 L
Plancha de calentamiento y agitación CORNING PC- 420 D		120 VAC 60 Hz 698 W Temperatura 5 – 560°C (paso 5°C)
Balanza Analítica SHIMADZU AX200		Máx. 200g d=0.1 mg
Espectrofotómetro UV- 1800 SHIMADZU No. A11455050076 US C.		100 – 120 V ~ 50 / 60 Hz Doble Haz: lámparas de Wolframio y Deuterio. Barrido entre 200 – 800 nm

**Fuente:** elaboración propia.

**4.2.3 Procedimiento.** Se hizo un reconocimiento preliminar del área de trabajo y de los diferentes equipos, medidas de seguridad y planeación del desarrollo experimental con el objetivo de proponer una estructuración secuencial de los métodos de extracción y de la experimentación en general, reduciendo el tiempo de experimentación y asegurar una manipulación correcta de los diferentes reactivos y equipos.



**4.2.3.1 Extracción Soxhlet.** Se pesaron 20 g de zanahoria triturada en una balanza analítica y se depositaron en un empaque improvisado de papel filtro sellado con ganchos metálicos, el cual fue pesado y luego introducido en el compartimiento del dedal en el Soxhlet de 100 mL. Seguidamente, se adicionaron 140 mL de hexano líquido medidos en un vaso de precipitados de 200 mL en un balón de fondo plano aforado de 100 mL previamente pesado. El montaje de extracción se construyó utilizando un soporte universal de acero, en el cual se sujetaron con pinzas y nueces metálicas el condensador de bolas de vidrio al cual se le conectaron las mangueras de silicona de manera tal que el ingreso del agua de refrigeración se encontrara en la parte inferior y la salida por la parte superior (Imagen 15). A este condensador se ancló el Soxhlet de vidrio con la muestra introducida en el compartimiento interno y a este se conectó el balón de fondo plano aforado. Seguidamente, el montaje fue dispuesto sobre una plancha de calentamiento eléctrica de manera tal, que el balón de fondo plano estuviera en contacto directo con esta.

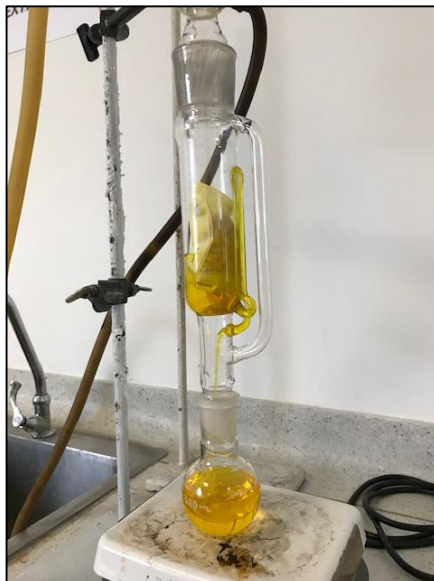
**Imagen 15.** Montaje de extracción Soxhlet utilizado.



**Fuente:** elaboración propia.

Una vez realizado el montaje Soxhlet, se dio inicio a la extracción ajustando la temperatura de la plancha de calentamiento a una temperatura aproximadamente superior a la temperatura de ebullición del hexano (68°C). Transcurridos 90 minutos, se observó el primer sifón (**Imagen 16**) el cual consiste en la primera recuperación del solvente junto con el extracto cuando el volumen dentro de la cámara de extracción del Soxhlet supera la altura del tubo en U, el solvente recuperado con el extracto desciende por el tubo en U o sifón volviendo al balón de fondo plano.

**Imagen 16.** Primer sífon de la extracción Soxhlet.



**Fuente:** elaboración propia.

Se registró la hora a la cual ocurrió el primer sífon, dejando que el proceso continuara por 6 h, punto en el cuál, se dio por terminado el proceso de extracción desactivando la plancha de calentamiento y dejando en reposo el sistema hasta que se enfriara el líquido a temperatura ambiente. Finalmente, se desmontó el sistema de extracción, se vertió el líquido remanente en la cámara de extracción Soxhlet en el balón de fondo plano aforado y este fue pesado y fue cubierto con papel de laminilla de aluminio de 0.2 mm de espesor. Este fue rotulado (**Imagen 17**) y almacenado en un lugar fresco, oscuro y alejado de la luz directa o fuentes de calor para evitar la degradación u oxidación del extracto. El dedal de papel filtro fue pesado luego del proceso con una balanza analítica.

**Imagen 17.** Rotulado extracto Soxhlet



**Fuente:** Elaboración propia.

**4.2.3.2 Extracción asistida con ultrasonido.** Paralelamente a la extracción convencional Soxhlet, se llevó a cabo la extracción asistida con ultrasonido, para la cual, inicialmente se pesaron minuciosamente 2 g de zanahoria seca triturada en una balanza analítica y se introdujeron en un tubo de ensayo de vidrio de 15 mL. Se repitió este procedimiento para los 9 tubos de ensayo en total y se rotularon enumerándolos de 1 a 9 (**Imagen 18**). Luego, se agregaron 10 mL de aceite de girasol extra refinado medidos en un vaso de precipitado de 50 mL en cada tubo de ensayo, se sellaron con sus respectivas tapas de plástico y cada uno de estos fue pesado en la balanza analítica, registrando cada valor. Para asegurar una dilución completa de la muestra de zanahoria en el aceite adicionado, se agitaron manualmente las muestras, cuidadosamente evitando que el material más fino de la zanahoria quedara en suspensión con el aceite, puesto que esto podría influir en las lecturas espectrofotométricas al final del análisis y cuantificación del pigmento objetivo.

**Imagen 18.** Muestras de zanahoria triturada.



**Fuente:** Elaboración propia.

Estos tubos rotulados y con las muestras preparadas fueron introducidos en un vaso de precipitado de 400 mL al cual se le adicionó agua destilada hasta completar el volumen del recipiente (**Imagen 19 a.**) con el objetivo de evitar la contaminación del líquido contenido en el baño ultrasónico, que podría resultar en el deterioro del material de las paredes internas del equipo y afectar la eficiencia de la difusión de las ondas ultrasónicas a través del fluido. En seguida, el vaso de precipitado con las muestras fue introducido en el baño ultrasónico y agua destilada fue adicionada hasta nivelar el volumen de este con el volumen del agua destilada del vaso de precipitado (**Imagen 19 b.**).

### Imagen 19. Montaje de extracción asistida con ultrasonido

a. Muestras preparadas



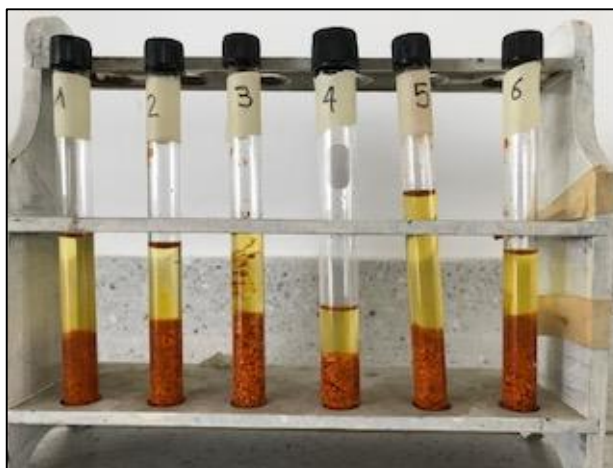
b. Muestras dentro del baño ultrasónico



Fuente: Elaboración propia.

La temperatura del baño ultrasónico se ajustó a un valor de 30 °C y el tiempo a 30 min, se cerró el equipo con la cubierta plástica y se dio inicio al proceso de extracción y al mismo tiempo se inició a cronometrar el tiempo. Con el objetivo de disminuir el tiempo de experimentación puesto que, como se mencionó en el capítulo anterior, cada prueba se realizó por triplicado por cada tratamiento; transcurridos 10 minutos, se extrajeron los tubos enumerados de 1 a 3 y se dejaron reposar en un vaso de precipitado vacío. Este procedimiento se repitió trascurridos 20 min y 30 min, extrayendo los tubos 4 a 6 y 7 a 9 respectivamente. Estos tubos expuestos al ultrasonido (**Imagen 20**) fueron pesados y llevados posteriormente al laboratorio de espectroscopía para el análisis posterior de cuantificación del extracto que se expondrá en el siguiente numeral.

**Imagen 20.** Muestras 1 a 6 luego de exposición a ultrasonido.



Fuente: Elaboración propia.

El cambio en la coloración del aceite extra refinado indicó, como una primera suposición, que este fue capaz de extraer algún pigmento de las muestras secas por su color amarillo-naranja que se pudo observar a simple vista. Por último, se pesaron los tubos de ensayo individualmente en una balanza analítica registrando cada valor.

El procedimiento anterior se repitió en dos ocasiones adicionales; para estos casos, la temperatura del baño ultrasónico fue ajustada en los valores de 40°C y 50°C como se tenía previsto en el diseño experimental, con la intención de evaluar el efecto de esta variable junto en el tiempo, en el rendimiento de extracción.

### 4.3 CUANTIFICACIÓN DEL EXTRACTO DE $\beta$ -CAROTENO

Se realizó una visita previa al área de trabajo con el objeto de reconocer los equipos y demás materiales que se iban a manipular, haciendo especial hincapié en las medidas de seguridad y prevención para hacer un buen uso de los mismos. La etapa de cuantificación se condujo inmediatamente luego de la etapa de extracción, considerando los efectos de foto-degradación y oxidación del  $\beta$ -caroteno. Para el caso del extracto, producto de la extracción Soxhlet, como se mencionó en la descripción del procedimiento, este se almacenó en un lugar fresco y alejado de la luz directa.

**4.3.1 Procedimiento.** Previamente a las lecturas de las muestras a analizar, se determinó la densidad del aceite extra refinado puro con ayuda de un picnómetro de 25 mL  $V_{pic}$  a través de un análisis gravimétrico, el cual consistió en pesar inicialmente el picnómetro vacío PV, luego este fue llenado con aceite hasta el tope y se selló con el pistilo, finalmente este fue pesado PLL. La densidad fue calculada mediante la **Ecuación 12**.

**Ecuación 12.** Cálculo de la densidad del aceite extra refinado.

$$Densidad \rho \left( \frac{g}{ml} \right) = \frac{PLL - PV}{V_{pic}}$$

Posteriormente, se realizó una lectura de la solución blanco o de referencia, la cual consistió de únicamente aceite extra refinado, puesto que este, no solo serviría como referencia para las demás lecturas, sino que también, permite descartar cualquier lectura de absorbancia de las muestras evaluadas que sean ajenas a estas y estén relacionadas con las características propias del aceite utilizado como agente de extracción. El espectrofotómetro UV-1800 SHIMADZU de doble haz permite leer el valor de absorbancia para dos muestras en paralelo, además, este se encuentra acoplado a un computador, por lo cual, para esta primera parte, se introdujeron ambas celdas de cuarzo de 1 cm de espesor con aceite extra refinado puro y se llevó a cabo la primera corrida de lectura de 800 nm a 200 nm.

Una vez finalizada la extracción asistida con ultrasonido dada una temperatura de extracción y los tres valores de tiempo de extracción mencionados; las nueve muestras fueron pesadas y llevadas al laboratorio de espectroscopía y se condujo el siguiente procedimiento:

3 g de aceite con pigmento fueron pesados rigurosamente en una balanza analítica en un vaso de precipitado de 50 mL. A esta cantidad de aceite fue adicionado hexano líquido con una pipeta graduada de 10 mL hasta completar un volumen total de 10 mL. Se agitó suavemente la mezcla resultante y esta fue llevada para la lectura en el espectrofotómetro. Como se mencionó previamente, al tratarse de un espectrofotómetro de doble haz, se retiró una de las celdas con el blanco (aceite) del equipo y esta fue llenada hasta 3/4 de su volumen con la muestra aceite-extracto-hexano. La celda fue introducida en el compartimiento dentro del equipo, la cámara de lectura fue cerrada y se dio por iniciada la lectura entre 800 nm y 200 nm.

Una vez finalizada la lectura, se almacenó el espectro de absorción en el computador acoplado al sistema, se extrajo la celda con la muestra, se descartó el contenido en un envase de almacenamiento de residuos y se lavó la celda con aceite extra refinado puro. El procedimiento anteriormente expuesto se llevó a cabo para cada muestra de cada repetición y de cada tratamiento. También fue establecido que, en caso de que hubiesen transcurrido más de 12 h entre cada análisis espectrofotométrico, se optaría por calibrar nuevamente el espectrofotómetro para disminuir la probabilidad de aparición de lecturas erróneas. Al final de este procedimiento se descartó el contenido sobrenadante restante de los tubos de ensayo y se pesaron nuevamente en la balanza analítica, con el objetivo de determinar el peso de la torta o precipitado de zanahoria en cada uno de estos.

Para el caso de la extracción convencional Soxhlet la(s) muestra(s) almacenada(s) y rotulada(s) se efectuó un procedimiento similar al ejecutado con las muestras tratadas con ultrasonido, a diferencia que, en este caso, los 3 g de aceite pesados inicialmente consistían de aceite extra refinado puro, puesto que el solvente empleado para esta técnica de extracción fue el hexano; por esto el hexano adicionado hasta completar 10 mL consistía de la mezcla hexano-extracto. En una primera lectura se observó que la lectura del espectro de absorción superaba el valor de absorbancia de 1.5, por lo cual fue necesario reestructurar el procedimiento para la cuantificación de manera tal que se acudiría a un factor de dilución para que el valor de la absorbancia no superara dicho valor. Por tanto, se tomaron 0.5 mL de la muestra hexano + extracto con una pipeta graduada, esta cantidad fue añadida a los 3 g de aceite puro y el volumen restante fue completado con hexano puro hasta completar los 10 mL. El factor de dilución fue calculado con la **Ecuación 13**, el cual relaciona las concentraciones finales e iniciales de una solución determinada con los volúmenes de dilución de las mismas como se muestra a continuación.

### Ecuación 13. Factor de dilución

$$\text{Factor de Dilución } FD = \frac{C_i}{C_f} = \frac{V_f}{V_i}$$

Donde  $C_i$  y  $C_f$  son las concentraciones iniciales y finales respectivamente y  $V_i$  y  $V_f$  son los volúmenes iniciales y finales de la solución a evaluar. Este factor permite conocer la concentración de un compuesto específico en solución con un solvente luego de un proceso de dilución y servirá de factor para conocer la concentración del  $\beta$ -caroteno en hexano por este método en específico.

#### 4.4 ANÁLISIS DE RESULTADOS

En esta sección se desarrollan los cálculos respectivos necesarios para determinar los aspectos técnicos del desarrollo experimental, junto con el análisis de los resultados arrojados, a través de la comparación con estudios similares encontrados en la literatura. Inicialmente se identificarán las propiedades físicas y las pruebas bromatológicas de la materia prima contrastando con resultados obtenidos para zanahorias en buen estado. Luego se expondrán los resultados del análisis espectrofotométrico y se discutirá acerca de la concentración del extracto dados los diferentes tratamientos seleccionados junto con el rendimiento de la extracción de los métodos evaluados. Posteriormente, se llevará a cabo la comparación del rendimiento de los procesos teniendo en cuenta diferentes aspectos técnicos involucrados en cada proceso. Finalmente se evaluará el efecto de la temperatura y el tiempo en el rendimiento de la extracción a través de un diseño de experimentos dado un diseño factorial de tipo  $3^2$ .

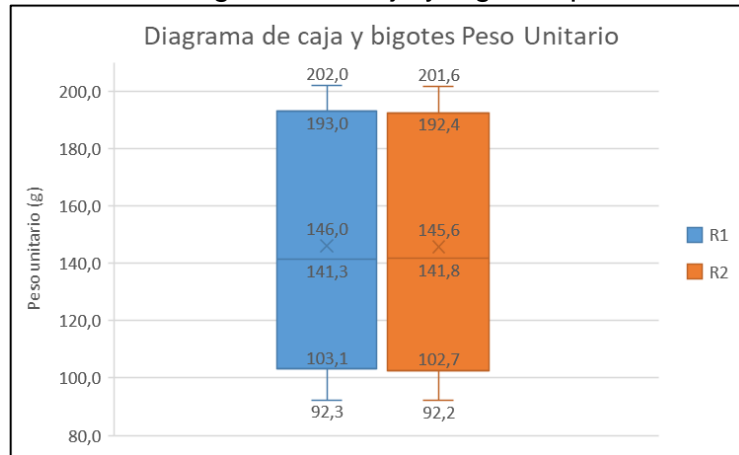
**4.4.1 Propiedades físicas de las muestras.** En un primer acercamiento a las muestras de zanahoria provistas por la empresa Hortalizas Boyacá S.A.S. se pudo observar que gran parte de estas, en lo que concierne a su aspecto físico, no cumplen con los parámetros de calidad establecidos por la Norma Técnica Colombiana NTC 1226 – 1 Frutas y Hortalizas Frescas – Zanahoria.

Las raíces seleccionadas se encuentran lavadas y libres de cualquier material extraño, sin embargo, su forma, tamaño y morfología sugieren que no son aptas para el consumo humano por lo que son descartadas y comercializadas como alimento animal o bien, desechadas por completo, puesto que representan un riesgo para la salud si llegasen a ser consumidas.

El análisis estadístico del peso unitario indica que la muestra seleccionada es de carácter homogénea, pues el 70.1% de los datos están comprendidos dentro de 1 desviación estándar de la media. Por otro lado, en la **Gráfica 1** se muestra la distribución de las mediciones del peso unitario en un diagrama de caja y bigotes.

De este se puede deducir que el rango intercuartílico presenta una alta variabilidad y poca concentración de datos, además, aproximadamente el 75% de las zanahorias seleccionadas tienen un peso mayor a los 103 g y las raíces tienen un peso promedio de 146 g.

**Gráfica 1.** Diagrama de caja y bigotes, peso unitario



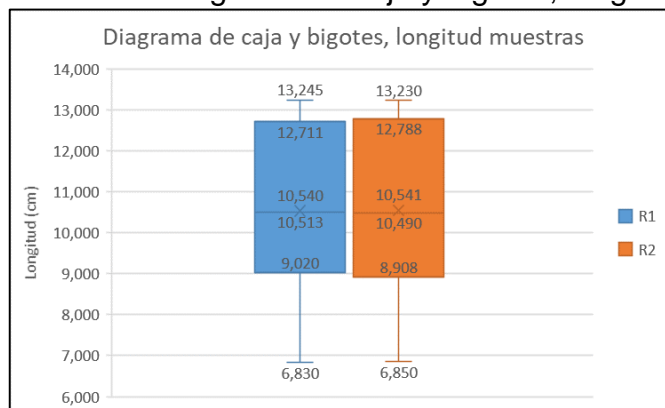
**Fuente:** elaboración propia.

La longitud de las zanahorias seleccionadas varía entre los 6 y 13 cm aproximadamente. La zanahoria Chantenay (*Daucus carota L.*) es de tipo semicorta (longitud entre 10 y 12 cm). El análisis estadístico arrojó una longitud promedio de las zanahorias de descarte de 10,5 cm; Igualmente, en la NTC 1226 – 1 se sugiere que la longitud mínima aceptada debe ser de 60 mm. Gracias al análisis estadístico se pudo determinar que el comportamiento de la longitud fue similar al del peso unitario, puesto que el 80.3% de los datos se encuentran a 1 desviación estándar de la media. Este hecho se ve también reflejado en la **Gráfica 2** donde aproximadamente el 75% de los datos superan una longitud de 9 cm y solo un 25% aproximadamente se encuentran entre los 6 y 9 cm. Por lo cual se corrobora la homogeneidad de la materia prima escogida.

La NTC 1226 – 1, por otra parte, indica que el calibre mínimo de las zanahorias debe ser de 20 mm, este valor se cumple para todas las muestras escogidas. El análisis estadístico muestra que el 84% de los datos se encuentran a 1 desviación estándar de la media y en la **Gráfica 3** se observa un comportamiento con baja dispersión de valores con un calibre promedio de aproximadamente 5 cm.

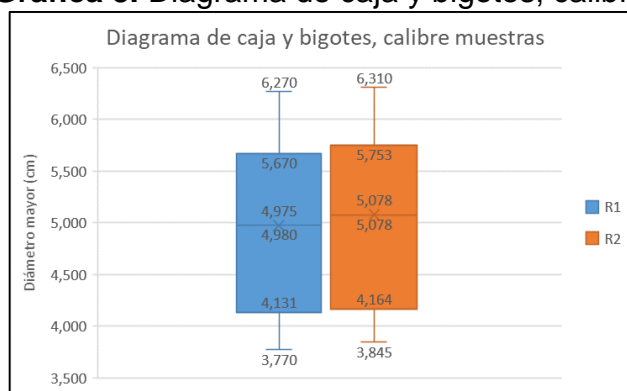


**Gráfica 2.** Diagrama de caja y bigotes, longitud



**Fuente:** elaboración propia.

**Gráfica 3.** Diagrama de caja y bigotes, calibre.



**Fuente:** elaboración propia.

En la tesis de grado de CURAN R., Nuria J. se realizó un análisis estadístico similar para la comparación del estado inmaduro y maduro de la zanahoria Chantenay (*Daucus carota L.*), en la **Tabla 24** se contrastan estos resultados con los obtenidos en este proyecto.

**Tabla 24.** Comparación peso, longitud y calibre de zanahorias en buen estado

	Zanahoria de desecho	Zanahoria en buen estado
Peso unitario promedio (g)	145.800	105.886
Longitud promedio (cm)	10.540	13.110
Calibre promedio (cm)	5.026	4.285

**Fuente:** Elaboración propia.

Es correcto afirmar que existen algunas diferencias notables entre estos valores, principalmente en el peso unitario, este valor difiere puesto que, a pesar de que la longitud promedio es un valor cercano a las zanahorias en buen estado, el calibre de las zanahorias de desecho es levemente mayor. En conclusión, se puede afirmar

que, si bien existen algunas diferencias en las dimensiones y el peso de la zanahoria Chantenay de desecho o descarte frente a las zanahorias en buen estado, esto parece depender directamente de la calidad del lote de producción y sus características predominantes y ser inherente al criterio de selección de calidad a la hora de determinar si es apta para el consumo humano. Esto último al parecer se ve más fuertemente ligado a el aspecto físico y la estética del producto, lo cual se discute a continuación.

Con respecto a los daños observado en las muestras escogidas, se pudo establecer que estos se agrupaban en dos grupos generales. El primero conformado por las raíces afectadas en su cuello u hombro por la exposición a los rayos del sol, presentando quemaduras de coloración rojiza o marrón, no obstante, no presentaban daños en el cuerpo de la raíz en absoluto. En la NTC 1226 – 1, se establece que se pueden permitir zanahorias en las que la parte superior sea verde o violeta hasta 2 cm para las raíces de longitud 10 cm o 3 cm para las más largas; a pesar de esto, gran parte de las zanahorias que presentan esta condición no superan los 10 cm de longitud.

El segundo grupo, está constituido por los daños morfológicos que mostraban desde la aparición de raíces secundarias, hasta la presencia de heridas abiertas secas o infectadas por bacterias. Gran parte de estos daños son atribuidos al exceso de humedad de los suelos donde fue cultivada esta hortaliza, puesto que aumenta la actividad de los nematodos, especialmente de la especie *Meloidogyne spp.* que se encuentran presentes en agua o el suelo. Los nematodos de tipo Ectoparásitos se caracterizan por cortar la raíz principal y afectar el rendimiento de las zanahorias, ya que pueden dejarlas cortas y bifurcadas principalmente<sup>78</sup>. Luego de causar estos daños estructurales en la zanahoria, esta puede sufrir de infecciones con bacterias presentes en el suelo como la *Erwinia carotovora-xanthomonas carotae*<sup>79</sup>, o demás microorganismos que pueden entrar por las heridas abiertas y causar daños como los observados en el análisis físico como la pérdida de brillo, coloración y uniformidad de la epidermis.

**4.4.2 Resultados análisis proximal.** El análisis bromatológico como se ilustró en la sección “3.1.6. Análisis Proximal” fue conducido en su totalidad satisfactoriamente. Estas pruebas sirven de base fundamental para determinar la calidad de un alimento.

Como se ha mencionado a lo largo del documento, la intención principal de realizar estas pruebas, es para llevar a cabo una comparación de estos análisis con otros estudios o resultados reportados en la literatura. En la **Tabla 25** se muestran los

---

<sup>78</sup> SEMINIS ®. Nematodos, Combatiendo al Enemigo. Viernes, 17 de febrero de 2017. Artículo. En: seminis-las.com

<sup>79</sup> CÁMARA DE COMERCIO DE BOGOTÁ. 2015. *Op cit.* p.29..

resultados ya reportados frente a datos encontrados en el rastreo bibliográfico constituido por tesis de grado, artículos científicos o fichas técnicas.

**Tabla 25.** Comparación resultados análisis proximal

PARÁMETRO	Zanahoria desecho	CURAN R., Nuria J.	TERRANOVA (1995)	DUKE, James A.	Kehr M. & Bohórquez
CALORÍAS (Kcal/100g)	39.83	48.134	44.1	36	37.7
CARBOHIDRATOS (g/100 d de alimento)	7.30	8.471 ± 0.46	9.7	10.7	8.4
HUMEDAD (g/100 g de alimento)	81.96	88.93 ± 0.22	88.2	86	88.9
CENIZAS (g/100 g de alimento)	6.24	0.498 ± 0.02	0.8	1.1	N/A
FIBRA CRUDA (g/100 g de alimento)	2.58	1.183 ± 0.08	1.0	1.2	1.1
GRASA (g/100 g de alimento)	0.59	1.17 ± 0.03	0.2	0.1	0.1
PROTEÍNA EN BASE HÚMEDA (g/100 g de alimento) (F=6.25)	1.33	0.930 ± 0.05	1.1	0.9	0.7
MATERIA SECA	18.04	11.07 ± 0.50	N/A	N/A	N/A

**Fuente:** elaboración propia.

El parámetro de las calorías del alimento presenta un porcentaje de error relativo menor al 20% en comparación a las zanahorias en buen estado. Cabe mencionar que, este parámetro fue determinado por el método de cálculo y de las otras fuentes mencionadas no se especifica el tipo de análisis realizado. Asimismo, para el caso de este análisis bromatológico, este valor depende directamente de los valores de carbohidratos, proteína y grasa que, como se puede observar, varían en comparación con los valores de la muestra analizada.

Los carbohidratos muestran una variación considerable con respecto a los valores reportados en la literatura. El porcentaje de error máximo calculado fue de 46.6%. Las condiciones del cultivo, cosecha y almacenamiento son algunos de los factores causantes de esta disminución en el contenido de carbohidratos en la zanahoria. Los carbohidratos son directamente asociados a los monosacáridos o disacáridos que posee la raíz, que en otras palabras hace referencia a los azúcares. La plagas o enfermedades pueden reducir la calidad sensorial reduciendo el sabor dulce de la

zanahoria (-195%) y el contenido de azúcar (-26%)<sup>80</sup>. Las temperaturas de comercialización altas versus las bajas (temperatura ambiente versus almacenamiento en frío) reduce la vida útil pero también afecta los aspectos nutricionales y sanitarios de las zanahorias disminuyendo el contenido de azúcares totales (-4%)<sup>81</sup>.

El contenido de cenizas muestra una desviación considerable frente a los valores reportados en la literatura, indicando un contenido reducido de materia orgánica por cada 100g de alimento y, por otra parte, un contenido mayor de minerales totales. Según Jain *et al.*<sup>82</sup> las cenizas son el residuo inorgánico remanente luego del agua y la materia orgánica y este valor no puede ser reducido durante el almacenamiento. Por lo cual, esta variación se puede atribuir al hecho de que algunas raíces se encontraban quebradas o con heridas abiertas, permitiendo el ingreso de sólidos del suelo y, por consiguiente, metales presentes en el mismo a las zanahorias. Con respecto al resultado del parámetro de la proteína, se observó una similitud considerable con algunos de los valores para zanahorias en buen estado, sin embargo, como se ha mencionado anteriormente, los resultados del análisis proximal y las pruebas bromatológicas dependen directamente del estado de la zanahoria y de los métodos o la técnica escogida para llegar a los resultados.

Se puede observar una similitud en el resultado de la humedad de la muestra de zanahoria de descarte con lo reportado en la literatura para zanahorias frescas, no obstante, el valor tiende al límite inferior en comparación con estos datos, lo que sugiere que esta sufrió una pérdida en el contenido de agua. Esto puede ocurrir por varios factores que van desde las condiciones climáticas o de almacenamiento, pasando por el tipo de empaque, hasta las condiciones de transporte. Como fue reportado al inicio de este capítulo, la temperatura local y la humedad relativa en campo a la hora del muestreo fueron de 11°C y 79% respectivamente; mientras que la Asociación del Sector de Seguros Alemán sugiere que las condiciones óptimas de almacenamiento de la Zanahoria Chantenay deben ser a una temperatura de 0.5 a 2°C y la humedad relativa de 95%<sup>83</sup>. Asimismo, las heridas y rajaduras presentes en las zanahorias aumentan el área superficial, aumentando la cantidad de agua perdida. Lo anterior puede ser una explicación del porqué la zanahoria pudo sufrir una pérdida en su contenido de humedad y, por consiguiente, una pérdida en el peso de las misma.

El parámetro de la fibra cruda al igual que el de la grasa del alimento también muestra una variación significativa del estado de deterioro con referencia al buen

---

<sup>80</sup> SELJÅSEN, Randi; et al. Quality of carrots as affected by pre- and postharvest factors and processing. En: Journal of Sci Food Agric. 2013. p. 2622.

<sup>81</sup> *Ibid.* p. 117.

<sup>82</sup> Jain, N. et al. 1992. Analysis for mineral element of some medicinal plants. IndianDrug. p. 2.

<sup>83</sup> Gesamtverband der Deutschen Versicherungswirtschaft. Transport Information Service. "Carrots" Berlín, 2002 – 2019.

estado. esto se debe a la alteración del estado de madurez del producto que puede limitar la formación completa de las estructuras y compuesto hasta los valores comunes de las zanahorias en buen estado. Esto es causado en gran medida por los daños ya mencionados.

Por otra parte, la materia seca de la zanahoria de desecho presenta un valor superior al reportado por CURAN R., Nuria J. de  $11.07 \pm 0.5$  (error = 38.63%) concluyéndose que la materia seca de la zanahoria Chantenay puede verse alterada directamente por la pérdida de humedad ya determinada.

Por último, la actividad de agua ( $A_w$ ) arrojó un valor de 0.963, lo que sugiere que la materia prima seleccionada es perecedera, puesto que la cantidad de agua libre del alimento presenta un valor cercano al límite superior de este parámetro (1.0) y, por consiguiente, la muestra es más propensa a ser afectada por microorganismos y así disminuir su vida útil. El valor de la actividad de agua ( $A_w$ ) para la zanahoria se encuentra entre 0.983 – 0.993<sup>84</sup>. El error absoluto calculado fue de 2.077%, por lo cual, se puede concluir, que este valor es similar tanto para las zanahorias de desecho, como para las zanahorias en buen estado. No obstante, el valor medido se encontró por debajo del límite inferior del reportado en la literatura, lo cual se puede atribuir a la pérdida de agua de las raíces quebradas.

**4.4.3 Extracción convencional Soxhlet.** Una vez finalizado el proceso de extracción Soxhlet y de cuantificación del extracto mediante la espectrofotometría UV-VIS se procedió a realizar los cálculos respectivos que se describirán en esta sección y seguidamente el análisis de los mismos a través de una contrastación con los resultados de estudios similares apoyados en la revisión bibliográfica.

**4.4.3.1 Concentración del extracto.** Para el cálculo de la concentración del extracto se partió del análisis de los espectros de absorción de cada muestra. En esta ocasión para cada repetición de la extracción (2 repeticiones) a las cuales se les dio el nombre de Soxhlet 1 y Soxhlet 2 se ejecutaron 3 lecturas consecutivas siguiendo la técnica descrita en la sección anterior. En la Tabla 26 se resumen los datos y las variables relevantes medidas a lo largo del desarrollo experimental que servirán para los cálculos posteriores.

**Tabla 26.** Datos y parámetros de la extracción Soxhlet.

Dato	Soxhlet 1	Soxhlet 2
Peso zanahoria (g)	20.1	20.05
Volumen hexano (mL)	140.0	140.0
Peso antes (dedal) (g)	22.7	22.9
Peso balón vacío (g)	76.9	73.8

<sup>84</sup> CHIRIFE, J., & FONTAN, C. F. (1982). Water Activity of Fresh Foods. Journal of Food Science, 47(2). p. 662. doi:10.1111/j.1365-2621.1982.tb10145.x

**Tabla 26.** (Continuación)

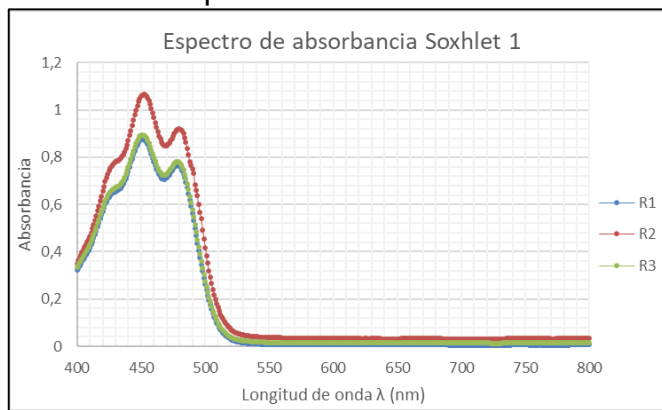
Dato	Soxhlet 1	Soxhlet 2
Temperatura (°C)	70	70
Tiempo (min)	360.0	360.0
Peso después (dedal) (g)	28.7	29.5
Peso balón con extracto (g)	140.9	132.4

**Fuente:** elaboración propia.

Tanto para la extracción Soxhlet 1 como para la Soxhlet 2 se utilizó la misma cantidad de zanahoria seca triturada, volumen de hexano, temperatura y tiempo de extracción. La única diferencia tuvo que ver con el balón de vidrio de fondo plano aforado que, a pesar de tener la misma capacidad (100mL) uno de estos tenía un aforo de mayor tamaño, por este motivo su peso registrado es mayor.

En la **Gráfica 4** y **Gráfica 5** se reportan los espectros y las lecturas en el intervalo comprendidos en el rango visible (400 a 800 nm) obtenidos.

**Gráfica 4.** Espectro de absorbancia Soxhlet 1.

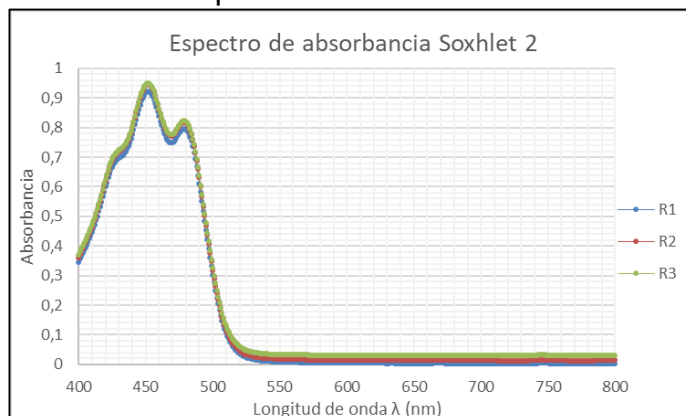


**Fuente:** Elaboración propia.

Donde R1, R2 y R3 corresponden a las repeticiones de las lecturas en el espectrofotómetro. Para esta primera extracción se evidencia un espectro de absorción característico para el  $\beta$ -caroteno, con picos de absorbancia en los valores de longitud de onda de 425, 451 y 479 nm, coincidiendo con los valores reportados en la teoría. La correlación matemática que se usó para calcular la concentración de  $\beta$ -caroteno en la muestra solo requiere el valor de la absorbancia a 450 nm por lo cual se calcularon los errores entre las lecturas o repeticiones para este valor de longitud de onda arrojando valores menores al 20%.

Resultados semejantes se observan en la **Gráfica 5**, sin embargo, las repeticiones de las mediciones espectrofotométricas muestran un error significativamente menor mostrando valores menores al 3%.

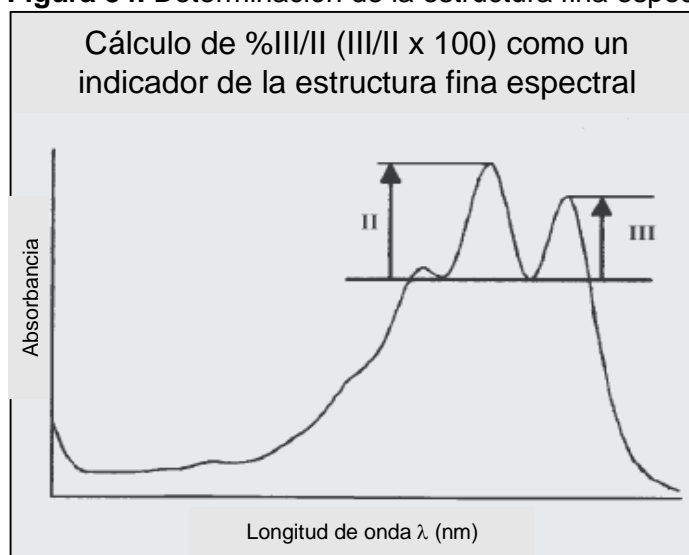
**Gráfica 5.** Espectro de absorbancia Soxhlet 2.



**Fuente:** elaboración propia.

Para rectificar la efectividad del método de cuantificación se recurre al cálculo de estructura fina espectral (%III/II), puesto que los espectros de absorbancia son raramente presentados en publicaciones de carotenoides hoy en día. En la **Figura 34** se muestra el procedimiento de cálculo de este factor.

**Figura 34.** Determinación de la estructura fina espectral (%III/II).



**Fuente:** elaboración propia, basado en. RODRIGUEZ A., Delia B; KIMURA, Mieko. HarvestPlus Handbook for Carotenoid Analysis. HarvestPlus Technical Monograph 2, 2004.

Este se calcula como la relación entre la distancia del pico o señal correspondiente a los 477 nm y a la señal máxima a 450 nm medida desde una línea base que corresponde al mínimo entre estos dos picos. Los valores de la estructura fina espectral encontrados para las pruebas Soxhlet 1 y Soxhlet 2 fueron de 24.13% y 23.61% respectivamente; y mostrando un error del 3.45% y 5.53% con respecto al

reportado para el  $\beta$ -caroteno en hexano medido a los mismos valores de longitud de onda (25%<sup>85</sup>).

La concentración de  $\beta$ -caroteno fue calculada para cada extracción y para cada repetición tomando como valor de la constante de extinción molar ( $E^{1\%}$ ) del  $\beta$ -caroteno en hexano a 450 nm como 2590  $\text{cm}^{-1}$  y el valor del espesor de la celda de medición ( $d$ ) como 1 cm.

Los resultados de las concentraciones se muestran en la **Tabla 27**, cabe aclarar, que estos resultados aún no han sido corregidos con el factor de dilución correspondiente para cada medición.

**Tabla 27.** Resultados concentración del extracto diluido.

Concentración C (mg $\beta$ -caroteno/kg aceite)					
Soxhlet 1			Soxhlet 2		
R1	R2	R3	R1	R2	R3
3.378	4.085	3.448	3.544	3.641	3.653
$\bar{X}$		$\sigma$	$\bar{X}$		$\sigma$
3.637		0.389	3.613		0.059

**Fuente:** elaboración propia.

La desviación estándar ( $\sigma$ ) indican que las lecturas de la prueba “Soxhlet 2” son más consistentes y, por lo tanto, más confiables que las lecturas de la prueba “Soxhlet 1”; sin embargo, el promedio o la media de ambas pruebas fueron similares. Gracias a la **Ecuación 13** se calculó el factor de dilución a partir de los volúmenes final e inicial de la muestra diluida compuesta por la fracción extracto-solvente y solvente puro (hexano). El volumen de hexano puro con el cual se completaron los 10 mL para el acondicionamiento de la muestra para la lectura espectrofotométrica se calcularon con la densidad del aceite dado la cantidad de aceite extra refinado puro pesado y la diferencia de los 10 mL totales de muestra y el volumen calculado de aceite (**Ecuación 14**).

**Ecuación 14.** Cálculo del volumen de aceite y hexano puro.

$$Vol\ aceite\ R1\ (ml) = \frac{masa\ aceite\ R1\ (g)}{\rho\ aceite\ \left(\frac{g}{ml}\right)}$$

$$Vol.\ Hexano\ puro\ R1\ (ml) = 10\ ml - Vol\ aceite\ R1\ (ml)$$

**Fuente:** elaboración propia.

<sup>85</sup> RODRIGUEZ A., Delia B; KIMURA, Mieko. 2004 *Op cit.* p. 58.



Con ayuda de la **Ecuación 12**, la **Ecuación 13** y la **Ecuación 14** se calculó el factor de dilución (FD) para cada prueba (Soxhlet 1 y Soxhlet 2) y para cada réplica (R1, R2 y R3) obteniendo los resultados que se resumen en la siguiente tabla (**Tabla 28**).

**Tabla 28.** Resultados del factor de dilución (FD)

Muestra	Soxhlet 1	Soxhlet 2
FD R1	15.4939	15.4097
FD R2	15.5071	15.3851
FD R3	15.4833	15.4632

**Fuente:** elaboración propia.

Finalmente, para calcular la concentración de  $\beta$ -caroteno corregida con el factor de dilución (FD) se acudió nuevamente a la **Ecuación 13** de la cual se despejó el valor de la concentración inicial ( $C_i$ ) llegando a los resultados que se reúnen en la **Tabla 29**.

**Tabla 29.** Concentración de  $\beta$ -caroteno corregida con FD.

Concentración C (mg $\beta$ -caroteno/kg aceite) Corregida con FD					
Soxhlet 1			Soxhlet 2		
R1	R2	R3	R1	R2	R3
52.3444	63.3457	53.3846	54.6185	56.0161	56.4795
$\bar{X}$	$\sigma$		$\bar{X}$	$\sigma$	
56.358	6.074		56.248	0.328	

**Fuente:** elaboración propia.

De estos resultados es válido afirmar que existe una diferencia significativa en la desviación estándar de ambas pruebas, siendo más confiable la segunda (Soxhlet 2). Una de las posibles causas puede deberse a los errores humanos, principalmente en la medición y pesaje de los reactivos y demás sustancias a lo largo de la etapa de cuantificación. Estos errores se propagan en las lecturas y en los cálculos de la concentración como se evidencia específicamente en la lectura R2 de la prueba Soxhlet 1 a pesar de que se trata de la misma muestra de extracto que las otras dos lecturas. Por esta razón se estableció un criterio de tolerancia a los resultados del análisis espectrofotométrico aplicable a las lecturas de las muestras de las dos técnicas de extracción que se están evaluando, en el cual se descartan los resultados que tengan un error absoluto con respecto a las demás lecturas mayor al 25%.

La concentración final del extracto para ambas pruebas se calculó como la media o el promedio de las repeticiones y descartando las lecturas dispersas como se mencionó previamente. La prueba Soxhlet 1 muestra una concentración final del extracto de 52.8645 mg  $\beta$ -caroteno por kg de aceite; mientras que la prueba Soxhlet 2 arrojó un valor final de 55.7047 mg  $\beta$ -caroteno por kg de aceite.

En el estudio de ORTIZ V., Ana C. y MAMANI S., María L., utilizaron 100 g de zanahoria Chantenay en 525 mL de hexano (proporción sólido – líquido del 19.05%) en un montaje de extracción Soxhlet durante 8 h, obteniendo el pico o señal de absorbancia máxima a valor de longitud de onda de 447 nm con una magnitud de 0.985 de absorbancia, dicho valor es comparable y aproximado al detectado en las muestras Soxhlet 1 y Soxhlet 2 del proyecto en cuestión a una longitud de onda de 450 nm.

**4.4.3.2 Rendimiento de la extracción (Extracción Soxhlet).** El rendimiento de la extracción (**Ecuación 15**) se define como la relación entre la cantidad o masa de extracto obtenido luego de un proceso extractivo y la cantidad de materia usado para la extracción; este valor puede, igualmente, expresarse como porcentaje de rendimiento. En el caso de los carotenoides este valor se reporta en su mayoría como la cantidad del carotenoide extraído por cada 100 g de materia seca<sup>86</sup> independientemente del método de extracción realizado.

**Ecuación 15.** Rendimiento de extracción.

$$\begin{aligned} & \text{Rendimiento de extracción } (Y_x) \\ & = \frac{\text{Masa del componente extraído } (M_{\beta\text{caroteno}})}{\text{Masa del material medido para la extracción}} \end{aligned}$$

**Fuente:** Elaboración propia.

Donde la masa del componente extraído corresponde a la masa de  $\beta$ -caroteno obtenida y la masa del material medido para la extracción es la cantidad de zanahoria seca y triturada pesada para cada prueba. Por medio de factores de conversión, recurriendo a los datos de la cantidad de zanahoria seca pesada y de aceite pesado para cada experimento y tomando como dato de partida las concentraciones calculadas en el numeral anterior fue posible determinar el rendimiento de extracción para la técnica Soxhlet. La masa de aceite pesado fue calculado a través de una equivalencia (**Ecuación 16**) de la proporción zanahoria-aceite de los datos registrados en la extracción asistida con ultrasonido.

**Ecuación 16.** Masa equivalente de aceite, extracción (Soxhlet 1).

$$Meq_{\text{Aceite}}(\text{Soxhlet1}) = \bar{M}_{\text{Aceite}}(\text{UAE}) \times \frac{M_{\text{zanahoria}}(\text{Soxhlet 1})}{\bar{M}_{\text{Zanahoria}}(\text{UAE})}$$

**Fuente:** elaboración propia.

Donde  $\bar{M}_{\text{Aceite}}(\text{UAE})$  y  $\bar{M}_{\text{Zanahoria}}(\text{UAE})$  es el promedio de las mediciones de aceite zanahoria seca pesadas respectivamente, para el proceso de extracción asistida

<sup>86</sup> CHUYEN, Hoang V. 2018. *Op cit.* p. 56.

con ultrasonido. Y  $M_{Zanahoria(Soxhlet\ 1)}$  es el peso de la zanahoria medido para la prueba Soxhlet 1. Los resultados del rendimiento de extracción para cada prueba y muestra se reúnen en la **Tabla 30**, cabe mencionar que el valor R2 de la prueba Soxhlet 1 es descartado por el criterio de tolerancia en la dispersión de errores planteado.

**Tabla 30.** Rendimiento de extracción técnica Soxhlet

Rendimiento de extracción (mg $\beta$ -caroteno/100 g materia seca)					
Soxhlet 1			Soxhlet 2		
R1	R2	R3	R1	R2	R3
20.4697	24.7719	20.8765	21.3591	21.9056	22.0868
$\bar{X}$		$\sigma$	$\bar{X}$		$\sigma$
23.3727		2.1671	21.7838		0.3788

**Fuente:** elaboración propia.

Para la prueba Soxhlet 1 se obtuvo un rendimiento promedio de 20.6731 mg  $\beta$ -caroteno/100 g materia seca y para la prueba Soxhlet 2 este valor fue de 21.7838 mg  $\beta$ -caroteno/100 g materia seca. Dada la similitud de las condiciones y los parámetros de extracción se determinó el error entre estos últimos valores con el fin de comparar ambas pruebas, este error calculado fue de 5.37%.

**4.4.3.3 Consumo energético.** El consumo energético es uno de los parámetros que se usarán para comparar el rendimiento de las dos técnicas de extracción posteriormente en este capítulo. El consumo energético que se calculará en este numeral sólo se centrará en la cantidad de potencia eléctrica que se requirió para completar las diferentes etapas que involucraron la transformación química o física de la materia prima (zanahoria) del diseño experimental, constituido desde el proceso de tratamiento y acondicionamiento de la muestra (secado y trituración), hasta el proceso de extracción en sí (Soxhlet). En la **Tabla 31** se enlistan los equipos usados durante cada etapa del proceso de extracción Soxhlet junto con sus respectivas especificaciones técnicas del equipo y parámetros de operación de cada una.

**Tabla 31.** Equipos usados por etapa

Etapas	Equipo	Asignación	Potencia y operación
Secado	Horno de secado MLW (Medizin-, Labor- und Wägetechnik)	Horno (F)	2160 W (72 h)
Trituración	Procesador de alimentos Samurai	Triturador (G)	650 W (2.5 min)
Extracción	Plancha de calentamiento y agitación CORNING PC-420 D.	Plancha (P)	698 W (6 h)

**Fuente:** elaboración propia.

El consumo energético fue calculado como el producto entre la cantidad de potencia eléctrica consumida por cada equipo y el tiempo de operación de los mismos. En la **Tabla 32** se muestran los datos y resultados de este procedimiento, el valor de consumo se presenta en unidades de Kilovátios hora (kWh).

**Tabla 32.** Consumo energético, extracción convencional Soxhlet.

Equipo	Consumo unitario (kW)	Tiempo (h)	Consumo total (kWh)
(F)	2.160	72	155.520
(G)	0.650	0.042	0.027
(P)	0.698	6	4.188
Total			159.735

**Fuente:** elaboración propia.

El proceso de extracción Soxhlet tuvo un consumo energético total de 159.735 kWh, de los cuales, el proceso de secado representa el 97.36% del consumo y el proceso de extracción Soxhlet el 2.62%. mientras tanto, el consumo energético del proceso de trituración es casi despreciable con un porcentaje de contribución de 0.017%.

**4.4.4 Extracción asistida con ultrasonido (UAE).** En esta sección se expone el procedimiento llevado a cabo para obtener los resultados experimentales, de manera conjunta se desarrolla el análisis de estos resultados acudiendo a resultados experimentales documentados en publicaciones científicas, artículos, tesis de grado entre otros. Además de recurrí a libros como soporte del fundamento teórico que servirán para hacer un análisis completo.

**4.4.4.1 Concentración del extracto.** El espectrofotómetro UV-1800 SHIMADZU permitió exportar los espectrogramas de absorbancia de cada muestra y réplica a una hoja de cálculo de Excel. En el ANEXO B, ANEXO C y ANEXO D se muestran los espectros de absorbancia para las pruebas conducidas a 30, 40 y 50°C respectivamente donde se especifican los tratamientos del tiempo de extracción de 10, 20 y 30 min.

Los tres tratamientos de tiempo a temperatura constante de 30, 40 y 50°C muestran un comportamiento similar al reportado en la literatura y al observado en los espectros arrojados en la extracción Soxhlet. En la **Tabla 33** se muestran los valores de absorbancia medidos a un valor de longitud de onda de 450 nm para cada tratamiento, siguiendo la nomenclatura establecida en la **Figura 29**.

**Tabla 33.** Absorbancias extracción asistida con ultrasonido (UAE)

(A <sub>450nm</sub> )		(A <sub>450nm</sub> )		(A <sub>450nm</sub> )	
A1	0.187	D1	0.077	G1	0.164
A2	0.172	D2	0.065	G2	0.161
A3	0.183	D3	0.080	G3	0.146

**Tabla 33.** (Continuación)

(A <sub>450nm</sub> )		(A <sub>450nm</sub> )		(A <sub>450nm</sub> )	
B1	0.285	E1	0.578	H1	0.400
B2	0.298	E2	0.536	H2	0.402
B3	0.307	E3	0.548	H3	0.390
C1	0.289	F1	0.690	I1	0.393
C2	0.280	F2	0.660	I2	0.383
C3	0.310	F3	0.580	I3	0.421

**Fuente:** elaboración propia.

Se calculó el error absoluto entre los datos por cada tratamiento y se determinó que el máximo error en las pruebas de 30, 40 y 50°C fueron de 10.71%, 23.1% y 10.98% respectivamente. Nuevamente se observa que estos no superaron el límite de tolerancia, por lo que no fue necesario descartar ningún valor de absorbancia.

La rectificación de la efectividad del método fue determinado determinada de igual forma como se hizo con los resultados de la extracción Soxhlet, a través del cálculo de la estructura fina espectral (%III/II), los resultados se exponen en la **Tabla 34**.

**Tabla 34.** Estructura fina espectral (%III/II) UAE.

(A <sub>450nm</sub> )					
(A <sub>450nm</sub> )					
A1	40.6%	D1	42.9%	G1	35.0%
A2	40.0%	D2	50.0%	G2	35.0%
A3	40.0%	D3	42.9%	G3	33.3%
B1	37.5%	E1	33.7%	H1	31.6%
B2	37.5%	E2	34.4%	H2	36.2%
B3	37.5%	E3	34.4%	H3	31.6%
C1	38.3%	F1	33.6%	I1	29.8%
C2	38.1%	F2	33.6%	I2	28.8%
C3	40.9%	F3	33.6%	I3	32.4%

**Fuente:** elaboración propia.

A pesar de la similitud en los espectros de absorbancia de las muestras evaluadas con las reportadas en la literatura por ejemplo la ilustrada en el marco teórico en la **Figura 15**, se pudo evidenciar una diferencia significativa en los valores de la estructura fina espectral con respecto al valor esperado para este pigmento en Hexano. Esto se puede atribuir al hecho de que la zanahoria Chantenay contiene compuestos carotenoides como el  $\alpha$ -caroteno, la Luteína y el 9-cis-caroteno<sup>87</sup>. Esto pudo haber sido un factor determinante en la proporción de las distancias de las señales arrojadas por el espectrofotómetro; puesto que, los valores porcentuales

<sup>87</sup> Y. Li, *et al.* 2012. *Op cit.* p. 28.

calculados no corresponden a ninguno de los reportados para estos compuestos presentes en la zanahoria; asimismo, las características de los espectros de absorbancia de estos no son compatibles con las observadas. De igual manera, se descarta una posible isomerización del  $\beta$ -caroteno; ya que, para los isómeros geométricos de este carotenoide, se reporta una compresión vertical del espectro; sin embargo, el factor %III/II permanece constante<sup>88</sup>. Por lo tanto, es correcto afirmar que la extracción UAE permitió una extracción menos selectiva del  $\beta$ -caroteno.

Consiguientemente, se procedió con el cálculo de la concentración del extracto según la correlación al igual que se mostró en la **Ecuación 10** nuevamente tomando como parámetros la constante de extinción molar del  $\beta$ -caroteno ( $E^{1\%}$ ) como 2590  $\text{cm}^{-1}$  y el espesor de la celda  $d$  como 1 cm, dichos resultados se muestran en la **Tabla 35** donde la concentración se expresa como mg de  $\beta$ -caroteno/ kg aceite. Para esta ocasión no se requirió de aplicar factores de dilución, pues los valores de absorbancia de las diferentes muestras no superaron el valor de 1.5, límite de tolerancia para la correlación matemática que se está empleando y para el cálculo de la concentración del extracto.

**Tabla 35.** Concentración del extracto, extracción asistida con ultrasonido.

Concentración del extracto [C] (mg $\beta$ -caroteno/kg aceite)					
A1	0.7220	D1	0.2510	G1	0.6332
A2	0.6641	D2	0.3089	G2	0.6216
A3	0.7066	D3	0.3089	G3	0.5637
$\bar{X}_A$	0.6976	$\bar{X}_D$	0.2896	$\bar{X}_G$	0.6062
$\sigma_A$	0.0299	$\sigma_D$	0.0334	$\sigma_G$	0.0372
B1	1.1004	E1	2.2317	H1	1.5444
B2	1.1506	E2	2.0695	H2	1.5521
B3	1.1853	E3	2.1158	H3	1.5058
$\bar{X}_B$	1.1454	$\bar{X}_E$	2.1390	$\bar{X}_H$	1.5341
$\sigma_B$	0.0427	$\sigma_E$	0.0835	$\sigma_H$	0.0248
C1	1.1158	F1	2.6641	I1	1.5174
C2	1.0811	F2	2.5483	I2	1.4788
C3	1.1969	F3	2.2394	I3	1.6255
$\bar{X}_C$	1.1313	$\bar{X}_F$	2.4839	$\bar{X}_I$	1.5405
$\sigma_C$	0.0594	$\sigma_F$	0.2196	$\sigma_I$	0.0761

Fuente: elaboración propia.

<sup>88</sup> RODRIGUEZ A., Delia B; KIMURA, Mieko. 2004. *Op cit.* p. 58.

**4.4.4.2 Rendimiento de extracción (Extracción UAE).** Nuevamente, tomando la definición de rendimiento de extracción como lo describe la Ecuación 15 se calculó el rendimiento de la extracción asistida con ultrasonido para cada muestra dado cada tratamiento y réplica empleando los datos registrados que constan de, la masa del aceite total y la masa de zanahoria pesada de cada muestra reportados en el desarrollo experimental.

En la **Tabla 36** se sintetizan los resultados de los valores del rendimiento de extracción definidos como mg de  $\beta$ -caroteno/ 100 g zanahoria seca.

**Tabla 36.** Rendimiento de extracción asistida con ultrasonido.

Rendimiento de extracción (mg $\beta$ -caroteno/100 g zanahoria seca)					
A1	0.2794	D1	0.0992	G1	0.2651
A2	0.2346	D2	0.1100	G2	0.2358
A3	0.2839	D3	0.1257	G3	0.2287
$\bar{X}_A$	0.2660	$\bar{X}_D$	0.1116	$\bar{X}_G$	0.2432
$\sigma_A$	0.0273	$\sigma_D$	0.0133	$\sigma_G$	0.1929
B1	0.4782	E1	0.9853	H1	0.7008
B2	0.4119	E2	0.7448	H2	0.6402
B3	0.4339	E3	0.7825	H3	0.5238
$\bar{X}_B$	0.4414	$\bar{X}_E$	0.8375	$\bar{X}_H$	0.6216
$\sigma_B$	0.0338	$\sigma_E$	0.1293	$\sigma_H$	0.0899
C1	0.4231	F1	1.0144	I1	0.5530
C2	0.4205	F2	1.0130	I2	0.5908
C3	0.4729	F3	0.9033	I3	0.6553
$\bar{X}_C$	0.4388	$\bar{X}_F$	0.9769	$\bar{X}_I$	0.5997
$\sigma_C$	0.0295	$\sigma_F$	0.0638	$\sigma_I$	0.0517

**Fuente:** elaboración propia.

Entre los primeros resultados relevantes que se pueden inferir están el rendimiento mínimo y máximo, llegando a valores de 0.0992 y 1.0144 mg de  $\beta$ -caroteno/ 100 g de zanahoria seca. Teniendo la nomenclatura establecida en el diseño experimental en el capítulo 2 (**Figura 29**), el rendimiento mínimo corresponde al tratamiento D1 ( $t = 10$  min,  $T = 40^\circ\text{C}$ ); mientras que, el máximo se trató del tratamiento F1 ( $t = 30$ ,  $T = 40^\circ\text{C}$ ). Se calculó también, el promedio del rendimiento de extracción de manera individual según el tratamiento (tiempo o temperatura) con lo cual fue posible construir la **Tabla 37** cuyos resultados se muestran a continuación.

En este caso, se observa un rendimiento promedio mayor para la variable de tiempo en un valor igual a 30 min y para la temperatura un valor de  $40^\circ\text{C}$

**Tabla 37.** Promedio del rendimiento de extracción según tratamiento aplicado.

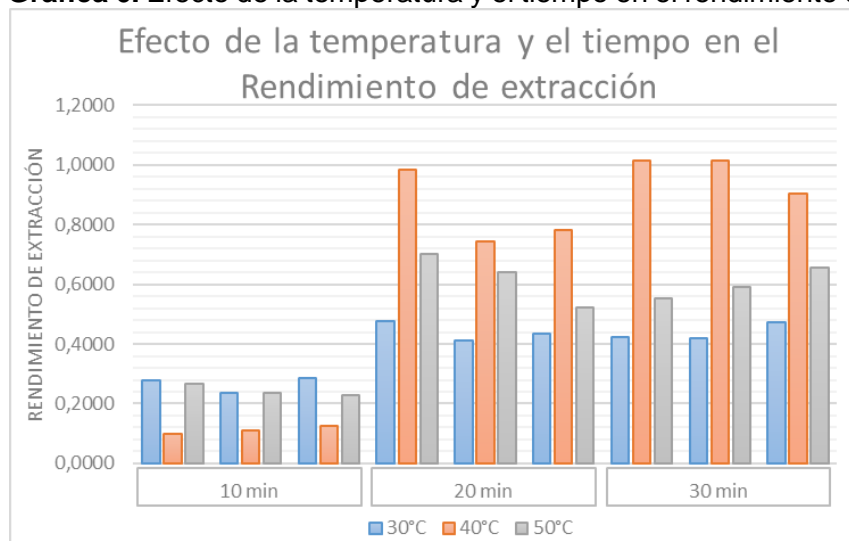
Rendimiento promedio por tratamiento					
Tiempo			Temperatura		
10 min	20 min	30 min	30°C	40°C	50°C
0.2069	0.6335	0.6718	0.3821	0.6420	0.4882

\*Nota: Rendimientos expresados en mg de  $\beta$ -caroteno/ 100 g de zanahoria seca

**Fuente:** elaboración propia.

En la **Gráfica 6** se ilustra un diagrama de columnas agrupadas donde se evidencia el efecto de la temperatura y el tiempo en el rendimiento de extracción. En este diagrama cada grupo de columnas apiladas corresponde a cada réplica realizada.

**Gráfica 6.** Efecto de la temperatura y el tiempo en el rendimiento de extracción.



**Fuente:** Elaboración propia.

Es correcto afirmar que para los valores de tiempo de extracción de 20 y 30 min los mayores rendimientos se lograron a una temperatura de 40°C; Efecto contrario se observa para un tiempo de extracción de 10 min donde esta temperatura aparentemente tiene un efecto inversamente proporcional al rendimiento de extracción. Igualmente, se puede concluir que los menores valores de rendimiento en la mayoría de los casos fueron observados a una temperatura de 30°C. El efecto de estas variables se evaluará a mayor profundidad en la sección del diseño de experimentos, que se desarrolla posteriormente en el capítulo.

Comparando los rendimientos de extracción de  $\beta$ -caroteno con los encontrados en el estudio de GOULA, Athanasia M., *et al.* se puede observar un valor significativamente menor en el caso de este estudio (0.3255 mg carotenoides/100 g de producto seco) comparado con los 1.0144 mg  $\beta$ -caroteno/100 g de zanahoria seca encontrado a las condiciones óptimas reportadas del proyecto en curso. Sin



embargo, las fuentes naturales de carotenoides evaluados son diferentes. Por otro lado, el estudio de Y. Li, *et al.* encontró un rendimiento de extracción óptimo a partir de la misma materia prima evaluada en este proyecto (zanahoria) igual a 334.75 mg  $\beta$ -caroteno/100 g de zanahoria seca, de lo cual se puede observar un rendimiento 330 veces mayor al identificado en este proyecto. Uno de los motivos principales, a los cuales se puede deber esta diferencia, tiene que ver con el equipo de extracción ultrasónico empleado en ambos estudios. Mientras que en el proyecto en cuestión se usó un equipo ultrasónico tipo baño de 37 kHz y 100 W de potencia ultrasónica; en el caso del estudio de Y. Li, *et al.* se empleó un equipo ultrasónico tipo sonda de 20 kHz y 1000 W de potencia ultrasónica. Este último equipo, la sonda ultrasónica es inmersa en la solución directamente y provee una potencia ultrasónica que es por lo menos hasta 100 veces mayor a la proporcionada por el baño ultrasónico, con un tiempo de sonicación de 5 min o menos<sup>89</sup>. Por otra parte, Sutkar *et al.*<sup>90</sup> concluyeron en su estudio, que un incremento en la intensidad ultrasónica puede mejorar los efectos de la cavitación y que debe seleccionarse una intensidad óptima dado un valor fijo de frecuencia ultrasónica. También se recomiendan temperaturas relativamente bajas para procesos en los cuales la cavitación es la causa principal de la activación<sup>91</sup>.

**4.4.4.3 Consumo energético.** El consumo energético para el caso de la extracción asistida por ultrasonido se calculó, de igual forma a la extracción convencional Soxhlet, considerando las etapas globales del proceso experimental, es decir, teniendo en cuenta los equipos usados desde el tratamiento y acondicionamiento de la materia prima (secado y trituración), hasta los equipos involucrados en el proceso extractivo (baño ultrasónico). Gracias al hecho de que la misma muestra de materia prima tratada fue usada en ambas técnicas de extracción, es decir, los procesos de secado y trituración fueron los mismos; en esta sección se retomaron estos valores y únicamente se calculó el consumo energético de la etapa de extracción asistida con ultrasonido (UAE).

El consumo energético fue calculado igualmente como el producto entre la cantidad de potencia eléctrica consumida por cada equipo y el tiempo de operación de los mismos. En la **Tabla 38** se muestran los datos y resultados de este procedimiento, el valor de consumo se presenta en unidades de Kilovátios hora (kWh).

---

<sup>89</sup> GOULA, Athanasia M, *et al.* 2017. *Op cit.* p. 66.

<sup>90</sup> V.S. Sutkar; P. R. Gogate. Design aspects of sonochemical reactors: techniques for understanding cavitation activity distribution and effect of operating parameters. *Chemical Engineering Journal* 155. 2009. Citado por: Y. Li *et al.* 2012. *Op cit.* p.28.

<sup>91</sup> V. Saez, *et al.* Characterization of a 20 kHz sonoreactor. Part 2: analysis of chemical effects by classical and electrochemical methods, *Ultrasonics Sonochemistry* 12. 2005. Citado por: *Ibid.* p. 129.

**Tabla 38.** Consumo energético, extracción convencional Soxhlet.

Equipo	Consumo unitario (kW)	Tiempo (h)	Consumo total (kWh)
Horno de secado	2.160	72	155.520
Triturador	0.650	0.042	0.027
Baño Ultrasónico	0.500	0.5	0.250
		<b>Total</b>	<b>155.797</b>

**Fuente:** elaboración propia.

El proceso global de extracción asistido con ultrasonido tuvo un consumo energético total de 155.797 kWh, de los cuales, el proceso de secado representa el 99.82% del consumo. El baño ultrasónico contribuyó a únicamente el 0.16% del consumo energético; mientras tanto, el consumo energético del proceso de trituración sigue siendo casi despreciable al mostrar un porcentaje de contribución de 0.017%.

**4.4.5 Análisis estadístico.** El diseño de experimentos, permite evaluar, a partir de modelos estadísticos, conjuntos de datos a partir de una hipótesis previamente establecida y brindan una mejor cuantificación de los resultados experimentales cuando se tiene una muestra lo suficientemente representativa. También, proporcionan una serie de herramientas que proporcionan criterios matemáticos con los cuales se puede dar una conclusión más acertada de un estudio. Asimismo, en la revisión bibliográfica se observó una serie de estudios apoyados en modelos estadísticos y del diseño de experimentos tanto para la evaluación de los resultados experimentales de la extracción de componentes bioactivos, como para la predicción del comportamiento de las variables y conformación de modelos predictivos.

**4.4.5.1 ANOVA de un solo factor (Tiempo).** Como primera instancia se optó por llevar a cabo un análisis de varianza para la variable del tiempo y su efecto en los resultados del rendimiento de extracción calculados. Con ayuda del Software MINITAB 18 se hizo uso del modelo estadístico inicialmente estableciendo las respectivas hipótesis y el nivel de significancia como se muestra en la **Imagen 21**.

**Imagen 21.** Definición del método y variables ANOVA (Tiempo)

Método		Información del factor		
Hipótesis nula	Todas las medias son iguales	Factor	Niveles	Valores
Hipótesis alterna	No todas las medias son iguales	Tiempo	3	10; 20; 30
Nivel de significancia	$\alpha = 0,05$			
<i>Se presupuso igualdad de varianzas para el análisis.</i>				

**Fuente:** programa de análisis estadístico MINITAB 18.

Posteriormente, el programa arrojó los resultados, que constan de la tabla de análisis de varianza (ver **Imagen 22 a.**) y la tabla de comparaciones presuponiendo varianzas iguales a partir del modelo de Tukey (**Imagen 22 b.**).

**Imagen 22.** Resultados ANOVA de un factor (Tiempo)

**a.** Tabla de análisis de varianza

Análisis de Varianza					
Fuente	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p
Tiempo	2	1,1986	0,59929	17,86	0,000
Error	24	0,8052	0,03355		
Total	26	2,0037			

**b.** Comparaciones en parejas de Tukey

Tiempo	N	Media	Agrupación
30	9	0,6718	A
20	9	0,6335	A
10	9	0,2069	B

**Fuente:** programa de análisis estadístico MINITAB 18.

En la tabla de análisis de varianza, dado el valor p, el cual fue menor que el nivel de significancia  $\alpha$  de 0.05, permite establecer estadísticamente que sí existe una diferencia significativa de las medias según el tiempo de extracción al cual se exponen las muestras. Por otra parte, del análisis de comparaciones en parejas del modelo de Tukey, se puede concluir que estadísticamente existe una diferencia significativa entre el tratamiento del tiempo de extracción de 10 min y de 20 min; mientras que, para el caso de los tiempos de extracción 20 y 30 min no existe diferencia alguna entre el efecto de estos tratamientos. Teniendo en cuenta la media de los tratamientos, se concluye que el tratamiento  $t = 30$  min se destaca frente a los otros dos, específicamente sobre el tratamiento  $t = 10$  min.

**4.4.5.2 ANOVA de un solo factor (Temperatura).** Seguidamente, se llevó a cabo un análisis de varianza para la variable de la temperatura y su efecto en los resultados del rendimiento de extracción calculados siguiendo un procedimiento similar al ya expuesto en el numeral anterior con ayuda del Software MINITAB 18. Los datos de entrada del modelo se muestran en la **Imagen 23**.

**Imagen 23.** Definición del método y variables ANOVA (Temperatura)

Método	
Hipótesis nula	Todas las medias son iguales
Hipótesis alterna	No todas las medias son iguales
Nivel de significancia	$\alpha = 0,05$
<i>Se presupuso igualdad de varianzas para el análisis.</i>	

Información del factor		
Factor	Niveles	Valores
Temperatura	3	30; 40; 50

**Fuente:** programa de análisis estadístico MINITAB 18.

Posteriormente, el programa arrojó los resultados, que constan de la tabla de análisis de varianza (ver **Imagen 24 a.**) y la tabla de comparaciones presuponiendo varianzas iguales a partir del modelo de Tukey (**Imagen 24 b.**).

**Imagen 24. Resultados ANOVA de un factor (Temperatura)**

**a. Tabla de análisis de varianza**

Análisis de Varianza					
Fuente	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p
Temperatura	2	0,3076	0,15378	2,18	0,135
Error	24	1,6962	0,07067		
Total	26	2,0037			

**b. Comparaciones en parejas de Tukey**

Temperatura	N	Media	Agrupación
40	9	0,642	A
50	9	0,4882	A
30	9	0,3820	A

**Fuente:** programa de análisis estadístico MINITAB 18.

De la tabla de análisis de varianza el valor p, en esta ocasión fue mayor que el nivel de significancia  $\alpha$  de 0.05, permitiendo constatar estadísticamente que no existe una diferencia significativa de las medias según la temperatura de extracción a la cual se exponen las muestras. Por otra parte, del análisis de comparaciones en parejas del modelo de Tukey, se puede concluir que estadísticamente no existe una diferencia significativa entre los tres tratamientos evaluados, dado que estos fueron ubicados en el mismo nivel de agrupación. El modelo ANOVA también permitió establecer que el tratamiento correspondiente a  $T = 40^{\circ}\text{C}$  se destaca frente a los otros dos tratamientos con respecto al valor de la media (0.642).

**4.4.5.3 Diseño factorial 3<sup>2</sup>.** Dada la topología del diseño experimental y las limitaciones técnicas que se presentaron en cuanto a la manipulación de las variables implicadas en el proceso de extracción asistido con ultrasonido (UAE), se optó por llevar a cabo un diseño de experimentos con los resultados obtenidos. Como primera evaluación, se realizó un modelo de diseño de experimentos de tipo factorial 3<sup>2</sup>. Gracias al uso del software MINITAB 18 se desarrolló el análisis estadístico para determinar el efecto de las variables tiempo y temperatura sobre el rendimiento de extracción de este método.

Se pretende analizar la variación del rendimiento de extracción de  $\beta$ -caroteno de la zanahoria por medio de solventes verdes con respecto a la temperatura de operación del tratamiento ultrasónico de la muestra a diferentes valores de tiempo de exposición a este tratamiento. Los datos se tomaron por triplicado y la variable de salida es el rendimiento de extracción expresado como mg de  $\beta$ -caroteno/100 g de producto seco (zanahoria). La hipótesis nula  $H_0$  establece que la temperatura, el tiempo y la relación de estas variables, no tiene ningún efecto sobre la variable de salida. Mientras que la hipótesis alternativa  $H_1$  sugiere que las variables evaluadas de forma independiente o conjunta sí tienen un efecto significativo en el rendimiento de extracción del pigmento.

Como se muestra en la **Imagen 25** el primer paso consistió en definir el modelo estadístico dada la naturaleza de los datos. Como factores, se tiene el tiempo y la temperatura, con sus niveles respectivos (10, 20 y 30 min) para el primero y (30, 40 y 50°C) para el segundo. Cada uno con 3 réplicas, para un total de 27 corridas.

**Imagen 25.** Definición de parámetros análisis estadístico

Resumen del diseño				Información del factor		
Factores:	2	Réplicas:	3	Factor	Niveles	Valores
Corridas base:	9	Total de corridas:	27	Tiempo	3	10; 20; 30
Bloques base:	1	Total de bloques:	1	Temperatura	3	30; 40; 50

**Fuente:** Programa de análisis estadístico, MINITAB 18.

Seguido a esto, fueron establecidos los datos correspondientes a cada tratamiento y réplica. El nivel de confiabilidad del modelo o valor de  $\alpha$  fue de 0.05. Finalmente, el programa llevó a cabo el proceso de cálculo llegando a los resultados que se muestran en la **Imagen 26**.

**Imagen 26.** Resultados análisis de varianza modelo factorial.

Análisis de Varianza					
Fuente	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p
Modelo	8	1,93401	0,241751	62,40	0,000
Lineal	4	1,50615	0,376539	97,19	0,000
Tiempo	2	1,19859	0,599294	154,69	0,000
Temperatura	2	0,30757	0,153783	39,69	0,000
Interacciones de 2 términos	4	0,42785	0,106963	27,61	0,000
Tiempo*Temperatura	4	0,42785	0,106963	27,61	0,000
Error	18	0,06974	0,003874		
Total	26	2,00374			

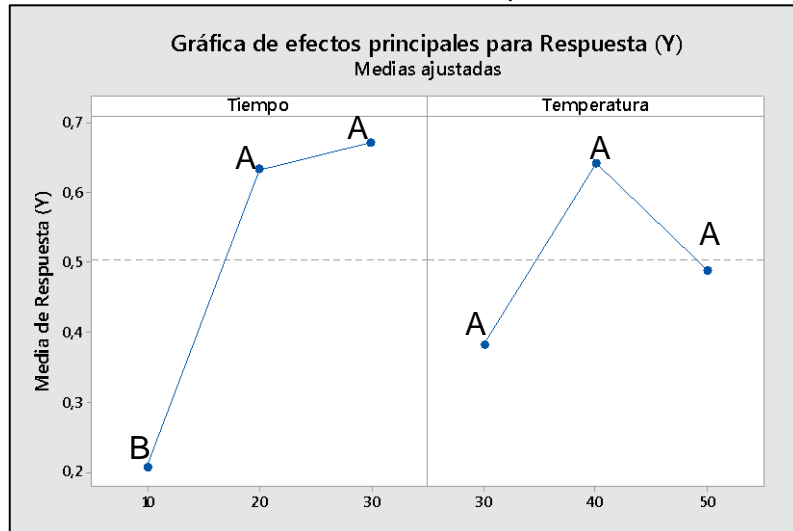
Resumen del modelo			
S	R-cuad.	R-cuad. (ajustado)	R-cuad. (pred)
0,0622428	96,52%	94,97%	92,17%

**Fuente:** programa de análisis estadístico, MINITAB 18.

El valor  $p$  del modelo indica la significancia de las variables o su efecto en la variable de respuesta, si este valor es menor al nivel de confiabilidad establecido ( $p < \alpha$ ) significa que el tratamiento evaluado tiene un efecto significativo, de lo contrario, significa que esta no tiene relación, estadísticamente. En esta ocasión se evidenció que tanto el tiempo, como la temperatura y la interacción de estos dos términos tienen un efecto significativo en el rendimiento de extracción al presentar valores  $p$  de orden bajo y menores que  $\alpha$ . Otro factor importante del modelo fue el coeficiente de correlación predecible, el cual muestra una proximidad relevante al 100%, resaltando nuevamente el grado del efecto de las variables evaluadas en la variable de salida.

En la **Gráfica 7** se muestran los efectos de las variables con respecto al variable de salida, donde se confirma el comportamiento observado en el análisis de resultados de la sección “3.4.4.2. Rendimiento de extracción (Extracción UAE)” en el cual se evidencia un rendimiento de la extracción mayor para una temperatura de 40°C y un tiempo de extracción de 30 min. De igual forma, se evidencian las agrupaciones calculadas en el análisis de contraste por el método de parejas de Tukey.

**Gráfica 7.** Efecto de las variables manipuladas con la variable de respuesta.



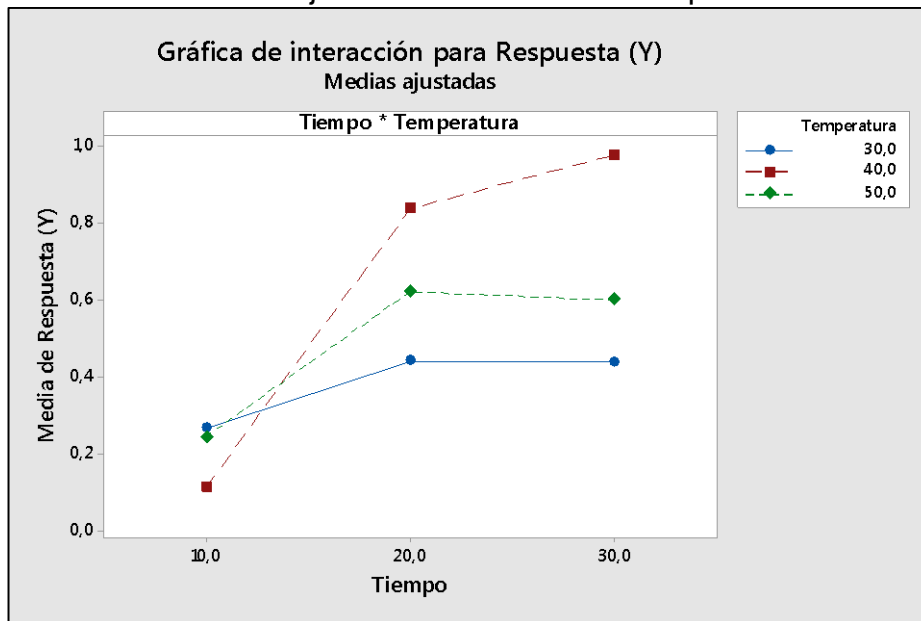
**Fuente:** programa de análisis estadístico MINITAB 18.

Igualmente, en la **Gráfica 8**, se corrobora lo establecido en la misma sección mencionada con respecto al efecto de la interacción de las variables del tiempo y temperatura, encontrando un rendimiento máximo para el tratamiento conducido a 40°C y 30 min de extracción. Se puede decir someramente que, en relación con el tiempo de extracción se observa un comportamiento creciente y directamente proporcional con el rendimiento de extracción del  $\beta$ -caroteno. Lo contrario se observa con la temperatura de extracción donde, al parecer, las temperaturas menores a los 35°C y mayores a los 46°C muestran un efecto desfavorable para el rendimiento de extracción, ya que los valores promedio de este parámetro para estos valores de temperatura son inferiores al promedio global del rendimiento de extracción.

Uno de los motivos que pueden explicar este comportamiento se atribuye a la retención de carotenoides de la zanahoria, la cual se puede ver reducida por tiempos de procesamiento prolongados, temperaturas altas de procesamiento y por cortes o trituración durante su tratamiento previo a la extracción. La retención se puede mejorar significativamente reduciendo los tiempos de procesamiento, la

temperatura y acortar los tiempos muertos entre las etapas de pelado, corte y procesamiento<sup>92</sup>.

**Gráfica 8.** Efecto conjunto de las variables manipuladas.



**Fuente:** programa de análisis estadístico MINITAB 18.

De igual forma es válido afirmar que, a pesar del análisis de varianza para la temperatura, el cual mostró que no existe una diferencia estadística entre el tratamiento de temperatura y el rendimiento de extracción; en la gráfica de efectos y de interacción, por el contrario, sí se evidencia una variación entre los resultados del rendimiento, motivo por el cual, sería necesario ahondar en las causas de este comportamiento.

**4.4.6 Comparación del rendimiento de las técnicas de extracción.** Una vez analizados los resultados encontrados para las técnicas evaluadas se procedió con el análisis comparativo de las mismas. Es importante aclarar inicialmente que, el fundamento técnico y el principio de extracción de la extracción Soxhlet y la extracción asistida por ultrasonido en un comienzo, no podrían ser comparados de manera directa. No obstante, gracias a la metodología y la técnica establecida y a los procedimientos adoptados principalmente por los trabajos de GOULA, Athanasia M., *et al.* y Y. Li, *et al.*<sup>93</sup>. fue posible llevar a cabo la comparación con base en el análisis del aceite enriquecido con  $\beta$ -caroteno obtenido al final del procedimiento experimental y analizado a través de la técnica equivalente para ambos extractos.

<sup>92</sup> RODRIGUEZ A., Delia B; KIMURA, Mieko, 2004. *Op cit.* p.58.

<sup>93</sup> GOULA, Athanasia M, *et al.*, 2017. *Op cit.* p. 66.

Como segunda instancia se determinó que, para la comparación en cuestión, se tomarán los resultados de la concentración y del rendimiento de extracción máximos encontrados en cada técnica, al igual que los parámetros energéticos previamente calculados en las secciones del consumo energético.

En la **Tabla 39** se resumen los parámetros y resultados más relevantes que se tendrán en cuenta para el análisis comparativo de las técnicas de extracción evaluadas.

**Tabla 39.** Comparación rendimiento de extracción por ambas técnicas

Parámetro	Extracción Soxhlet	Extracción UAE
Temperatura (°C)	70	40
Tiempo (min)	360	30
Concentración [C] (mg β-caroteno/kg aceite)	56.4795	2.6641
Rendimiento Y (mg β-caroteno/100 g B.S.)	21.7838	1.0144
Consumo energético total (kWh)	159.735	155.797
Consumo energético extracción (kWh)	4.188	0.250

**Fuente:** elaboración propia.

De esta tabla se puede deducir inicialmente, que tanto la concentración del extracto, como el rendimiento de la extracción muestra valores mayores para la técnica Soxhlet, siendo significativamente mayor (21.2 veces) para el caso de la concentración del extracto [C]; mientras que en el caso del rendimiento del extracto la este fue 21.5 veces mayor. La diferencia en la proporción de la concentración puede explicarse por el hecho de que la técnica Soxhlet permite el contacto continuo y el flujo permanente del solvente dentro del sistema promoviendo la interacción de las partículas sólidas con la fase móvil; además, la variable principal que se encarga de hacer posible la extracción es la temperatura de calentamiento, ya que de esta depende la volatilización del solvente de extracción. En el caso de la extracción asistida con ultrasonido, el solvente permanece inmóvil y el proceso extractivo solo se limita a la interacción del mismo con el área superficial de las partículas sólidas disponible y la variable responsable de promover la extracción es la difusión de las ondas ultrasónicas que facilitan la formación de micro burbujas y su posterior colapso (cavitación) generando focos localizados de temperatura y presión al interior del solvente. Parte de la disminución de la concentración y el rendimiento del β-caroteno tiene que ver con los efectos viscosos que actúan en la medida que las ondas ultrasónicas viajan por el medio. La alta viscosidad del aceite es un problema mayor, que resulta en una baja difusividad y como consecuencia, en un rendimiento bajo de extracción incluso a altas temperaturas<sup>94</sup>.

<sup>94</sup> GOULA, Athanasia M, *et al.* 2017. *Op cit.* p. 66.



Por otra parte, errores experimentales comunes pudieron ocurrir como por ejemplo la variación del estado natural de la matriz y la conservación de la calidad de las muestras del alimento, durante los procedimientos de preparación de muestras, extracción y almacenamiento. La inestabilidad de los carotenoides es una de las dificultades más grandes que se presentan en la etapa de análisis, por este motivo se recomienda llevar a cabo el análisis en el menor tiempo posible, evitar contacto directo con el oxígeno y con la luz directa, evitar exposición a altas temperaturas y prevenir el contacto con ácidos o impurezas tóxicas de solventes contaminados<sup>95</sup>. En cuanto a el rendimiento, la diferencia entre las técnicas es igualmente significativa puesto que, este parámetro es proporcional a la concentración del extracto; sin embargo, la técnica de extracción asistida con ultrasonido UAE muestra ser efectiva si se tiene en cuenta lo siguiente.

Como primera ventaja de la extracción asistida con ultrasonido se tiene el uso de temperaturas menores del proceso, puesto que esta no depende directamente con las propiedades físico-químicas del solvente. Al usar una temperatura 30°C menor que la empleada en la extracción Soxhlet se observan dos beneficios principales; el primero tiene que ver con la disminución de la probabilidad de degradación o desnaturalización de la molécula del compuesto bioactivo. S. Chemat, *et al*<sup>96</sup>, compararon la extracción convencional y la asistida con ultrasonido de carvona y limoneno de semillas de alcaravea, reportaron que las energías de activación para el procedimiento ultrasónico son mucho menores comparadas con las obtenidas en el procedimiento controlado, lo que explica el mejoramiento de la extracción en las pruebas ultrasónicas a bajas temperaturas<sup>97</sup>. Como segunda instancia, se encontró una disminución en el consumo energético, del cual se puede observar que, desde un punto de vista global del proceso, la disminución de este factor en esta técnica innovadora es del 2.527%; pero, desde un punto de vista local, es decir, sólo teniendo en cuenta el consumo de energía en el proceso de extracción, se observó un consumo 16.752 veces menor. Lo último sin tener en cuenta el consumo de energía que estaría asociado a la refrigeración del sistema Soxhlet y los procesos posteriores a la extracción destinados a la purificación del extracto. Esta purificación del extracto es necesaria para el proceso Soxhlet muestra ser otra desventaja, puesto que en esta técnica se usa convencionalmente solventes tóxicos que pueden contaminar el componente bioactivo y en algunos casos promueven a la degradación del mismo.

Una de las mayores ventajas de las técnicas evaluadas, tiene que ver con el uso de un solvente verde, en este caso, aceites de origen vegetal. Inicialmente, gracias a su conveniencia, fácil acceso y bajo costo. Asimismo, los aceites vegetales

---

<sup>95</sup> RODRIGUEZ A., Delia B; KIMURA, Mieko. 2004. *Op cit.* p. 58.

<sup>96</sup> S. Chemat, *et al.* Comparison of conventional and ultrasound-assisted extraction of carvone and limonene from caraway seeds, *Flavour Fragrance*. Citado por: GOULA, Athanasia M., *et al.* 2017 *Op cit.* p.66.

<sup>97</sup> *Ibid.* p.137.

comestibles han demostrado tener un buen potencial como solventes para la extracción de compuestos deseados. Y. Li, *et al*<sup>98</sup>. no encontraron evidencia alguna de la degradación de carotenoides en el aceite de girasol expuesto a ultrasonido; sino que también este permitió extraer una cierta cantidad de  $\beta$ -caroteno, el cual puede tener un uso posterior directo como colorante natural disminuyendo el riesgo de contaminación de los productos a los cuales este compuesto estaría destinado. En contraste, algunas de las limitaciones del uso de aceites vegetales, como el aceite de girasol tiene que ver con la dificultad de analizar el extracto obtenido por la alta viscosidad del medio y, por otra parte, el control estricto que se debe tener sobre la oxidación de los lípidos presentes en el aceite, que pueden contaminar y degradar el carotenoide de interés<sup>99</sup>.

Como conclusión se puede constatar que el proceso de extracción de  $\beta$ -caroteno a partir de zanahoria Chantenay mediante Ultrasonido a las condiciones establecidas presentó un rendimiento de extracción bajo, comparado con la técnica convencional de extracción Soxhlet y los a los resultados reportados en estudios que emplearon la misma materia prima y solvente de extracción. Algunos de los motivos que llevaron a esta afirmación están asociados a las restricciones técnicas, las características del equipo ultrasónico ocupado y los efectos del solvente de extracción seleccionado.

En las características cualitativas del extracto final se logró evidenciar un cambio en la coloración del aceite, indicando un enriquecimiento del mismo con  $\beta$ -caroteno y otros carotenoides presentes de la zanahoria. Además, se pudo constatar la posibilidad de usar aceites vegetales comestibles como solventes alternativos para la extracción de compuestos bioactivos, gracias a su bajo costo, conveniencia y uso seguro. No obstante, se requiere ejecutar un mayor control de los parámetros del proceso, desde la etapa de acondicionamiento de la materia prima, su conservación y almacenamiento; al igual que las variables seleccionadas para el proceso extractivo como tiempo, temperatura, tamaño de partícula. También, asegurar la conservación correcta del extracto final obtenido y la calidad del aceite a emplear

---

<sup>98</sup> Y. Li *et al.* 2012. *Op cit.* p.28

<sup>99</sup> Y. Li *et al.* 2012. *Op cit.* p.28.

## 5. DISEÑO PRELIMINAR DEL PROCESO DE EXTRACCIÓN

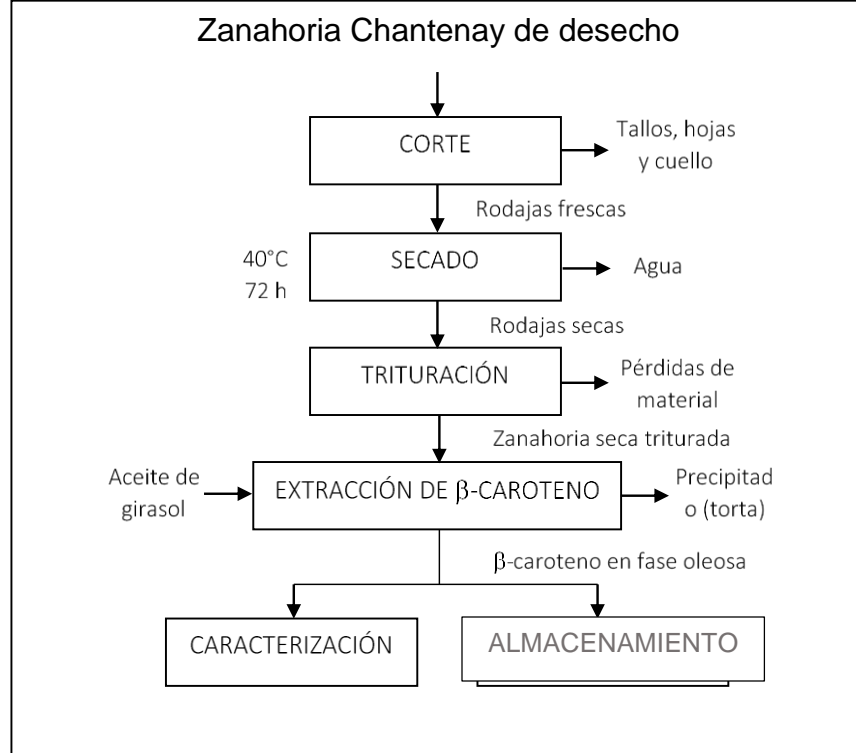
En este capítulo se establecen los requerimientos técnicos del proceso de extracción de  $\beta$ -caroteno aplicando la técnica asistida con ultrasonido a escala piloto, tomando como punto de partida los resultados observados y el análisis llevado a cabo en el desarrollo experimental. Se exponen también, los balances de materia y energía de cada etapa involucrada en el proceso teniendo en cuenta los requerimientos técnicos del proceso y los volúmenes y cantidades de material que se emplean para procesos a dicha escala y apoyándose en la teoría del diseño de procesos químicos y escalado de procesos. Posteriormente se desarrolla el dimensionamiento de los equipos, donde se establecen sus características principales como tamaño, forma, material de construcción y operación. Por último, se muestran los respectivos diagramas de bloques y de proceso donde se reúnen los resultados encontrados en la etapa previa y una propuesta tentativa de la distribución de la planta física.

El soporte teórico de este capítulo se basa en artículos, publicaciones de revistas científicas, libros y manuales donde se describen los parámetros y pasos relevantes para la síntesis de procesos químicos a escala piloto, a partir de diseños experimentales a escala laboratorio.

### 5.1 DESCRIPCIÓN GENERAL

La extracción de  $\beta$ -caroteno contenido en la zanahoria variedad Chantenay (*Daucus carota L.*), requiere de un tratamiento y procesamiento con la intención de obtener un extracto de características específicas que le permitan su posible aplicación directa como aditivo o colorante natural similar al producto E160a en la industria de alimentos o farmacéutica. Las especificaciones técnicas que a continuación se determinan, están fundamentadas en el análisis del proceso a escala laboratorio previamente desarrollado, teniendo en cuenta los parámetros evaluados y siguiendo un proceso de escalado a nivel piloto. Las cantidades de materia prima y demás reactivos serán calculados a partir de balances de materia de cada etapa, al igual que los requerimientos energéticos a través de balances de energía proceso partiendo de factores de escala direccionados a las cantidades típicamente usadas a este nivel de producción. Tomando en consideración lo observado en el desarrollo experimental se muestra en el diagrama de bloques (**Figura 35**) donde se especifican las diferentes etapas que componen el proceso en cuestión, las cuales serán evaluadas y tomadas en cuenta para el dimensionamiento a la escala ya mencionada.

**Figura 35.** Diagrama de bloques etapas generales del proceso.



**Fuente:** elaboración propia.

## 5.2 PARÁMETROS TÉCNICOS DEL PROCESO

Como punto de partida para el proceso de escalado a nivel piloto, se estableció el promedio de la cantidad de zanahoria variedad Chantenay descartada por la empresa Hortalizas Boyacá S.A.S. cuyo valor fue de 1 Ton al día, teniendo en cuenta que este valor puede variar a lo largo del año; sin embargo, la capacidad típica de los procesos a escala piloto sugiere una cantidad de 1 – 5 kg de materia o 1 – 100 L de líquido o gas por hora<sup>100</sup>. Otro parámetro al cual se acudió tiene que ver con el rendimiento de extracción, el cual, gracias al desarrollo experimental y a los resultados encontrados fue posible establecer las mejores condiciones de extracción para el proceso. Estudios de escalado a nivel piloto de la extracción asistida con ultrasonido de β-caroteno directamente de los desechos de zanahoria no han sido reportados previamente en la literatura, por esto se acudieron a los resultados encontrados a escala laboratorio. Es importante resaltar en este punto, que el diseño de procesos a escala piloto permite la investigación de un producto y un proceso en una escala intermedia antes de invertir cantidades altas de dinero en

<sup>100</sup> EDWARDS, David. Scaling up step by step. Biofuels commercialisation. Green Power Conferences. 2012. p. 45

un proceso a escala industrial; además, usualmente no es posible predecir los efectos de un incremento de varias medidas en la escala<sup>101</sup>.

**5.2.1 Análisis dimensional.** El análisis dimensional es una herramienta que permite determinar la cantidad de materia, reactivos o compuestos necesarios para un proceso dada la cantidad de alguno de estos como referencia y un factor de escala definido por una serie de proporciones o relaciones asociadas al rendimiento de las diferentes etapas que componen el proceso. Este valor de referencia para el proceso a escala piloto consiste en la cantidad de materia prima seca sugerida por la literatura la cual, en este caso será de 5 kg/h de zanahoria seca que se alimenta al baño ultrasónico, dado el rango de flujo de materia convencional para procesos a esta escala. A continuación, se muestra el procedimiento seguido para el cálculo de las demás cantidades de materia que se adoptarán para el proceso de escalado a nivel piloto teniendo en cuenta los factores de escala definidos como el rendimiento de los flujos de materia en el proceso de extracción a partir de los factores experimentales que corresponden al promedio de la masa de zanahoria seca pesada, masa de aceite pesado, promedio del rendimiento de extracción para las 3 réplicas de la prueba a condiciones de mayor rendimiento de extracción (40°C y 30 min) y el peso promedio del precipitado o torta remanente del proceso de extracción.

$$\begin{aligned}
 5.0 \frac{kg}{h} \text{ Zanahoria seca} * \left( \frac{7.9836 \times 10^{-3} \text{ kg Aceite de girasol}}{2.0274 \times 10^{-3} \text{ kg zanahoria seca}} \right) \\
 &= 19.6892 \text{ kg/h Aceite de girasol} \\
 5.0 \frac{kg}{h} \text{ Zanahoria seca} * \left( \frac{0.9769 \text{ mg } \beta \text{ caroteno}}{0.1 \text{ kg zanahoria seca}} \right) \\
 &= 48.846 \text{ mg/h } \beta \text{ caroteno} \\
 5.0 \frac{kg}{h} \text{ Zanahoria seca} * \left( \frac{2.309 \times 10^{-3} \text{ kg precipitado (torta)}}{2.0274 \times 10^{-3} \text{ kg zanahoria seca}} \right) \\
 &= 5.6953 \frac{kg}{h} \text{ precipitado(torta)}
 \end{aligned}$$

Estos valores corresponden a algunas de las corrientes de entrada y salida del proceso global de extracción. En la sección “Balances de materia” servirán como parámetros o datos especificados de los cuales se apoyará el cálculo de las demás corrientes.

---

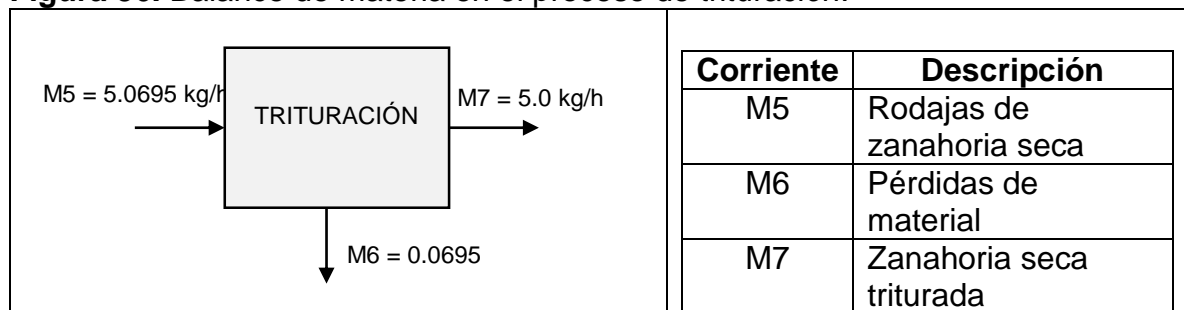
<sup>101</sup> ISLAM, Khairul. Pilot Plant Scale-up Technique. Department of Applied Chemistry & Chemical Engineering. Rajshahi university. 2016. p. 5

**5.2.2 Materia prima.** Como se pudo observar en la sección 3.4.2. algunos de los parámetros bromatológicos de la zanahoria dependen de las condiciones de almacenamiento, transporte y empaque como, disminución en el contenido de carbohidratos (azúcares) y el contenido de humedad del alimento; no obstante, la empresa Hortalizas Boyacá S.A.S. produce una cantidad de zanahoria Chantenay descartada de aproximadamente 3.5 Ton diarias. Por lo cual se tendrá acceso a esta hortaliza de manera continua a medida que el proceso lo requiera y no será necesario acudir a refrigeradores o sistemas de control de temperatura a las condiciones recomendadas para almacenar esta materia prima.

**5.2.3 Balances de materia.** El cálculo de los balances de materia consistió en el análisis de cada operación unitaria o de transformación y, teniendo en cuenta los valores encontrados en el análisis dimensional calculados a partir de la base de cálculo establecida (5 kg/h) correspondiente a la cantidad de zanahoria seca triturada. Como datos adicionales se tendrán en cuenta las pérdidas de material reportadas a lo largo del desarrollo experimental, que se mencionarán a medida que se realicen los balances.

**5.2.3.1 Trituración.** El procedimiento de cálculos de balance de materia inicia en esta etapa, puesto que de esta se tomó la base de cálculo a través del análisis dimensional que corresponde a la cantidad de zanahoria seca triturada propuesta (5.0 kg/h de zanahoria seca). La trituración de la zanahoria seca, consiste en la reducción de tamaño de las rodajas con el objetivo de aumentar el área superficial que estará en contacto con el solvente de extracción (aceite de girasol). Las corrientes de materia que componen este proceso se encuentran asociadas gracias a la base de cálculo seleccionada que se conoce como la corriente M7, y el porcentaje de pérdidas de material igualmente establecido en el desarrollo experimental (1.37%). A continuación, en la Figura 36 se muestra el procedimiento para el balance de materia en el proceso de trituración.

**Figura 36.** Balance de materia en el proceso de trituración.



**Fuente:** elaboración propia.

En la **Ecuación 17** se muestra la ecuación global del balance de materia para el proceso de trituración y datos adicionales empleados para el cálculo de las corrientes.

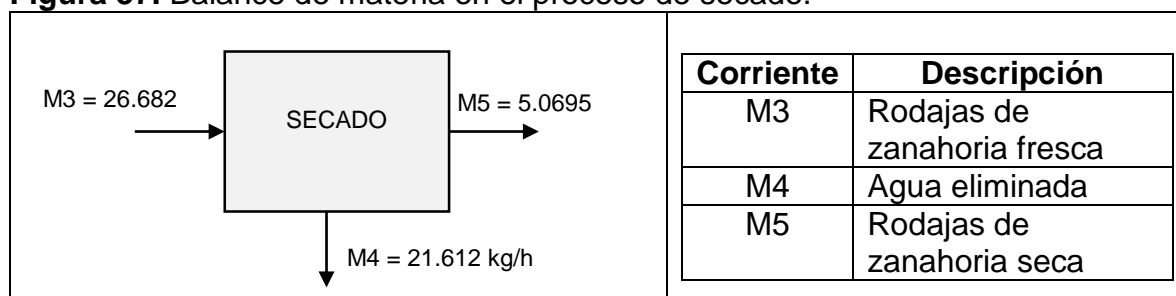
**Ecuación 17.** Balance de materia proceso de trituración y datos adicionales.

$$M5 = M6 + M7 \quad \text{donde, } M6 = 0.0137 (M5)$$

**Fuente:** elaboración propia.

**5.2.3.2 Secado.** El proceso de secado es una operación unitaria que tiene como objeto reducir el contenido de humedad de la zanahoria sólida cortada en rodajas a partir de una fuente de calor directa, o bien, un flujo de aire caliente. De las corrientes involucradas, se conoce La masa de rodajas de zanahoria seca (M5) previamente calculada (**Figura 37**). Como dato adicional, se conoce el porcentaje de agua removida (98.82%) definido por la Ecuación 13 en la sección “3.1.5. Tratamiento de la muestra”.

**Figura 37.** Balance de materia en el proceso de secado.



**Fuente:** elaboración propia.

En la **Ecuación 18** se muestra la ecuación global del balance de materia para el proceso de secado y se muestra también la relación del porcentaje de eliminación de agua (81%) con respecto al material seco.

**Ecuación 18.** Balance de materia proceso de secado y datos adicionales.

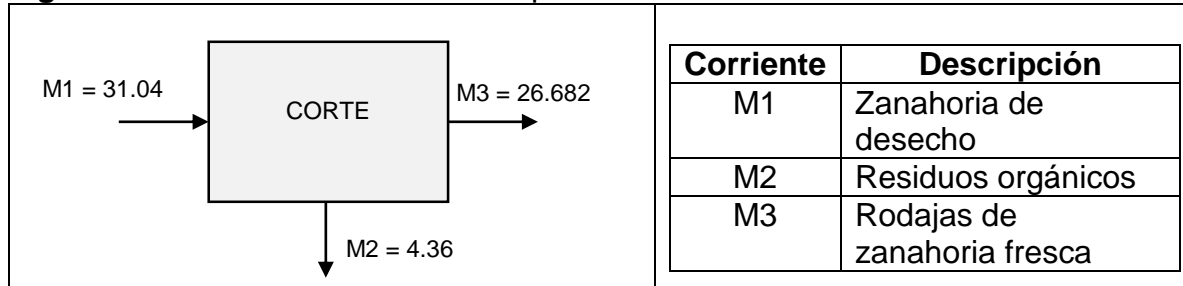
$$M3 = M4 + M5 \quad \text{donde, } M5 = 0.19 (M3)$$

**Fuente:** elaboración propia.

**5.2.3.3 Corte.** El proceso de corte consiste en la eliminación de los tallos, hojas y el cuello de la zanahoria, puesto que este material no contiene el material bioactivo de interés y se trata de materia orgánica residual que podría afectar el rendimiento en la extracción. Por otra parte, tiene como objetivo cortar en rodajas delgadas las raíces para facilitar el proceso de secado posterior. Se conoce la masa de las rodajas de zanahoria fresca (M3) y, de igual forma, el porcentaje de eliminación de material residual (14.04%) basado en los resultados arrojados en la etapa de tratamiento en el desarrollo experimental.

En la **Figura 38** se muestra el balance de materia para el proceso de corte donde se especifica la información de cada corriente.

**Figura 38.** Balance de materia en el proceso de corte.



**Fuente:** elaboración propia.

En la **Ecuación 19** se muestra la relación global del balance de materia para el proceso de corte y datos adicionales empleados para el cálculo de las corrientes.

**Ecuación 19.** Balance de materia proceso de corte y datos adicionales.

$$M1 = M2 + M3 \quad \text{donde, } M2 = 0.1404 (M1)$$

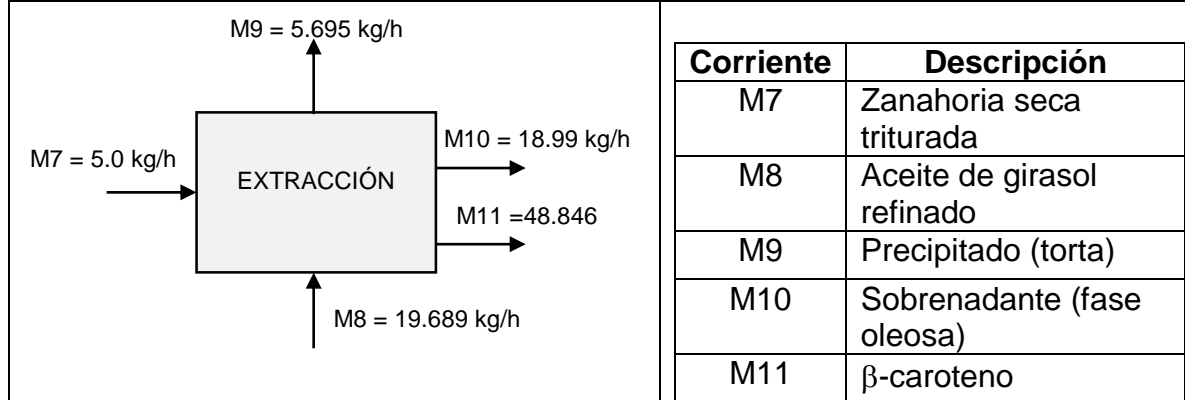
**Fuente:** elaboración propia.

Se pudo determinar que este proceso requiere de 31.04 kg/h de zanahoria Chantenay descartada; sin embargo, dada la estacionalidad del proceso de secado (72h) que limita el flujo de materia en los procesos previos, el flujo real de la corriente M1 será de 31.04 kg de zanahoria fresca cada 72 h.

**5.2.3.4 Extracción asistida con ultrasonido.** La operación de extracción es el proceso más relevante pues en esta etapa ocurre la obtención del carotenoide a través del enriquecimiento del aceite al ser expuesto a ondas ultrasónicas generadas por el sistema. Esta etapa del proceso en específico es de tipo batch o por lotes, ya que la materia que se alimenta debe permanecer durante un tiempo  $t$  en la unidad de proceso para lograr la extracción como se observó en la experimentación a escala laboratorio. El funcionamiento de esta operación unitaria se aproxima a la de un reactor tipo batch, puesto que, a pesar de que no ocurren reacciones químicas conocidas en su interior, al final del proceso se logra obtener un extracto en solución con la fase oleosa como resultado de los fenómenos del equilibrio de fases y la transferencia de masa. A continuación, se muestra el balance de materia en el reactor (Figura 39) donde la masa de aceite de girasol es calculada a partir del volumen requerido obtenido en el análisis dimensional y la densidad del mismo reportada en el capítulo anterior. De igual forma se conoce la cantidad de precipitado (torta) (M9) gracias al análisis dimensional.



**Figura 39.** Balance de materia en el proceso de extracción.



**Fuente:** elaboración propia.

Gracias a los datos reportados del peso de la torta o precipitado luego de la extracción UAE, fue posible calcular el porcentaje promedio de retención de aceite definido como la relación entre la masa promedio zanahoria pesada y el peso promedio del precipitado o torta de las muestras que arrojaron un mayor rendimiento de extracción obtenida por la diferencia del peso del tubo con la torta menos el peso del tubo de ensayo y apoyándose en la **Ecuación 20**, el cual arrojó un valor promedio de 13.91%.

**Ecuación 20.** Porcentaje de retención de aceite

$$\%Retención\ aceite = \left[ \left( \frac{\text{Peso promedio de precipitado (torta)}}{\text{Peso promedio zanahoria seca pesada}} \right) - 1 \right] \times 100$$

**Fuente:** elaboración propia.

En la **Ecuación 21** se muestra la ecuación global del balance de materia para el proceso de extracción.

**Ecuación 21.** Balance de materia proceso de extracción.

$$M7 + M8 = M9 + M10 + M11 \quad \text{donde,} \quad M9 = (1 + 0.1391) * M7$$

**Fuente:** elaboración propia.

**5.2.4 Balances de energía.** Los balances de energía proporcionan información básica de los requerimientos de potencia a partir de los flujos de energía que ocurren en un proceso u operación unitaria. En esta sección se determina la cantidad de calor a transferir o retirar en las etapas que lo requieren tomando como referencia la masa de material que entra a cada sistema ( $m$ ) y la diferencia de temperatura del mismo.

Para todas las operaciones unitarias a excepción de la etapa de extracción, se supone un valor de temperatura inicial constante, igual a la temperatura media anual local donde se encuentra ubicada la empresa Hortalizas Boyacá S.A.S. que tiene un valor de 13.1 °C<sup>102</sup>. En el caso del proceso de secado, este es un proceso de tipo indirecto, es decir, este ocurre mediante fuentes calefactoras que evaporan en agua a eliminar del material húmedo, dadas las características observadas del horno de secado usado a escala laboratorio. Por lo anterior, el análisis del consumo energético para esta operación unitaria será calculado directamente con información bibliográfica de hornos de secado de escala piloto a partir de la potencia de operación de estos, considerando la cantidad de zanahoria a procesar.

**5.2.4.1 Extracción asistida con ultrasonido.** La extracción del β-caroteno, al igual que en el proceso a escala laboratorio, consiste de un baño ultrasónico donde se usa agua como medio difusor de las ondas ultrasónicas. Por cada ciclo de operación de extracción la temperatura del sistema inicia a un valor igual a la temperatura media local (13.1°C) y se lleva hasta las condiciones máximas de rendimiento observadas en el desarrollo experimental (40°C). El volumen de agua fue calculado siguiendo un procedimiento similar al mostrado en el análisis dimensional donde se calculó el promedio del peso zanahoria – aceite total por corrida con el volumen de llenado del vaso de precipitado para la extracción (450 mL); obteniendo un valor de 123.67 L el cual se aproximó a los 125 L. La masa se calculó con la densidad del agua a la temperatura promedio (26.55°C) reportado como 997.062 kg/m<sup>3</sup> <sup>103</sup>. El calor específico del agua fue consultado para una temperatura promedio (26.55°C) encontrando un valor de 4.18 kJ/kg °C<sup>104</sup>. En la Ecuación 22 se observa el cálculo de la energía que se requiere adicionar del sistema.

**Ecuación 22.** Balance de energía proceso de extracción.

$$Q = m \times Cp \times \Delta T$$

$$Q = 124.633 \text{ kg} \times 4.18 \frac{\text{kJ}}{\text{kg} \text{ } ^\circ\text{C}} \times (40^\circ\text{C} - 13.1^\circ\text{C})$$

$$Q = 14,013.956 \text{ kJ}$$

**Fuente:** elaboración propia.

<sup>102</sup> Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales IDEAM. Clima, Promedios Climatológicos 1981 – 2010. En: ideam.gov.co

<sup>103</sup> CENGEL, Yunus A.; BOLES, Michael A. Termodinámica. Apéndice 1, Tablas de Propiedades, Figuras y Diagramas (Unidades SI). 7ma Ed. Editorial McGrawHill. ISBN 978-607-15-0743-3. 2012. p. 912.

<sup>104</sup> Ibid, p. 146.

La **Ecuación 22** describe la cantidad de energía a retirar para mantener la materia prima a las condiciones establecidas.

La potencia del control de temperatura del baño ultrasónico se calcula (**Ecuación 23**) como la energía requerida y el tiempo de operación, que corresponde a 30 min; o tiempo en el que estará en operación por ciclo de extracción.

**Ecuación 23.** Potencia del sistema de control de temperatura, baño ultrasónico.

$$P (W) = \frac{|Q (J)|}{t (s)}$$
$$P (W) = \frac{|14,013.956 \text{ kJ}|}{30 \text{ min}} \times \frac{1,000 \text{ J}}{1 \text{ kJ}} \times \frac{1 \text{ min}}{60 \text{ s}}$$
$$P = 7,785.531 \text{ W} \rightarrow 7.786 \text{ kW}$$

**Fuente:** elaboración propia.

**5.2.4.2 Almacenamiento del producto terminado.** Ejemplares comerciales de  $\beta$ -caroteno en fase oleosa (aceite de maíz) al 30%, por ejemplo, recomiendan un almacenamiento del extracto a una temperatura de 15°C para evitar el efecto oxidativo de la temperatura sobre el carotenoide extraído. Suponiendo que la temperatura del extracto es igual a la temperatura final de extracción (40°C) y que la capacidad calorífica de la solución corresponde a la dada por el aceite de girasol (2.146 kJ/kg °C) a una temperatura promedio (27.5°C), se calcula la cantidad de calor que debe ser retirada del sistema (Ecuación 24) para así, calcular la potencia mínima requerida para el refrigerador.

**Ecuación 24.** Balance de energía proceso de refrigeración del producto terminado.

$$Q = m \times Cp \times \Delta T$$
$$Q = 18.994 \text{ kg} \times 2.146 \frac{\text{kJ}}{\text{kg} \text{ } ^\circ\text{C}} \times (15^\circ\text{C} - 40^\circ\text{C})$$
$$Q = -1,019.03 \text{ kJ}$$

**Fuente:** elaboración propia.

La **Ecuación 24** describe la cantidad de energía a retirar para mantener el extracto a las condiciones establecidas.

La potencia del refrigerador se calcula como la energía a retirar requerida y el tiempo de operación, que se supone como 24 h del día (**Ecuación 25**).

**Ecuación 25.** Potencia del refrigerador de almacenamiento del producto terminado.

$$P (W) = \frac{|Q (J)|}{t (s)}$$
$$P (W) = \frac{|-1,019.03 \text{ kJ}|}{24 \text{ h}} \times \frac{1,000 \text{ J}}{1 \text{ kJ}} \times \frac{1 \text{ h}}{3,600 \text{ s}}$$
$$P = 11.79 \text{ W} \rightarrow 0.01179 \text{ kW}$$

**Fuente:** elaboración propia.

### 5.3 ESPECIFICACIONES TÉCNICAS DE LOS EQUIPOS

Tras haber calculado y especificado los parámetros fundamentales y haber determinado los requerimientos de materia y energéticos que se ven involucrados en el proceso de extracción de  $\beta$ -caroteno a escala piloto, el paso a seguir consistió en establecer las especificaciones técnicas de los equipos del proceso en su totalidad, es decir, desde la recepción de la materia prima, hasta el almacenamiento del producto terminado. El procedimiento que se llevó a cabo para tal fin, tuvo en cuenta, además de los parámetros ya mencionados, también las fichas técnicas de equipos con capacidad para volúmenes similares a los calculados y de aplicaciones a la escala evaluada. Para cada operación unitaria o etapa del proceso se establecerán las dimensiones, forma, capacidad, materiales de construcción y características de operación. Mientras que, lo que concierne a la ingeniería de detalle no se desarrollará en este proyecto de investigación. Es importante mencionar que los materiales de construcción que están en contacto directo con la materia prima y compuestos del proceso deben estar fabricados de acero inoxidable, como lo establece la Resolución 4142 de 2012, que define el marco de materiales metálicos y equipos que estén en contacto con alimentos o bebidas para el consumo humano<sup>105</sup>.

**5.3.1 Almacenamiento de la materia prima.** En primera instancia se tiene la recepción de la materia prima, la zanahoria de desecho proveniente de la línea de producción de la empresa Hortalizas Boyacá S.A.S. es entregada empacada en lonas de fique de 60 kg; sin embargo, como se mencionó previamente se requieren 30.04 kg de materia prima cada 72 h por lo cual se solicitará que sea entregada en estas cantidades.

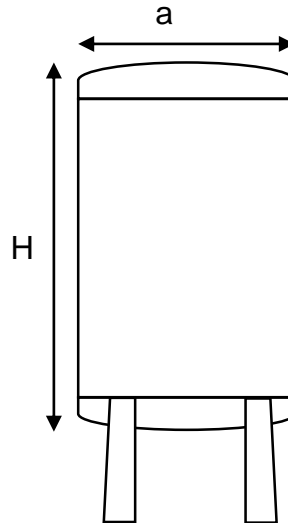
Para el almacenamiento del aceite de girasol extra refinado se propone el uso de un tanque cilíndrico vertical de tapa cóncava de 2000 L de acero inoxidable sanitario

---

<sup>105</sup> Ministerio de Salud de Colombia. Resolución 4142 de 2012. Por la cual se establece el reglament técnico sobre los requisitos sanitarios que deben cumplir los materiales destinados a entrar en contacto con alimentos y bebidas para el consumo humano en el territorio nacional. Bogotá, 12 de diciembre de 2012. 16 p.

con cubierta desmontable y sistema de control de llenado y vaciado (**Figura 40**). Las dimensiones de este se ilustran en la **Tabla 40**.

**Figura 40.** Tanque de almacenamiento de aceite de 2000 L.



**Fuente:** elaboración propia.

**Tabla 40.** Dimensiones tanque de almacenamiento de 2000 L.

Dimensiones	Externas (m)
H	1.77
a	1.2

**Fuente:** elaboración propia.

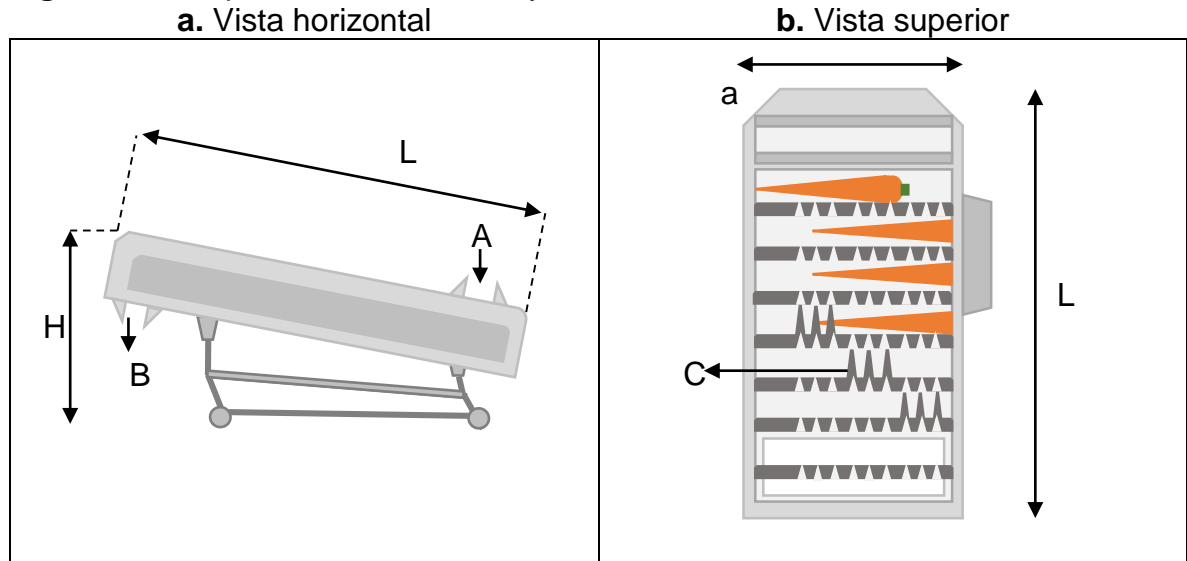
Este tanque de almacenamiento de aceite cuenta con una capacidad de 2000 L suficiente para suplir el proceso durante 8 días de operación, considerando una operación diaria de 12 h y de 5 días por semana.

**5.3.2 Corte.** El proceso de corte es la primera operación unitaria del proceso de extracción y se encarga de procesar una cantidad de 30 kg/h de materia prima. La primera etapa de este paso consiste en el transporte de las hortalizas hasta la alimentación de la máquina en sí, consistiendo de un elevador tipo cangilón de PVC con alimentación tipo tolva, que se encarga de alimentar las raíces en la siguiente máquina descabezadora y cortadora.

Apoyándose en el diseño de la máquina Sormac WOS-1A, se propone usar una máquina con estas características. Esta consiste de una serie de travesaños montados sobre cadenas, una placa base y dos cintas de alineación con una plataforma de cuchillas (**Figura 41 a.**). Las zanahorias son individualizadas mediante los travesaños, luego estas son direccionadas hacia el costado donde se

ubican las cuchillas que cortan la cabeza de las raíces y luego estas son cortadas en rodajas por una serie de cuchillas perpendiculares (**Figura 41 b.**).

**Figura 41.** Máquina descabezadora y de corte.



**Fuente:** elaboración propia.

Las dimensiones, convenciones y demás especificaciones técnicas del equipo se resumen en la **Tabla 41**.

**Tabla 41.** Especificaciones técnicas, descabezadora y cortadora

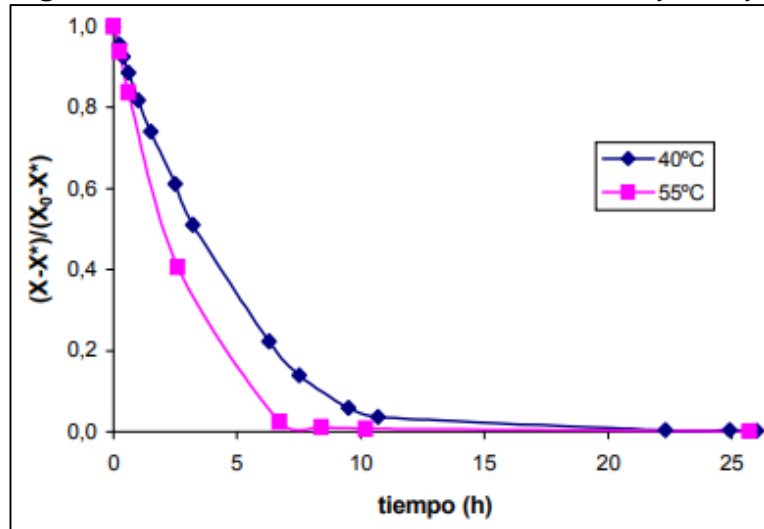
Convenciones	Valor/Dato
Altura (H)	127.0 cm
Longitud (L)	270.0 cm
Ancho (a)	88.5 cm
A	Alimentación
B	Descarga
C	Cuchillas

**Fuente:** elaboración propia.

La máquina procesa 30.04 kg de zanahoria por minuto y genera 4.36 kg de desechos, que constan de las cabezas de las zanahorias, junto con fracciones de tallo. La máquina está construida de acero inoxidable, al igual que las cuchillas, y los travesaños; mientras que la estructura externa de apoyo de aluminio. Tiene una potencia de consumo total de 610W.

**5.3.3 Secado.** Como se estableció en la sección “4.2.4. Balances de energía” los parámetros del equipo de esta operación unitaria se apoyarán en equivalentes para tratar la cantidad de zanahoria cortada calculada (26.682 kg/h). Las curvas de secado son representaciones gráficas que muestran el contenido de humedad de un material con respecto al tiempo de secado dado un valor de temperatura. Para la zanahoria Chantenay cortada en rodajas de 7 mm de espesor se muestra una curva de secado en la Figura 42 a una temperatura de 40°C<sup>106</sup>.

**Figura 42.** Curva de secado Zanahoria Chantenay a 40 y 50°C



**Fuente:** VÁZQUEZ V, María J. et al. *Cinéticas de Deshidratación de Zanahorias Mediante Deshidratación Osmótica y Secado con Aire*. 2007.

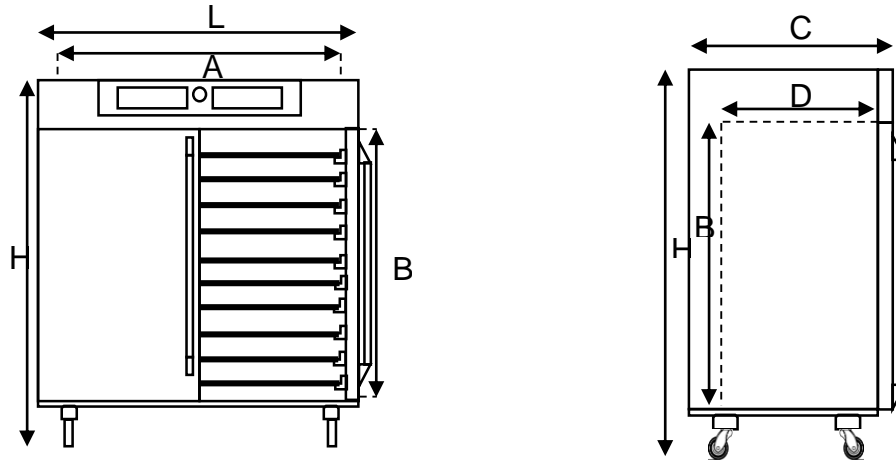
En esta se puede observar una disminución de la mayor cantidad de humedad de esta hortaliza transcurridas 15h del inicio del proceso de secado. A pesar de esto, los valores de tiempo y temperatura de secado recomendados en la literatura para el tratamiento de la materia prima para procesos de extracción de  $\beta$ -caroteno superan los 40°C y las 48 h, concluyéndose que se continuará con el establecimiento de las dimensiones del horno de secado teniendo en cuenta la capacidad de carga de zanahoria y los requerimientos energéticos ya calculados.

Inmediatamente luego del proceso de corte, las rodajas de zanahoria caen en un contenedor receptor de polipropileno. Manualmente, las rodajas son dispuestas en bandejas de rejillas metálicas de manera tal que no se aglomeren y que se dispongan de manera individual distribuidas por bandeja. El equipo tiene una capacidad de 749 L con capacidad de 15 bandejas de rejillas metálicas de

<sup>106</sup> VÁZQUEZ V, María J. et al. *Cinéticas de Deshidratación de Zanahorias Mediante Deshidratación Osmótica y Secado con Aire*. Universidad de Santiago de Compostela. 2007. p. 134.

dimensiones 104 x 60 cm (**Figura 43**) y permite el control de la temperatura, la cual se ajusta a 40°C. En cuanto a las dimensiones del mismo, estas se especifican en la **Tabla 42**.

**Figura 43.** Horno de secado.



**Fuente:** elaboración propia.

**Tabla 42.** Dimensiones horno 749 L.

Dimensiones	Valor (cm)
L	122.4
H	172.6
A	104.0
B	120.0
C	78.4
D	60.0

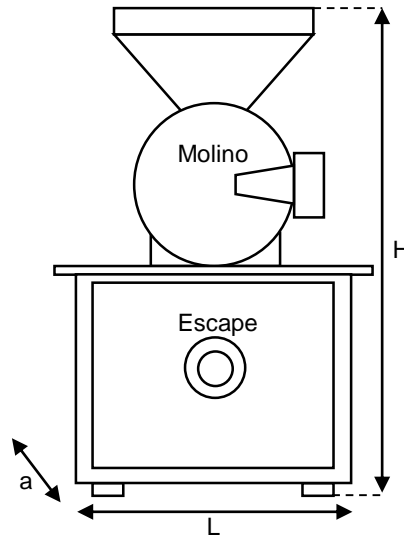
**Fuente:** elaboración propia.

Teniendo en cuenta lo anterior, se propone el uso de un horno comercial Universal Oven UN750plus de Memmert, el cual consiste de un horno de secado de convección natural de 7000 W de potencia de doble puerta de acero inoxidable. Dada la estacionalidad de este proceso (72h) se optó por modificar la capacidad de bandejas de rejillas para así suplir los requerimientos de material para darle continuidad a las operaciones posteriores (trituración y extracción), por lo cual la capacidad de bandejas se duplicó a 30. Una vez transcurrido el tiempo de secado (72h) se procede a retirar las bandejas con las rodajas de zanahoria secas, estas son después conducidas manualmente al equipo de trituración que se expone a continuación.



**5.3.4 Trituración.** En el proceso de extracción de  $\beta$ -caroteno a escala laboratorio se empleó un triturador de alimentos convencional ya que el tamaño de partícula no se consideró como un parámetro a evaluar. Sin embargo, para el diseño a escala piloto se especificó un equipo equivalente teniendo en cuenta la capacidad de procesamiento requerida (5.0695 kg/h). Este consiste de un molino de discos de 2200 W de acero inoxidable marca GOUXIN modelo CY-15B de capacidad de 10 – 50 kg/h con alimentación tipo tova rectangular (**Figura 44**), cuyas dimensiones se ilustran en la **Tabla 43**.

**Figura 44.** Triturador de zanahoria seca (molino de discos)



**Fuente:** elaboración propia.

**Tabla 43.** Dimensiones triturador de zanahoria seca.

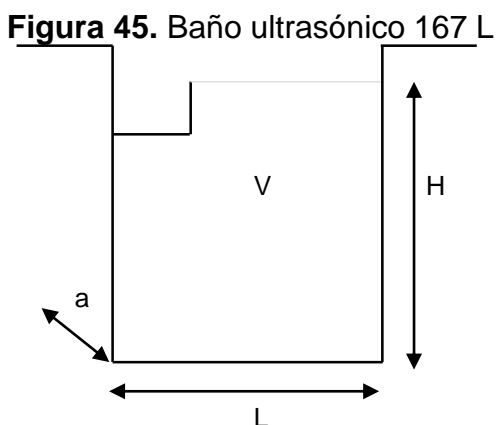
Dimensiones	Valor (cm)
H	188.0
L	110.0
a	90.0

**Fuente:** elaboración propia.

Las pérdidas de material en este equipo se cuantificaron con un valor de 0.0695 kg/h; no obstante, al tratarse de un equipo con características diferentes al usado a escala laboratorio, estas podrían variar. La zanahoria triturada es en seguida empacada en bolsas de polipropileno de cierre hermético de 5 kg, y estas son almacenadas en un armario a temperatura ambiente.

**5.3.5 Extracción asistida con ultrasonido.** Como se constató en la sección de los balances de materia, el funcionamiento de este equipo es similar al de un reactor tipo batch o por lotes, principalmente por dos razones.

La primera tiene que ver con la naturaleza del principio técnico de extracción puesto que la muestra debe permanecer inmóvil durante el proceso; la segunda, está relacionada con la necesidad de cargar y lavar el contenedor donde se deposita las muestras por cada ciclo extractivo. El volumen del extractor ultrasónico tipo baño, calculadas en el balance de energía arrojó un valor de 125 L que es equivalente a 0.125 m<sup>3</sup>, correspondiente al volumen de agua requerido para procesar 24.689 kg de zanahoria triturada y aceite de girasol. Las dimensiones de este equipo que cumple con estas características se muestran en la **Figura 45** y se resumen en la **Tabla 44**.



**Fuente:** elaboración propia.

**Tabla 44. Dimensiones Baño ultrasónico 167 L.**

Dimensiones	Externo (cm)	Interno (cm)
H	170.0	45.6
L	107.0	60.0
a	73.0	55.0
V (Volumen efectivo) (L)	1,327.87	150.48

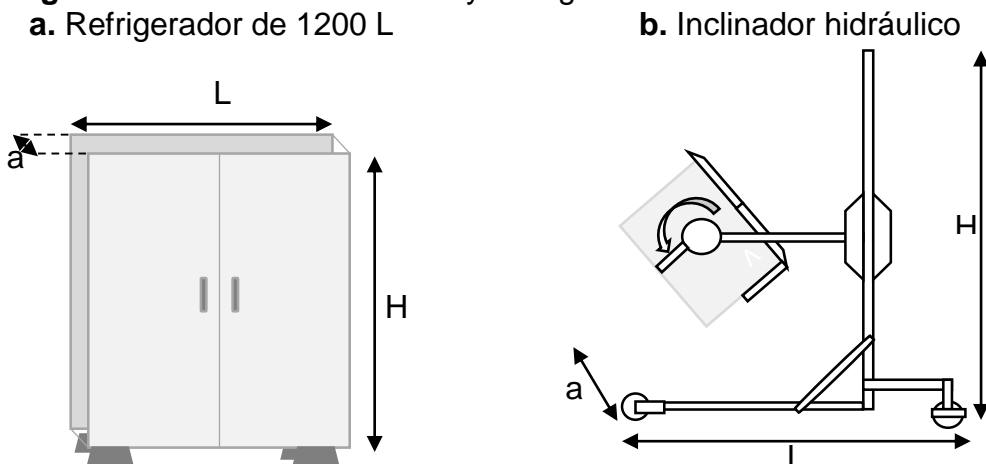
**Fuente:** elaboración propia.

El equipo posee un sobredimensionamiento del 20.38% que se hace con base en el volumen máximo de llenado del baño ultrasónico con agua y la capacidad de servicio. Con esto se proyecta usar un baño ultrasónico de 167 L de marca Elmasonic de referencia X-tra Line 1600 Flex 1 con una potencia de calentamiento de 77855.31 W, una potencia ultrasónica efectiva ajustable entre los 100 y 2000 W y una frecuencia ultrasónica de 37 kHz. Este permite, además, controlar la temperatura entre los 30°C y 80°C y el tiempo de operación y permite drenar el contenido del baño por medio de un escape de 1 in. El material de construcción del tanque es de acero inoxidable resistente a la cavitación. La potencia total de

consumo del equipo es de 9520 W. El contenedor que se introducirá con la muestra es de material inerte resistente a la cavitación y a la temperatura (vidrio refractario) de capacidad de 50 L.

**5.3.6 Almacenamiento producto terminado.** Una vez terminado el proceso de extracción el sobrenadante es evacuado del contenedor a través de un vertimiento convencional inclinando a este con el apoyo de un inclinador hidráulico dada la naturaleza observada de la torta o precipitado que se forma en el fondo del contenedor de extracción (Figura 46 b). Sus dimensiones se especifican en la Tabla 45. El sobrenadante se vierte en contenedores de vidrio color ámbar marrón de 20 L a través de un embudo de acero inoxidable. Los contenedores con el producto terminado son llevados a un refrigerador de 1200 L que permite mantener los contenedores a 4°C (Figura 46 a) cuyas dimensiones se resumen igualmente en la Tabla 45.

**Figura 46.** Inclinador hidráulico y Refrigerador de 1200 L.



**Fuente:** elaboración propia

**Tabla 45.** Dimensiones inclinador hidráulico y refrigerador de 1200 L.

Dimensiones	Refrigerador 1200 L		Inclinador hidráulico
	Externas (cm)	Internas (cm)	Valor (cm)
H	200	138.6	210.0
L	134	122	140.0
a	81.5	65.3	100.0

**Fuente:** elaboración propia.

El almacenamiento del producto terminado se estima para una duración de 5 días durante su comercialización, por esto, se propone el uso de un refrigerador tipo

doble puerta de 1200 L marca Gastronorm de referencia CMCC663 con un requerimiento de potencia de 688.7 W. El exterior está construido con acero inoxidable y el interior de aluminio.

#### 5.4 REQUERIMIENTOS ENERGÉTICOS

Una vez cuantificada la cantidad de energía que requiere cada equipo dados los balances de energía y el establecimiento de las especificaciones técnicas de los equipos a escala piloto dados los balances de materia y las características de la materia prima, co-productos y productos, se procede a calcular el consumo energético total del proceso teniendo en cuenta las siguientes consideraciones:

- El proceso de acondicionamiento de la materia prima ocurre por lotes y a cada operación unitaria o etapa le corresponde un tiempo de ejecución diferente.
- El cálculo del requerimiento toma en consideración tanto los equipos principales ya descritos, como los auxiliares, por ejemplo, los equipos de transporte.

El cálculo del requerimiento energético se calcula como el producto de los valores de la potencia requerida enunciados en los numerales anteriores con el tiempo de funcionamiento de cada equipo de manera independiente. Los resultados se muestran en la **Tabla 46** y son expresados en kilovatios por hora (kWh) puesto que, estas unidades llegan a ser útiles para el cálculo de los costos variables de operación de la planta que se evaluarán en el siguiente capítulo.

**Tabla 46.** Requerimientos energéticos proceso a escala planta piloto.

Equipo	Potencia (kW)	Tiempo de operación por día (h)	Energía consumida (kWh/día)
Elevador	0.746	1	0.746
Descabezador	0.61	0.083	0.05063
Horno de secado	7	24	168
Molino de discos	2.2	6	13.2
Baño ultrasónico 167 L	9.52	6	57.12
Refrigerador 1200 L	0.6887	24	16.5288
		<b>Requerimientos totales</b>	<b>255.64</b>

**Fuente:** elaboración propia.

De la **Tabla 46** se puede afirmar que las operaciones unitarias que representan la mayor parte del consumo energético por día son el secado (65.7%), la extracción asistida con ultrasonido (22.34%), la refrigeración (6.5%) y la trituración o molienda



(5.16%). En el siguiente capítulo se evaluarán los costos variables asociados al proceso tomando estos valores calculados.

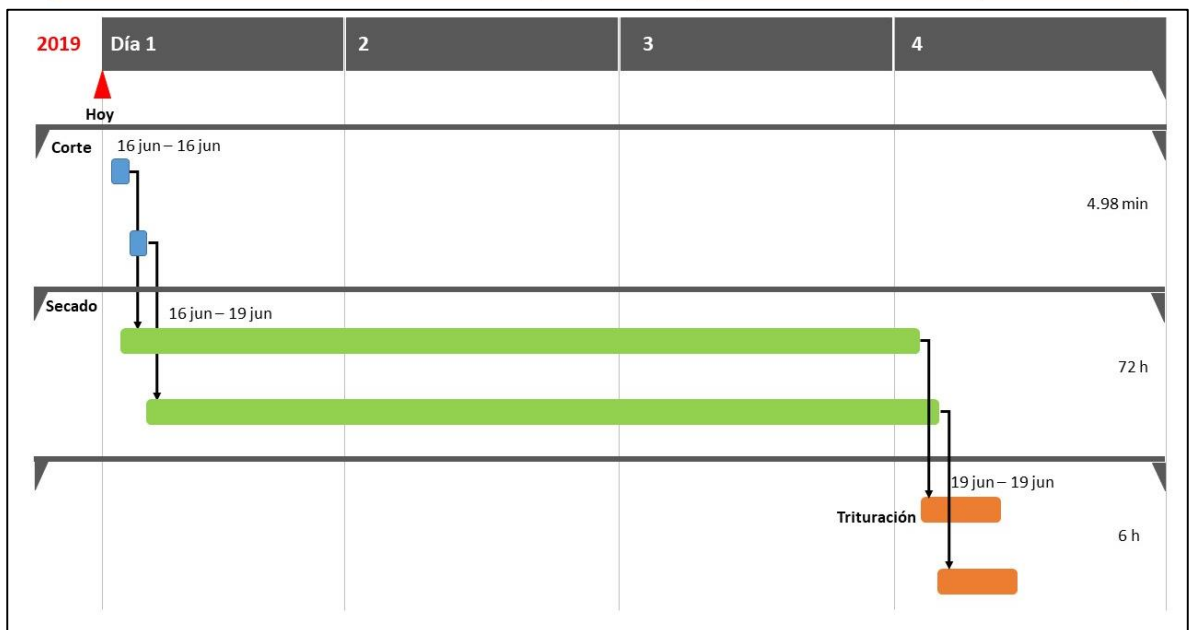
## 5.5 DIAGRAMAS DEL PROCESO

La construcción y síntesis de los diagramas de proceso, constituye una de las etapas finales en el diseño de procesos. Estos proveen una representación gráfica de las diferentes etapas y operaciones unitarias que componen un proceso, al igual que resumen los flujos de materia y la topología de su transformación de materias primas o reactivos en productos.

**5.5.1 Diagrama de Gantt del proceso por lotes.** Como fue establecido en el diseño del proceso a escala piloto, la etapa de acondicionamiento de la materia prima ocurre en un proceso discontinuo o por lotes. Este segmento está conformado por las etapas de corte, secado y trititación; los cuales están limitados por la etapa de almacenamiento de la zanahoria seca trititada. En la Figura 47 se evidencian la cronología de cada una de estas etapas en proceso por lotes, conformando un diagrama de Gantt.

**Figura 47.** Diagrama de Gantt etapas por lotes

Actividad	Identificación	Inicio	Fin	Duración
Corte	 T	16/06/2019	16/06/2019	4.98 min
Secado	 T	16/06/2019	19/06/2019	72 h
Trititación	 T	19/06/2019	19/06/2019	6 h



**Fuente:** elaboración propia.

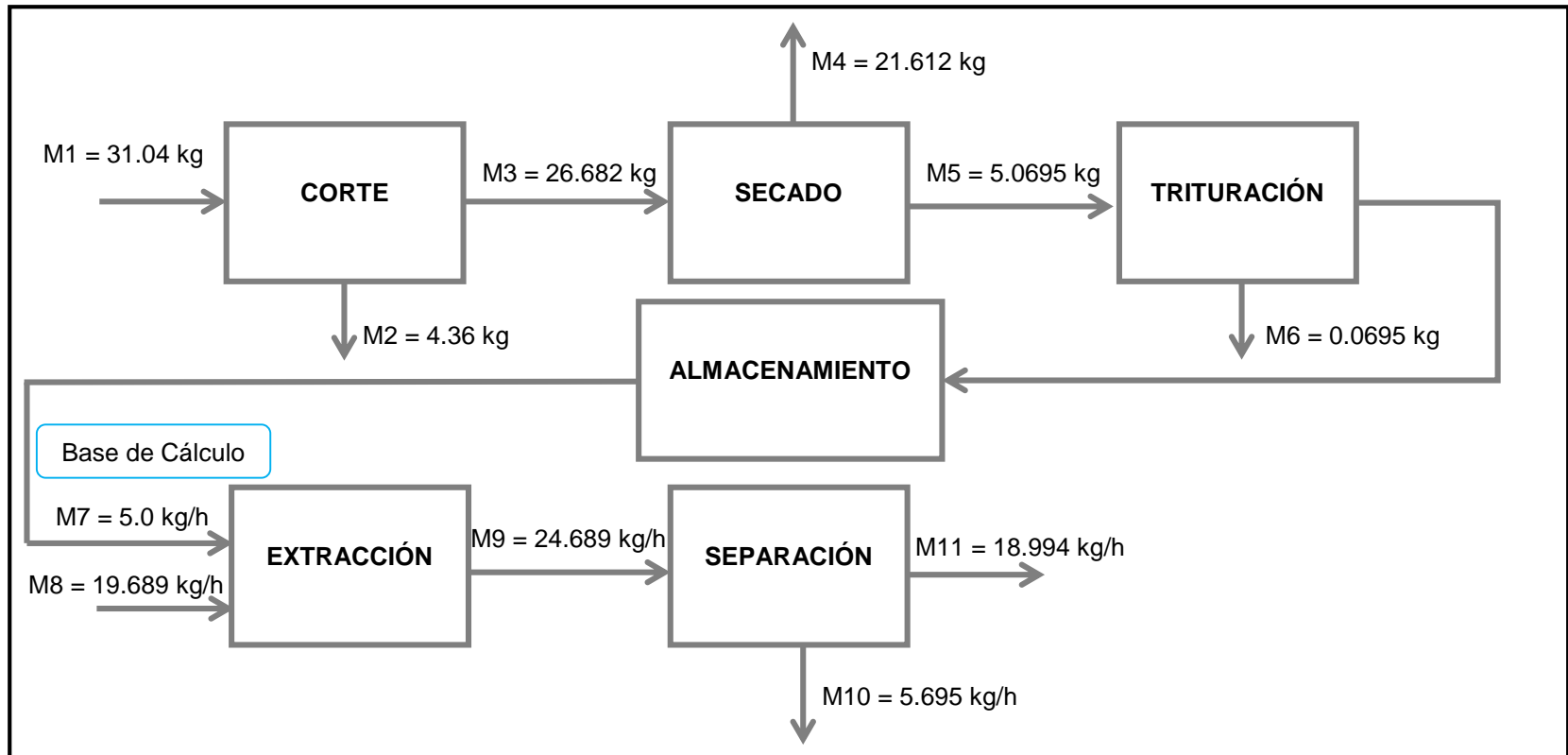
En el diagrama se evidencia la modificación de la capacidad de bandejas tipo rejillas del horno de secado, que permite duplicar la carga de zanahoria fresca cortada, brindando la posibilidad de duplicar las etapas de corte y secado para suplir esta modificación. Seguido a la etapa de trituración se encuentra la etapa de almacenamiento, que provee una alimentación continua a la segunda sección del proceso que ocurre de forma continua.

**5.5.2 Diagrama de Bloques (BFD).** El diagrama de flujo de bloques, es la representación gráfica general de un proceso, cuya importancia reside en su simplicidad y grado de síntesis que permite la identificación de las unidades más críticas involucradas en un proceso, al igual que brinda información general relevante de las corrientes que participan en cada etapa de este. Cada bloque representa una operación unitaria que representan cuatro operaciones principales: mezcla, separación, división o reacción. En la **Figura 48** se presenta el diagrama de bloques del proceso de extracción de  $\beta$ -caroteno a escala piloto, en el cual se especifica cada corriente según la nomenclatura utilizada en los balances de materia.

**5.5.3 Diagrama de proceso (PFD).** Este tipo de diagrama es una representación más detallada de las corrientes y operaciones unitarias, especificando datos más concisos de las corrientes y empleando una representación gráfica más precisa de las unidades de proceso (**Figura 49**). Las propiedades y características de cada corriente se reúnen en la **Tabla 47**.

**5.5.4 Planta física.** En esta sección se planteará una distribución de la planta para el proceso de extracción de  $\beta$ -caroteno a partir de desechos de zanahoria Chantenay donde se incluyen los equipos y demás unidades de proceso evaluados y especificados a lo largo de este capítulo y se harán una descripción de los mismos (**Figura 50**). Por otro lado, en la **Tabla 48** se muestran las respectivas convenciones de este plano.

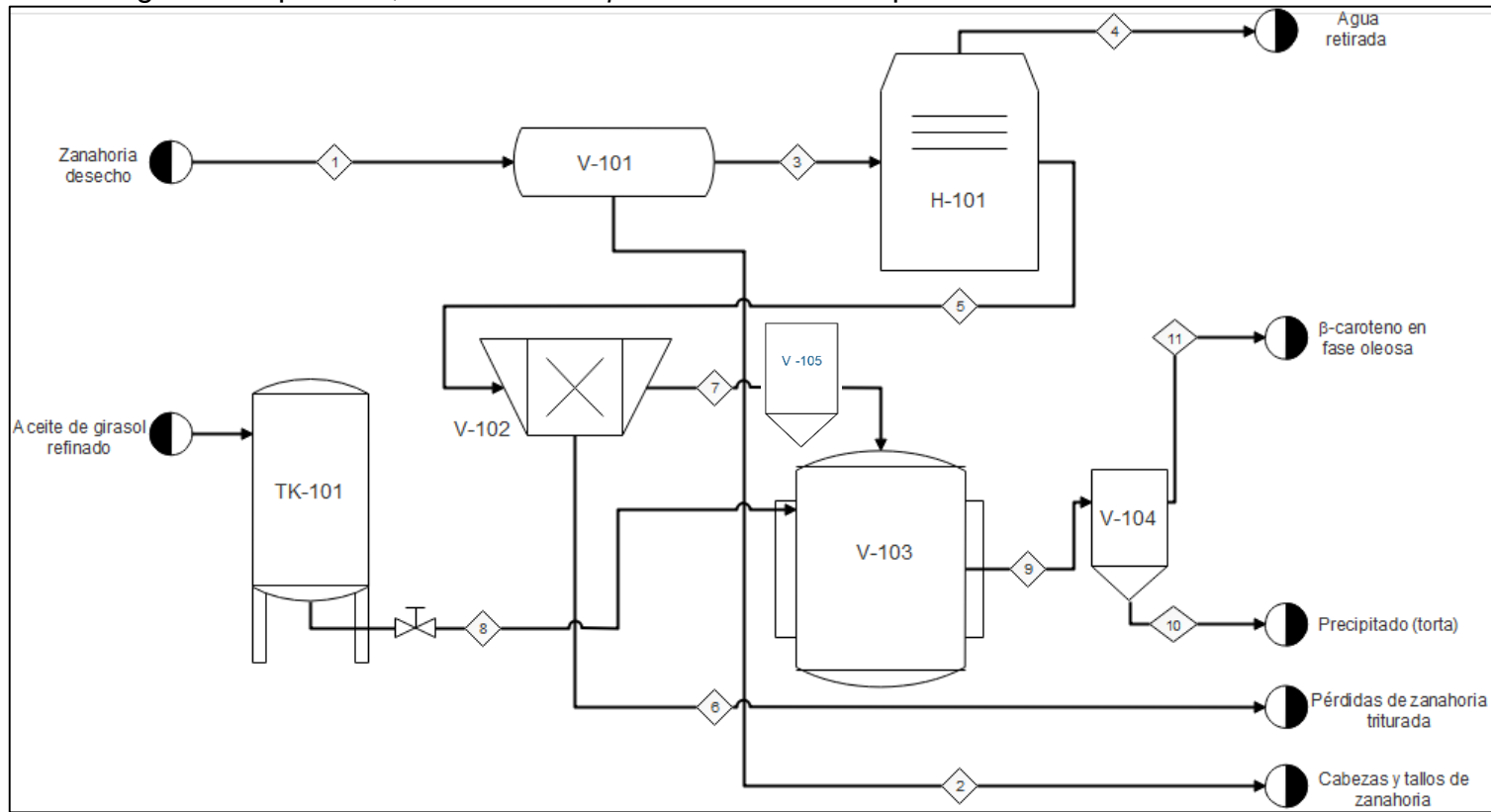
**Figura 48.** Diagrama de bloques, extracción de  $\beta$ -caroteno a escala piloto.



**Fuente:** Elaboración propia

Corriente	Descripción	Corriente	Descripción	Corriente	Descripción
M1	Zanahoria de desecho	M5	Rodajas de zanahoria seca	M9	Extracto y precipitado
M2	Cabezas y tallos	M6	Pérdidas de polvillo	M10	Precipitado (torta)
M3	Rodajas de zanahoria fresca	M7	Zanahoria seca triturada	M11	$\beta$ -caroteno en fase oleosa (48.846 mg/h)
M4	Agua eliminada	M8	Aceite de girasol refinado		

**Figura 49.** Diagrama de proceso, extracción de  $\beta$ -caroteno a escala piloto.



<b>TK-101</b> Almacenamiento de aceite de girasol	<b>V-101</b> Descabezador y cortador	<b>V-102</b> Triturador o molino	<b>V-103</b> Baño ultrasónico	<b>V-104</b> Contenedor líquido - sólido	<b>V-105</b> Tanque almacenamiento zanahoria seca triturada	<b>H-101</b> Horno de secado
--	--	--	-------------------------------------	--	---	------------------------------------

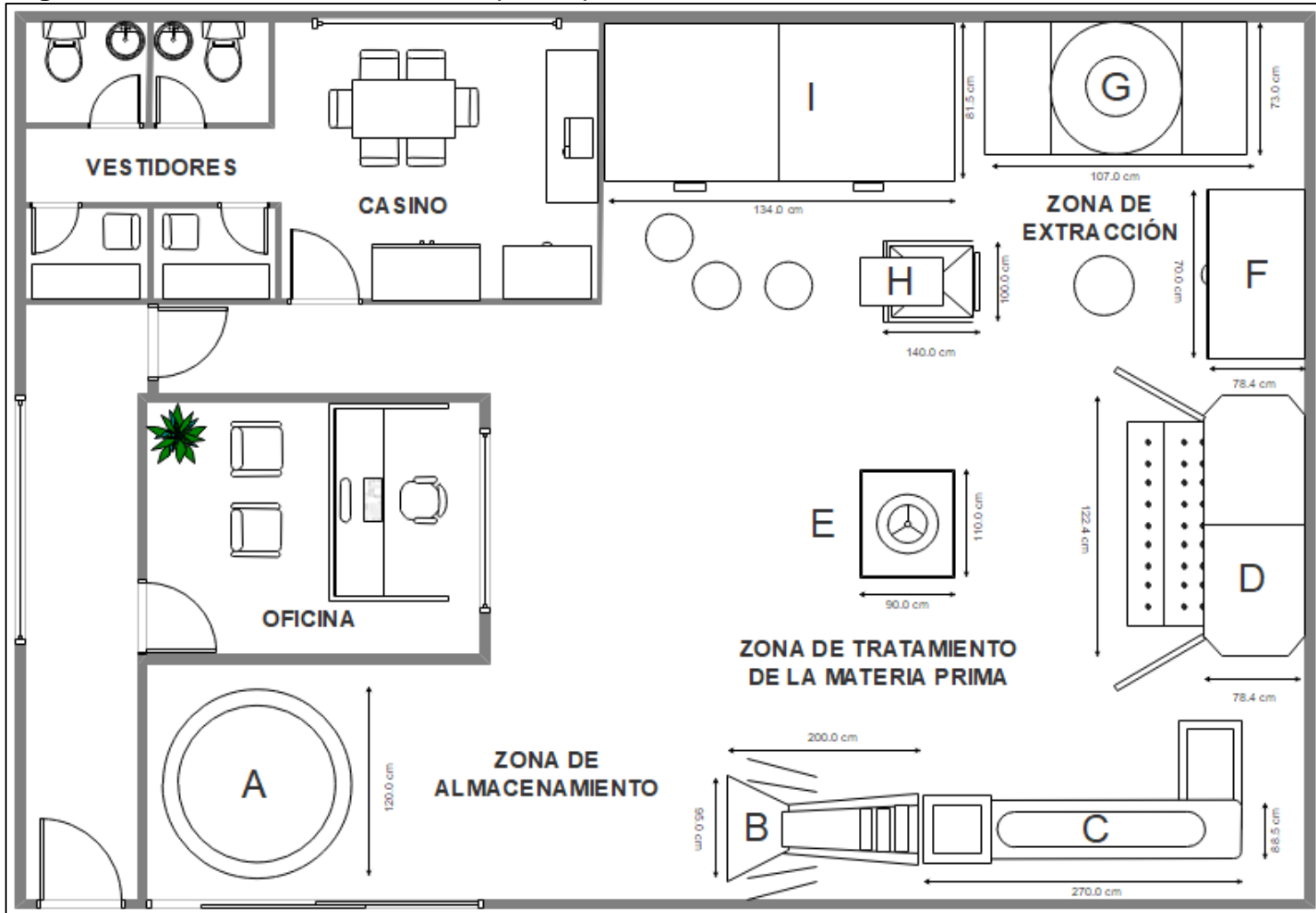


**Tabla 47.** Especificaciones y propiedades de las corrientes, diagrama PFD.

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Temperatura (°C)	13.1	13.1	13.1	40	40	13.1	13.1	13.1	40	40	40
Presión (bar)	1.016	1.016	1.016	1.016	1.016	1.016	1.016	1.016	1.016	1.016	1.016
Masa o flujo másico (kg/h)	31.04	4.36	26.682	21.612	5.0695	0.0695	5.0	19.689	24.689	5.695	18.994
<b>Componentes de flujo</b>											
Zanahoria	X	X	X		X	X	X		X	X	
Aceite de girasol								X	X	X	X
Agua	X	X	X	X							
Extracto									X	X	X
β-caroteno	X	X	X		X	X	X		X	X	X

**Fuente:** elaboración propia.

**Figura 50.** Plano de distribución de la planta piloto.



Fuente: elaboración propia.

**Tabla 48.** Convenciones plano de distribución de la planta piloto.

Convención	Equipo
A	Tanque de 2000 L (Almacenamiento de aceite de girasol)
B	Elevador tipo cangilón
C	Descabezadora y cortadora
D	Horno de secado 749 L
E	Triturador o molino de discos
F	Armario zanahoria triturada
G	Baño ultrasónico 167 L
H	Inclinador hidráulico
I	Refrigerador 1200 L (Producto terminado)

**Fuente:** elaboración propia.

## 6. ANÁLISIS FINANCIERO

El procesamiento de la zanahoria Chantenay en la empresa Hortalizas Boyacá S.A.S. produce diariamente en promedio aproximadamente 3.5 Ton de zanahoria que se descarta por su condición, la cual impide su comercialización y desde un punto de vista financiero, disminuyen el rendimiento de producción de la hortaliza y generan pérdidas económicas a diario.

Por tal razón se presenta el proyecto actual de evaluación de la factibilidad técnica ya descrito en el capítulo 3 “Proceso de extracción de  $\beta$ -caroteno” y a continuación se realizará la evaluación de la factibilidad financiera donde se tomará en consideración el rendimiento, volumen de producción y las especificaciones técnicas de los equipos y de las diferentes etapas del proceso a escala piloto.

Para la evaluación financiera se usará el Peso Colombiano (COP) y el Dólar Estadunidense (USD), como unidad monetaria de valor constante. Este capítulo inicialmente expone los aspectos financieros asociados a la capacidad de producción según los costos de las materias primas y el precio de venta del producto obtenido al final del proceso, a través del cálculo del potencial económico. Seguido de la determinación de los costos fijos y variables enfocados en el costo de los equipos, construcción de la planta piloto, dotación, consumo energético, personal, entre otros. Como última instancia se construirá un flujo de caja teniendo en cuenta un horizonte del proyecto que se establecerá a lo largo del capítulo y con el cuál se calcularán los indicadores financieros, Valor Presente Neto (VPN), Tasa Interna de Retorno (TIR) y Relación beneficio costo (R B/C), que servirán para definir la factibilidad financiera del proceso.

Para llevar a cabo este análisis se acudió a información relacionada con los costos de los diferentes aspectos que se mencionaron previamente, proporcionada directamente por la empresa Hortalizas Boyacá S.A.S, páginas web con información de precios de venta de equipos y dotación necesarios para la conformación del proceso a escala piloto y libros o publicaciones de carácter científico donde se establecen los fundamentos teóricos de los aspectos y parámetros que se usarán en este capítulo.

### 6.1 CAPACIDAD DE PRODUCCIÓN

En esta sección se determinan las características financieras del proceso de extracción del  $\beta$ -caroteno en lo que concierne a la materia prima, el producto obtenido y los costos fijos y variables.

**6.1.1 Costo de materia prima.** Como se ha mencionado reiterativamente a lo largo del proyecto, la empresa Hortalizas Boyacá S.A.S. dispone de alrededor de 3.5 Ton/día de zanahoria descartada para el consumo humano, estas son comercializadas para el consumo animal o en algunos casos dada la calidad de estas, son desechadas. El precio de venta de esta ronda en promedio los \$4,000 COP por cada lona de 60 kg, es decir, el precio sería de \$66.67 COP por kg de producto.

Este será entonces, el costo que se asumirá por esta materia prima. Para el caso del aceite de girasol extra refinado, se estima un costo de \$10,990 COP por kg de producto. Este costo depende directamente del aspecto del aceite, ya que, este debe ser lo más incoloro posible y de grado alimenticio. La **Tabla 49** se sintetizan los resultados de los costos de las materias primas calculados por año teniendo en cuenta los requerimientos de estos calculados en los balances de materia.

**Tabla 49.** Costos de materia prima.

Insumo	Costo base (COP/kg)	Costo por hora (COP/h)	Costo por semana (COP/sem)	Costos anuales (COP/año)
Zanahoria Chantenay descartada	\$66.67	\$27.81	\$1,669	\$86,782
Aceite de girasol extra refinado	\$10,990	\$216,382	\$12'892,927	\$675'112,183
<b>Total costos (COP)</b>				<b>\$675'198,965</b>

**Fuente:** elaboración propia.

Los costos anuales fueron calculados para una operación de 12 h a día y 5 días a la semana.

**6.1.2 Precio de venta del  $\beta$ -caroteno.** El mercado del  $\beta$ -caroteno en Colombia está dirigido, en parte a la industria de alimentos o farmacéutica ofreciendo este producto en presentaciones en base oleosa. La empresa Factores y Mercadeo S.A., por ejemplo, comercializa  $\beta$ -caroteno natural para la industria de bebidas en concentración 30% en fase oleosa o 10% CWS por un valor aproximado de \$450,000 COP por kilogramo. Otra parte del mercado de este carotenoide está destinado a la investigación, comercializándose como estándar de grado analítico que puede llegar a concentraciones mayores al 95% de pureza que se presenta como un polvillo fino y tiene un precio de venta aproximado de \$300,000 COP por gramo. Sin embargo, este último se comercializa en el país a través de empresas intermediarias, proveedoras de compañías multinacionales como Merck Group o Sigma Aldrich.

Por otro lado, se encuentra el mercado dirigido a las nuevas tendencias de productos naturales conformados por los aceites esenciales y extractos naturales para el cuidado de la piel. La compañía canadiense Divine Essence en su portafolio dirigido a la comercialización de esencias y aceites naturales ofrece su producto “Carrot oil - extract” para uso el cual consiste de una solución oleosa de aceite de girasol 99.55%, extracto de zanahoria 0.25% y tocoferol 0.2% por un valor de \$34.99 CAD (Dólares canadienses) o aproximadamente \$26.0 USD.

Dadas las características del extracto obtenido, y su concentración se estimó un precio de venta de \$12,800 COP por litro de producto. Esto último, considerando la diversidad de aplicaciones que puede tener este extracto también en la industria de alimentos. De igual forma, se propuso la comercialización del precipitado o torta sólida con aceite, coproducto del proceso de extracción a un valor igual al fijado para la comercialización de la zanahoria descartada (\$66.67 COP). Los ingresos anualizados se muestran en la **Tabla 50**.

**Tabla 50.** Ingresos anualizados.

	Cantidad (kg/h)	Precio unitario (COP/kg)	Ingresos (COP/h)	Ingresos (COP/semana )	Ingresos (COP/año)
Extracto $\beta$ - caroteno	18.994	\$12,800	\$256,000	\$15'360,000	\$798'720,00 0
Torta o precipitado de zanahoria	5.695	\$67	\$380	\$22,780	\$1'184,560
				<b>Total (COP)</b>	<b>\$799'904,560</b>

**Fuente:** elaboración propia.

**6.1.3 Potencial Económico.** El potencial económico o la economía de un proceso permite conocer la diferencia monetaria entre el valor de los productos y los costos de las materias primas de un proceso químico, independientemente de la escala que se esté evaluando, depende en un principio, de una base de cálculo que generalmente se refiere a la cantidad de consumo de alguna materia prima o bien, la cantidad de producción del compuesto o sustancia de interés. El paso a seguir consiste en definir un factor de escala, con el cual se calcula el volumen o masa de los flujos de materia del proceso en general. Estas primeras etapas para el cálculo del potencial económico se desarrollaron a lo largo del capítulo anterior, por lo cual, el paso a seguir consiste en calcular este parámetro teniendo en cuenta los costos de la materia prima y el precio de venta del producto terminado tomados de los numerales anteriores. En la Tabla 51 se resumen los resultados del potencial económico para el proceso en cuestión.

**Tabla 51.** Potencial económico del proceso.

Costos o Ingresos	Valor (COP/año)
Zanahoria Chantenay descarte	-\$86,782
Aceite de girasol extra refinado	-\$675'112,183
Extracto de $\beta$ -caroteno	\$798'720,000
Zanahoria precipitada sólida	\$1'184,560
<b>Diferencia Neta</b>	<b>\$124'705,595</b>

**Fuente:** elaboración propia.

Los costos se representan como flujos negativos de dinero, ya que se trata de un egreso, mientras que los ingresos se expresan como un flujo positivo. Los costos de materia prima hacen parte de los costos variables, puesto que estos aumentarán anualmente como se describirá en la sección “5.1.5 Costos variables”.

Según el Centro Nacional de Investigaciones para la Agroindustria de Especies Aromáticas Medicinales Tropicales (Cenivam), la demanda anual global de aceites esenciales está constituida por una producción de 100,000 Ton con un mercado total de \$900 millones de dólares (USD) en el año 2013<sup>107</sup>. La participación de Latinoamérica en el mercado de los aceites esenciales tiene un horizonte estimado para el año 2023 de \$ 500 millones de dólares (USD), de los cuales se espera que Colombia tenga un aporte del 33%<sup>108</sup>. Existen estudios recientes del mercado de aceites esenciales en el mundo y en Colombia; sin embargo, estos no se encuentran enfocados a un aceite en específico dada su amplia variedad de productos, no obstante, en todos los casos demuestra ser un mercado potencial<sup>109</sup>.

Teniendo en cuenta lo anterior, se puede concluir que el diseño establecido en este proyecto produciría un total de 62.4 Ton anuales de extracto de  $\beta$ -caroteno en fase oleosa, lo cual correspondería a una participación del 0.062% en cuanto a la producción mundial y una participación en el mercado de Latinoamérica aproximado del 0.048%.

---

<sup>107</sup> MARCA PAÍS COLOMBIA / PROCOLOMBIA. “Colombia afianza con investigación su industria de aceites esenciales”. Esta es Colombia - Innovación. 1 de octubre de 2013. En: [www.colombia.co](http://www.colombia.co)

<sup>108</sup> EL PAÍS S.A. “Young Living, empresa líder en aceites esenciales, abrió sus puertas en Colombia”. Elpais.com.co. 27 de febrero de 2019. En: [www.elpais.com.co](http://www.elpais.com.co)

<sup>109</sup> HURTADO, Paola; VILLA, Aída L. Estudio de mercado de aceite esencial de naranja en Colombia en el periodo 2009 – 2014. Revista Colombiana de Ciencias Hortícolas. 2016. DOI: <http://dx.doi.org/10.17584/rcch.2016v10i2.4653>. p. 303.

**6.1.4 Costos fijos.** Los costos fijos hacen referencia a los egresos de dinero que no dependen del volumen o de las condiciones de operación y producción, por tanto, su valor será constante a lo largo del horizonte del proyecto que se establecerá posteriormente en este capítulo. Para la evaluación financiera se estipuló que estos costos estarán comprendidos por los costos de energía eléctrica, costos de mano de obra y el costo de mantenimiento de los equipos del proceso y de dotación de la planta.

Como primera instancia se calcularon los costos asociados al consumo de energía retomando los valores encontrados en el capítulo 4 en la sección “4.4. Requerimientos energéticos”. En la **Tabla 52** se resumen los consumos estimados y el precio total de energía eléctrica anual tomando como referencia las tarifas de la energía eléctrica actuales que brinda la Empresa de Energía de Boyacá S.A. E.S.P. para el año 2019 y en el sector de operación donde se plantea ubicar la planta piloto propuesta el cual es de \$561.97 COP/kWh<sup>110</sup>.

**Tabla 52.** Costo para servicio energético.

Equipo	Energía consumida (kWh/día)	Costo de energía COP/día	Costo de energía COP/mes
Elevador dosificador	0.746	\$419	\$8,385
Descabezadora	0.05063	\$28	\$569
Horno de secado	168	\$94,412	\$1'888,247
Molino de discos	13.2	\$7,418	\$148,362
Baño ultrasónico 167 L	57.12	\$32,100	\$642,004
Refrigerador 1200 L	17	\$9,289	\$185,777
<b>Total costos mes (COP)</b>			<b>\$2'873,343</b>
<b>Total costos al año (COP)</b>			<b>\$34'480,118</b>

**Fuente:** elaboración propia.

Para la supervisión, el control y desarrollo del proceso se plantea contar con un operario capacitado en la manipulación de alimentos y control de los equipos en específico; y, por otra parte, un ingeniero encargado a la supervisión de la planta. Para lo cual se estimaron los sueldos para cada uno, tomando como base el salario mínimo legal vigente para el año 2019, el cual es de \$828,116 COP<sup>111</sup> y, además,

<sup>110</sup> Empresa de Energía de Boyacá E.S.P. Tarifas de energía 2019. Tarifas del mes. [Consultado el 10/05/2019]. En: [www.ebsa.com.co](http://www.ebsa.com.co)

<sup>111</sup> Presidencia de la República de Colombia. Presidente Duque expidió decretos que fijan el incremento del salario mínimo y del auxilio de transporte para la vigencia 2019, el aumento real más significativo de los últimos 25 años. Bogotá, 28/12/2018. [Consultado el 13/04/2019]. En: [id.presidencia.gov.co](http://id.presidencia.gov.co)



considerando las prestaciones sociales respectivas de los mismos como se muestra en la **tabla 53**.

**Tabla 53.** Cálculo Costos de mano de obra.

Cargo	Técnico	Ingeniero
Sueldo	\$900.000	\$1.500.000
Subsidio de Transporte	\$0	\$0
Cesantías	\$75.000	\$125.000
Intereses cesantías	\$9.000	\$15.000
Prima	\$75.000	\$125.000
Vacaciones	\$37.500	\$62.500
Salud	\$76.500	\$127.500
Pensión	\$108.000	\$180.000

**Fuente:** elaboración propia.

También se consideraron elementos adicionales como riesgos profesionales, provisión vacaciones salud y pensión, SENA, ICBF, caja de compensación y parafiscales, calculando un valor de mano de obra de \$743.9 COP/kg de extracto. Para finalmente obtener los resultados anualizados, que se resumen en la **tabla 54**.

**Tabla 54.** Resultados costo de mano de obra.

Costo\Cargo	Técnico	Ingeniero
Sueldo base (COP/mes)	\$900,000	\$1'500,000
Sueldo luego de liquidación (COP/mes)	\$1'377,761	\$2'296,268
Costo mano de obra anual (COP/año)	\$16'533,132	\$27'555,216
<b>Costo total anual (COP/año)</b>	<b>\$44'088342</b>	

**Fuente:** elaboración propia.

Finalmente se estimaron los costos asociados al mantenimiento de los insumos, dotación de la planta y de los equipos definiendo un porcentaje de eventualidades del 10% y de reparaciones del 30% como se expone en la **Tabla 55**.

**Tabla 55.** Costos de mantenimiento.

Equipo	Valor al año por unidad (COP)
Computador	\$80,000
Tanque 2000 L	\$100,000
Elevador dosificador	\$120,000
Descabezadora y cortadora	\$130,000
Horno de secado	\$250,000

**Tabla 55.** (Continuación)

Equipo	Valor al año por unidad (COP)
Triturador o molino de discos	\$160,000
Baño ultrasónico 167 L	
Inclinador hidráulico	\$100,000
Refrigerador 1200 L	\$100,000
Total	\$1'590,000
%Eventualidades	10%
%Reparaciones	30%
<b>Total +% (COP)</b>	<b>\$2'226,000</b>

**Fuente:** elaboración propia.

Los costos fijos totales anuales que reúnen la totalidad de los costos previamente calculados llegan a una cifra de \$80'794,460 COP.

**6.1.5 Costos variables.** Los costos variables, a diferencia de los costos fijos, sí dependen del volumen de producción y del proceso en sí. En este caso, estos corresponden a los costos de la materia prima, los cuales, al igual que los ingresos tendrán un incremento anual del 2%, valor cercano al crecimiento del Producto Interno Bruto (PIB) para la industria manufacturera en el año 2018<sup>112</sup>.

**6.1.6 Costos de inversión.** Los costos de inversión se refieren a la cantidad de dinero que se debe inyectar a la creación del proyecto. Para la ejecución de la planta piloto se determinaron los costos de compra de los equipos que componen el proceso acudiendo a páginas web de las empresas que fabrican los equipos de referencias mencionadas en las especificaciones técnicas (Tabla 56). Asimismo, se estimaron los costos requeridos para la construcción de las instalaciones, adecuación de espacios y dotación de insumos para el funcionamiento de la planta. Gracias a información proporcionada por la Hortalizas Boyacá S.A.S., se estimó el costo para la construcción de las instalaciones con un área total de 88 m<sup>2</sup> partiendo de información facilitada de un proyecto similar que se encuentra en ejecución en el momento.

Lo que tiene que ver con la dotación de la oficina, áreas comunes e instalación de tuberías y redes eléctricas fueron adoptadas de información de la construcción de la planta existente de la misma empresa (**Tabla 57**). Los resultados se muestran a continuación.

<sup>112</sup> Diario La República. Producto Interno Bruto de Colombia creció 2.7% en 2018 según informó el DANE. Jueves, 28 de febrero de 2019. [Consultado el 20/04/2019]. En: [www.larepublica.co](http://www.larepublica.co)

**Tabla 56.** Costos de inversión de los equipos.

Equipo	Unidades	Precio total (COP)
Refrigerador 1200 L	1	\$5'427,620
Tanque aceite 2000 L	1	\$9'882,900
Elevador	1	\$6'588,600
Descabezadora	1	\$9'882,900
Horno de secado	1	\$18'398,024
Molino de discos	1	\$5'567,367
Baño ultrasónico 167 L	1	\$49'084,129
Inclinador hidráulico	1	\$3'317,616
<b>Total</b>		<b>\$108'149,155</b>
<b>IVA</b>		<b>19%</b>
<b>Total + IVA</b>		<b>\$128'697,495</b>

**Fuente:** elaboración propia.

**Tabla 57.** Costos de construcción y adecuación de la planta física.

Ítem	Valor (COP)
Construcción bodega 88 m2	\$25'000,000
Dotación oficina, baños, vestieres	\$7'000,000
Dotación personal	\$1'200,000
Conexiones y tubería equipos	\$5'000,000
<b>Total</b>	<b>\$38'200,000</b>

**Fuente:** elaboración propia.

Los costos de inversión totales arrojaron un valor de \$166'897,495 COP con los cuales se procede a la construcción y conformación del flujo de caja en la siguiente sección.

## 6.2 FLUJO DE CAJA

El flujo de caja o flujo de fondos, permite evaluar la factibilidad de un proyecto de inversión dada una serie de parámetros y requisitos que se deben definir o establecer inicialmente y de los cuales depende la construcción del mismo. Estos se explican en los siguientes índices.

- **Tipo de proyecto.** La presente propuesta del diseño de proceso a escala piloto para la extracción de  $\beta$ -caroteno partiendo de desechos de la zanahoria Chantenay corresponde a un proyecto de inversión, por el hecho de que este busca el aprovechamiento de una potencial oportunidad de negocio de emprendimiento a través de la ejecución de una evaluación de la factibilidad financiera teniendo en cuenta las inversiones, insumos y actividades necesarias

para llegar a tal fin. Este tipo de proyecto tiene como intención evaluar la conformación de una empresa nueva y tiene como objeto de estudio financiero la rentabilidad del proyecto.

- **Horizonte del proyecto.** Se establece un horizonte del proyecto de 10 años para la evaluación financiera teniendo en cuenta la magnitud de la inversión y la proyección del crecimiento de los ingresos durante este periodo de tiempo.
- **Financiación.** Al tratarse de una suma considerable de dinero la requerida para la inversión inicial, y obedeciendo a la capacidad económica de la empresa Hortalizas Boyacá S.A.S. se decidió apoyar esta inversión inicial con un crédito de libre inversión tasa de interés del 10% efectivo anual (EA). Esta tasa corresponde aproximadamente a las tasas de interés que ofrecen las entidades bancarias agrarias del país como por ejemplo el Banco Agrario de Colombia. Se opta a la vez, que se financiará el 50% de la inversión total, es decir, equivalente a \$83´448,747 COP; el cual se abonará en los 5 primeros años de la ejecución del proyecto en cuotas anuales iguales (\$16´689,749 COP). Por este motivo, se construyó la tabla de amortización respectiva que se muestra a continuación (**Tabla 58**) en la cual, las cifras se expresan en millones de pesos colombianos.

**Tabla 58.** Tabla de amortización financiación del proyecto.

Año	Saldo inicial	Intereses (10%)	Abono capital
0	\$83.45	0	0
1	\$83.45	\$8.34	\$16.69
2	\$66.76	\$6.68	\$16.69
3	\$50.07	\$5.01	\$16.69
4	\$33.38	\$3.34	\$16.69
5	\$16.69	\$1.67	\$16.69

Nota\* Cifras en millones de Pesos colombianos COP.

**Fuente:** elaboración propia.

- **Impuesto a la renta.** El impuesto a la renta se fijó en un valor del 33% al igual que en el año gravable 2018<sup>113</sup> y este se aplica a la utilidad gravable calculada en el flujo de caja.
- **Tasa de interés de oportunidad (TIO).** La Tasa de Interés de Oportunidad permite conocer la rentabilidad mínima que se le exige al proyecto. Existen diferentes metodologías para su cálculo según el sector económico donde se va a desempeñar. Para el proyecto en cuestión se aplicará una metodología básica,

<sup>113</sup> Estatuto tributario colombiano. Ley 1943 del 28 de diciembre de 2018. Tarifa general del impuesto de renta personas jurídicas año 2019. En: [www.actualicese.com](http://www.actualicese.com)

que tiene en cuenta tasa de depósito a término fijo DTF, el porcentaje de inflación y una tasa de rentabilidad de medida del riesgo del proyecto (**Ecuación 26**). La tasa efectiva anual de los depósitos a término fijo en Colombia para el año 2019 corresponde al 4.48% y la inflación reportada para el año 2018 alcanzó un valor de 3.18%<sup>114</sup>. La tasa de rentabilidad o medida del riesgo estimada fue de 12% pues, se trata de un proyecto que busca ingresar en un mercado desconocido o ajeno a la actividad económica que desempeña de la empresa Hortalizas Boyacá S.A.S.

**Ecuación 26.** Tasa de interés de oportunidad (Método básico).

$$TIO = [(1 + DTF) \times (1 + \%inflación) \times (1 + tasa\ rentabilidad)] - 1$$

**Fuente:** Apuntes de clase, Formulación y evaluación de proyectos.

La TIO arrojó un valor de 20.74%, este valor será esencial a la hora de evaluar la factibilidad financiera del proyecto mediante los indicadores financieros en el siguiente numeral.

- **Depreciación de activos.** La depreciación de activos corresponde a la pérdida del valor de compra de algún bien a lo largo del tiempo. en esta oportunidad se depreciarán los costos de inversión del proyecto siguiendo un comportamiento de línea recta, es decir, tendrá una depreciación constante a lo largo del horizonte del proyecto (10 años). Por lo cual este valor corresponde a \$16'689,750 COP cada año.

Por último, en la **Tabla 59** se resumen los datos de los valores con los cuales se desarrolla el flujo de caja.

**Tabla 59.** Información para la construcción del flujo de caja.

Horizonte del proyecto (años)	10
Inversión	\$166'897,495
Ingresos anuales	\$799'904,560
Costos fijos	\$80'794,460
Costos variables	\$675'198,965
Valor a financiar	\$83'448,747
Valor cuota fija financiación	\$16'689,749
Impuesto a la renta	33%
Intereses	10%
Tasa de interés de oportunidad TIO	20.74%
Crecimiento ingresos y costos fijos	2%

<sup>114</sup> BANCO DE LA REPÚBLICA. Estadísticas, precios e inflación. Meta de inflación (serie histórica). [consultado el 04/05/2019] En: [www.banrep.gov.co](http://www.banrep.gov.co)

<b>Tabla 59.</b> (Continuación)	
Depreciación Equipos y planta	\$16'689,749
<b>Fuente:</b> elaboración propia.	

Una vez establecidos estos ítems se procede con la construcción del flujo de caja con financiación (**ANEXO E**).

### 6.3 INDICADORES FINANCIEROS

“Los indicadores financieros son utilizados para mostrar las relaciones que existen entre diferentes cuentas de los estados financieros; y sirven para analizar su liquidez, solvencia, rentabilidad y eficiencia operativa de una identidad”<sup>115</sup>. La evaluación financiera de este proyecto se desarrollará por medio del cálculo de tres indicadores esencialmente: el Valor Presente Neto (VPN), la Tasa Interna de Retorno (TIR) y la relación Beneficio – Costo (R B/C).

**6.3.1 Valor Presente Neto (VPN).** El indicador financiero Valor Presente Neto se define como aquel indicador que expresa “en pesos de hoy tanto los ingresos futuros como los egresos futuros, lo cual facilita la decisión desde el punto de vista financiero, de realizar o no un proyecto”<sup>116</sup>. Este indicador matemáticamente consiste en el promedio ponderado de los flujos de efectivo, evaluados a la tasa de interés de oportunidad (TIO), trayendo al valor presente los flujos de, tanto ingresos como egresos, dado un flujo de fondos de un proyecto (**Ecuación 27**).

**Ecuación 27.** Valor Presente Neto.

$$VPN_i = \sum F_n(1+i)^{-n} = F_0 + F_1(1+i)^{-1} + F_2(1+i)^{-2} + \dots + F_n(1+i)^{-n}$$

**Fuente:** BACA C., Guillermo. Ingeniería Económica. Bogotá D.C. Fondo educativo panamericano, 2000.

Donde:

*n*: es el número de periodos del proyecto.

*F*: es el valor del flujo de fondos para el periodo *n*.

*i*: es la tasa de interés de oportunidad o TIO.

El criterio de selección de si el proyecto es financieramente rentable consiste en que este indicador debe ser mayor o igual a cero ( $VPN \geq 0$ ). Dado el flujo de caja con financiación, fue posible calcular el Valor Presente Neto de este proyecto, el cual arrojó un valor de \$20'821,138 COP, concluyéndose que el proyecto es

<sup>115</sup> ALCÁNTARA H., María E. Indicadores financieros. Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo. Escuela Superior de Ciudad Sahagún. 2013.

<sup>116</sup> BACA C., Guillermo. Ingeniería Económica. Bogotá D.C. Fondo educativo panamericano, 2000. p. 197.

financieramente rentable. Este valor significa que, transcurrido el tiempo del horizonte del proyecto, se recuperará la inversión en su totalidad, y quedarán libres \$20'821,138 COP como utilidad.

**6.3.2 Tasa Interna de Retorno (TIR).** “La Tasa Interna de Retorno se define como la tasa de rentabilidad del proyecto; es una característica propia de cada alternativa; y es totalmente independiente de las ambiciones del inversionista; es decir, de su tasa de interés de oportunidad”<sup>117</sup>. Matemáticamente se podría definir como la tasa de interés necesaria para que el valor del Valor Presente Neto sea igual a cero. Existen diferentes metodologías matemáticas para su cálculo; no obstante, para esta evaluación financiera se determinó con ayuda de una hoja de cálculo del programa Excel, el cual utiliza una metodología de convergencia matemática. El criterio de selección en este caso sugiere que, si la tasa interna de retorno arroja un valor mayor a la tasa de interés de oportunidad ( $TIR > TIO$ ), entonces el proyecto resulta viable, puesto que la rentabilidad específica del proyecto supera las expectativas del inversionista comparado con su tasa de rentabilidad esperada. El valor de la TIR para el proyecto arrojó un valor igual al 26%, por lo cual, se confirma nuevamente que la propuesta de diseño para el proceso de extracción del carotenoide de interés resulta ser factible financieramente, pues se cumple la condición ( $26\% > 20.74\%$ ).

**6.3.3 Relación Beneficio – Costo (R B/C).** Este criterio de selección establece la relación entre los flujos positivos o beneficios del proyecto y los costos del flujo de fondos de un proyecto. Este se calcula a partir de la **Ecuación 28**.

**Ecuación 28.** Relación Beneficio – Costo.

$$\frac{B}{C}(i) = \frac{\sum_{j=0}^n \frac{I_j}{(1+i)^j}}{\sum_{j=0}^n \frac{E_j}{(1+i)^j}} \quad \text{Para } j = 0,1,2, \dots, n.$$

**Fuente:** MORALES C., Carlos M. Finanzas del Proyecto. Introducción a las Matemáticas Financieras. Medellín Colombia, 2014.

Donde:

*I*: son los ingresos o flujos positivos de dinero

*E*: son los egresos o flujos negativos

*j*: es el número de periodo

El criterio de selección está dado por el hecho de que la cantidad de ingresos (*I*) debe ser mayor a los egresos en el flujo de fondos, es decir, el valor de la relación Beneficio – Costo debe ser mayor o igual a la unidad ( $R B/C \geq 1$ ). Para el proyecto

<sup>117</sup> MORALES C., Carlos M. Finanzas del Proyecto. Introducción a las Matemáticas Financieras. Medellín Colombia, 2014. p.253.

en cuestión, el valor encontrado fue de 1.25, lo que quiere decir que el proyecto es igualmente factible financieramente.



## 7. CONCLUSIONES

- La revisión bibliográfica de los antecedentes y su comparación con diferentes estudios asociados a la extracción de carotenoides, en particular al  $\beta$ -caroteno; junto con la constitución de la técnica para el proceso en cuestión, permitieron llevar a cabo la selección de los parámetros de extracción mediante Soxhlet, el cual se llevó a cabo a una temperatura de 70°C, relación solvente – sólido de 2:10 y con Hexano como solvente. Por otro lado, la extracción asistida con ultrasonido, fue conducida y evaluada a tres valores de tiempo (10, 20 y 30 min) y temperatura (30, 40 y 50°C) de extracción, a una potencia ultrasónica de 100 W y frecuencia de 37kHz, estas últimas dos limitadas por las especificaciones técnicas del equipo ultrasónico tipo baño, el cual se tuvo a disposición para el desarrollo experimental. De lo anterior, se concluye que el control y la manipulación de estos parámetros resulta ser de gran importancia para proveer las condiciones adecuadas que promuevan la extracción del  $\beta$ -caroteno.
- La concentración promedio de la extracción convencional Soxhlet arrojó un valor de 56.5 mg  $\beta$ -caroteno/kg aceite y un rendimiento de 21.8 mg  $\beta$ -caroteno/100 g de zanahoria seca. Mientras que, para la extracción asistida con ultrasonido, las mejores condiciones se presentaron para los tratamientos de tiempo y temperatura de 30 min y 40°C respectivamente, obteniéndose una concentración y rendimiento de extracción promedio de 2.6641 mg de  $\beta$ -caroteno/kg aceite y 1.0144 mg  $\beta$ -caroteno/100 g de zanahoria seca respectivamente. El tiempo de procesamiento repercute en el rendimiento de extracción; caso contrario ocurre con la temperatura de extracción. Sin embargo, el efecto combinado de ambas variables evaluadas muestra un efecto estadísticamente significativo en el rendimiento de extracción. Con respecto al rendimiento de los métodos de extracción evaluados es correcto afirmar que se el proceso es potencialmente rentable, a la medida que se evalúen nuevas metodologías y se tenga un mayor control sobre los diferentes parámetros esenciales que condicionan el rendimiento final del proceso extractivo.
- El diseño preliminar del proceso a escala piloto, permite establecer las especificaciones técnicas de los equipos a partir del cálculo de los flujos de materia y energía. El diseño realizado tiene una capacidad de producción de 18.9 kg/h de aceite enriquecido con  $\beta$ -caroteno y requiere de 30 kg de zanahoria fresca por cada ciclo de secado y 19.7 kg/h de aceite de girasol extra refinado. El proceso tiene una etapa discontinua condicionada por la etapa de secado y limitada por la etapa de almacenamiento de la zanahoria seca triturada, cuya función es proveer material de manera continua a las demás etapas. El consumo energético del diseño es de 255.64 kWh/día y produce 5.695 kg/h de precipitado (zanahoria – aceite).

- Finalmente, de acuerdo con la evaluación financiera realizada para el diseño preliminar a escala piloto para un horizonte de proyecto de 10 años con una inversión de COP \$166'897,495 financiando un 50% durante 5 años en cuotas iguales a una tasa de interés anual del 10%; teniendo en cuenta costos variables anuales por COP \$675'198,965, ingresos anuales por COP \$799'904.560 y costos fijos anuales de COP\$80'794,460; estos dos últimos con un crecimiento anual del 2%; fue posible calcular los indicadores financieros Valor Presente Neto (VPN), Tasa Interna de Retorno (TIR) y Relación Beneficio Costo R (B/C). Estos indicadores arrojaron valores positivos (VPN = COP \$20'821,138; TIR = 26% y R (B/C) = 1.25) indicando que el proceso a escala piloto diseñado es financieramente factible.

## 8. RECOMENDACIONES

- Formular técnicas alternativas que permitan disminuir el consumo energético del proceso de secado o evaluar tratamientos alternos para el acondicionamiento de la zanahoria para el proceso de extracción de  $\beta$ -caroteno.
- Se recomienda implementar una técnica más rigurosa para la cuantificación del pigmento carotenoide, como por ejemplo la comparación del extracto con un estándar comercial o a través de técnicas más elaboradas como la cromatografía líquida de alta eficiencia HPLC.
- A raíz del bajo rendimiento de extracción observado para el equipo ultrasónico utilizado, se recomienda evaluar la factibilidad técnica del proceso de extracción usando un equipo ultrasónico tipo sonda a las mismas condiciones de extracción establecidas en este trabajo.
- Se recomienda seleccionar y evaluar otros parámetros de extracción como la temperatura, tiempo y potencia y frecuencia ultrasónica; con el fin de comparar el efecto del cambio de estas variables en el rendimiento del proceso de este proyecto.
- De igual manera se recomienda extraer  $\beta$ -caroteno empleando otros aceites vegetales o solventes considerados como solventes verdes, para así compararlos con los resultados encontrados en este proyecto.
- Caracterizar otra variedad de zanahoria de carácter comercial como la de variedad Nantes (*Daucus carota subsp. sativus*) y evaluar la cantidad de  $\beta$ -caroteno que esta pueda contener a través de los procesos de extracción evaluados: Soxhlet y ultrasonido.
- Debido a la existencia de tecnologías de extracción de componentes bioactivos más recientes, se recomienda evaluar el rendimiento de extracción de  $\beta$ -caroteno a partir de desechos de zanahoria a través de procesos asistidos con microondas o con fluidos supercríticos.
- Evaluar otras alternativas de obtención de carotenoides como la extracción en contracorriente con prensado.
- Realizar una curva de secado de la zanahoria Chantenay para calcular el requerimiento energético y el tamaño del horno para este proceso.

## BIBLIOGRAFÍA

ALCÁNTARA H., María E. Indicadores financieros. Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo. Escuela Superior de Ciudad Sahagún. 2013.

ALESSANDRO, María S. Manual de Producción de Zanahoria. Editado por GAVIOLA, Julio C. Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria. Capítulo 2. Características botánicas y tipos varietales. 27-46 p.

AMORIM-C ARRILHO, K. T., et al. Review of methods for analysis of carotenoids. 2014. 49-73 p.

BACA C., Guillermo. Ingeniería Económica. Bogotá D.C. Fondo educativo panamericano, 2000. p. 197.

BANCO DE LA REPÚBLICA. Estadísticas, precios e inflación. Meta de inflación (serie histórica). [consultado el 04/05/2019] En: [www.banrep.gov.co](http://www.banrep.gov.co)

BARRA P., Julio S. Desarrollo de Snacks en Base a Zanahoria (Daucus Carota L.) Variedad Ábaco Deshidratada Osmóticamente para Consumidores Infantiles. Universidad de Chile, 2019. p. 14.

BBC Research, Market Forecasting. The Global Market for Carotenoids. BBC Research Food & Beverage Report. M2 Presswire. Septiembre 2011. 1-5 p.

BELWAL, Tarun, et al. A critical analysis of extraction techniques used for botanicals: Trends, priorities, industrial uses and optimization strategies. En: Trends in Analytical Chemistry. Mar. vol. 100, p. 82-102.

BERNAL DE R., Inés. Análisis de Alimentos. Academia colombiana de ciencias exactas, físicas y naturales. Colección Julio Carrizosa y Valenzuela No. 2. 3 Ed. Santafé de Bogotá, D.C. Colombia 1998. ISBN: 958-9205-00-3. 1-313 p.

BIN Y., MOHAMAD Z. Study on factors affecting extraction of carotene from carrot by using Soxhlet extraction method. Facultad de Ingeniería Química y de Recursos Naturales. Universidad de Malaysia Pahang. 2013. 1-24 p.

BOUKROUFA, Meryem et al. Development of a green procedure of citrus fruits waste processing to recover carotenoids. En: Resource-Efficient Technologies. 2017. vol. 3, no. 3. 252-262 p.

CÁMARA DE COMERCIO DE BOGOTÁ. Manual Zanahoria. Proyecto realizado por: Núcleo Ambiental S.A.S. Programa de apoyo agrícola y agroindustrial, vicepresidencia de fortalecimiento empresarial. 2015. 1-50 p.

CENGEL, Yunus A.; BOLES, Michael A. Termodinámica. Apéndice 1, Tablas de Propiedades, Figuras y Diagramas (Unidades SI). 7ma Ed. Editorial McGrawHill. ISBN 978-607-15-0743-3. 2012. 1-999 p.

CHIRIFE, J., & FONTAN, C. F. (1982). Water Activity of Fresh Foods. *Journal of Food Science*, 47(2). DOI:10.1111/j.1365-2621.1982.tb10145. x. 661-663 p.

CHUYEN, Hoang V., et al. Microwave-assisted extraction and ultrasound-assisted extraction for recovering carotenoids from Gac peel and their effects on antioxidant capacity of the extracts. En: *Food Science & Nutrition*. 2018. vol. 6, no. 1. 189-196 p.

CURAN R., Nuria J. Identificación de las Propiedades Físico-químicas de la Zanahoria Amarilla (*Daucus carota* L) variedad Chantenay, en dos estados de madurez (Inmaduro-maduro) proveniente de Antonio Ante-Imbabura. Universidad Técnica del Norte, 2009. 1-112 p.

D. M. Sahabi, et al. Screening for Total Carotenoids and  $\beta$ -Carotene in Some Widely Consumed Vegetables in Nigeria. En: *Nigerian Journal of Basic and Applied Science*. 2012. ISSN 0794-5698. 225-227 p.

DEPARTAMENTO ADMINISTRATIVO NACIONAL DE ESTADÍSTICAS DANE. Generalidades del Cultivo de Zanahoria; 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). Boletín Mensual INSUMOS Y FACTORES ASOCIADOS A LA PRODUCCIÓN AGROPECUARIA. Núm. 60, 2017. 1-100 p.

DIARIO LA REPÚBLICA. Producto Interno Bruto de Colombia creció 2.7% en 2018 según informó el DANE. Jueves, 28 de febrero de 2019. [Consultado el 20/04/2019]. En: [www.larepublica.co](http://www.larepublica.co)

EDWARDS, David. Scaling up step by step. Biofuels commercialisation. Green Power Conferences. 2012. 44-46 p.

EL PAÍS S.A. “Young Living, empresa líder en aceites esenciales, abrió sus puertas en Colombia”. [Elpais.com.co](http://Elpais.com.co). 27 de febrero de 2019. En: [www.elpais.com.co](http://www.elpais.com.co)  
Empresa de Energía de Boyacá E.S.P. Tarifas de energía 2019. Tarifas del mes. [Consultado el 10/05/2019]. En: [www.ebsa.com.co](http://www.ebsa.com.co)

ESTATUTO TRIBUTARIO COLOMBIANO. Ley 1943 del 28 de diciembre de 2018. Tarifa general del impuesto de renta personas jurídicas año 2019. En: [www.actualicese.com](http://www.actualicese.com)

F.A., Tomas Barberan; M.I. Gil. Improving the Health Promoting Properties of Food and Vegetable Products. Cambridge, Inglaterra: Woodhead Publishing in Food Science, Technology and Nutrition, 2008.

GOULA, Athanasia M., et al. Green ultrasound-assisted extraction of carotenoids from pomegranate wastes using vegetable oils. 2017a. 821-830 ISBN 1350-4177. 1-10 p.

H. Greenfield; D.A.T. Southgate. Food Composition Data, Production, management and use. FAO. Capítulo 7. Review of methods of analysis. "The proximate system of analysis". Roma, 2003. ISBN 92-5-104949-1. 1-35 p.

HAGIWARA, Teruhiko, et al. Determination of Lycopene,  $\alpha$ -Carotene and  $\beta$ -Carotene in Vegetable Juice by Liquid Chromatography / Atmospheric Pressure Chemical Ionization-Mass Spectrometry. En: J. Food Hyg. Soc. Japan Vol. 38, No. 4. Tokyo, Japón, 1996. 211-219 p.

HURTADO, Paola; VILLA, Aída L. Estudio de mercado de aceite esencial de naranja en Colombia en el periodo 2009 – 2014. Revista Colombiana de Ciencias Hortícolas. 2016. DOI: <http://dx.doi.org/10.17584/rcch.2016v10i2.4653>. p. 301 – 310.

I. Karabagias, et al. Classification of Western Greek virgin olive oils according to geographical origin based on chromatographic, spectroscopic, conventional and chemometric analyses. En: Food Research International 54. Ioannina, Grecia, 2013. 1950-1958 p.

INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMAS TÉCNICAS Y CERTIFICACIÓN. Compendio de normas para trabajos escritos. NTC-1486-6166. Bogotá D.C.: El instituto, 2018. ISBN 9789588585673 153 p.

ISLAM, Khairul. Pilot Plant Scale-up Technique. Department of Applied Chemistry & Chemical Engineering. Rajshahi university. 2016. 1-42 p.

JAIN, N. et al. 1992. Analysis for mineral element of some medicinal plants. IndianDrug. p. 2.

JASWIR, Irwandi et al. Carotenoids: Sources, medicinal properties and their application in food and nutraceutical industry. En: Journal of Medicinal Plants Research Vol. 5(33), 2011. ISSN 1996-0875, DOI: 10.5897/JMPRx11.011. 7119-7131 p.

K. D. Sharma et al. Chemical composition, functional properties and processing of carrot – a review. Association of Food Scientists & Technologists. India, 2011. DOI 10.1007/s13197-011-0310-7. 22 - 32 p.

KYRIAKOPOULOU, Konstantina et al. Life cycle analysis of  $\beta$ -carotene extraction techniques. En: Journal of Food Engineering. 2015.

MARCA PAÍS COLOMBIA / PROCOLOMBIA. "Colombia afianza con investigación su industria de aceites esenciales". Esta es Colombia - Innovación. 1 de octubre de 2013. En: [www.colombia.co](http://www.colombia.co)

MASSON, Lina. Capítulo 14. Métodos Analíticos para la Determinación de Humedad, Alcohol, Energía, Materia Grasa y Colesterol en Alimentos. FAO. p. 51

MCKEE, Richard H., et al. Assessment of the potential human health risks from exposure to complex substances in accordance with REACH requirements. "White spirit" as a case study. 2017. En: Regulatory Toxicology and Pharmacology. 2017, vol. 92. 439-457 p.

MINGUEZ M., M. Isabel. et al. Color-Pigment Correlation in Virgin Olive Oil. JAOS, Vol. 68, no. 5. Sevilla España. 1991. 332 - 336 p.

MINISTERIO DE AGRICULTURA Y DESARROLLO RURAL. Zanahoria. Evaluaciones Agropecuarias Municipales. Agronet, 2015. 1-4 p.

MINISTERIO DE SALUD DE COLOMBIA. Resolución 4142 de 2012. Por la cual se establece el reglamento técnico sobre los requisitos sanitarios que deben cumplir los materiales destinados a entrar en contacto con alimentos y bebidas para el consumo humano en el territorio nacional. Bogotá, 12 de diciembre de 2012. 16 p.

MINISTERIO DE SALUD. Resolución 10593 de 1985. 16 de julio de 1985. 1-13 p.  
MINISTRY OF HEALTH AND FAMILY WELFARE. "Lab. Manual 5, Manual of Methods of Analysis of Foods, Fruit and Vegetable Products". Food Safety and Standards Authority of India. Government of India. Nueva Delhi, 2012. 1-59 p.

MORALES C., Carlos M. Finanzas del Proyecto. Introducción a las Matemáticas Financieras. Medellín Colombia, 2014. p.253.

MULLER, Lars; BOHM, Volker. Antioxidant Activity of  $\beta$ -Carotene Compounds in Different in Vitro Assays. Alemania, 2011. 1055-1069 p.

NUNES D., Marlene. Caracterización y procesado de kiwi y fresa cultivados por diferentes sistemas. Universidad Santiago de Compostela, 2007. 1-243 p.

ORTIZ V., Ana C. y MAMANI S., María L. Obtención del Beta-Caroteno a partir de la Zanahoria y su Aplicación en la Industria Alimenticia. Universidad Mayor de San Andrés, Bolivia. 2015. 1-176 p.

PINTO, María R. et al. Producción Ecológica Certificada de Hortalizas de Clima Frío. Fundación Universidad de Bogotá Jorge Tadeo Lozano. ISBN 958-9029-42-3. 2003. 1–196 p.

PRESIDENCIA DE LA REPÚBLICA DE COLOMBIA. Presidente Duque expidió decretos que fijan el incremento del salario mínimo y del auxilio de transporte para la vigencia 2019, el aumento real más significativo de los últimos 25 años. Bogotá, 28/12/2018. [Consultado el 13/04/2019]. En: [id.presidencia.gov.co](http://id.presidencia.gov.co)

RASHIDI, Majid; GHOLAMI, Mohammad. Prediction of carrot firmness based on water content and total soluble solids of carrot. En: African Journal of Agricultural Research Vol. 6(7). Takestan, Iran, 2011. ISSN 1991-637X ©2011 Academic Journals. DOI: 10.5897/AJAR10.11.43. 1831-1834 p.

REINA, Carlos E. et al. Manejo Postcosecha y Evaluación de Calidad para la Zanahoria (*Daucus carota* L.) que se Comercializa en la Ciudad de Neiva. Universidad Surcolombiana. Programa de Ingeniería Agrícola. Neiva, Colombia, 1997. 1-83 p.

RICCE, Cinthia, et al. Ultrasound pre-treatment enhances the carrot drying and rehydration. En: Food Research International. 2016. 1-8 p.

RODRIGUEZ A., Delia B; KIMURA, Mieko. HarvestPlus Handbook for Carotenoid Analysis. Breeding Crops for Better Nutrition. HarvestPlus Technical Monograph 2, 2004. 409-467 p.

RODRÍGUEZ A., Delia. Producción y Manejo de Datos de Composición Química de Alimentos en Nutrición. Capítulo 18, Análisis de Carotenoides. Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación. FAO, 1997. 1-6 p.

SAINI, Ramesh Kumar; KEUM, Young-Soo. Carotenoid extraction methods: A review of recent developments. En: FOOD CHEMISTRY. 2018. vol. 240. 90-103 p.

SELJÅSEN, Randi; et al. Quality of carrots as affected by pre- and postharvest factors and processing. En: Journal of Sci Food Agric. 2013. 2611-2626 p.

SEMINIS®. Nematodos, Combatiendo al Enemigo. Viernes, 17 de febrero de 2017. Artículo. En: [seminis-las.com](http://seminis-las.com)

SOARES, Aline T., et al. Improvement of the Extraction Process for High Commercial Value Pigments from *Desmodesmus* sp. Microalgae. En: Journal of The Brazilian Chemical Society. 2016. vol. 27, no. 6. 1083-1093 p.

STRATI, I. F.; OREOPOULOU, V. Recovery of carotenoids from tomato processing by-products – a review. En: Food Research International. 2014. vol. 65. 311-321 p.



T., Yilmaz, et al. Ultrasound-Assisted extraction of Lycopene and  $\beta$ -carotene from tomato-processing wastes. 2017. En: Ital. Journal of Food Science. vol. 29. 1-9 p.  
The United States Pharmacopeial Convention. Revision Bulletin. Beta Carotene. 2012. 1-2 p.

VÁZQUEZ V, María J. et al. Cinéticas de Deshidratación de Zanahorias Mediante Deshidratación Osmótica y Secado con Aire. Universidad de Santiago de Compostela. 2007. 127 -136 p.

VILKHU, Kamaljit et al. Applications and opportunities for ultrasound assisted extraction in the food industry – A review. En: Innovative Food Science and Emerging Technologies 9. 2008. 161-169 p.

WINGQVIST, Annica. Extraction, Isolation and Purification of b-Carotene. Karlstads University, 2011. 1-42 p.

Y. Li, et al. Green ultrasound-assisted extraction of carotenoids based on the bio-refinery concept using sunflower oil as an alternative solvent. En: Ultrasonics Sonochemistry 20 (2013). 2012. 12-18 p.

## **ANEXOS**

## ANEXO A

### FICHA TÉCNICA, BAÑO ULTRASÓNICO ELMASONIC E60H.



product profile

## Elmasonic E 60 H

Ultrasonic cleaning unit

#### Elma Order Nos.

Elmasonic E 60 H (230 V)	100 4642
Elmasonic E 60 H (115 V)	100 7161
Basket stainless steel	100 4243
Lid (plastic)	100 3282
Further accessories on request	



Pictured E 60 H

The new Elmasonic E units are available in 8 different sizes ranging from 0,5 litres to 28 litres. State of the art micro-processor controlled ultrasonic cleaning and sweep technology, easy to use.

Further advantages:

- high performance 37 kHz sandwich transducer systems
- cleaning tank made of cavitation-resistant stainless steel
- permanent sweep function for an optimised sound field distribution in the cleaning liquid by frequency modulation
- user-friendly and clear operating panel, splash water proof
- LED-Display for ultrasonic function and heating function
- Turning knob for setting continued and short-period operation from 1 to 30 min.
- temperature-controlled ultrasonic operation
- dry-run protected heating
- Turning knob temperature. Temperature range variable in 5°C steps from 30° up to 80°C
- plug-in mains supply
- Plastic carrying handles, heat conducting
- Turning knob for tank drainage at side of unit for simple get effective draining of tank

#### Technical data

Mains voltage (Vac)	100-120 V/220-240 V
Mains frequency (Hz)	50 / 60
Ultrasonic frequency (kHz)	37
Power consumption total (W)	500
Ultrasonic power effective (W)	100
Ultrasonic peak performance max.** (W)	400
Heating power (W)	400
Unit outer dimensions W / D / H (mm)	365 / 186 / 264
Tank internal dimensions W / D / H (mm)	300 / 151 / 150
Max. filling volume tank (lit. / gal.)	5,75 / 1.52

Weight (kg)	4,6
Material tank	stainless steel
Material casing	stainless steel
Drain	3/8"
Carrying handles (plastic)	√
CE directive 89/336 EWG (EEC)	√
CE directive 73/23 EWG (EEC)	√
Protection class	IP 20

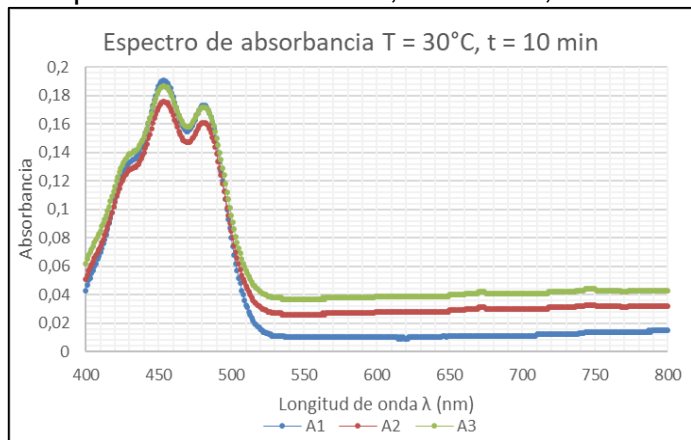
\*\* E 15 H – E 30 H: impulse wave form; E 60 – E 300 H: standard sine-wave modulation  
The choice of the waveform has been matched to the relevant tank size. The signal form of the wave results in a factor 4 or 8 for the ultrasonic peak max., depending on the modulation of the wave.

Subject to technical and optical changes reserved Elma\_ch\_01\_07

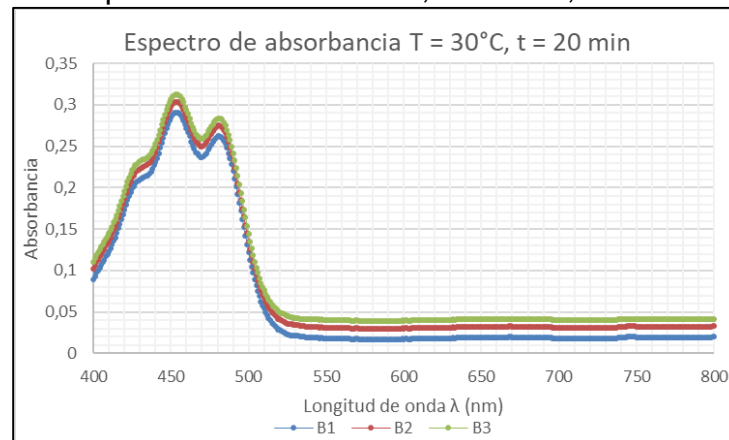
## ANEXO B

### ESPECTROS DE ABSORBANCIA EXTRACCIÓN ULTRASONIDO T = 30°C.

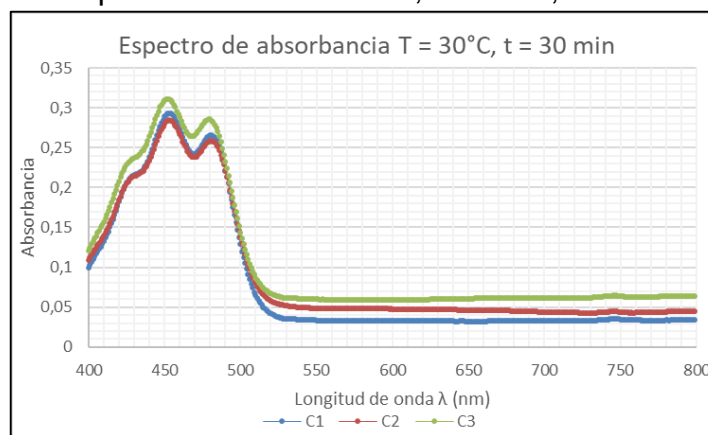
a. Espectro de absorbancia, T = 30 °C, t = 10 min



b. Espectro de absorbancia, T = 30°C, t = 20 min



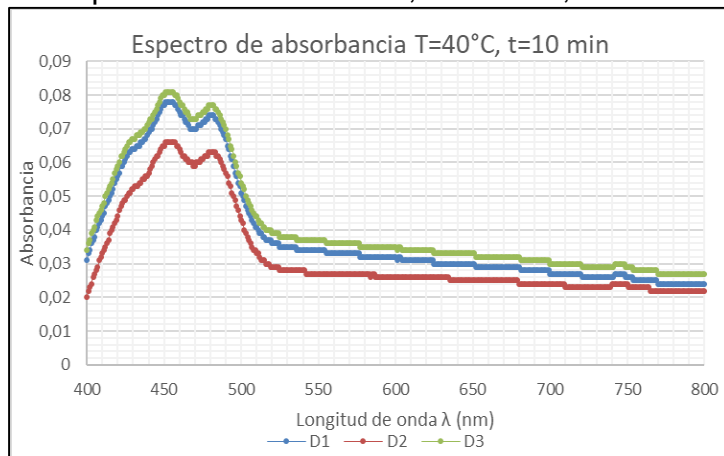
c. Espectro de absorbancia, T = 30°C, t = 30 min



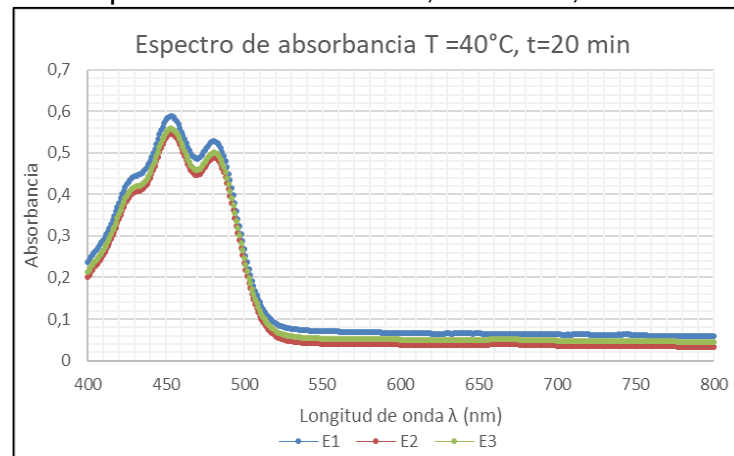
## ANEXO C

### ESPECTROS DE ABSORBANCIA EXTRACCIÓN ULTRASONIDO T = 40°C.

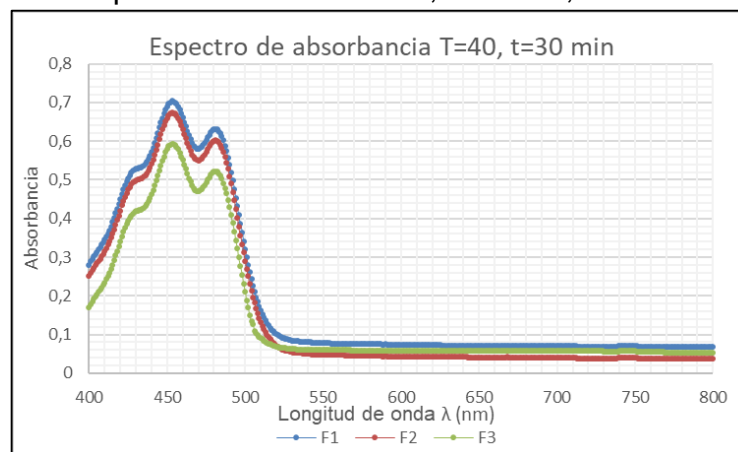
a. Espectro de absorbancia, T = 40 °C, t = 10 min



b. Espectro de absorbancia, T = 40°C, t = 20 min

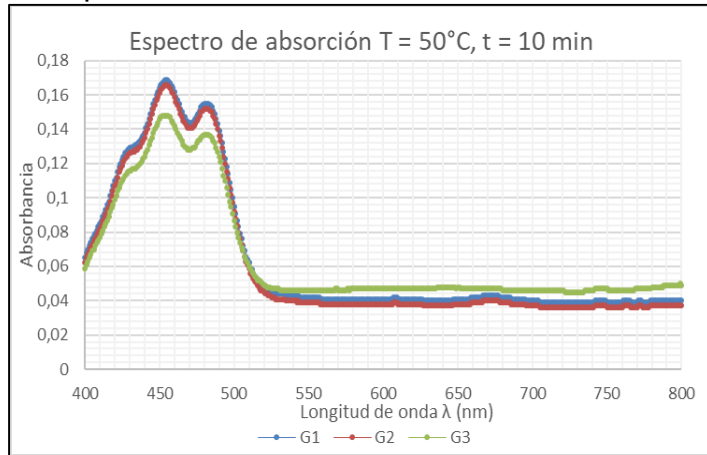


c. Espectro de absorbancia, T = 40°C, t = 30 min

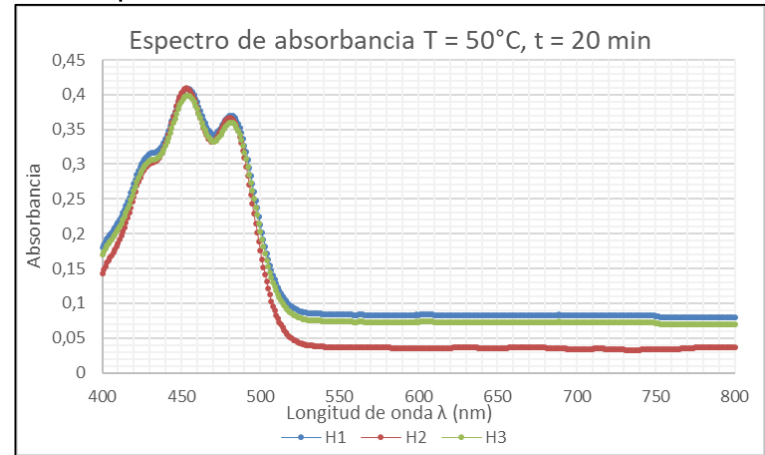


**ANEXO D**  
**ESPECTROS DE ABSORBANCIA EXTRACCIÓN ULTRASONIDO T = 50°C.**

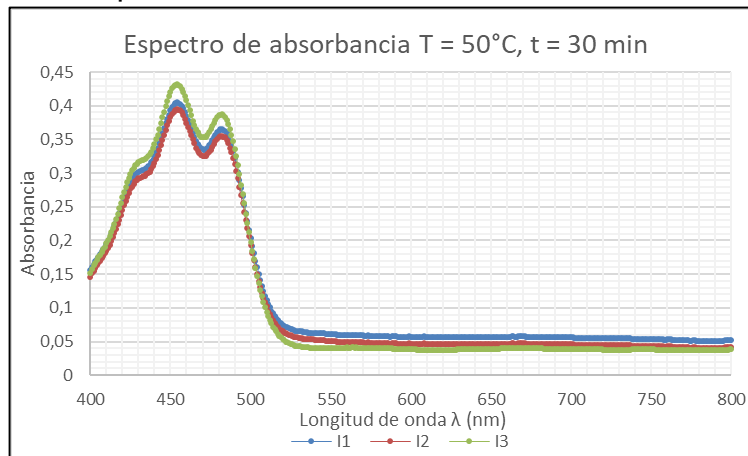
**a. Espectro de absorción, T = 50 °C, t = 10 min**



**b. Espectro de absorción, T = 50°C, t = 20 min**



**c. Espectro de absorción, T = 50°C, t = 30 min**



**ANEXO E**  
**FLUJO DE CAJA CON FINANCIACIÓN.**

	Año										
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
<b>Ingresos</b>		\$799,90	\$815,90	\$832,22	\$848,87	\$865,84	\$883,16	\$900,82	\$918,84	\$937,22	\$955,96
<b>Costos fijos</b>		-\$80,79	-\$80,79	-\$80,79	-\$80,79	-\$80,79	-\$80,79	-\$80,79	-\$80,79	-\$80,79	-\$80,79
<b>Costos variables</b>		-\$675,20	-\$688,70	-\$702,48	-\$716,53	-\$730,86	-\$745,47	-\$760,38	-\$775,59	-\$791,10	-\$806,93
<b>Intereses (10%)</b>		-\$8,34	-\$6,68	-\$5,01	-\$3,34	-\$1,67					
<b>Depreciación E y P</b>		-\$16,69	-\$16,69	-\$16,69	-\$16,69	-\$16,69	-\$16,69	-\$16,69	-\$16,69	-\$16,69	-\$16,69
<b>Utilidad Gravable</b>		\$18,88	\$23,04	\$27,25	\$31,52	\$35,83	\$40,20	\$42,95	\$45,76	\$48,63	\$51,55
<b>Impto renta (33%)</b>		-\$6,23	-\$7,60	-\$8,99	-\$10,40	-\$11,82	-\$13,27	-\$14,17	-\$15,10	-\$16,05	-\$17,01
<b>Utilidad neta</b>		\$12,65	\$15,44	\$18,26	\$21,12	\$24,01	\$26,93	\$28,78	\$30,66	\$32,58	\$34,54
<b>Depreciación E y P</b>		\$16,69	\$16,69	\$16,69	\$16,69	\$16,69	\$16,69	\$16,69	\$16,69	\$16,69	\$16,69
<b>Flujo operativo</b>		\$29,34	\$32,13	\$34,95	\$37,81	\$40,70	\$43,62	\$45,47	\$47,35	\$49,27	\$51,23
<b>Inversión</b>	-\$166,90										
<b>Préstamo</b>	\$83,45	-\$16,69	-\$16,69	-\$16,69	-\$16,69	-\$16,69					
<b>Flujo de Caja libre Financiado</b>	-\$83,45	\$12,65	\$15,44	\$18,26	\$21,12	\$24,01	\$43,62	\$45,47	\$47,35	\$49,27	\$51,23

Fuente: elaboración propia.