

UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR  
FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA  
ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA E INGENIERÍA DE ALIMENTOS



**ESTUDIO DE FACTIBILIDAD DEL PROCESO DE  
PRODUCCIÓN SOSTENIBLE DE ACEITE DE AGUACATE  
(*Persea americana miller*) PARA USO EN LA INDUSTRIA  
DE COSMÉTICOS**

PRESENTADO POR:

**PÉREZ ALDANA, MARÍA ANGÉLICA  
RODRÍGUEZ LINARES, RAFAEL ANÍBAL  
SANTOS LÓPEZ, ALEJANDRA SARAÍ**

PARA OPTAR AL TÍTULO DE:

**INGENIERO QUÍMICO**

CIUDAD UNIVERSITARIA, MARZO DE 2021

**UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR**

RECTOR:

**Msc. ROGER ARMANDO ARIAS ALVARADO**

SECRETARIO GENERAL:

**ING. FRANCISCO ANTONIO ALARCÓN SANDOVAL**

**FACULTAD DE INGENIERIA Y ARQUITECTURA**

DECANO:

**PhD. EDGAR ARMANDO PEÑA FIGUEROA**

SECRETARIO:

**ING. JULIO ALBERTO PORTILLO**

**ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA E INGENIERÍA DE ALIMENTOS**

DIRECTOR:

**INGRA. SARA ELISABETH ORELLANA BERRIOS**

UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR  
FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA  
ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA E INGENIERÍA DE ALIMENTOS

Trabajo de Graduación previo a la opción al Grado de:

**INGENIERO QUÍMICO**

Título:

**ESTUDIO DE FACTIBILIDAD DEL PROCESO DE PRODUCCIÓN SOSTENIBLE  
DE ACEITE DE AGUACATE (*Persea americana miller*) PARA USO EN LA  
INDUSTRIA DE COSMÉTICOS**

Presentando por:

**PÉREZ ALDANA, MARÍA ANGÉLICA**

**RODRÍGUEZ LINARES, RAFAEL ANÍBAL**

**SANTOS LÓPEZ, ALEJANDRA SARAÍ**

Trabajo de Graduación aprobado por:

Docente Asesora:

**INGRA. ANA CECILIA DÍAZ DE FLAMENCO**

San Salvador, marzo de 2021

Trabajo de Graduación aprobado por:

Docente Asesora:

**INGRA. ANA CECILIA DÍAZ DE FLAMENCO**

## **AGRADECIMIENTOS GENERALES.**

El llegar hasta el final de este camino ha sido posible por la gracia y voluntad de nuestro Dios, de Él es todo lo que existe bajo los cielos incluyendo la ciencia, el conocimiento, la sabiduría e inteligencia. Agradecemos a nuestro Dios quien nos ha permitido llegar a este momento y culminar una etapa importante de nuestras vidas, ser profesionales, ser Ingenieros Químicos.

Agradecerle a la Escuela de Ingeniería Química e Ingeniería de Alimentos de la Facultad de Ingeniería y Arquitectura de la Universidad de El Salvador, por todo el apoyo y conocimiento transferido a través de sus docentes durante los años de estudio.

Un agradecimiento inmenso a nuestra asesora Ingra. Ana Cecilia Díaz de Flamenco a quien expresamos nuestra gratitud por todo el apoyo, asesoría y conocimiento brindado a lo largo de la investigación.

Así mismo, agradecerle inmensamente por todo el conocimiento brindado a la Ingra. Eugenia Salvadora Gamero de Ayala, que desde un inicio mostró su apoyo en la investigación.

Estaremos agradecidos inmensamente con la Ingra Rosmery Arely Cerón Morales por todo el apoyo y conocimiento brindado, y quien es un pilar fundamental para que la investigación se realizara, que desde el inicio hasta el final de la investigación estuvo pendiente y brindándonos sus conocimientos para presentar soluciones a los problemas presentados.

Agradecemos a todos por su inmenso apoyo y conocimiento brindados.

*“Los ingenieros químicos no son gente tranquila; gustan de las altas presiones y altas temperaturas”*

Steve LeBlanc

## **AGRADECIMIENTOS.**

Agradezco a Dios todo poderoso por guiarme, cuidarme y ser mi héroe en todo momento, porque él es quien me ha llevado más allá de lo que imaginé. ¡Gracias mi Jesús, tú lo hicisteis posible!

Agradezco infinitamente a Dios, por la familia tan cariñosa que tengo: María Angélica de Pérez, Saúl Pérez, Saúl Alberto Pérez y su esposa Ruth de Pérez, quienes siempre me tuvieron fe y me enseñaron a no rendirme. Esto es para ustedes, ¡Lo logramos familia!

Los caminos de Dios son perfectos, y le doy infinitamente gracias, por permitirme conocer a dos personas maravillosas, quienes me han enseñado mucho tanto en lo profesional como en lo personal y para mí son unas grandes amigas, Ingra. Delmy Rico e Ingra. Cecilia de Flamenco, muchas, muchas gracias por todo.

El amigo es un hermano del alma, doy gracias a Dios por permitirme tener a la mejor amiga y quien es una hermana para mí, Delmy González, quien siempre está dispuesta ayudarme, aconsejarme, y sobre todo siempre tuvo fe en que lo lograría. Y con quien comparto esta alegría. Así mismo, agradezco por los amigos de batalla y alegría, quienes siempre estuvieron dispuestos a bríndame su apoyo en todo momento, Mario Flores, Rosario García, Moisés Gómez, Beralí Alfaro, Jennifer Hernández, Alejandro Sandoval, Oswaldo Jandres, Caren Bolaños, Xiomara Zaldaña, Eduardo Umaña, Jacquelin Vásquez, Francisco Alvarado, Carolina Bernal, Karla Coto, Kathy Bonilla, Daniel Menjivar, Luis Navarro, Allan Cárcamo, Verónica Arévalo, Roció Guevara, Alberto Jiménez, Luis Pérez y Stephanie Bran. A todos, gracias y con mucho cariño les puedo decir, ¡Si se pudo!

Agradezco a Dios por permitirme trabajar con excelentes compañeros y amigos, Alejandra Santos y Rafael Rodríguez, agradezco su entrega y dedicación, les deseo una vida llena de éxitos y bendiciones. Hoy podemos decir, ¡LO LOGRAMOS!

**María Angélica Pérez Aldana**

## **AGRADECIMIENTOS.**

Agradecido con Dios por cuidarme en este largo y difícil camino, por ayudarme a superar cada obstáculo y darme ánimos cuando estuve a punto de darme por vencido, por esas lecciones que ha puesto en mi vida para ser una mejor persona y superarme cada día más.

A mis padres, con quienes estaré eternamente en deuda, Víctor Rodríguez y Araceli Linares, que siempre estuvieron pendientes de mi progreso y me aportaron las suficientes herramientas para enfocarme y salir adelante con mi carrera, muchas gracias por todo ese esfuerzo.

A mi abuela y segunda madre, Isabel Batres, por acompañarme con su incondicional apoyo en este proceso, por todos sus cuidados, oraciones, consejos y palabras de ánimo.

A mis compañeras, Angélica Pérez y Saraí Santos, por los momentos alegres y por esos momentos tristes también, por todo ese apoyo, esfuerzo y dedicación en cada una de las etapas del trabajo, gracias por cada aventura compartida, por la paciencia y la comprensión.

Y finalmente agradezco a cada una de esas personas que directa o indirectamente fueron partícipes de esta etapa de mi vida y que de alguna forma ayudaron a que este objetivo fuese posible.

**Rafael Aníbal Rodríguez Linares**

## AGRADECIMIENTOS.

Agradezco inmensamente a Dios, quien siempre estuvo, ha estado y estoy segura que estará para mí. Sin Él nada de esto hubiese sido posible, creyó en mi más que yo misma y me convenció de que era mucho más capaz de lograr mis metas de lo que yo pensaba.

Agradezco de una manera muy especial a mi familia, quienes han sido mi motor, especialmente a mi padre **Benjamín Eladio Santos**, una persona admirable quien con mucho esfuerzo hizo posible este logro y no me alcanzará la vida para compensarle todo lo que ha hecho por mí. Agradezco también a mi madre Gloria López y a mis hermanos Irene de Galdámez, Kenia Santos, Emérita Santos, Guadalupe Santos, Ulises Santos y Reynaldo Santos quienes siempre han estado para mí. Por último, agradezco a mi cuñado Luis Galdámez por su apoyo incondicional e impulsarme a dar lo mejor de mí.

En el camino para llegar hasta aquí, tuve la dicha de conocer a personas maravillosas que hicieron mucho más agradable este trayecto, Ingrid Peraza una amiga incondicional, siempre dispuesta a ayudar a los demás y Paola Ayala de quien aprendí que siempre se puede seguir mejorando en todo sentido. También agradezco a muchos de mis docentes quienes compartieron su conocimiento y me enseñaron más que solo ciencia, especialmente a nuestra asesora Ana Cecilia Díaz de Flamenco, calidad de docente y persona.

Por último, agradezco inmensamente a mis compañeros **Rafael Rodríguez** y **Angélica Pérez**, por todo su esfuerzo y dedicación en este proyecto. A pesar de todos los contratiempos.

La vida está llena de altos y bajos y tienen éxito aquellos que saben apreciar cuando están arriba y no darse por vencidos cuando están abajo.

**Alejandra Saraí Santos López**



## RESUMEN

En el presente trabajo de investigación se propone una alternativa de diseño sostenible para la producción de aceite de aguacate para ser utilizado en la industria de cosméticos, partiendo con la selección del método de extracción que es la base para desarrollar las etapas que conforman el proceso y con ello poder evaluar las actividades del mismo que representan una problemática ambiental. Esto con el fin de desarrollar un proceso que cumpla con los denominados procesos industriales sostenibles, implementando medidas de manejo ambiental que mitiguen o prevengan los impactos ambientales asociados a cada etapa del proceso.

La metodología desarrollada para seleccionar el mejor método de extracción de aceite de aguacate se basó principalmente en la definición de criterios técnicos como la inversión inicial, el costo del proceso y mantenimiento, el pretratamiento de la materia prima, el rendimiento de extracción, los riesgos para la seguridad y salud ocupacional, compatibilidad con el medio ambiente, el uso del método en la industria, y criterios fisicoquímicos del aceite extraído como, el índice de yodo, saponificación, refracción, peróxido, acidez y el contenido de humedad. A estos criterios se les asignó una valoración cuantitativa basada en la revisión bibliográfica de investigaciones realizadas tanto a nivel industrial como a nivel de laboratorio de los diferentes métodos de extracción. Para la comparación de cada método la herramienta utilizada es la matriz PUGH, este método compara lógicamente diferentes opciones basadas en criterios predefinidos para seleccionar la mejor opción entre varias alternativas.

Para la definición de las operaciones unitarias, los parámetros de operación y los equipos que conforman el proceso, se establecieron los criterios de sostenibilidad, los cuales están enfocados en: a) prevenir o minimizar la producción de residuos, b) aplicar procesos que eviten el uso de sustancias tóxicas, c) control y prevención de la contaminación, d) la reutilización, reciclaje o rechazo del residuo final y e) el cierre en los ciclos de materia y energía.

La evaluación de los impactos ambientales se realizó a través del método de criterios relevantes integrados (CRI) y con base a los resultados fue posible proponer las medidas de manejo ambiental y los indicadores para monitorear el desempeño ambiental del proceso.

Los resultados obtenidos en la investigación mostraron que, entre los diferentes métodos comparados, el que tiene una mayor valoración es el método de centrifugado con una puntuación de diecinueve. A partir de este resultado, el proceso se compone de nueve etapas; recepción y selección de materia prima, almacenamiento de materia prima, lavado y desinfección del fruto, despulpado, pretratamiento de termobatido de la pasta, centrifugación y purificación del aceite para su posterior almacenamiento y envasado. Los resultados de evaluar los impactos ambientales del proceso arrojaron que los impactos con una mayor valoración son: a) el vertido de aguas residuales en la etapa de lavado y desinfección, b) los residuos en la etapa de despulpado, c) la generación de residuos en forma de lodos y agua residual en la etapa de centrifugación y d) la generación de agua residual en la etapa de purificación.

Las medidas ambientales con respecto al manejo de residuos están enfocadas a la reutilización de los mismos, para abono orgánico y como alternativa para la obtención de almidón o colorante (en el caso de la semilla del aguacate). Para el caso del manejo de efluentes, las medidas que se tomaron van enfocadas en alternativas de tratamiento y recirculación del agua, y alternativas menos contaminantes en el proceso de lavado y desinfección del fruto. Los indicadores para evaluar las medidas ambientales fueron planteados en cuatro categorías: a) generación de residuos, b) generación de efluentes, c) consumo de agua y d) consumo energético.

Con base a los resultados obtenidos se puede concluir que técnicamente y de forma teórica es posible diseñar un proceso de producción de aceite a partir del aguacate que contemple los criterios de sostenibilidad ambiental y los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS).

## ÍNDICE DE CONTENIDO.

TEMA	PÁGINA
INTRODUCCIÓN .....	1
<b>CAPITULO 1: ALCANCES Y PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA .....</b>	<b>2</b>
<b>1.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA .....</b>	<b>2</b>
<b>1.2 OBJETIVOS .....</b>	<b>4</b>
1.2.1 Objetivo general. ....	4
1.2.2 Objetivos específicos.....	4
<b>1.3 ALCANCES.....</b>	<b>5</b>
<b>1.4 JUSTIFICACIÓN. ....</b>	<b>6</b>
<b>1.5 ANTECEDENTES.....</b>	<b>7</b>
<b>CAPITULO 2: MARCO TEÓRICO.....</b>	<b>9</b>
<b>2.1 DESARROLLO SOSTENIBLE.....</b>	<b>9</b>
2.1.1 Procesos industriales sostenibles.....	10
2.1.1.1 Características de un proceso industrial sostenible. ....	11
2.1.1.2 Aplicación de las 4 R's a los procesos químicos sostenibles.....	11
2.1.2 Disciplinas en el diseño de procesos industriales sostenibles.....	12
2.1.2.1 Química Verde. ....	13
2.1.2.2 Ingeniería Verde. ....	14
2.1.2.3 Ecología industrial.....	16
2.1.2.4 Producción más limpia o eco-eficiencia. ....	17
2.1.2.5 Ecodiseño. ....	21
2.1.2.6 Cero residuos.....	22

<b>TEMA</b>	<b>PÁGINA</b>
2.1.3 El papel de la ingeniería de procesos en el logro del desarrollo sostenible. ....	23
2.1.4 Objetivos de desarrollo sostenible (ODS).....	24
2.1.5 Sostenibilidad- Ciclo de vida. ....	27
<b>2.2 INDICADORES PARA EVALUAR LA SOSTENIBILIDAD DE UN PROCESO INDUSTRIAL. ....</b>	<b>28</b>
2.2.1 Indicadores económicos.....	28
2.2.2 Indicadores sociales. ....	29
2.2.3 Indicadores ambientales.....	29
2.2.4 Indicadores de productos. ....	33
2.2.5 Indicadores de ecoeficiencia. ....	33
<b>2.3. EVALUACIÓN DE ASPECTOS E IMPACTOS AMBIENTALES. ....</b>	<b>34</b>
2.3.1 Evaluación de impactos ambientales. ....	36
2.3.1.1 Clasificación de los impactos ambientales.....	37
2.3.1.2 Métodos para la evaluación de impactos ambientales.....	38
<b>2.4 PROCESOS CONVENCIONALES DE PRODUCCIÓN DE ACEITE DE AGUACATE. ....</b>	<b>45</b>
2.4.1 Características generales del aguacate. ....	46
2.4.1.1 Producción del aguacate en El Salvador. ....	47
2.4.1.2 Características generales del aguacate como materia prima. ....	51
2.4.1.3 Usos del aguacate en la Industria.....	54
<b>2.5 MÉTODOS DE EXTRACCIÓN DE ACEITES NATURALES. ....</b>	<b>55</b>
2.5.1 Extracción por solvente. ....	56
2.5.1.1 Tipos de solventes orgánicos.....	59

<b>TEMA</b>	<b>PÁGINA</b>
2.5.2 Método de prensado.....	63
2.5.3 Extracción por centrifugado.....	69
2.5.3.1 Centrifugación asistida por enzimas. ....	70
2.5.3.2 Centrifugación asistida mecánicamente.....	70
2.5.4 Extracción por fluidos supercríticos (EFSC). ....	73
2.5.4.1 Extracción con CO <sub>2</sub> supercrítico. ....	74
<b>2.6 CARACTERIZACIÓN DEL ACEITE DE AGUACATE. ....</b>	<b>79</b>
2.6.1 Composición del aceite de aguacate.....	79
2.6.2 Propiedades físicas. ....	83
2.6.3 Propiedades químicas. ....	84
2.6.4 Propiedades microbiológicas.....	88
<b>2.7 CONSIDERACIONES FINALES. ....</b>	<b>89</b>
<b>CAPITULO 3: METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN.....</b>	<b>91</b>
<b>3.1 METODOLOGÍA PARA LA REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA. ....</b>	<b>91</b>
<b>3.2 METODOLOGÍA PARA LA SELECCIÓN DEL MÉTODO DE EXTRACCIÓN DE ACEITE DE AGUACATE. ....</b>	<b>93</b>
3.2.1 Matriz PUGH. ....	93
3.2.2 Desarrollo de la matriz PUGH para la selección del método de extracción de aceite de aguacate. ....	95
3.2.3 Criterios para la selección del método de extracción. ....	96
3.2.3.1 Inversión inicial. ....	96
3.2.3.2 Costos del proceso y mantenimiento. ....	97
3.2.3.3 Pretratamiento de la materia prima. ....	97
3.2.3.4 Rendimiento de extracción.....	97

<b>TEMA</b>	<b>PÁGINA</b>
3.2.3.5 Características fisicoquímicas del producto final. ....	98
<b>3.3 METODOLOGÍA PARA EL DISEÑO DEL PROCESO DE PRODUCCIÓN SOSTENIBLE DE ACEITE DE AGUACATE.....</b>	<b>101</b>
3.3.1 Definición de los criterios de sostenibilidad a aplicar.....	101
3.3.2 Especificaciones del aguacate como materia prima.....	102
3.3.3 Especificaciones del aceite de aguacate como producto terminado. .	103
3.3.4 Diagrama global del proceso.....	104
3.3.5 Diagrama de bloques del proceso.....	105
3.3.6 Diagrama de flujo de proceso.....	106
3.3.7 Balances de materia.....	106
3.3.8 Selección y dimensionamiento de equipos y maquinaria. ....	107
3.3.9 Consumo energético del proceso.....	108
<b>3.4 METODOLOGÍA PARA LA EVALUACIÓN DE IMPACTOS AMBIENTALES.....</b>	<b>108</b>
3.4.1 Identificación de aspectos ambientales.....	108
3.4.2 Identificación de los impactos ambientales. ....	109
3.4.3 Evaluación de los impactos ambientales. ....	110
<b>3.5 METODOLOGÍA PARA LA GESTIÓN DE IMPACTOS AMBIENTALES.</b>	<b>112</b>
<b>CAPITULO 4: ANÁLISIS Y PRESENTACIÓN DE RESULTADOS.....</b>	<b>113</b>
<b>4.1 REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA. ....</b>	<b>113</b>
<b>4.2 SELECCIÓN DEL MÉTODO DE EXTRACCIÓN DE ACEITE DE AGUACATE.....</b>	<b>116</b>
4.2.1 Análisis comparativo a través de la matriz PUGH.....	118

<b>TEMA</b>	<b>PÁGINA</b>
4.2.2 Justificación de factores y alternativas. ....	119
4.2.2.1 Inversión inicial .....	119
4.2.2.2 Costo del proceso y mantenimiento. ....	119
4.2.2.3 Pretratamiento de la materia prima. ....	120
4.2.2.4 Rendimiento de extracción. ....	120
4.2.2.5 Índice de yodo. ....	120
4.2.2.6 Índice de saponificación. ....	121
4.2.2.7 Índice de refacción. ....	121
4.2.2.8 Índice de acidez. ....	122
4.2.2.9 Humedad. ....	122
4.2.2.10 Riesgos para la seguridad y salud ocupacional. ....	122
4.2.2.11 Compatibilidad con el medio ambiente. ....	123
4.2.2.12 Uso del método en la industria. ....	123
4.2.3 Justificación de la selección del método de extracción. ....	124
<b>4.3 DISEÑO DEL PROCESO DE PRODUCCIÓN SOSTENIBLE DE ACEITE</b>	
<b>DE AGUACATE. ....</b>	<b>126</b>
4.3.1 Definición de los criterios de sostenibilidad a aplicar. ....	126
4.3.2 Especificaciones del aguacate como materia prima. ....	127
4.3.3 Especificaciones del aceite de aguacate como producto terminado. .	128
4.3.4 Diagrama global del proceso. ....	129
4.3.4.1 Descripción de las entradas y salidas del proceso. ....	130
4.3.5 Diagrama de bloques del proceso. ....	132
4.3.5.1 Recepción y almacenamiento de materia prima. ....	134
4.3.5.2 Almacenamiento de materia prima. ....	134
4.3.5.3 Lavado y desinfección. ....	134
4.3.5.4 Despulpado. ....	135
4.3.5.5 Termobatido. ....	135

<b>TEMA</b>	<b>PÁGINA</b>
4.3.5.6 Centrifugación.....	136
4.3.5.7 Purificación. ....	136
4.3.5.8 Almacenamiento y envasado .....	137
4.3.6 Diagrama de flujo del proceso de extracción de aceite de aguacate..	137
4.3.6.1 Definición de parámetros de control.....	137
4.3.6.2 Balances de masa de cada operación unitaria. ....	146
4.3.7 Selección y dimensionamiento de equipos.....	158
4.3.7.1 Selección del equipo para almacenamiento del aguacate. ....	158
4.3.7.2 Selección del equipo para el lavado y desinfección.....	159
4.3.7.3 Selección de equipo despulpador de aguacate. ....	161
4.3.7.4 Selección del equipo para el termobatido. ....	163
4.3.7.5 Selección de equipo para la centrifugación.....	165
4.3.7.6 Selección de equipo para purificación del aceite. ....	168
4.3.7.7 Selección del equipo para el almacenado y envasado de aceite. ....	170
4.3.7.8 Equipos auxiliares para el proceso de extracción de aceite.....	172
4.3.7.9 Identificación de los criterios de sostenibilidad aplicado a los equipos utilizados en el proceso producción de aceite de aguacate .....	177
4.3.8 Consumo energético del proceso.....	178
4.3.9 Análisis de los criterios de sostenibilidad aplicados al proceso de extracción de aceite de aguacate. ....	180
<b>4.4 EVALUACIÓN DE IMPACTOS AMBIENTALES DEL PROCESO.....</b>	<b>186</b>
4.4.1 Identificación de aspectos ambientales.....	186
4.4.2 Identificación de los impactos ambientales. ....	189
4.4.2.1 Descripción de los impactos ambientales identificados. ....	191



<b>TEMA</b>	<b>PÁGINA</b>
4.4.3 Evaluación de impactos ambientales generados en el proceso de extracción de aceite de aguacate.....	194
4.4.3.1 Análisis de resultados de la evaluación de impactos ambientales.....	196
<b>4.5 MEDIDAS DE MANEJO AMBIENTAL PARA CONTRIBUIR A LA SOSTENIBILIDAD DEL PROCESO.....</b>	<b>198</b>
4.5.1 Manejo de residuos.....	200
4.5.2 Manejo de efluentes.....	213
4.5.3 Consumo de agua.....	220
4.5.4 Consumo de energía eléctrica.....	223
4.5.5 Análisis de las medidas propuestas en el proceso de extracción de aceite de aguacate.....	227
4.5.6 Indicadores ambientales para la evaluación de las medidas propuestas.....	229
<b>CONCLUSIONES.....</b>	<b>235</b>
<b>RECOMENDACIONES.....</b>	<b>239</b>
<b>REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....</b>	<b>240</b>
<b>ANEXOS.....</b>	<b>253</b>
Anexo A. Composición fisicoquímica del aceite de aguacate y el aceite de oliva.....	253
Anexo B. Balance de materia.....	254
Anexo C. Simbología del proceso.....	262
Anexo D. Ejemplos de cálculo de la evaluación de impactos ambientales a través del método CRI.....	264

Anexo E. Esquema del procedimiento utilizado para la extracción de almidón a partir de semilla de aguacate .....	265
Anexo F. Procedimiento para la extracción de colorante de la semilla de aguacate a través del método de maceración por lixiviación con solvente.....	266
Anexo G. Límites permisibles para la descarga de aguas residuales a un cuerpo receptor.....	267
Anexo H. Sistema de captación de agua lluvia .....	267
Anexo I. Sistema de generación de energía eléctrica a partir de biomasa .....	268

## ÍNDICE DE FIGURAS.

<b>FIGURA</b>		<b>PÁGINA</b>
<b>Figura 2.1</b>	Pilares del desarrollo sostenible. ....	10
<b>Figura 2.2</b>	Pirámide hacia la sostenibilidad. Ecología industrial .....	16
<b>Figura 2.3</b>	Jerarquía de residuos, cero residuos.....	23
<b>Figura 2.4</b>	Esquema general del análisis del ciclo de vida de un producto.....	27
<b>Figura 2.5</b>	Esquema de evaluación de impacto ambiental. ....	37
<b>Figura 2.6</b>	Presentación física del aguacate ( <i>Persea americana miller</i> ). ....	47
<b>Figura 2.7</b>	Zonas potenciales de producción de aguacate en El Salvador. ....	48
<b>Figura 2.8</b>	Productos cosméticos elaborados a partir del aceite de aguacate. ....	55
<b>Figura 2.9</b>	Células del mesocarpio del aguacate durante la maduración. ....	56
<b>Figura 2.10</b>	Homogeneizador ultrasónico de extracción Soxhlet.....	58
<b>Figura 2.11</b>	Diagrama de fases.....	73
<b>Figura 3.1</b>	Diagrama global del proceso. ....	105
<b>Figura 3.2</b>	Diagrama de bloques del proceso. ....	105
<b>Figura 3.3</b>	Ejemplo de diagrama de flujo de procesos de agua-vapor, en un sistema de generación de energía eléctrica.....	106
<b>Figura 3.4</b>	Balance de materia para operación unitaria específica. ....	108
<b>Figura 4.1</b>	Esquema del proceso de análisis bibliográfico .....	114

<b>FIGURA</b>	<b>PÁGINA</b>
<b>Figura 4.2</b>	Distribución de los archivos incluidos en la propuesta metodológica..... 115
<b>Figura 4.3</b>	Gráfico comparativo de los métodos de extracción de aceite de aguacate evaluados a través de la matriz Pugh..... 118
<b>Figura 4.4</b>	Resultados de la evaluación del método de centrifugación ..... 124
<b>Figura 4.5</b>	Diagrama global del proceso de extracción de aceite de aguacate. .... 130
<b>Figura 4.6</b>	Diagrama de bloques del proceso de extracción de aceite de aguacate. .... 133
<b>Figura 4.7</b>	Entradas y salidas en el proceso de recepción y selección de materia prima. .... 146
<b>Figura 4.8</b>	Entradas y salidas en el proceso de almacenamiento de materia prima ..... 147
<b>Figura 4.9</b>	Entradas y salidas en el proceso de lavado y desinfección del aguacate. .... 147
<b>Figura 4.10</b>	Entradas y salidas en el proceso de despulpado. .... 149
<b>Figura 4.11</b>	Entradas y salidas en el proceso de termobatido. .... 150
<b>Figura 4.12</b>	Entradas y salidas en el proceso de centrifugación. .... 151
<b>Figura 4.13</b>	Entradas y salidas en el proceso de purificación del aceite ..... 154
<b>Figura 4.14</b>	Entradas y salidas en el proceso de almacenado del aceite. .... 156

<b>FIGURA</b>	<b>PÁGINA</b>
<b>Figura 4.15</b> Diagrama de flujo del proceso de extracción de aceite de aguacate. ....	157
<b>Figura 4.16</b> Esquema del funcionamiento de un Tricanter. ....	166
<b>Figura 4.17</b> Esquema de funcionamiento de una centrifuga de discos.....	169
<b>Figura 4.18</b> Cintra transportadora.....	173
<b>Figura 4.19</b> Transportador de tornillo.....	174
<b>Figura 4.20</b> Tubería de acero inoxidable. ....	175
<b>Figura 4.21</b> Bomba de desplazamiento positivo. ....	175
<b>Figura 4.22</b> Intercambiador calor de placas. ....	176
<b>Figura 4.23</b> Gráfico comparativa de las potencias de los equipos utilizados para la extracción de aceite. ....	180
<b>Figura 4.24</b> Gráfico que representa la distribución de etapas por criterio de sostenibilidad. ....	182
<b>Figura 4.25</b> Diagrama de flujo con los criterios de sostenibilidad aplicados al proceso .....	185
<b>Figura 4.26</b> Gráfico de porcentaje de los diferentes niveles de significancia en la evaluación de impactos ambientales .....	197
<b>Figura 4.27</b> Resumen general de los aspectos ambientales relacionados al proceso de extracción de aceite de aguacate .....	199
<b>Figura 4.28</b> Diagrama general de los residuos sólidos generados en el proceso y las medidas de manejo ambiental .....	200

<b>FIGURA</b>	<b>PÁGINA</b>
<b>Figura 4.29</b> Proceso de re-triturado en cuatro fases de Alfa-Laval para el tratamiento de orujo de aceite.....	209
<b>Figura 4.30</b> Diagrama general de los tipos de efluentes generados en el proceso. ....	213
<b>Figura 4.31</b> Diagrama general de las etapas que consumen agua en el proceso .....	220
<b>Figura 4.32</b> Diagrama general de las medidas ambientales para el consumo de energía en el proceso .....	223
<b>Figura 4.33</b> Diagrama de flujo del proceso de extracción de aceite de aguacate con recirculación de agua. ....	228

## ÍNDICE DE TABLAS.

<b>TABLA</b>		<b>PÁGINA</b>
<b>Tabla 2.1</b>	Indicadores de sostenibilidad ambiental. ....	30
<b>Tabla 2.2</b>	Aspectos e impactos ambientales y su área de incidencia. ....	35
<b>Tabla 2.3</b>	Ejemplo de matriz de interacción entre los factores ambientales y las acciones. ....	39
<b>Tabla 2.4</b>	Descripción de parámetros del método de Criterios Relevantes Integrados (CRI). ....	42
<b>Tabla 2.5</b>	Descripción de los criterios de reversibilidad y riesgo .....	44
<b>Tabla 2.6</b>	Clasificación de impactos en categorías según el valor de VIA. ....	45
<b>Tabla 2.7</b>	Porcentaje de fruto de aguacate cosechado por departamento en El Salvador. ....	47
<b>Tabla 2.8</b>	Características del aguacate según la zona de cultivo de El Salvador. ....	49
<b>Tabla 2.9</b>	Clasificación taxonómica y composición química del aguacate. ....	51
<b>Tabla 2.10</b>	Propiedades fisicoquímicas del aguacate en estado de madurez. ....	51
<b>Tabla 2.11</b>	Principales características físicas de tres razas de aguacate. ....	52
<b>Tabla 2.12</b>	Parámetros mínimos de calidad para las diferentes variedades de aguacate. ....	54
<b>Tabla 2.13</b>	Ventajas y desventajas del método de extracción por solvente. ...	59

<b>TABLA</b>	<b>PÁGINA</b>
<b>Tabla 2.14</b> Disolventes con densidades mayores que el agua.....	60
<b>Tabla 2.15</b> Disolventes con densidades menores que el agua.....	60
<b>Tabla 2.16</b> Prueba fisicoquímica del aceite de aguacate extraído con solvente hexano. ....	61
<b>Tabla 2.17</b> Pruebas fisicoquímicas del aceite de aguacate extraído con solvente éter de petróleo.....	61
<b>Tabla 2.18</b> Resumen de las condiciones generales para la extracción de aceite por el método de solvente. ....	62
<b>Tabla 2.19</b> Rendimiento y parámetros fisicoquímicos de aceite de aguacate extraído por prensado hidráulico.....	65
<b>Tabla 2.20</b> Parámetros de calidad del aceite de aguacate extraído por prensado en frío. ....	66
<b>Tabla 2.21</b> Parámetros de calidad del aceite de aguacate extraído por prensado mecánico, con pretratamiento de secado.....	67
<b>Tabla 2.22</b> Parámetros fisicoquímicos del aceite de aguacate extraído por prensado hidráulico y expeller. ....	67
<b>Tabla 2.23</b> Composición de ácidos grasos en el aceite de aguacate extraído por prensado hidráulico y expeller. ....	68
<b>Tabla 2.24</b> Parámetros del aceite de aguacate extraído por termobatido.....	71
<b>Tabla 2.25</b> Composición de ácidos grasos en el aceite de aguacate extraído por termobatido. ....	71



<b>TABLA</b>	<b>PÁGINA</b>
<b>Tabla 2.26</b>	Características fisicoquímicas del aceite aguacate variedad Margarida y Hass, extraído por centrifugación..... 72
<b>Tabla 2.27</b>	Parámetros críticos del agua, el dióxido carbono y el metanol..... 75
<b>Tabla 2.28</b>	Información técnica del equipo de extracción por fluidos supercríticos..... 76
<b>Tabla 2.29</b>	Prueba de calidad del aceite de aguacate extraído por diferentes métodos..... 77
<b>Tabla 2.30</b>	Condiciones de extracción de aceite de aguacate a escala semi industrial, con CO <sub>2</sub> como fluido supercrítico. .... 77
<b>Tabla 2.31</b>	Caracterización fisicoquímica del aceite de aguacate extraído por fluido supercrítico a escala semi-industrial..... 78
<b>Tabla 2.32</b>	Perfil de ácido graso del aceite de aguacate extraído por fluidos supercríticos a escala semi-industrial. .... 78
<b>Tabla 2.33</b>	Composición (%) de los ácidos grasos comunes del aceite de aguacate. .... 81
<b>Tabla 2.34</b>	Compuesto de antioxidante presentes en el aceite de aguacate. Concentración [=] mg x kg <sup>-1</sup> . .... 82
<b>Tabla 2.35</b>	Propiedades fisicoquímicas del aceite de aguacate según método de extracción..... 87
<b>Tabla 2.36</b>	Comparación de las características fisicoquímicas del aceite de aguacate variedad Margarida, Hass y Comercial..... 87

<b>TABLA</b>	<b>PÁGINA</b>
<b>Tabla 2.37</b> Especificación de límites microbianos (expresados en UFC/g o UFC/cm <sup>3</sup> ). .....	88
<b>Tabla 3.1</b> Estructura de la matriz PUGH.....	95
<b>Tabla 3.2</b> Formato ejemplo para presentar la identificación de aspectos ambientales. ....	109
<b>Tabla 3.3</b> Ejemplo de matriz para la identificación de impactos ambientales. ....	109
<b>Tabla 3.4</b> Ejemplo de matriz para la evaluación de impactos ambientales .	111
<b>Tabla 3.5</b> Presentación de la información de las medidas de manejo.....	112
<b>Tabla 4.1</b> Comparación de los métodos de extracción de aceite de aguacate a través de la matriz PUGH. ....	117
<b>Tabla 4.2</b> Criterios comunes entre disciplinas de sostenibilidad.....	127
<b>Tabla 4.3</b> Parámetros fisicoquímicos recomendados para el aguacate como materia prima para extraer aceite. ....	128
<b>Tabla 4.4</b> Parámetros fisicoquímicos recomendados para el aceite de aguacate.....	129
<b>Tabla 4.5</b> Límites microbianos a evaluar en el aceite de aguacate. ....	129
<b>Tabla 4.6</b> Parámetros de control en la etapa de recepción y selección de materia prima.....	138

<b>TABLA</b>	<b>PÁGINA</b>
<b>Tabla 4.7</b> Parámetros de control en la etapa almacenamiento de materia prima.....	138
<b>Tabla 4.8</b> Parámetros de operación en el proceso de lavado y desinfección del aguacate. ....	141
<b>Tabla 4.9</b> Parámetros de operación en el proceso de despulpado del aguacate.....	142
<b>Tabla 4.10</b> Parámetros en el proceso de batido de la pasta de aguacate. ....	143
<b>Tabla 4.11</b> Parámetros de operación en la etapa de centrifugado de la pasta de aguacate.....	144
<b>Tabla 4.12</b> Parámetros de operación en la etapa de purificación del aceite de aguacate. ....	144
<b>Tabla 4.13</b> Condiciones de almacenamiento para el aceite de aguacate.....	145
<b>Tabla 4.14</b> Descripción de entradas y salidas en el proceso de lavado y desinfección del aguacate. ....	148
<b>Tabla 4.15</b> Caracterización de entradas y salidas en el proceso de despulpado del aguacate. ....	150
<b>Tabla 4.16</b> Caracterización de entradas y salidas en el proceso de termobatido de la pasta de aguacate. ....	151
<b>Tabla 4.17</b> Caracterización de entradas y salidas en el proceso de centrifugación de la pasta de aguacate. ....	153
<b>Tabla 4.18</b> Caracterización de entradas y salidas en el proceso de purificación del aceite. ....	155

<b>TABLA</b>	<b>PÁGINA</b>
<b>Tabla 4.19</b>	Descripción de entradas y salidas en el proceso de almacenamiento del aceite. .... 156
<b>Tabla 4.20</b>	Descripción del equipo para la maduración del aguacate. .... 159
<b>Tabla 4.21</b>	Comparación de los equipos para el lavado y desinfección del aguacate. .... 160
<b>Tabla 4.22</b>	Comparación de los equipos para despulpar fruta. .... 162
<b>Tabla 4.23</b>	Comparación de batidoras para la etapa de termobatido. .... 164
<b>Tabla 4.24</b>	Comparación de decantadores trifásicos para la etapa de centrifugación. .... 167
<b>Tabla 4.25</b>	Comparación de centrifugas de discos para la etapa de purificación del aceite. .... 170
<b>Tabla 4.26</b>	Comparación de los equipos para el almacenamiento del aceite. 171
<b>Tabla 4.27</b>	Parámetros de operación de la cinta transportadora. .... 173
<b>Tabla 4.28</b>	Parámetros de operación de tuberías de acero inoxidable. .... 175
<b>Tabla 4.29</b>	Parámetros de operación de bombas de desplazamiento positivo. .... 176
<b>Tabla 4.30</b>	Parámetros de operación del intercambiador de placas. .... 177
<b>Tabla 4.31</b>	Identificación de los criterios de sostenibilidad aplicados a los equipos de producción ..... 177
<b>Tabla 4.32</b>	Consumo energético de los equipos para la de extracción de aceite de aguacate. .... 179

<b>TABLA</b>	<b>PÁGINA</b>
<b>Tabla 4.33</b> Identificación de los criterios de sostenibilidad aplicados al proceso de extracción de aceite .....	181
<b>Tabla 4.34</b> Identificación y descripción de aspectos ambientales del proceso de extracción de aceite de aguacate .....	186
<b>Tabla 4.35</b> Identificación de impactos ambientales en el proceso de extracción de aceite de aguacate .....	190
<b>Tabla 4.36</b> Evaluación de impactos ambientales por el método CRI.....	195
<b>Tabla 4.37</b> Resultados de evaluación de impactos ambientales .....	196
<b>Tabla 4.38</b> Impactos, medidas de manejo, criterios de sostenibilidad e indicadores asociados a los desechos generados en la etapa de despulpado .....	201
<b>Tabla 4.39</b> Impactos, medidas de manejo, criterios de sostenibilidad e indicadores asociados a los lodos generados en la etapa de centrifugación .....	207
<b>Tabla 4.40</b> Impactos, medidas de manejo, criterios de sostenibilidad e indicadores asociados a los lodos generados en la etapa de envasado .....	211
<b>Tabla 4.41</b> Impactos, medidas de manejo, criterios de sostenibilidad e indicadores asociados a los efluentes generados en la etapa de lavado y desinfección. ....	214
<b>Tabla 4.42</b> Impactos, medidas de manejo, criterios de sostenibilidad e indicadores asociados a los efluentes generados en la etapa de centrifugación y purificación. ....	217

<b>TABLA</b>		<b>PÁGINA</b>
<b>Tabla 4.43</b>	Impactos, medidas de manejo, criterios de sostenibilidad e indicadores asociados al consumo de agua de proceso .....	221
<b>Tabla 4.44</b>	Impactos, medidas de manejo, criterios de sostenibilidad e indicadores ambientales asociados al consumo de energía del proceso .....	224
<b>Tabla 4.45</b>	Indicadores ambientales para la evaluación de las medidas ambientales propuestas para el proceso de producción sostenible de aceite de aguacate. ....	230

## INTRODUCCIÓN.

En la actualidad los aceites vegetales desempeñan un papel importante en diferentes áreas de la industria como la medicina, cosmetología, arte culinario, entre otras. Los aceites en cosmetología especialmente el aceite de aguacate, debido a sus propiedades orgánicas permite proteger y nutrir, tanto la piel como el cabello (Rigano, 2007).

La importancia que confieren los consumidores a este tipo de productos de belleza, ha generado que la industria cosmética esté en constante actualización, tanto en el área cosmetológica como en el área de procesos industriales, donde actualmente se está desarrollando un nuevo concepto, el desarrollo sostenible, el cual está orientado a garantizar la satisfacción de las necesidades fundamentales de la población y elevar su calidad de vida, a través del manejo racional de los recursos naturales, propiciando su conservación, recuperación, mejoramiento y uso adecuado, de tal manera que no se comprometa las necesidades de las generaciones venideras (Loayza Pérez y Silva Meza, 2013).

De acuerdo con lo anterior, en el presente proyecto se estudia la factibilidad del diseño de un proceso de producción sostenible para la obtención de aceite de aguacate para uso en la industria de cosméticos. Con la extracción de aceite de aguacate se pretende a su vez aprovechar el potencial de la especie vegetal, el cual dependiendo de la variedad y madurez del fruto alcanza en la pulpa niveles de hasta 25% de aceite, lo que permite lograr rendimientos de alrededor de 10% de la fruta fresca (J. A. Olaeta, 2003). Además, todo el proceso de producción debe ir acompañado de estrategias que permitan según el Programa de Naciones Unidas para el Medio Ambiente (PNUMA, 2000) reducir los problemas de contaminación, mejorar la eficiencia y reducir los riesgos para los humanos, pasando de un proceso ineficiente de control a un proceso eficiente de prevención, enfocándose en los objetivos de desarrollo sostenible tales como, producción y consumo responsable (ODS 12), utilización de energía no contaminante (ODS 7) y acciones que protejan y resguarden los sistemas acuáticos y terrestres (ODS 14 y 15).

## **CAPITULO 1: ALCANCES Y PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.**

En este capítulo se presenta la importancia de la temática y la forma en cómo se llevará a cabo el estudio. También se establecen los objetivos, alcances, justificación y los antecedentes que son la base para el desarrollo del presente trabajo.

### **1.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.**

El Salvador es un país en donde el cultivo del aguacate es una alternativa muy valiosa para la diversificación de la agricultura, tanto por su rentabilidad como por su riqueza nutricional (Centro Nacional de Tecnología Agropecuaria y Forestal [CENTA], 2018). El aguacate se ha convertido en una alternativa de estudio como fuente natural en la fabricación de cosméticos, puesto que cada día hay más consumidores que se sienten atraídos por la alta calidad y la riqueza en activos de las formulaciones a base de fuentes naturales. A nivel mundial los productos e ingredientes naturales se han venido incorporando de forma creciente en la industria cosmética como una alternativa a la cosmética tradicional. Lo anterior responde principalmente a una percepción de mayor calidad, funcionalidad y efectos benéficos en la salud, así como una mayor conciencia en la preservación del medio ambiente y el desarrollo sostenible (Alcalde, 2008).

Las ventajas del aguacate es su potencial para ser usado como materia prima para la elaboración de aceite tanto en la industria cosmética como la alimenticia. El aguacate dependiendo de la variedad y madurez del fruto alcanza en la pulpa niveles de hasta 25% de aceite, lo que permite lograr rendimientos de alrededor de 10% de la fruta fresca (Olaeta, 2003).

En general los aceites vegetales son muy utilizados en la industria de cosméticos, debido a que se obtienen de recursos renovables, y constituyen una alternativa respetuosa con el medio ambiente, frente a otros ingredientes cosméticos de origen



fósil (Donat, 2017). La producción de estos aceites en el mercado internacional es alta, lo cual indica que su demanda debe también serlo. Este mercado en los últimos años ha tenido un volumen de producción de aproximadamente 145 millones de toneladas métricas (Pons, 2015). Los procesos de obtención tradicionales de estos aceites se basan en la cocción, extrusión de las semillas y posterior extracción con solventes del aceite contenido en ellas. Estos métodos de obtención son caros e implican daños medioambientales como resultado del empleo de solventes orgánicos nocivos a la atmósfera (Pons, 2015). Además, cabe mencionar que en general algunos procesos de producción carecen de prácticas para hacer uso eficiente de materias primas, agua y energía para la producción de sus bienes, dichas prácticas son importantes porque minimizan la presencia de residuos o desechos, el consumo de agua y la energía (Loayza y Silva, 2013).

Lo anterior evidencia la importancia de introducir un nuevo concepto, el proceso industrial sostenible, que hace posible que las empresas sean responsables, implementando actividades limpias y seguras en sus procesos, minimizando los problemas ambientales, sin dejar de ser competitivas en el mercado frente a otras industrias (Loayza et al., 2013). Partiendo de este concepto se presenta la oportunidad de realizar un estudio para diseñar un proceso de producción sostenible para la obtención de aceite de aguacate para uso en la industria de cosméticos, considerando que todo proceso de producción debe ir acompañado de estrategias que permitan reducir los problemas de contaminación, mejorar la eficiencia y reducir los riesgos para los humanos. Todo esto enmarcado en el logro de los objetivos de desarrollo sostenible (ODS) que abarcan el interés de mantener energía asequible y no contaminante (ODS 7), la producción y consumo responsable (ODS 12) y el cuidado de los ecosistemas acuáticos y terrestres (ODS 14 y 15) (Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente [PNUMA], 2000)

## **1.2 OBJETIVOS.**

En este apartado se presentan los objetivos de la investigación, que son las actividades clave a lograr para responder o resolver el problema planteado de la investigación. Con estos objetivos se busca concretar cuáles son las tareas imprescindibles para llevar a cabo el trabajo de investigación.

### **1.2.1 Objetivo general.**

Proponer una alternativa de diseño de proceso sostenible para la producción de aceite de aguacate para ser utilizado en la industria de cosméticos.

### **1.2.2 Objetivos específicos.**

1. Seleccionar el método de extracción del aceite de aguacate de acuerdo a las características fisicoquímicas recomendadas para la industria de cosméticos.
2. Diseñar el proceso de producción de aceite de aguacate con enfoque de sostenibilidad que permita una producción amigable con el medio ambiente.
3. Identificar los impactos ambientales derivados de las actividades del proceso de producción de aceite de aguacate que puedan tener un impacto sobre el medio ambiente.
4. Proponer alternativas de gestión ambiental sobre los impactos ambientales más significativos, generados por las actividades del proceso de extracción de aceite de aguacate.

### **1.3 ALCANCES.**

- a. La selección del método de extracción se hará en función de las características fisicoquímicas que deba tener el producto final para su producción y aceptación en el mercado de cosméticos, considerando los criterios de sostenibilidad, basado en la revisión bibliográfica de investigaciones relacionadas.
- b. Se desarrollará el diseño del proceso de producción de aceite de aguacate enfocándose en los principios de sostenibilidad: eficiencia energética, uso adecuado del agua, selección de materias primas y reutilización de residuos.
- c. Se evaluarán los impactos ambientales derivados del proceso productivo del aceite de aguacate con el fin de priorizar aquellos que tenga una mayor incidencia en el medio ambiente.
- d. Se propondrán acciones para gestionar los impactos ambientales prioritarios derivados del proceso de extracción de aceite de aguacate a través de estrategias ambientales.

## 1.4 JUSTIFICACIÓN.

Según el CENTA (2018), el aguacate, es una fruta con creciente aceptación en los consumidores por su contenido nutricional en proteínas, vitaminas, minerales y su beneficio en la salud humana. Actualmente la producción de aguacate a nivel mundial se ha incrementado llegando en el 2018 a 6.3 millones de toneladas (Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación [FAO], 2018). En El Salvador su producción entre el año 2017 y 2018 fue de 7,939.27 toneladas (Ministerio de Agricultura y Ganadería de El Salvador [MAG], 2018), teniendo la disponibilidad del fruto durante todo el año.

Entre las principales características del aceite de aguacate está su riqueza en ácidos grasos esenciales y esteroides en una proporción de 30-60 %, los cuales son lípidos insaponificables con propiedades cosméticas de regeneración, protección de la epidermis y cicatrizantes, así como alfatocoferol, derivado de la vitamina E con acción antioxidante (Alcalde, 2007).

Según la Fediol (Federación de la Industria de aceites y harina proteínica de oleaginosas de la Unión Europea), la producción de aceites y grasas vegetales ascendió a 12 millones de toneladas en el año 2007. Según el CBI (Centro de Promoción de Importaciones de países en desarrollo) entre los años 2004 y 2007, la producción de aceites y grasas vegetales aumentó en un promedio de 7.7% por año.

Los problemas ambientales relacionados con las actividades de la industria en general, y de la industria de aceites naturales en particular pueden ser prevenidos si los procesos productivos que utilizan las empresas, cumplen con una serie de requisitos y tienen como base para su diseño un conjunto de principios que deben ser tomados en cuenta por los ingenieros de procesos. Para ello es necesario introducir un nuevo paradigma, el proceso industrial sostenible, que hará posible que las empresas sean responsables en sus procesos y competitivas al mismo tiempo (Loayza et al., 2013).

## 1.5 ANTECEDENTES.

Artículo científico presentado por la revista, Food Science and Technology Research, Japón: *Material Balance of Olive Components in Virgin Olive Oil Extraction Processing*. Dammak, I., Neves, M., Souilem, S., Isoda, H., Sayadi, S., & Nakajima, M. (2015). El estudio tiene como objetivo principal el procesamiento del fruto de aceituna para la producción de aceite de oliva. Del aceite obtenido se analizaron los componentes orgánicos más importantes tales como: el contenido de aceite, agua, carbohidratos, proteínas y minerales.

Artículo científico presentado por la revista In Gourmet and health-promoting specialty, *Avocado Oil*. Woolf, A., Wong, M., Eyres, L., McGhie, T., Lund, C., Olsson, S., & Requejo-Jackman, C. (2009). El objetivo principal de la investigación es presentar un estudio completo del aceite de aguacate, desde la importancia en el arte culinario, el proceso de extracción, hasta presentar un estudio de los principales compuestos orgánicos del aceite. Así mismo se presenta las ventajas y desventajas de los diferentes métodos de extracción de aceite.

Artículo presentado por la revista de Agroindustrial Science. Perú: *Ácidos grasos y criterios de calidad del aceite de palta obtenido mediante tres sistemas de extracción libres de solvente*. Vargas, M., Gutarra, H., Delgado-Soriano, V., Cortés-Avendaño, P. y Elías, C. (2020). El objetivo de la investigación fue determinar el perfil de ácidos grasos y los criterios de calidad del aceite de aguacate obtenido mediante tres sistemas de extracción libres de solvente.

Artículo científico presentado por Journal of Agricultural Engineering, Italia: *Avocado oil extraction processes: method for cold-pressed high-quality edible oil production versus traditional production*. Costagli, G., & Betti, M. (2015). El objetivo de la investigación es comparar los métodos de extracción tradicional con los modernos, así mismo, presentar las características del fruto y las propiedades del aceite de aguacate.

Tesis de pregrado, presentado por la universidad de Sevilla, España: Instalación de tratamiento de aguas residuales de almazara. Gómez Pariente, M. (2016). La investigación tiene como objetivo presentar una alternativa de tratamiento de aguas residuales para la zona de almazara, con el objetivo de poder transformar sus residuos en subproductos que puedan generar beneficios a la comunidad.

Congreso ibérico de agroingeniería y ciencias hortícolas, España: Reciclaje de residuos de la producción de guacamole mediante compostaje. González-Fernández, J. J., Alvarez, J. M., Galea, Z., Guirado, E., Hermoso, J. M. y López, R. (2013). El objetivo del congreso es presentar una oportunidad para el aprovechamiento agrícola de los residuos orgánicos siendo una forma de evitar problemas medioambientales contribuyendo así a la sostenibilidad de los cultivos.

Guía de manejo ambiental presentado por la empresa PALMA Y TRABAJO S.A.S, Colombia: Plan de manejo ambiental palma y trabajo s.a.s. planta extractora de aceite de palma. (2017). El objetivo de la guía es presentar un plan de manejo ambiental, donde se identifiquen los impactos tanto negativos como positivos que se generan en el proceso de extracción de aceite de palma, además de formular acciones y medidas que conduzcan a minimizar el impacto al medio ambiente.

Artículo científico, presentado por Universidad Nacional Mayor de San Marcos, España: Los procesos industriales sostenibles y su contribución en la prevención de problemas ambientales. Jorge, L., Vicky, S. 2013. El objetivo de la investigación es dar a conocer una nueva concepción sobre los procesos industriales, los denominados procesos industriales sostenibles, aplicando este concepto en los procesos industriales de las grandes empresas para elaborar productos químicos, a bajo costos y siendo amigable con el medio ambiente, sin dejar de ser competitivas con las demás industrias.

## **CAPITULO 2: MARCO TEÓRICO.**

Para llevar a cabo la propuesta de estudio de factibilidad del proceso de producción sostenible de aceite de aguacate para uso en la industria de cosméticos, es necesario describir los métodos de extracción de aceite, el concepto de sostenibilidad y como se aplica esto a los procesos industriales, así mismo. Para poder desarrollar el estudio se necesita describir las disciplinas involucradas en el diseño de los procesos sostenibles y para su evaluación es necesario conocer las herramientas, estrategias e indicadores que ayudaran a determinar el impacto negativo que el proceso causa al medio ambiente.

Los problemas ambientales relacionados con las actividades de la industria se pueden prevenir si en los procesos productivos se establecen una serie de requisitos y se tiene como base en su diseño un conjunto de principios ambientales. Para ello es necesario introducir un nuevo concepto, el proceso industrial sostenible, el cual hará posible que las empresas sean responsables a través de actividades limpias y seguras, siendo al mismo tiempo competitivas, es decir, que puedan interactuar en mercados nacionales e internacionales con las mismas condiciones que otras empresas del sector (Loayza et al., 2013).

### **2.1 DESARROLLO SOSTENIBLE.**

El origen del concepto de desarrollo sostenible está asociado a la preocupación creciente de los problemas que existieron en las últimas décadas del siglo XX, al considerar el vínculo existente entre el desarrollo económico, social y sus efectos inmediatos en el medio ambiente (Gómez, s.f). Por lo tanto, el desarrollo sostenible es ese que va enfocado en satisfacer las necesidades de la generación presente sin comprometer la capacidad de las generaciones futuras (Macedo, 2005).

Las primeras y las actuales representaciones sistémicas del desarrollo sostenible contemplan la importancia de la interacción de tres pilares fundamentales: social, económico y ecológico. Dicha interacción se presenta en la Figura 2.1.



**Figura 2.1 Pilares del desarrollo sostenible.** Fuente: (Castaños, 2013).

La interacción muestra que los tres pilares tienen una interacción mutua y que si uno de ellos retrocede los demás lo hacen, y para ello, son los indicadores los que permiten cuantificar los avances y retrocesos en estas áreas.

### **2.1.1 Procesos industriales sostenibles.**

Los procesos industriales sostenibles, son procesos constituidos por etapas, que son operaciones unitarias que potencian el aprovechamiento de los materiales y la energía para la producción de bienes o productos y al mismo tiempo minimizan o eliminan la presencia de residuos y desechos (Loayza et al., 2013).



### **2.1.1.1 Características de un proceso industrial sostenible.**

Los procesos industriales sostenibles poseen las siguientes características que los hacen diferentes de los procesos industriales tradicionales (Loayza, 2016), estas características son:

- i. Innovación: incorpora innovaciones tecnológicas en el área de producción.
- ii. Eficiencia: tiene en cuenta indicadores tecnológicos y económicos para cuantificar su grado de avance o retroceso.
- iii. Limpieza: emplea la minimización de residuos sólidos, líquidos y gaseosos, se basan en los indicadores ambientales.
- iv. Contribución al desarrollo sostenible: potencia el uso de materias primas renovables no contaminantes al ambiente y evita conflictos socio-ambientales.
- v. Competitividad: sus productos y servicios son de calidad y a precios que pueden ser asumidos por el mercado.
- vi. Sostenible empresarialmente.

En los procesos tradicionales el objetivo principal es transformar la materia prima e insumos en productos, subproductos, residuos y desechos, usando racionalmente la energía. Por otro lado, en los procesos sostenibles el objetivo principal es potenciar el aprovechamiento de los materiales y la energía para la producción de bienes, y minimizar la presencia de residuos y desechos (Loayza et al., 2013).

### **2.1.1.2 Aplicación de las 4 R's a los procesos químicos sostenibles.**

Es difícil definir con exactitud cuando una empresa se vuelve sostenible, sin embargo, las empresas que más se han acercado a que su operación sea sostenible han llevado a cabo las 4 R's de la sostenibilidad que son: repensar, reducir, reusar y reciclar. Rodríguez (2001), las describe de la siguiente manera:

**Repensar:** es el primer paso a seguir para lograr el cambio, es denominado como reingeniería, la cual consiste en observar y estudiar los procesos, productos materiales y en si la estructura de la organización con el fin de descubrir aquellas situaciones que no sean las correctas y también localizar en donde existen posibilidades de mejora.

**Reducir:** se refiere al concepto de productividad es decir aprovechar al máximo los recursos de la empresa.

**Reutilizar:** tiene como objetivo volver a utilizar un producto, material o desecho con el fin reducir costos en compra y producción. Al hacer eso se genera el llamado logros de reutilización de sostenibilidad.

**Reciclar:** en general en las industrias el volumen de desechos generados no permite crear una planta de reciclaje propia, por lo que la forma de contribuir es a través de la utilización de materias primas reciclada y enviando sus desechos a una planta recicladora.

### **2.1.2 Disciplinas en el diseño de procesos industriales sostenibles.**

El diseño sostenible en ingeniería de procesos se basa necesariamente en el diseño tradicional de ingeniería química, apoyándose de otras disciplinas. La integración de estas disciplinas en el panorama actual del diseño permitirá crear un marco de referencia para el desarrollo de productos, procesos y sistemas de producción, cuyos componentes no sean peligrosos, generen un estado de bienestar, consideren y respeten cada uno de los ciclos de vida de los productos que intervienen e imiten en lo posible a los sistemas naturales (Loayza et al., 2013). Las disciplinas que se deben considerar en el diseño de procesos industriales sostenibles son: la química verde, ingeniería verde, ecología industrial, producción más limpia, ecodiseño y cero residuos.

### 2.1.2.1 Química Verde.

La química verde fue adoptada como una propuesta novedosa para reducir y/o eliminar los problemas ambientales derivados de actividades industriales. Según la US Environmental Protection Agency (EPA), la química verde es el uso de la química para la prevención de la contaminación, el diseño de productos químicos y procesos benéficos para el ambiente.

La química verde plantea 12 principios para conseguir sus objetivos, Olivero y Pájaro (2011) los describen como sigue:

**Objetivo 1. Prevención.** Es preferible evitar la producción de un residuo que reciclarlo, tratarlo o disponer de él una vez que se haya formado.

**Objetivo 2. Economía atómica.** Los métodos de síntesis deberán diseñarse de manera que se incorporen al máximo los reactivos en el producto final, minimizando la formación de subproductos, lo que favorece también al objetivo 1.

**Objetivo 3. Realizar síntesis química menos peligrosa.** Consiste en aplicar procesos que generen la mínima toxicidad e impacto ambiental.

**Objetivo 4. Diseñar productos y compuestos menos peligrosos.** Los productos químicos se deben diseñar con una toxicidad mínima.

**Objetivo 5. Utilizar disolventes y condiciones seguras de reacción.** Las sustancias auxiliares de los procesos químicos (disolventes, tampones, aditivos de separación, entre otros), han de ser inocuas y reducirlas al mínimo.

**Objetivo 6. Diseñar para la eficiencia energética.** Debe minimizarse los requerimientos energéticos para los procesos químicos, los cuales serán evaluados por su impacto medioambiental y económico, y reducirlos al máximo, intentando llevar a cabo los métodos de síntesis a temperatura y presión ambiente.

**Objetivo 7. Utilizar materias primas renovables.** Los materiales de partida utilizados deben proceder de fuentes renovables, en la medida en que sea económica y técnicamente factible.

**Objetivo 8. Evitar derivados químicos.** La síntesis debe diseñarse con el uso mínimo de grupos protectores para evitar pasos extras y reducir los desechos.

**Objetivo 9. Utilizar catalizadores.** Debe emplearse catalizadores lo más selectivos y reutilizables posibles.

**Objetivo 10. Diseñar productos fácilmente degradables al final de su vida útil.** Los productos químicos han de ser diseñados de tal manera que al culminar su función no persistan en el ambiente y puedan degradarse a derivados inertes o biodegradables.

**Objetivo 11. Monitorear los procesos químicos en tiempo real para evitar la contaminación.** Debe crearse sistemas de control y monitorización continuos para prevenir la producción de sustancias peligrosas durante los procesos.

**Objetivo 12. Prevenir accidentes.** Diseñar los procesos químicos, utilizando métodos y sustancias que reduzcan los accidentes (emisiones, explosiones, incendios, entre otros), y minimizar los daños cuando se produzca un accidente.

#### **2.1.2.2 Ingeniería verde.**

La ingeniería verde se desarrolló como extensión de la química verde y tiene un alcance más amplio. David Allen y David Shonnard conciben la ingeniería verde como “el diseño, comercialización y uso de procesos y productos, los cuales son técnica y económicamente viables, a la vez que minimizan la generación de contaminación y el riesgo para la salud y el medioambiente” (Loayza et al., 2013).

La ingeniería verde más que una disciplina nueva, está destinada a transformar las disciplinas y prácticas tradicionales de la ingeniería en otras nuevas que aumenten la sostenibilidad. La ingeniería verde tiene 12 principios, Loayza et al. (2013) los describen a continuación:

**Principio 1.** Los diseñadores deben esforzarse por asegurar que todas las entradas y salidas de materia y energía sean tan inherentemente inocuas como sea posible.

**Principio 2.** Es mejor prevenir la contaminación que tratar o limpiar el residuo ya producido.

**Principio 3.** Las operaciones de separación y purificación deberían diseñarse para minimizar el consumo de energía y el uso de materiales.

**Principio 4.** Los productos, procesos y sistemas deberían diseñarse para la maximización de la eficiencia en el uso de materia, energía y espacio.

**Principio 5.** Los productos, procesos y sistemas deberían estar orientados hacia la "producción bajo demanda" más que hacia el "agotamiento de la alimentación".

**Principio 6.** La entropía y la complejidad inherentes, deben ser consideradas como una inversión al elegir entre reutilizar, reciclar o rechazar como residuo final.

**Principio 7.** Diseñar para la durabilidad, no para la inmortalidad.

**Principio 8.** Satisfacer la necesidad, minimizar el exceso.

**Principio 9.** Minimizar la diversidad de materiales.

**Principio 10.** Cerrar los ciclos de materia y energía del proceso tanto como sea posible.

**Principio 11.** Diseñar para la reutilización de componentes tras el final de la vida útil del producto.

**Principio 12.** Las entradas de materia y energía deberían ser renovables.

### 2.1.2.3 Ecología industrial.

La ecología industrial plantea una analogía entre los sistemas ecológicos naturales y la comunidad de plantas industriales (infraestructuras o instalaciones industriales). Al igual que en un ecosistema biológico, en un ecosistema industrial cada proceso debe ser visto como una parte dependiente e interrelacionada de un todo o de un sistema mayor.

La ecología industrial explora nuevas posibilidades para la interrelación entre empresas, como resultado de un replanteamiento de las actividades industriales y en respuesta al conocimiento cada vez más completo sobre sus impactos ambientales (Cervantes, Sosa, Robles y Rodríguez, 2009). La representación de la ecología industrial se muestra en la Figura 2.2.



**Figura 2.2** Pirámide hacia la sostenibilidad. Ecología industrial.

Fuente: (Cervantes et al., 2009).

#### **2.1.2.4 Producción más limpia o eco-eficiencia.**

La producción más limpia (PML) tiene la finalidad de contribuir al desarrollo sostenible. Igual que su sinónimo ecoeficiencia, la PML se define como una estrategia ambiental preventiva e integrada, enfocada hacia procesos productivos, productos y servicios, con la finalidad de reducir costos, incentivar innovaciones y disminuir los riesgos relevantes al ser humano y al ambiente (Paredes, 2014).

La importancia de esta estrategia empresarial radica en su aporte a la competitividad empresarial basada en la conservación del medio ambiente y la responsabilidad social. De esta manera contribuye al equilibrio entre los tres elementos principales del desarrollo sostenible (medio ambiente, social y económico) (Paredes, 2014).

Los objetivos de la política de PML, Loayza et al. (2013) los describen como:

- i. Optimizar el consumo de recursos naturales y materias primas.
- ii. Aumentar la eficiencia energética y utilizar combustibles más limpios.
- iii. Prevenir la generación de residuos contaminantes
- iv. Prevenir, mitigar, corregir y compensar los impactos ambientales sobre la población y los ecosistemas.
- v. Adoptar tecnologías más limpias y prácticas de mejoramiento continuo de la gestión ambiental.
- vi. Minimizar y aprovechar los residuos generados en caso que sean inevitables.

#### **A. Factores o elementos para alcanzar producciones más limpias.**

Para alcanzar una producción más limpia en cualquier industria se necesita la conjugación y complementación de los siguientes factores o elementos (Muñoz, Urrutia y Vaquero, 2005), los cuales se describen como siguen:

## **I. Mejoramiento de la gestión de producción.**

Contempla la toma de medidas internas que no provocan cambios en los procedimientos de fabricación, sino que mejoran aspectos tales como la organización de la producción, el control de las fuentes de contaminación y el adecuado manejo del agua, materias primas y productos. Las medidas internas pueden ser:

### a) Uso eficiente del agua.

El consumo de agua es un parámetro clave que determina los volúmenes y concentraciones de los líquidos residuales a manejar y por ende la capacidad y características de los sistemas de tratamiento y disposición final. Para consumir menos agua es necesario cerrar los sistemas, recircular el agua del proceso en los casos en que sea posible, realizar la recogida en seco de desperdicios y garantizar el buen estado de los sistemas de conducción y los depósitos de almacenamiento.

### b) Inventario, almacenamiento y manejo adecuado de los materiales utilizados en el proceso productivo.

Incluye la compra de materiales cuando se necesite y en las cantidades necesarias, el registro de las fechas de caducidad para el establecimiento de prioridades en el uso, la utilización de contenciones alrededor de tanques, contenedores y equipos del proceso para evitar derrames o fugas, el manejo cuidadoso de los materiales peligrosos y el establecimiento de los procedimientos de eliminación de materiales contaminados o caducados.

### c) Separación y tratamiento independiente de los residuos generados.

Implica la separación del efluente proveniente del agua residual del proceso con el objetivo de permitir realizar un manejo diferenciado de acuerdo a su peligrosidad, grado de contaminación y posibilidades de tratamiento y aprovechamiento, reduciendo de esta manera los volúmenes y costos de manejo. Por otra parte, se facilita



la reincorporación de los residuales no contaminados o no diluidos al proceso de producción, o su envío a otro sitio para la recuperación de materiales o sustancias de valor económico.

d) Mantenimiento preventivo y correctivo.

Consiste en inspecciones regulares, limpiezas, pruebas, y sustitución de partes gastadas o descompuestas, a fin de limitar las posibilidades de fugas o derrames debido al mal funcionamiento y las fallas de equipos y accesorios, o en la solución inmediata cuando éstos se produzcan, evitando que las sustancias tóxicas lleguen a los sistemas de alcantarillado y tratamiento, o se produzcan contaminaciones cruzadas.

e) Reciclaje o reúso de residuales.

Las medidas internas son también un factor de gran importancia para el posible reusó o aprovechamiento de residuales sin afectar al ambiente, la calidad del producto o el proceso receptor de los mismos.

f) Educación y capacitación de los recursos humanos.

Puede ser la técnica de prevención de la contaminación más elemental, pues es importante que conozcan y entiendan los beneficios económicos, ambientales y sanitarios de lograr una producción más limpia. La toma de medidas internas como la aplicación de buenas prácticas de higiene industrial, el control eficiente de los procesos, la eliminación de errores operativos que impliquen la liberación al ambiente de corrientes contaminantes, etc., complementan los impactos positivos que pudieran tener los cambios tecnológicos.

## **B. Modificaciones en los procesos productivos.**

Muchas veces la toma de medidas internas puede ir acompañada por cambios tecnológicos en el proceso de producción que van a promover el reúso del agua, la

sustitución de algunos materiales usados en el proceso y la recuperación de determinadas sustancias que previamente se vertían en los efluentes y que a partir de los cambios se pueden utilizar dentro del mismo proceso tecnológico. En algunas industrias como la química, se considera el cambio tecnológico como la acción fundamental para disminuir la contaminación ambiental. Este aspecto contempla:

a) Cambios en el proceso.

Consisten en cambiar uno o más procesos o el equipamiento usado en ellos. Pueden tener como resultado la reducción en volumen y/o toxicidad del residual generado. No tienen que ser necesariamente extensos o costosos para implementarse.

b) Sustitución de materiales.

Comprende los cambios de la materia prima, de composición o uso de un producto intermedio o final, o de productos y sustancias tóxicas que se usan en un proceso, con el objetivo de reducir la generación de contaminantes en la fuente.

c) Aprovechamiento económico de residuales.

Debe constituir la línea prioritaria de trabajo en la introducción de prácticas de producción más limpia. Aún con la introducción de prácticas de producción más limpia se producirán determinados volúmenes de residuales, por lo que resulta necesario agotar las posibilidades de cierre del sistema productivo y tratar éstos como recursos que, al aprovecharse, disminuyen simultáneamente la demanda de recursos naturales y las cargas contaminantes dispuestas al medio ambiente.

d) Controles de salida.

Aunque la tendencia actual es diseñar los procesos productivos y las tecnologías previniendo la producción de residuales en la fuente, no se puede prescindir de la utilización de sistemas de tratamiento de las emisiones contaminantes a la salida

de los procesos productivos, que remuevan contaminantes seleccionados y garanticen el cumplimiento de los parámetros de vertimiento o reúso. Estos sistemas reducen la contaminación cuando su funcionamiento es adecuado, pero son soluciones costosas para la sociedad y la industria, que pueden generar problemas.

#### **2.1.2.5 Ecodiseño.**

Entre las disciplinas a utilizar en la sostenibilidad se tiene el ecodiseño el cual se utiliza para la evaluación de los impactos ambientales de una línea de producción (Sanes, 2012).

El ecodiseño permite reducir costos de producción, optimizar la calidad y aumentar la vida útil de los productos, a través, de la selección de recursos más sostenibles o con menor consumo energético. El objetivo principal del ecodiseño es reducir los distintos impactos ambientales de un determinado producto o servicio a lo largo de todo su ciclo de vida (Tamayo y Vicente, 2007).

Entre las prácticas de ecodiseño según Tamayo et al. (2007), se tienen:

- a) Reciclaje de materiales.
- b) Incrementar la durabilidad del producto.
- c) Empleo de materiales reciclables.
- d) Menor consumo energético.
- e) Rediseño/ reacondicionamiento.
- f) Menor desperdicio en producción.
- g) Técnicas limpias de producción.
- h) Reducción en el peso y/o volumen del producto.
- i) Empleo de materiales o envases más limpios y reutilizables.
- j) Empleo de menor cantidad de envase.

### **2.1.2.6 Cero residuos.**

Según Vilella (2018), una economía circular de cero residuos tiene implicancias climáticas muy importantes. Fundamentalmente, los programas de cero residuos tienen como resultado una menor demanda de materiales de origen natural, cuya extracción, transporte y procesamiento son fuentes importantes de emisiones de gases de efecto invernadero y, por lo tanto, reducen las emisiones en prácticamente todas las industrias y sectores económicos.

Además, la implementación exitosa de una economía circular de cero residuos proporcionará otros beneficios ambientales, sociales y económicos significativos, como la eficiencia de recursos, la creación de empleos, la prosperidad baja en carbono, un medio ambiente saludable, una producción limpia y un consumo sostenible, pero para garantizar tal éxito, es necesario adoptar un enfoque integral.

La transición hacia una economía circular de cero residuos requiere de cambios fundamentales en toda la economía y deben basarse según Vilella (2018), en los siguientes pilares interdependientes:

- a) La reducción constante de desechos a través de la prevención de residuos y la maximización de la recuperación de materiales mediante esquemas de recolección.
- b) El rediseño de productos y procesos, las instalaciones de tratamiento flexibles de residuos.
- c) La reformulación de políticas de energía renovable y metodologías de contabilidad de gases de efecto invernadero y apoyo al desarrollo de esquemas dirigidos por trabajadores.

Esta evidenciado que el mejor residuo es aquel que nunca se produce. De hecho, la prevención y reducción de residuos es la opción preferida en la jerarquía de residuos en términos de sustentabilidad y la más efectiva para la mitigación del cambio

climático en cuanto a la gestión de recursos (Vilella, 2018). En la Figura 2.3 se presenta la jerarquía de residuos propuesta por esta disciplina de cero residuos indicando el orden de preferencia de las opciones de gestión de residuos basados en la sostenibilidad.

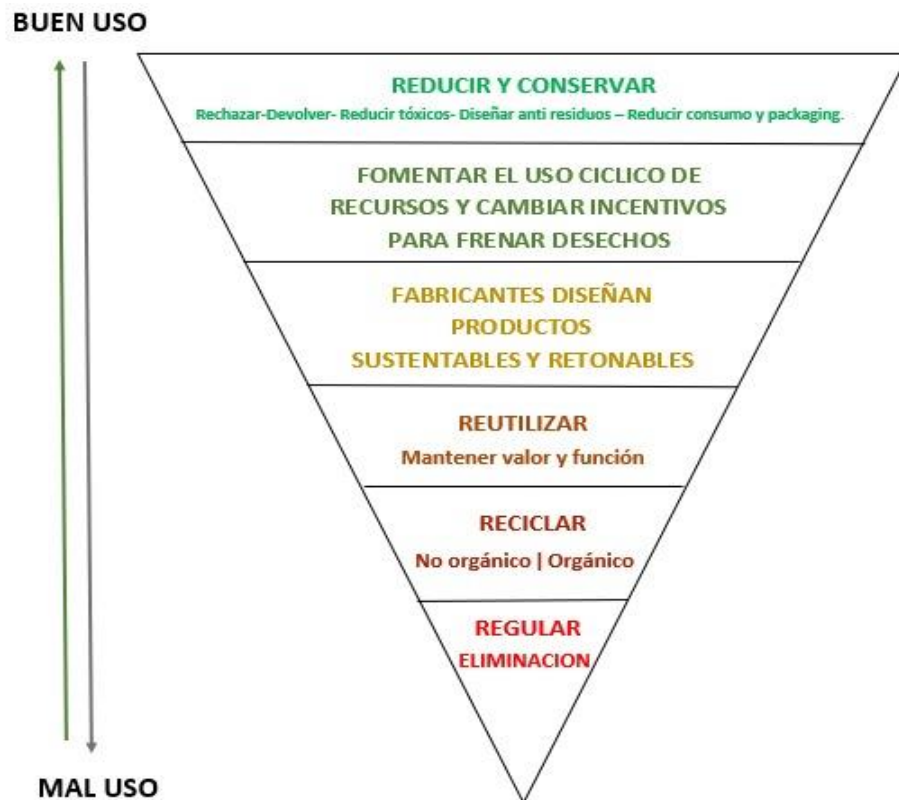


Figura 2.3 Jerarquía de residuos, cero residuos. Fuente: (Vilella, 2018).

### 2.1.3 El papel de la ingeniería de procesos en el logro del desarrollo sostenible.

La ingeniería de procesos es una especialidad tecnológica que, aplicando los principios fundamentales de la ingeniería, economía y ecología, busca producir bienes (o productos) que la sociedad requiere para satisfacer sus necesidades. El proceso productivo corresponde al componente operativo de la empresa, la cual para ser

competitiva debe buscar producir óptimamente, es decir, con eficiencia tecnológica, organizacional, económica, social y ambiental (Loayza et al., 2013).

Los ingenieros de procesos diseñan, operan y controlan procesos industriales en los cuales se utilizan y transforman materias primas (recursos naturales) o sustancias químicas (resultantes de otros procesos), en productos o insumos. Actualmente los ingenieros de procesos se centran en el diseño y operación de procesos industriales sostenibles (Loayza et al., 2013).

#### **2.1.4 Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS).**

Los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) adoptados por las Organización de las Naciones Unidas contienen la agenda global más ambiciosa aprobada por la comunidad internacional, proponiendo equilibrar las tres dimensiones esenciales del desarrollo sostenible (económica, social y ambiental) (Gómez, 2018).

Los ODS son 17 objetivos genéricos, que se materializan en otras 169 metas medibles a través de 230 indicadores verificables (Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo [PNUD], 2017).

Los 17 objetivos del desarrollo sostenible son:

**Objetivo 1.** Poner fin a la pobreza en todas sus formas y en todo el mundo.

**Objetivo 2.** Poner fin al hambre, lograr la seguridad alimentaria y la mejora de la nutrición y promover la agricultura sostenible.

**Objetivo 3.** Garantizar una vida sana y promover el bienestar de todos a todas las edades.

**Objetivo 4.** Garantizar una educación inclusiva y equitativa de calidad y promover oportunidades de aprendizaje permanente para todos.

**Objetivo 5.** Lograr la igualdad de género y empoderar a todas las mujeres y las niñas.

**Objetivo 6.** Garantizar la disponibilidad y la gestión sostenible del agua y el saneamiento para todos.

**Objetivo 7.** Garantizar el acceso a una energía asequible, fiable, sostenible y moderna para todos.

**Objetivo 8.** Promover el crecimiento económico sostenido, inclusivo y sostenible, el empleo pleno y productivo y el trabajo decente para todos.

**Objetivo 9.** Construir infraestructuras resilientes, promover la industrialización inclusiva y sostenible, y fomentar la innovación.

**Objetivo 10.** Reducir la desigualdad en los países y entre ellos.

**Objetivo 11.** Lograr que las ciudades y los asentamientos humanos sean inclusivos, seguros, resilientes y sostenibles.

**Objetivo 12.** Garantizar modalidades de consumo y producción sostenibles.

**Objetivo 13.** Adoptar medidas urgentes para combatir el cambio climático y sus efectos.

**Objetivo 14.** Conservar y utilizar sosteniblemente los océanos, los mares y los recursos marinos para el desarrollo sostenible.

**Objetivo 15.** Proteger, restablecer y promover el uso sostenible de los ecosistemas terrestres, gestionar sosteniblemente los bosques, luchar contra la deforestación, detener e invertir la degradación de las tierras y detener la pérdida de biodiversidad.

**Objetivo 16.** Promover sociedades pacíficas e inclusivas para el desarrollo sostenible, facilitar el acceso a la justicia para todos y construir a todos los niveles instituciones eficaces e inclusivas que rindan cuentas.

**Objetivo 17.** Fortalecer los medios de implementación y revitalizar la Alianza Mundial para el Desarrollo Sostenible.

De los 17 objetivos del desarrollo sostenible, tres (ODS 13, 14 y 15) están relacionados directamente al desarrollo ambiental, debido a que el cambio climático afecta a todos sin excepción de ninguna índole (Gómez, 2018). Dichos objetivos se describen según la Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura [UNESCO] (2017) como:

- a) **El ODS 13:** propone que sus metas estén dirigidas a frenar los estragos causados al medio ambiente y a construir un modelo sostenible en el que se pueda habitar sin comprometer los recursos para las futuras generaciones.
- b) **El ODS 14:** propone metas enfocadas a disminuir y erradicar el vertido y los desechos marinos, ya que la sobrepesca ha provocado la extinción de muchas especies marinas, además, los mares y océanos son una de las fuentes principales para la sobrevivencia de los seres vivos.
- c) **El ODS 15:** propone una gestión sostenible para evitar la deforestación, y así detener la degradación de las tierras y la pérdida de la biodiversidad.

De los 17 ODS, tres (ODS 6, 7 y 12) están relacionado al desarrollo industrial sostenible, teniendo como meta disminuir la contaminación ambiental (Gómez, 2018). Dichos objetivos la UNESCO (2017) los define de la siguiente manera:

- a) **El ODS 6:** propone mantener agua limpia y saneamiento través de herramientas sostenibles, con el objetivo de disminuir los impactos ambientales que los procesos industriales generan.
- b) **El ODS 7:** Garantizar el acceso a una energía asequible, fiable, sostenible y moderna para todos, contribuyendo a la reducción de la huella de carbono y haciendo uso de energía de fuentes renovables.



- c) **El ODS 12:** trata de hacer conciencia sobre la producción y consumo responsable tanto a nivel industrial como a nivel de cada habitante del planeta.

### 2.1.5 Sostenibilidad- Ciclo de vida.

El Análisis del Ciclo de Vida (ACV) de un producto es una metodología que intenta identificar, cuantificar y caracterizar los diferentes impactos ambientales asociados a cada una de las etapas del ciclo de vida de un producto. Básicamente, se enfoca al rediseño de productos bajo el criterio de la minimización de los recursos energéticos y materias primas limitadas. Por tal motivo, la conservación de recursos privilegia la reducción de la cantidad de residuos generados (a través del producto), pero ya que éstos se seguirán produciendo, el ACV plantea manejar los residuos en una forma sustentable minimizando todos los impactos asociados con el sistema de manejo (Sanes, 2012).

El esquema general del análisis del ciclo de vida de un producto se muestra en la Figura 2.4.

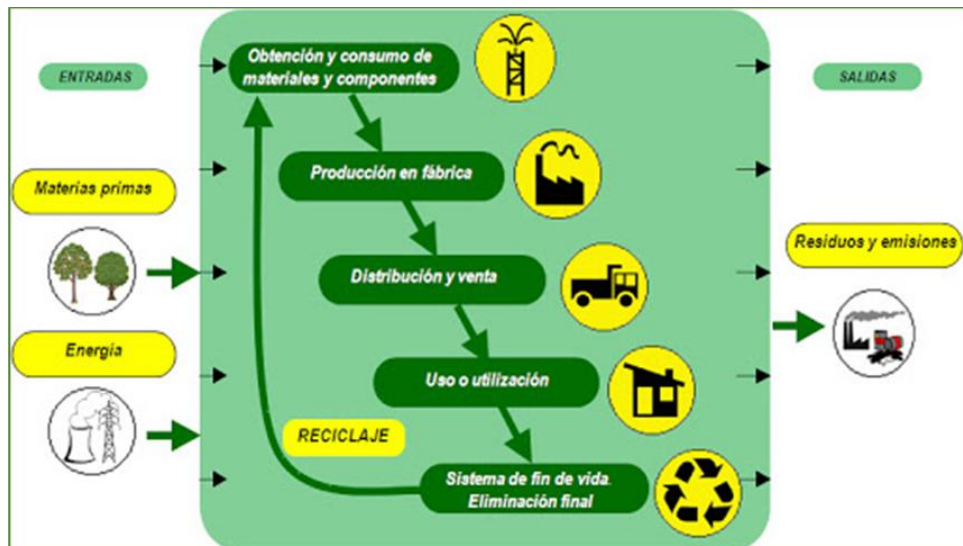


Figura 2.4 Esquema general del análisis del ciclo de vida de un producto.

Fuente: (Contreras, 2014).

Por lo tanto, ACV se definirá como una metodología que permite evaluar los impactos de un producto en cada una de las etapas de su ciclo de vida, con el fin de determinar su sostenibilidad, para lo cual incluye indicadores de evaluación de factores políticos, económicos, socio-culturales, tecnológicos y ecológicos (Sanes, 2012).

## **2.2 INDICADORES PARA EVALUAR LA SOSTENIBILIDAD DE UN PROCESO INDUSTRIAL.**

Los indicadores de sostenibilidad evalúan el desempeño económico, ambiental y social de una organización, permitiendo gestionar la sostenibilidad de la misma, a través de la medición, monitoreo y mejora de los indicadores (Chilealimentos, 2013).

Los indicadores facilitan el proceso de toma de decisiones, permiten medir y calibrar el progreso hacia las metas de desarrollo sostenible. Por otro lado, pueden constituirse en verdaderas señales de alerta que prevengan daños económicos, sociales y ambientales (De Miguel, García y Sánchez, 2009).

### **2.2.1 Indicadores económicos.**

Los indicadores económicos abordan temas como el valor económico generado y distribuido, la participación en el mercado, y los impactos económicos indirectos (Chilealimentos, 2013). Además, permite a la organización medir los resultados económicos de sus actividades y valorar las inversiones que lleva a cabo en el entorno en el que opera (De Miguel et al., 2009). Algunos de los indicadores económicos más importantes son:

- a) Porcentaje de incremento de beneficio.
- b) Porcentaje de ingresos totales dedicado a la prevención y el tratamiento de la contaminación (tratamientos residuos, emisiones, aguas residuales).

- c) Porcentaje de ingresos totales dedicado al consumo de energía.
- d) Porcentaje de ingresos totales dedicado a los empleados.

### **2.2.2 Indicadores sociales.**

En el ámbito social los indicadores brindan información referente al impacto de la actividad sobre la sociedad, los clientes, los proveedores, la comunidad local, pero centrándose principalmente en los resultados de los trabajadores (De Miguel et al., 2009). Algunos ejemplos de indicadores sociales son:

- a) Porcentaje de empleos nuevos/año.
- b) Porcentaje de absentismo.
- c) Porcentaje de contratos a tiempo parcial, obra y servicio y sustitución.
- d) Porcentaje horas extra respecto al total de horas trabajadas.
- e) Porcentaje de rotación de empleados.
- f) Porcentaje mujeres en relación al total de trabajadores.
- g) N° de quejas y reclamaciones/año.

### **2.2.3 Indicadores ambientales.**

Los indicadores ambientales están relacionados con el comportamiento medioambiental y el impacto que genera la actividad al medio ambiente (ecosistema, residuos, emisiones, vertidos), así como el consumo y fuente de origen de los recursos naturales que se utiliza para prestar la actividad (agua, energía, entre otros) (De Miguel et al., 2009), además de evaluar el grado en que se cumplen las normativas (Chilealimentos, 2013). En la Tabla 2.1 se presentan algunos de los indicadores que permiten evaluar el desempeño ambiental.

**Tabla 2.1** Indicadores de sostenibilidad ambiental.

INDICADOR	DESCRIPCIÓN	MEDICIÓN
Materia prima, insumos y embalaje.	Describe como la organización contribuye a la conservación del recurso y los esfuerzos por reducir el consumo de materias prima, insumos y embalaje.	a) Porcentaje (%) de materia prima, insumo y embalaje utilizado por producto terminado.
Porcentaje de materia prima, embalaje e insumos provenientes de materiales reciclables.	Se refieren a los materiales que sustituyen a los materiales vírgenes.	a) Material reciclado utilizado comparado con el material total utilizado que no proviene de fuente reciclada.
Consumo de energía eléctrica (kWh).	Energía comprada a un intermediario. Muestra el esfuerzo de la empresa por gestionar los impactos ambientales.	a) Consumo de energía eléctrica en el período/Cantidad de producto terminado. b) Consumo de energía eléctrica en el período/Cantidad de materia prima procesada.

Continúa...

**Tabla 2.1** Indicadores de sostenibilidad ambiental (Continuación).

INDICADOR	DESCRIPCIÓN	MEDICIÓN
Consumo de combustibles.	Combustibles como el petróleo, gas natural, carbón, biomasa, gas licuado en otros. Con este indicador se puede evaluar la eficiencia energética de la planta.	<ul style="list-style-type: none"> <li>a) Consumo total de combustible.</li> <li>b) Consumo total desglosado por fuentes/Consumo total.</li> <li>c) Consumo de combustible/ Cantidad de producto terminado.</li> </ul>
Eficiencia en el uso de energía.	Se refiere al ahorro debido al rediseño de procesos, conversión y adaptación de equipos y comportamiento del personal. Reduce la dependencia de la organización de fuente no renovables.	<ul style="list-style-type: none"> <li>a) Variación del indicador entre un periodo y otro.</li> </ul>
Agua reciclada y reutilizada (m <sup>3</sup> /año).	Se refiere al agua de proceso reutilizada y al agua tratada reutilizada. Este indicador puede funcionar como medida de eficiencia, debido a que se reducen los costos de tratamiento y vertido de las aguas.	<ul style="list-style-type: none"> <li>a) Volumen de agua de proceso reutilizada.</li> <li>b) Volumen de agua tratada reutilizada.</li> <li>c) Volumen total de agua reutilizada/Total de agua utilizada.</li> </ul>

Continúa...

**Tabla 2.1** Indicadores de sostenibilidad ambiental (Continuación).

INDICADOR	DESCRIPCIÓN	MEDICIÓN
Emisiones directas e indirectas de gases de efecto invernadero CO <sub>2</sub> e (equivalentes de dióxido de carbono).	Las emisiones directas son aquellas procedentes de fuentes donde se tiene control y las emisiones indirectas con las procedentes de otras organizaciones, por ejemplo, las procedentes del consumo de electricidad.	<ul style="list-style-type: none"> <li>a) Cantidad CO<sub>2</sub>e directas o indirectas.</li> <li>b) Cantidad CO<sub>2</sub>e directas o indirectas /Cantidad de producto.</li> <li>c) Cantidad CO<sub>2</sub>e total/ Cantidad de producto terminado.</li> </ul>
Peso de residuos generados al año por tipo de residuo y método de disposición.	Se refiere a los residuos sólidos peligrosos y no peligrosos y su disposición final. Es un indicador de los esfuerzos por la reducción de los residuos y mejoras en la eficiencia.	<ul style="list-style-type: none"> <li>a) Total de residuos peligrosos y no peligrosos generados.</li> <li>b) Residuos peligrosos y no peligroso generados por tipo.</li> <li>c) Residuos peligrosos y no peligrosos generados por destino.</li> <li>d) Total de residuos generados.</li> </ul>

Fuente: (Chilealimentos, 2013).

#### **2.2.4 Indicadores de productos.**

Los indicadores relativos al producto cuantifican el impacto del sistema de producto (embalaje, envase, producto y componentes) sobre el entorno en que es utilizado esto teniendo en cuenta el ciclo de vida del producto, procurando minimizar aquellos aspectos que hagan insostenible el producto en referencia a la cantidad de recursos que consume en todas las etapas del ciclo de vida, mala reciclabilidad al terminar la vida útil, composición de embalajes, materia prima utilizada, entre otros (De Miguel et al., 2009).

Algunos ejemplos de estos indicadores son:

- a) Porcentaje de productos con etiqueta/marcado ambiental.
- b) Porcentaje de ahorro como resultado de aplicar el ecodiseño al producto/servicio.
- c) Porcentaje de producto en su fin de vida que es reciclado o valorizado.
- d) Porcentaje de reducción de la cantidad de materias primas con impacto ambiental en el producto.
- e) Porcentaje de materias primas recicladas, reutilizadas o eco-diseñadas presentes en el embalaje.
- f) Porcentaje de productos transportados por medio de transporte.
- g) Porcentaje de materias primas que pueden causar riesgo al medio ambiente o a la salud del consumidor.

#### **2.2.5 Indicadores de ecoeficiencia.**

Los indicadores de ecoeficiencia miden la relación entre el funcionamiento ambiental y el funcionamiento financiero de la empresa, para ciertos problemas ambientales globales. Los objetivos se basan en el concepto general de ecoeficiencia (Rincón y Wellens, 2011). En la ecuación 2.1 se presenta el cálculo de la coeficiencia.

$$\text{Ecoeficiencia} = \frac{\text{valor del producto}}{\text{Influencia ambiental}}$$

### **Ecuación 2.1**

Algunos ejemplos de eco indicadores son:

- a) Consumo de agua o de energía por unidad producida.
- b) Toneladas de NO<sub>x</sub> emitidos a la atmósfera por unidad producida.
- c) Número de unidades producidas por kg de residuos sólidos generados.

### **2.3 EVALUACIÓN DE ASPECTOS E IMPACTOS AMBIENTALES.**

Toda organización, debido a su actividad, repercute sobre el medio ambiente, generando impactos ambientales. Un impacto ambiental es cualquier cambio en el medio ambiente, sea adverso o beneficioso, como resultado total o parcial de los aspectos ambientales. Por otro lado, los aspectos ambientales son los elementos consecuencia de las actividades de una organización que pueden interactuar con el medio ambiente.

Se puede decir que, los aspectos ambientales, son aquellas partes resultantes de una actividad, producto o servicio, que pueden repercutir sobre las condiciones naturales del medio ambiente, dando lugar a alteraciones o modificaciones específicas (Sociedad pública de gestión ambiental [Ihobe], 2009).

En conclusión, los aspectos ambientales dan por consecuencia los impactos ambientales, ejemplo de ellos se muestra en la Tabla 2.2.



**Tabla 2.2** Aspectos e impactos ambientales y su área de incidencia.

<b>ÁREA DE INCIDENCIA</b>	<b>CAUSA (ASPECTO AMBIENTAL)</b>	<b>EFEECTO (IMPACTO AMBIENTAL)</b>
Residuos.	I. Residuos peligrosos. II. Residuos inertes. III. Residuos urbanos.	a) Contaminación del suelo y aguas subterráneas. b) Bioacumulación. c) Riesgo para la salud.
Atmósfera.	I. Emisiones. II. Inmisiones.	a) Destrucción de la capa de ozono. b) Efecto invernadero. c) Lluvia ácida. d) Smog. e) Riesgo para la salud.
Agua.	I. Captación de agua. II. Vertido de aguas residuales.	a) Eutrofización. b) Disminución de la biodiversidad. c) Muerte de especies acuáticas.
Sustancias peligrosas.	I. Almacenamiento. II. Transporte.	a) Contaminación del suelo. b) Contaminación de las aguas subterráneas. c) Contaminación atmosférica.
Suelos.	I. Contaminación del suelo.	a) Contaminación de las aguas subterráneas. b) Contaminación de las aguas superficiales. c) Pérdida de biodiversidad.

Continúa...

**Tabla 2.2 Aspectos e impactos ambientales y su área de incidencia (Continuación).**

<b>ÁREA DE INCIDENCIA</b>	<b>CAUSA (ASPECTO AMBIENTAL)</b>	<b>EFECTO (IMPACTO AMBIENTAL)</b>
Recursos naturales.	I. Consumo de agua. II. Consumo de energía. III. Consumo de combustibles. IV. Consumo de papel, madera, entre otros.	Agotamiento de recursos naturales: a) Energía. b) Agua. c) Materias primas.
Ambiente exterior.	I. Ruido y vibraciones. II. Olores.	Efectos locales: a) Generación ruidos/ vibraciones/olores/humos. b) Riesgos para la salud humana.

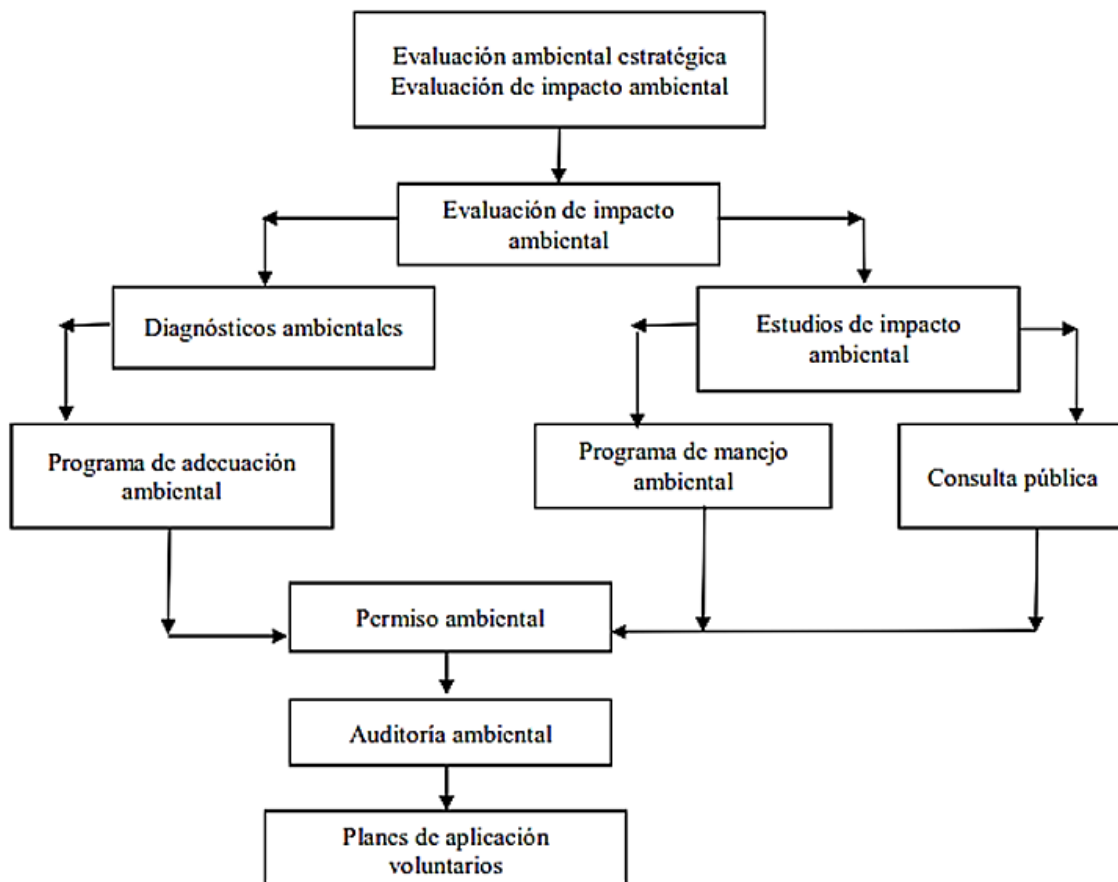
Fuente: (Ihobe, 2009).

### **2.3.1 Evaluación de impactos ambientales.**

Toda actividad realizada por la humanidad, provoca impactos en el medio ambiente de manera directa e indirecta, por lo que se hace necesario realizar previamente una evaluación de impacto ambiental. Su importancia radica en que es un instrumento de planificación, gestión y control de los procesos (Martínez, Morales y Reyes, 2019)

Una evaluación de impacto ambiental es el proceso sistemático para identificar, predecir y valorar impactos ambientales y proponer las medidas de mitigación o atenuación de las actividades, obras y proyectos antes de su ejecución, de tal forma que permita emitir un juicio sobre su viabilidad ambiental (García, Khalil y Portillo, 2018).

En la Figura 2.5, se encuentra un esquema general de evaluación de impacto ambiental.



**Figura 2.5 Esquema de evaluación de impacto ambiental.**

Fuente: (García et al., 2018).

### 2.3.1.1 Clasificación de los impactos ambientales.

Los impactos ambientales pueden ser clasificados por su efecto en el tiempo, los cuales, según Martínez et al. (2019) son:

**Irreversible:** es aquel impacto cuya trascendencia en el medio, es de tal magnitud que es imposible revertirlo a su línea de base original. Ejemplo: Minerales a tajo abierto.

**Temporal:** es aquel impacto cuya magnitud no genera mayores consecuencias y permite al medio recuperarse en el corto plazo hacia su línea de base original.

**Reversible:** el medio puede recuperarse a través del tiempo, ya sea a corto, mediano o largo plazo, no necesariamente restaurándose a la línea de base original.

**Persistente:** las acciones o sucesos practicados al medio ambiente son de influencia a largo plazo, y extensibles a través del tiempo. Ejemplo: Derrame o emanaciones de ciertos químicos peligrosos sobre algún biotopo.

**Actual o potencial:** el impacto actual es aquel que está ocurriendo de inmediato, y el potencial es aquel que podría ocurrir a futuro, si no se toman las medidas preventivas necesarias.

**Local o diseminado:** esto depende de si el efecto tiene lugar en una pequeña región acotada (local), o si fluye hacia otros ecosistemas y se esparce (diseminado).

### **2.3.1.2 Métodos para la evaluación de impactos ambientales.**

#### **I. Matriz Leopold.**

Uno de los primeros métodos sistemáticos de evaluación de impactos ambientales, es la matriz de Leopold, fue diseñada para la evaluación de impactos asociados a cualquier tipo de proyectos (Ramos, 2014).

El método de Leopold está basado en una matriz que consta de 100 acciones que pueden causar impactos al ambiente representadas por columnas y 88 características o condiciones ambientales representadas por filas. La matriz es bastante completa en los aspectos físico-biológicos y socioeconómicos, pero la lista de las 88 características ambientales no está óptimamente estructurada (Ramos, 2014), es decir, el investigador selecciona los factores y acciones ambientales que considere conveniente, ya que esto depende del tipo de proyecto que se esté ejecutando (Gómez, 2019).

**a) Características de la matriz Leopold.**

La matriz de Leopold no es selectiva y no posee ningún mecanismo para destacar áreas críticas de interés. Relacionada a esto está el hecho de que la matriz no distingue entre impactos transitorios y duraderos, aunque se pudieran preparar matrices separadas para cada período de tiempo (Ramos, 2014).

Una de las fallas más criticadas de la matriz es la falta de objetividad, ya que cada usuario tiene la libertad de escoger el número (entre 1 y 10) o el número (entre 1 y 5) que mejor le parece que representa la magnitud e importancia del impacto. Tampoco se prevé la probabilidad de que ocurra el impacto, cada predicción es tratada como si tuviera 100 por ciento de probabilidad de ocurrir (Ramos, 2014). En la Tabla 2.3 se presenta la estructura de la matriz Leopold.

**Tabla 2.3** Ejemplo de matriz de interacción entre los factores ambientales y las acciones.

Acciones	Acción 1	Acción 2	Afectaciones positivas	Afectaciones negativas	Agregado de impacto
Factores ambientales					
Factor 1					
Factor 2					
Afectaciones positivas			<b>COMPROBACIÓN</b>		
Afectaciones negativas					
Agregado de impacto					

Fuente: (Gómez, 2019).

## **II. Matriz MEL-ENEL.**

El método MEL-ENEL es un sistema racional de generación, manejo y procesamiento de datos ambientales, aplicable como herramienta para la evaluación ambiental de proyectos en etapa de pre-inversión o en operación, que garantiza al equipo interdisciplinario el conocimiento exhaustivo del proyecto y del medio ambiente interactuante, la identificación completa de sus impactos potenciales, una adecuada evaluación y priorización de acuerdo con su significancia ambiental y los criterios para definir el límite entre el nivel significativo y no significativo, para efectos de justificar cuáles impactos negativos requieren de medidas de control ambiental (Ramos, 2014).

### **a) Características de la matriz MEL-ENEL.**

La característica principal del método MEL-ENEL radica en su proceso separativo de matrices en las diferentes fases de los proyectos por establecer o ya establecidos; es decir que se puede utilizar como una herramienta de planificación en proyectos por desarrollarse, o bien como una herramienta de medición y/o diagnóstico en proyectos ya establecidos, a los cuales no se les desarrolló una evaluación de impacto ambiental en su fase de planificación (Ramos, 2014). Según Martínez et al. (2019), el método consta de seis etapas secuenciales, que son:

- a. Desglose de acciones del proyecto
- b. Desglose de factores ambientales
- c. Matriz de identificación de impactos
- d. Categorización por impactos genéricos
- e. Evaluación de impactos genéricos
- f. Priorización de impactos por significancia.

### III. Método de Criterios Relevantes Integrados (CRI).

El método de los Criterios Relevantes Integrados (CRI) consiste en obtener un valor numérico para cada impacto que provocará el proyecto, al ponderar su evaluación a través de diversos indicadores (Neuberger-Cywiak, 2001).

Los indicadores que conforman el método de Criterios Relevantes Integrados según, Neuberger-Cywiak (2001), son:

- a) **Intensidad.** Se refiere al grado con el que un impacto altera a un determinado elemento del ambiente, por tanto, está en relación con la fragilidad y sensibilidad de dicho elemento, puede ser alto, medio o bajo. El valor numérico de la intensidad varía dependiendo del grado del cambio sufrido. Esta calificación de carácter subjetivo establece la predicción del cambio neto entre las condiciones, con y sin proyecto.
- b) **Extensión o influencia espacial.** Determina el área geográfica de influencia teórica que será afectada por un impacto en relación con el entorno del proyecto (porcentaje de área impactada respecto al entorno en que se manifiesta el efecto), pudiendo esta, ser puntual, local o regional.
- c) **Duración.** Se refiere al tiempo que supuestamente permanecería el efecto, desde su aparición, y a partir del cual el factor afectado retornaría a las condiciones iniciales, previo a la acción de medios naturales o mediante la introducción de medidas correctoras. La duración es independiente de la reversibilidad
- d) **Reversibilidad.** Es la posibilidad de reconstrucción del factor afectado por el proyecto, es decir, la posibilidad de retornar a las condiciones iniciales previas a la intervención humana, una vez que aquella deja de actuar.
- e) **Riesgo.** Es la posibilidad real o potencial de que una determinada actividad produzca un impacto sobre un factor ambiental. Se considera como Alto cuando existe la certeza de que un impacto se produzca y sea real; Medio es la condición intermedia de duda de que se produzca o no un impacto y, Bajo

si no existe la certeza de que un impacto se produzca y por lo tanto es potencial.

En la Tabla 2.4, se presenta cada parámetro, con su valoración respectiva para el método de criterios relevantes integrados (CRI).

**Tabla 2.4** Descripción de parámetros del método de Criterios Relevantes Integrados (CRI).

PARÁMETRO	ESCALA	VALOR
Intensidad del impacto (I)	Alto	7-9
	Medio	4-6
	Bajo	1-3
Extensión o influencia espacial (E)	Regional	10
	Local	5
	Puntual	2
Duración (D)	Largo (>10años)	10
	Mediano (5-10 años)	5
	Corto (0-5 años)	2

Fuente: (Martínez et., al 2019).

Una vez analizado y valorado cada parámetro sintetizado en la Tabla 2.4, en cada una de las interacciones de la matriz de identificación, se procede con el cálculo de la magnitud del impacto que es el efecto de la acción, como resultado de la sumatoria acumulada de los valores obtenidos de las variables de intensidad (I), extensión (E) y duración (D), donde cada variable se multiplica por el valor de peso asignado. Esto se indica en la Ecuación 2.2.



$$Ma = (I * WI) + (E * WE) + (D * WD)$$

### **Ecuación 2.2**

Donde:

**Ma:** valor calculado de la magnitud del impacto ambiental

**I:** valor del criterio de intensidad del impacto

**WI:** peso del criterio de intensidad

**D:** valor del criterio de duración del impacto

**WD:** peso del criterio de duración del impacto

**E:** valor del criterio de extensión del impacto

**WE:** peso del criterio de extensión

**WI:** peso del criterio de intensidad (con un valor de 0.40)

**WE:** peso del criterio de extensión (con un valor de 0.40)

**WD:** peso del criterio de duración (con un valor de 0.20)

Una vez obtenido el valor de la magnitud de los impactos, se continúa con la evaluación del Índice de Impacto Ambiental (VIA). El valor del índice ambiental está dado en función de las características del impacto y se calcula mediante los valores de reversibilidad, incidencia y magnitud. Para el cálculo del VIA se utiliza la Ecuación 2.3.

$$VIA = R^{Xr} * RG^{Xrg} * M^{Xm}$$

### **Ecuación 2.3**

Donde:

**RG:** valor del criterio de riesgo del impacto.

**R:** valor del criterio de reversibilidad del impacto.

**M:** valor del criterio de magnitud del impacto.

**Xr:** peso del criterio de reversibilidad, teniendo un valor de 0.22

**Xrg:** peso del criterio de riesgo, teniendo un valor de 0.17

**Xm:** peso del criterio de magnitud, teniendo un valor de 0.61

El valor del criterio de reversibilidad e incidencia se detalla en la Tabla 2.5.

**Tabla 2.5** Descripción de los criterios de reversibilidad y riesgo.

PARÁMETRO	ESCALA		VALOR
Reversibilidad (R)	Irreversible	Baja o irrecuperable	10
		El impacto puede ser recuperable a muy largo plazo (>30 años) y a elevados costos	9
	Parcialmente reversible	Media (Impacto reversible a largo y mediano plazo)	5
	Reversible	Alta (Impacto reversible de forma inmediata o a corto plazo)	2
Riesgo (RG)	Alto		10
	Medio		5
	Bajo		2

Fuente: (Martínez et., al 2019).

El valor de VIA permite clasificar los impactos en categorías (véase Tabla 2.6), y estas a su vez permiten establecer las medidas ambientales a implementar, ya sea de mitigación, prevención o corrección.

**Tabla 2.6** Clasificación de impactos en categorías según el valor de VIA.

CATEGORÍA	OCURRENCIA	VALOR DE VIA
I	Muy alta	$VIA > 8$
II	Alta	$6 < VIA \leq 8$
III	Moderada	$4 < VIA \leq 6$
IV	Baja	$VIA \leq 4$

Fuente: (Martínez et., al 2019).

Las medidas ambientales de prevención, mitigación o corrección, Martínez et., al (2019), son:

- a) **Categoría I.** Probabilidad de ocurrencia muy alta.  $VIA \geq 8$ . Máxima atención. Medidas preventivas para evitar su manifestación.
- b) **Categoría II.** Probabilidad de ocurrencia alta.  $6 < 8$ . Medidas mitigantes o correctivas (preferiblemente estas últimas). Normalmente exigen monitoreo o seguimiento
- c) **Categoría III.** Probabilidad de ocurrencia moderada.  $4 < VIA < 6$ . Medidas preventivas, que pueden sustituirse por mitigantes, correctivas o compensatorias cuando el impacto se produzca, si aquellas resultaran costosas
- d) **Categoría IV.** Probabilidad de ocurrencia baja o media.  $VIA \leq 4$ . No se aplican medidas, a menos que se trate de áreas críticas o de medidas muy económicas.

## 2.4 PROCESOS CONVENCIONALES DE PRODUCCIÓN DE ACEITE DE AGUACATE.

La Organización de las Naciones Unidas para el Desarrollo Industrial (ONUDI) en el año 2018 estableció que la tendencia en los usuarios es de utilizar productos cosméticos a base de ingredientes naturales, y que, a pesar de la desaceleración de la

economía mundial, la demanda de este sector industrial ha crecido anualmente en un 3.9% entre los años 2013 al 2017 (Organización de las Naciones Unidas para el Desarrollo [ONUDI], 2018).

Debido a que actualmente se busca elaborar cosméticos con ingredientes naturales, el aguacate es una fuente principal de materia prima por ser una fruta de climas templados y su cosecha se mantiene en toda temporada (todo el año), además posee vitaminas, propiedades antioxidantes y se ha demostrado que su aplicación es una gran aliada para cuidar la piel, entre otros beneficios.

El presente apartado contiene los conceptos más importantes que ayudan a comprender y resolver la problemática de la investigación, estudio de factibilidad del proceso de producción sostenible de aceite de aguacate (*Persea americana*). Para la comprensión de la temática, se describe las características del fruto, los métodos de extracción y caracterización del aguacate como materia prima a utilizar para la obtención del aceite.

#### **2.4.1 Características generales del aguacate.**

El aguacate es un fruto exótico y carnoso, el cual proviene del náhuatl ahuacatl que también significa aguacate (Centro Nacional de Tecnología Agropecuaria y Forestal [CENTA], 2018). Además, en América del Sur el fruto se conoce como palta.

La palabra aguacate proviene del náhuatl que se remonta a la proto-azteca, que también significaba 'aguacate'. Se conoce con este nombre, y sus derivados, al fruto de *Persea americana* en México, Ecuador, Paraguay, Venezuela, Colombia, Estados Unidos, Centroamérica, el Caribe, España y los países anglosajones y lusófonos (véase Figura 2.6).



**Figura 2.6 Presentación física del aguacate (*Persea americana miller*).**

Fuente: (CENTA, 2003).

#### **2.4.1.1 Producción de aguacate en El Salvador.**

En El Salvador las condiciones climáticas del país, son ventajosas ya que se puede cultivar el aguacate en todo el territorio nacional. En la Tabla 2.7 se presenta el porcentaje de fruto cosechado por departamento.

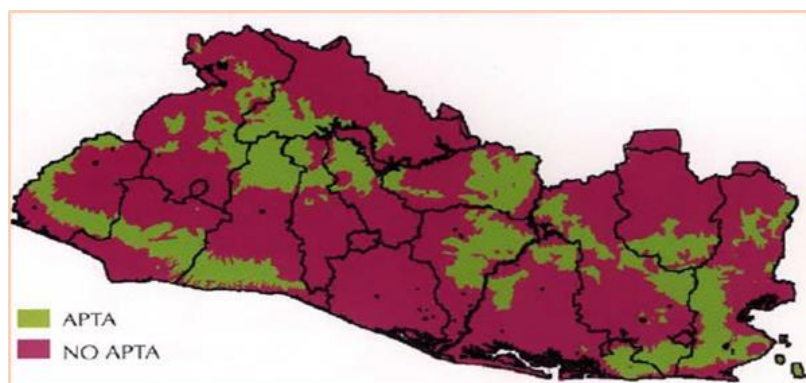
**Tabla 2.7 Porcentaje de fruto cosechado por departamento en El Salvador.**

<b>DEPARTAMENTOS</b>	<b>ÁREA (%)</b>	<b>DEPARTAMENTOS</b>	<b>ÁREA (%)</b>
Ahuachapán	1.7	Cabañas	2.3
Santa Ana	1.8	San Vicente	2.1
Sonsonate	1.6	Usulután	1.7
Chalatenango	1.9	San Miguel	2.9
La Libertad	3.2	Morazán	1.3
San Salvador	0.9	La Unión	3.1
Cuscatlán	1.0	<b>Total</b>	<b>25.6</b>

Fuente: (CENTA, 2003)

En El Salvador el fruto puede cultivarse en terrenos de textura ligera, profundos, bien drenados con un pH neutro o ligeramente ácido (5.5 a 7) desde 0 hasta 2500 metros sobre el nivel del mar, sin embargo, puede cultivarse entre 800 y 2500 m, para evitar problemas con enfermedades, especialmente en las raíces. La temperatura y la precipitación son los dos factores de mayor incidencia en el desarrollo del cultivo.

El Centro Nacional de Tecnología Agropecuaria y Forestal (CENTA), presenta un resumen de las zonas geográficas aptas para el cultivo de aguacate en El Salvador y explica que mayoritariamente se cultiva en zonas altas debido a que las altas temperaturas presentes en el lugar evitan que se produzcan enfermedades en la raíz y fruto. Las zonas aptas para el cultivo de aguacate en El Salvador se presentan la Figura 2.7.



**Figura 2.7 Zonas potenciales de producción de aguacate en El Salvador.**

Fuente: (CENTA, 2003).

Algunas de las características más importantes según la zona de cultivo de aguacate en El Salvador se describen en la Tabla 2.8.

**Tabla 2.8** Características del aguacate según la zona de cultivo de El Salvador.

Selección	Altitud (msnm)	Floración	Cosechas	Forma	Tamaño	Fruto Color Cáscara	Sabor	Tipo floral
<b>Sitio del niño No.2</b>	400-900	Sept/Nov	Enero/Junio	Periforme	Pequeño	Verde	Muy bueno	A
<b>Sitio del niño No.3</b>	400-900	Agost/Nov	Enero/Junio	Periforme	Mediano	Verde	Excelente	B
<b>Sitio del niño No.5</b>	400-900	Sept/Oct	Marzo/Junio	Alargado	Mediano	Verde	Muy bueno	A
<b>Juguete</b>	400-900	Agost/Nov	Febrero/Junio	Ovalado	Mediano	Morado	Excelente	A
<b>Nejapa</b>	400-900	Agost/Nov	Febrero/Mayo	Periforme	Mediano	Verde	Excelente	A
<b>San Jacinto</b>	400-1000	Sept/Nov	Dic/Abril	Periforme	Mediano	Verde	Muy bueno	A
<b>Lorenzana</b>	100-900	Oct/Nov	Abril/Junio	Periforme	Mediano	Verde	Muy bueno	B

Continúa...

**Tabla 2.8** Características del aguacate según la zona de cultivo de El Salvador (Continuación).

<b>Selección</b>	<b>Altitud (msnm)</b>	<b>Floración</b>	<b>Cosechas</b>	<b>Forma</b>	<b>Tamaño</b>	<b>Fruto Color Cáscara</b>	<b>Sabor</b>	<b>Tipo floral</b>
<b>Lima</b>	100-900	Oct/Nov	Febrero/Junio	Alargado	Grande	Morado	Muy bueno	A
<b>Beneke</b>	400-1000	Sept/Nov	Diciembre/Abril	Semiaperado	Grande	Morado	Muy bueno	A
<b>Ereguayquin</b>	50-600	Oct/Nov	Marzo/Abril	Ovalado	Mediano	Verde	Muy bueno	A
<b>Alicia Cordero</b>	400-900	Enero/Marzo	Agosto/Octubre	Ovalado	Mediano	Verde	Muy bueno	B
<b>Izalco</b>	300-900	Agosto/Nov	Abril/Junio	Alargado	Grande	Verde	Muy bueno	A

Fuente: (CENTA, 2018).



### 2.4.1.2 Características generales del aguacate como materia prima.

La composición química y clasificación taxonómica del aguacate se presenta en la Tabla 2.9, la cual describe los elementos más importantes del mismo.

**Tabla 2.9** Clasificación taxonómica y composición química del aguacate

CLASIFICACIÓN TAXONÓMICA		COMPOSICIÓN QUÍMICA	PULPA DE AGUACATE
<b>Reino</b>	Vegetal	<b>Agua (%)</b>	71.2
<b>División</b>	Spermatophyta	<b>Grasa (%)</b>	20.6
<b>Clase</b>	Dicoledoneae	<b>Proteína (%)</b>	1.8
<b>Género</b>	Persea	<b>Fibra (%)</b>	1.4
<b>Orden</b>	Ranales	<b>Ceniza (%)</b>	1.2
<b>Especies</b>	Americana	<b>Ácido Ascórbico (mg)</b>	11
<b>Filum</b>	Magnoliophyta	<b>Niacina(mg)</b>	1.9
<b>Familia</b>	Lauráceas	<b>Vitamina B6 (mg)</b>	0.62

Fuente: (Huamán, 2014).

Las propiedades fisicoquímicas del aguacate (*Persea americana miller*) en diferentes estados de madurez se presentan en la Tabla 2.10.

**Tabla 2.10** Propiedades fisicoquímicas del aguacate en estado de madurez.

ESTADO DE MADUREZ (M)	VARIEDAD		
	°Brix	pH	Acidez
M. de cosecha (verde)	7.61 ± 0.93	6.44 ± 0.23	0.099 ± 0.031
M. de consumo sin almacenamiento	4.7 ± 0.39	6.58 ± 0.10	0.149 ± 0.036
M. de consumo con almacenamiento	5.54 ± 0.32	6.88 ± 0.16	0.084 ± 0.017

Fuente: (Astudillo y Rodríguez, 2017)

Las propiedades físicas del aguacate (*Persea americana miller*) se presenta en la Tabla 2.11.

**Tabla 2.11** Principales características físicas de tres razas de aguacate.

CARACTERÍSTICAS		RAZA		
		Mexicana	Guatemalteca	Antillana
Adaptación (clima)		Frio	Frio	Cálido
Altura de adaptación		1700 a 2500	1000 a 2000	0 a 1000
Temperatura min (°C)		-9.0	-4.5 a 6.0	-2.2 a 4.0
Temperatura optima (°C)		8 a 15	12 a 22	22 a 28
Tolerancia	Frio	Alta	Media	Baja
	Humedad	Baja	Media	Alta
	Salinidad	Baja	Media	Alta
	Alcalinidad	Media	Baja	Alta
Origen		Tierras altas de México	Tierras altas de Guatemala	Tierras bajas de centro y sur América
Hojas	Olor a anís	Si	No	No
	Color brotes	Verde pálido	Bronceado	Verde pálido
	Tamaño	Pequeña	Intermedia	Grande
	Color	Verde Oscuro Lustroso	Verde Oscuro Lustroso	Verde Claro opaco
	Color envés	Ceroso	Menos ceroso	Ceroso
Tamaño		Pequeño	Variable	Variable
Peso (g)		80 a 250	200 a 1300	250 a 2500
Contenido aceite		Alto – Hasta 30%	Alto – Hasta 20%	Alto – Hasta 20%

Continúa...

**Tabla 2.11 Principales características físicas de tres razas de aguacate (Continuación).**

CARACTERÍSTICAS		RAZA		
		Mexicana	Guatemalteca	Antillana
Cascara	Grosor	Delgada	Gruesa	Intermedia
	Tamaño (mm)	0.8	3.0 – 6.0	1.5 – 3.0
	Textura	Lisa	Áspera	Lisa
	Consistencia	Suave	Leñosa quebradiza	Flexible
Semilla	Tamaño	Grande	Pequeña	Grande
	Estado	Adherida o suelta	Adherida	Suelta
	Cotiledones	Rugoso	Liso	Rugoso
Pedúnculo	Tamaño	Largo	Corto	Corto
	Longitud (cm)	2.0 a 5.4	0.6 a 1.8	0.6 a 1.8
	Grosor (cm)	0.6 a 1.3	1.3 a 1.8	0.6 a 1.3
	Forma	Cónico	Cilíndrico o cónico	Cilíndrico
Floración a madurez (meses)		5.6 a 8.0	10 a 15	5.6 a 9.0

Fuente: (Robayo, 2016).

En la Tabla 2.12 se presentan los parámetros mínimos de calidad para las diferentes variedades del aguacate (*Persea americana miller*), en donde se evidencia el contenido de materia seca y aceite.

**Tabla 2.12** *Parámetros mínimos de calidad para las diferentes variedades de aguacate.*

<b>VARIEDAD</b>	<b>PULPA (%)</b>	<b>ACEITE (%)</b>	<b>MATERIA SECA (%)</b>	<b>DUREZA (kgf.cm<sup>-1</sup>)</b>
<b>Hass</b>	55.7	25.5	39.5	2.4
<b>Fuerte</b>	70.6	10	21.1	2.2
<b>Booth 8</b>	69.2	6.4	15.8	3.2
<b>Trinidad</b>	69.9	6.4	15.8	3.2
<b>Lorena</b>	69.2	10.8	23.9	2.4
<b>Trapp</b>	68.4	3.8	14.9	4.8
<b>Choquette</b>	77.2	4.6	14.8	2.7
<b>Santana</b>	68.6	3.9	12	4.1

Fuente: (Forero, García y Sandoval, 2010)

#### **2.4.1.3. Usos del aguacate en la Industria.**

Los componentes del aguacate son muy útiles para el cuidado de la piel, por lo que la industria cosmética ha ido incluyendo poco a poco al aguacate en la elaboración de sus productos.

El aceite es uno de los principales productos, el cual se utilizan como materia prima principal para la elaboración de productos cosméticos. En la Figura 2.8 se presentan algunos de los productos cosméticos elaborados a partir del aceite de aguacate.

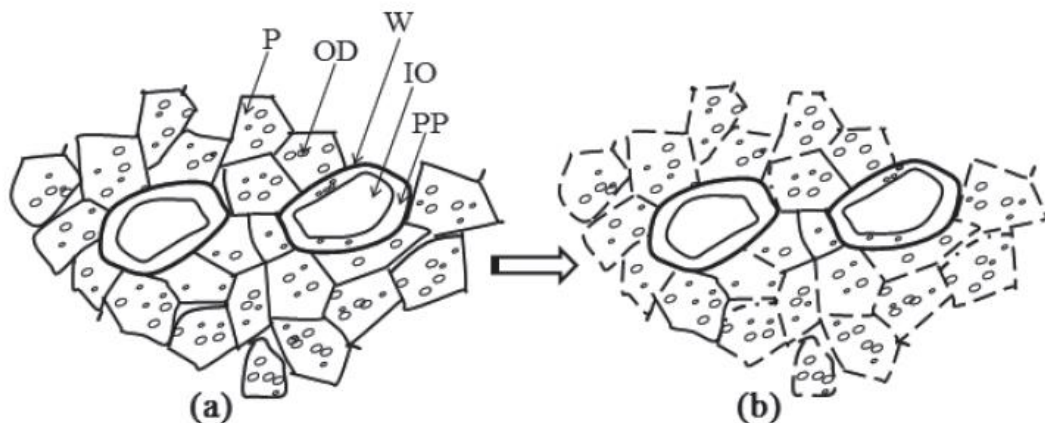


**Figura 2.8 Productos cosméticos elaborados a partir del aceite de aguacate.**

Fuente: (ONUFI, 2018).

## 2.5 MÉTODOS DE EXTRACCIÓN DE ACEITES NATURALES.

Varias investigaciones se enfocan en la tecnología de producción de aceite de aguacate, con el propósito de agregar valor económico y lograr un producto adecuado para diversas aplicaciones. Generalmente, el aceite crudo se puede obtener mediante técnicas de centrifugación, prensado, extracción por solvente y por fluidos supercríticos. Además del proceso de extracción utilizado, el pretratamiento de semillas oleaginosas y / o frutos aceitosos es uno de los factores más importantes que afectan el rendimiento de extracción del aceite. Los lípidos se encuentran principalmente en el mesocarpio del aguacate que está compuesto por numerosas células de parénquima e idioblastos distribuidos uniformemente (véase Figura 2.9). Las células del parénquima contienen una emulsión de aceite finamente dispersa y los idioblastos están llenos de un gran saco de aceite (Qin & Zhong, 2016).



**Figura 2.9. Células del mesocarpio del aguacate durante la maduración. (a) Células del mesocarpio sin madurar. (b) células del mesocarpio maduras. P: célula parénquima, W: pared idioblástica, OD: gota de aceite, PP: protoplasma, IO: saco oleoso idioblástico. Fuente: (Qin et al., 2016).**

Para aumentar la liberación de aceite de los cuerpos celulares y potenciar la extracción de aceite, se utilizan procesos de extracción asistidos con pretratamientos mecánicos, enzimáticos o térmicos para romper la estructura de la emulsión y las paredes celulares.

### 2.5.1 Extracción por solvente.

Este es uno de los métodos tradicionales más utilizados. Se basa principalmente en la selección de solventes, temperatura o agitación, con el fin de incrementar la solubilidad de los materiales y la tasa de transferencia de masa. Se separan los compuestos con base en sus solubilidades por dos líquidos inmiscibles usualmente el líquido a separar y el solvente orgánico. En la industria, este proceso se realiza continuamente bombardeando una corriente orgánica y otra acuosa dentro de una mezcladora, donde se mezclan ambos componentes y se permite el intercambio iónico hasta que se logre el cambio (Azuola y Vargas, 2007).

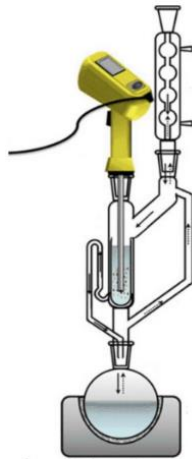
El método para la extracción del aceite es por medio de solvente, pero el equipo a utilizar a nivel de laboratorio es el Soxhlet. Actualmente existe dos equipos con Soxhlet: extracción Soxhlet tradicional y extracción Soxhlet asistida por ultrasonido. (Flores et al., 2019).

## **II. Extracción Soxhlet tradicional.**

Utilizado para la extracción de compuestos, generalmente de naturaleza lipídica, contenidos en un sólido, por medio de un solvente compatible químicamente. Su función es cíclica, cuando se evapora el solvente sube hasta el área donde es condensado, cae y regresa a la cámara, va separando los compuestos, hasta que se llega a una concentración deseada. (Azuola et al., 2019).

## **III. Extracción Soxhlet asistida por ultrasonido.**

Es un equipo de ultrasonido de gran alcance que aumenta la transferencia de masa entre la muestra y el disolvente. De este modo, el uso de disolventes puede reducirse o evitarse por completo. La duración de extracción se acorta drásticamente de modo que los extractos no están expuesto a periodos de calentamiento largo. Esto significa que la descomposición del extracto puede ser evitado. El ultrasonido puede ser fácilmente integrado en una instalación de extracción Soxhlet, ya que mediante la introducción de la bocina de ultrasonidos en la cámara de Soxhlet indirectamente a través de la pared del vaso, dan como resultados mayores rendimiento dentro de un tiempo de extracción corto (Hielscher, 2020). En la Figura 2.10 se encuentra un ejemplo de equipo de extracción Soxhlet por ultrasonido.



**Figura 2.10 Homogeneizador ultrasónico de extracción Soxhlet.**

Fuente: (Hielscher, 2020).

El método de solvente por medio Soxhlet tradicional es el que se explicara a detalle, debido a que el método ultrasónico presenta mayores rendimientos para materia prima como las semillas. (Flores et al., 2019).

El Soxhlet tradicional utiliza varios solventes y se han utilizado principalmente solventes orgánicos, y la eliminación posterior del solvente se realiza a través de evaporación al vacío, y se detiene hasta tener masa constante a una temperatura determinada, y esto indica que el disolvente remanente se ha eliminado, dejando solo el material extraído (Alnasan, 2019)

Además, este método tiene el rendimiento más alto, pero a nivel industrial el equipo es muy caro de instalar y los solventes utilizados son altamente inflamables por lo cual son muy peligrosos, además la recuperación y eliminación total del solvente también es un problema lo que requiere una planta muy sofisticada para su eliminación. (Alnasan, 2019).

El método tiene otras desventajas como: la pérdida de compuestos volátiles, largos tiempos de extracción, residuos de disolventes tóxicos y la degradación de valiosos compuestos orgánicos del aceite (Alnasan, 2019).



En resumen, las ventajas y desventajas del proceso de extracción con solventes se presentan en la Tabla 2.13

**Tabla 2.13** Ventajas y desventajas del método de extracción por solvente.

VENTAJAS	DESVENTAJAS
<ul style="list-style-type: none"> <li>a) Presenta rendimientos altos en comparación con otros métodos.</li> <li>b) Cumplen con la normativa microbiológica.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>a) Solventes orgánicos tóxicos.</li> <li>b) Esta técnica es utilizada generalmente a escala solo de laboratorio.</li> <li>c) Al utilizar los solventes se necesitan permisos especiales.</li> <li>d) Presenta una operación unitaria adicional: Destilación, para eliminar el solvente remanente.</li> <li>e) Temperaturas elevadas de trabajo (100-105 °C), lo cual desnaturalizan las propiedades químicas del aceite.</li> </ul>

Fuente: (Melo et al., 2018).

### 2.5.1.1 Tipos de solventes orgánicos.

Para lograr la extracción de aceites de origen vegetal se necesitan solventes orgánicos, ya que estos permiten la dispersión o extracción de otra sustancia a nivel molecular o iónico. Los tipos de solventes se dividen en dos categorías (Venegas, 2016).

- a) Disolventes de extracción con densidades menores que el agua,
- b) Disolventes de extracción con densidades mayores que el agua.

Las características fisicoquímicas y el grado de peligrosidad de los solventes orgánicos con densidades mayores que el agua se presentan en la Tabla 2.14.

**Tabla 2.14** Disolventes con densidades mayores que el agua.

NOMBRE	FORMULA	DENSIDAD (g/ ml)	PUNTO DE EBULLICIÓN (°C)	PELIGROSIDAD
Diclorometano	CH <sub>2</sub> Cl <sub>2</sub>	1.3	41	Tóxico
Cloroformo	CHCl <sub>3</sub>	1.5	61	Tóxico
Tetracloruro de carbono	CCl <sub>4</sub>	1.6	77	Tóxico

Fuente: (Venegas, 2016)

Los disolventes de extracción con densidades menores que el agua se presentan en la Tabla 2.15.

**Tabla 2.15** Disolventes con densidades menores que el agua.

NOMBRE	FORMULA	DENSIDAD (g/ mL)	PUNTO DE EBULLICIÓN (°C)	PELIGROSIDAD
Éter dietílico	(CH <sub>3</sub> CH <sub>2</sub> ) <sub>2</sub> O	0.7	35	Muy inflamable, toxico
Benceno	C <sub>6</sub> H <sub>14</sub>	≈ 0.7	>60	Inflamable Toxico Carcinógeno
Tolueno	C <sub>6</sub> H <sub>5</sub> CH <sub>3</sub>	0.9	111	Inflamable
Acetato de etilo	CH <sub>3</sub> COOCH <sub>2</sub> CH <sub>3</sub>	0.9	78	Inflamable Irritable
Hexano	C <sub>6</sub> H <sub>14</sub>	0.655	68.73	Inflamable
Etanol	C <sub>2</sub> H <sub>5</sub> OH	0.789	78.37	Inflamable

Fuente: (Venegas, 2016)

En la Tabla 2.16 y 2.17 se presentan los parámetros fisicoquímicos medidos al aceite de aguacate, extraído con solvente éter de petróleo y solvente hexano respectivamente, así mismo los procesos de pretratamiento de la materia prima y los rangos de operación se encuentran en la Tabla 2.18.

**Tabla 2.16** Pruebas fisicoquímicas del aceite de aguacate extraído con solvente Hexano.

PARÁMETRO	RESULTADO
Rendimiento (%)	12.9 %
Índice de Yodo (cg I <sub>2</sub> /g aceite)	72.9
Índice de Saponificación (mg KOH/g aceite)	180.7
Índice de Refracción (nD 40°C)	1478

Fuente: (Melo y Mora, 2018).

**Tabla 2.17** Pruebas fisicoquímicas del aceite de aguacate extraído con solvente éter de petróleo.

PARÁMETRO	RESULTADO
Rendimiento (%)	85.5
Índice de Yodo (cg I <sub>2</sub> /g aceite)	77.85 ± 2.1
Índice de peróxidos (mEq O <sub>2</sub> /Kg aceite)	31.66 ± 2.47
Índice de Saponificación (mg KOH/g aceite)	1.68 ± 2.98
Índice de acidez (% ácido oleico)	1.68 ± 0.14
Gravedad específica	0.874 ± 0.05

Fuente: (Restrepo et al., 2012).

**Tabla 2.18** Resumen de las condiciones generales para la extracción de aceite por el método de solvente.

PROCESOS DE PRETRATAMIENTO DE LA MATERIA PRIMA	CONDICIONES DE OPERACIÓN. CON EL EQUIPO SOXHLET		CONDICIONES DE OPERACIÓN. OPERACIÓN UNITARIA ADICIONAL	
<p>Selección de la materia prima, fruta en proceso de Maduración fisiológica.</p> <p>Proceso de lavado del fruto, eliminación de suciedad.</p> <p>Despulpado de la fruta</p>	<p>Temperatura y tiempo de secado de materia prima</p>	<p>100 -105 °C por 2 hrs.</p>	<p>Presión. de destilación.</p>	<p>0.7368 atm</p>
<p>Molienda. Esta se hace con el fin de obtener una pasta homogénea, para que la pasta de aguacate sea más simple de deshidratar.</p> <p>Secado de materia prima, es necesario para remover la mayor cantidad de agua posible de la pulpa de aguacate.</p>	<p>Temperatura y tiempo de extracción por equipo SOXHLET</p>	<p>70-100°C por 1-8 hrs.</p>	<p>Temperatura y tiempo de destilación.</p>	<p>71°C por 2 hrs.</p>
			<p>Temperatura y tiempo de evaporación de solvente remanente</p>	<p>60 - 80 °C 30 min</p>

Fuente: (Melo et al., 2018).

### **2.5.2 Método de prensado.**

El principio de funcionamiento de la operación de prensado radica en la separación por compresión de un líquido contenido en un sistema de dos fases, el cual está generalmente constituido por una fase sólida y una líquida. Las condiciones de operación deben permitir que, durante la compresión el líquido pueda escapar mientras que el sólido permanezca retenido entre las superficies de compresión (Vargas, 2004).

El método de prensado divide las dos fases nombradas anteriormente, mientras que la última separación de la grasa en fase líquida y de otros componentes, se realiza utilizando el método de centrifugación (Melo et al., 2018).

El prensado se puede llevar a cabo a través de prensa de tornillo o prensa hidráulica. La tecnología de prensado es comúnmente utilizada para exprimir el aceite de los materiales de semillas oleaginosas, como el sésamo, con un contenido de aceite relativamente alto. En comparación con las semillas oleaginosas, la pulpa de aguacate contiene más humedad (alrededor de 77%) y su contenido celular es diferente. El contenido de agua de la pulpa puede afectar significativamente el rendimiento de aceite, por ello se hace necesario el uso de métodos de pretratamiento de la pulpa de aguacate, antes del prensado (Qin et al., 2016).

Los enfoques de pretratamientos incluyen:

- a) Cortar y secar la pulpa de aguacate al horno o sol.
- b) Secar en horno de microondas.
- c) Adición de aditivos sólidos.
- d) Deshidratado por liofilización.

Los pretratamientos tradicionales, como el secado al horno y al sol, requieren mucho tiempo para secar la pulpa a un contenido de agua de 4 - 5%, lo que se acompaña de un riesgo relativamente alto de mala calidad del aceite (Qin et al., 2016).

El proceso de secado en horno microondas no solo acorta el tiempo de secado, sino que también sirve como una función para inducir la alteración de la estructura celular. Factores como la cantidad de muestras, la intensidad de la energía de microondas y el tiempo de exposición a las microondas afectan el rendimiento de la extracción de aceite. Estudios realizados han demostrado que el rendimiento de extracción de aceite alcanzó su nivel más bajo (menos de 30%) cuando la energía era superior a 2 kJ / g y temperaturas mayores 100°C, resultando en una transformación severa de la estructura de las células idioblásticas del aceite. Tal estructura transformada tiene un efecto negativo sobre el rendimiento de extracción del aceite (Qin et al., 2016).

La adición de aditivos sólidos es otra forma de reducir la humedad y viscosidad de la pulpa de aguacate y de aumentar el rendimiento de extracción de aceite. Se supone que los aditivos sólidos tienen cierta dureza y granularidad, no son tóxicos y son insolubles en aceite o agua. Por ejemplo, el efecto exprimidor fue mejor agregando arroz, arroz con sorgo y granos de arena que, agregando cáscara de arroz, azúcar y sal. Después de mezclar suficiente pulpa de aguacate con aditivos sólidos, se requiere un calentamiento adecuado para el posterior exprimido. Dicho calentamiento favorece la aceleración de la rotura de las paredes celulares durante el proceso de extrusión, haciendo que la disminución de la viscosidad del aceite celular aumente el rendimiento de extracción del aceite. Además, el calentamiento moderado favorece la inactividad de las lipasas, lo que reduce o elimina la hidrólisis del aceite de aguacate durante el período de exprimido y almacenamiento (Qin et al., 2016).

Otro proceso que se suele llevar a cabo para reducir el contenido de humedad de la pulpa de aguacate es la liofilización. La liofilización es un proceso en el cual se

extrae el agua contenida en la muestra, por medio de congelación y deshidratación por sublimación del hielo, se diferencia de otros métodos porque permite obtener un producto de alta calidad, debido a que se caracteriza por: retener el aroma y sabor, conservar el valor nutricional del producto y generar mínimos cambios en la forma, color y apariencia del producto (Vélez et al., 2014).

Vélez et al. (2014) desarrolló la extracción de aceite de aguacate utilizando el método de prensado hidráulico, para ello entre 80 y 90 g de pulpa de aguacate liofilizada fueron llevada a un filtro de poliamida con un tamaño de poro de 69.4 x 10.2 mm, con el fin de evitar la presencia de pulpa en el aceite extraído y se sometieron al proceso de prensado, evaluando dos presiones, 2000 PSI y 2500 PSI y un tiempo de prensado de 30 minutos. Las condiciones óptimas de extracción fueron: una presión de 2500 PSI por 30 minutos. Para el caso del proceso de liofilización, la muestra se sometió a una temperatura de congelación -80 °C, con un tiempo óptimo de 6 horas, para posteriormente llevarse al liofilizador a una presión de operación de 0.023 mBar por 24 horas. Los resultados del rendimiento y parámetros de calidad se detallan en la Tabla 2.19.

**Tabla 2.19** Rendimiento y parámetros fisicoquímicos de aceite de aguacate extraído por prensado hidráulico.

PARÁMETRO	VALOR
Rendimiento (%)	55.53 ± 11.6
Densidad (g/mL)	0.908
Índice de saponificación (mg KOH/g aceite)	236.895 ± 7.802
Índice de refracción	1.468 ± 0.001
Índice de acidez (% ácido oleico)	0.418 ± 0.030

Fuente: (Vélez et al., 2014).

Otro estudio realizado por Rastrepo et al. (2012), evaluó la calidad del aceite obtenido por prensado en frío. Láminas de la pupa de aguacate fueron sometidas a un pretratamiento de deshidratación en un secador solar que permitió mantener la temperatura por debajo de 45°C, para evitar la degradación de los compuestos bioactivos presentes en el fruto. Este proceso fue llevado a cabo en un secador solar tipo invernadero por un período de tiempo de 6 h. La muestra seca fue sometida a prensado en frío para la obtención del aceite. El rendimiento del aceite obtenido respecto a la pulpa fue de 16.52%, lo cual implica un 82.68% de rendimiento del aceite extraído. Los parámetros fisicoquímicos obtenidos se muestran en la Tabla 2.20.

**Tabla 2.20** *Parámetros de calidad del aceite de aguacate extraído por prensado en frío.*

<b>PARÁMETRO</b>	<b>VALOR</b>
Rendimiento (%)	16.52
Índice de yodo (cg I <sub>2</sub> /g aceite)	78.44±1.41
Índice de peróxido (mEq O <sub>2</sub> /kg aceite)	22.86±1.94
Índice de saponificación (mg KOH/g aceite)	223.69±6.57
Índice de acidez (% ácido oleico)	4.63±0.03
Gravedad específica	0.914±0.03

Fuente: (Rastrepo et al., 2012)

En el caso del estudio realizado por Krumreicha, Borges, Mendonça Jansen-Alvesa y Zambiasi, (2019) se evaluó la calidad del aceite de aguacate cuya pulpa fue procesada a través de diferentes métodos de secado (en horno con ventilación a 40 y 60 ° C y en horno de vacío a 60 ° C) y diferentes métodos de extracción (prensado mecánico y Soxhlet). El mejor proceso para obtener aceite de aguacate con excelentes propiedades químicas y dentro de los parámetros de calidad recomendados por la legislación, fue la extracción del aceite por prensado mecánico, donde la pulpa



se secó a 60 ° C en un horno de vacío, obteniéndose un rendimiento entre 25 y 33%. Los parámetros de calidad se muestran en la Tabla 2.21.

**Tabla 2.21** *Parámetros de calidad del aceite de aguacate extraído por prensado mecánico, con pretratamiento de secado.*

PARÁMETRO	VALOR
Índice de peróxido (mEq O <sub>2</sub> /kg aceite)	4.5 ± 0.4
Índice de yodo (g I <sub>2</sub> /100 g aceite)	91.4 ± 0.7
Índice de acidez (% ácido oleico)	1.6 ± 0.1
Índice de refracción	1.465 ± 0.001
Actividad antioxidante (en % inhibición)	86.51 ± 4.07

Fuente: (Krumreicha et al., 2019).

Vargas, Gutarra, Delgado-Soriano, Cortés-Avenidaño y Peñafiel (2020) extrajeron aceite de aguacate a través de prensado hidráulico y prensado expeller. Las muestras se secaron en un secador de bandejas a temperatura de 60 °C ± 5 por un tiempo de 10 horas, hasta un contenido de humedad de 10%. Los rendimientos de los aceites obtenidos fueron 16.39 ± 1.38 %, 23.97 ± 2.72 %, respectivamente. Los parámetros fisicoquímicos y composición de ácidos grasos se muestran la Tabla 2.22 y 2.23 respectivamente.

**Tabla 2.22** *Parámetros fisicoquímicos del aceite de aguacate extraído por prensado hidráulico y expeller.*

PARÁMETRO	MÉTODO DE EXTRACCIÓN	
	Prensado hidráulico	Prensado por expeller
Índice de acidez (mg KOH/g grasa).	0.2032 ± 0.00	0.4679 ± 0.01
Índice de peróxido (mEq O <sub>2</sub> /kg).	5.6200 ± 0.01	14.8084 ± 0.49

Continúa...

**Tabla 2.22** Parámetros fisicoquímicos del aceite de aguacate extraído por prensado hidráulico y expeller (Continuación).

PARÁMETRO	MÉTODO DE EXTRACCIÓN	
	Prensado hidráulico	Prensado por expeller
Índice de refracción (20°C)	1.4620 ± 0.00	1.4640 ± 0.00
Humedad (%)	0.2656 ± 0.01	0.2375 ± 0.03

Fuente: (Vargas et al., 2020).

**Tabla 2.23** Composición de ácidos grasos en el aceite de aguacate extraído por prensado hidráulico y expeller.

ÁCIDO GRASO	MÉTODO	
	Prensado hidráulico	Prensado expeller
Palmítico (C16:0)	24.33 ± 0.11	23.61 ± 0.06
Palmitoleico (C16:1)	11.49 ± 0.01	11.76 ± 0.04
Estearico (C18:0)	0.62 ± 0.01	0.61 ± 0.01
Oleico (C18:1 ω-9)	41.27 ± 0.01	40.90 ± 0.06
Vaccénico (C18:1 ω-7)	5.60 ± 0.02	5.68 ± 0.01
Linoleico (C18:2 ω-6)	13.83 ± 0.02	14.24 ± 0.01
Alfa-linolénico (C18:3 ω-3)	0.88 ± 0.01	0.94 ± 0.01
Eicosaenoico (C20:1 ω-9)	0.21 ± 0.02	0.22 ± 0.01
Saturados	24.94 ± 0.10	24.2 ± 0.06
Monoinsaturados	58.56 ± 0.03	58.56 ± 0.01
Poliinsaturados	14.71 ± 0.02	15.18 ± 0.02

Fuente: (Vargas et al., 2020).

### 2.5.3 Extracción por centrifugado.

La extracción de aceite por centrifugación es también conocida como extracción termomecánica o extracción por termobatido. Este proceso es mayormente usado para la extracción de aceite de oliva, pero también se han encontrado investigaciones que utilizan este método para la extracción de aceite de aguacate. (Gutarra y Vargas, 2018).

El proceso de centrifugación se realiza en equipos que utilizan la fuerza centrífuga y la diferencia de densidades entre el agua y el aceite. La obtención del aceite, se realiza a temperaturas menores de 45°C, lo que permite que no se modifiquen las propiedades químicas del aceite (Acosta, 2011).

El método de centrifugado se realiza a través de extracciones acuosas que es un proceso utilizado para recuperar el aceite de los recursos vegetales. La separación de agua del aceite de aguacate se realiza mediante la destrucción enzimática o mecánica de las células del tejido que contienen lípidos, seguida de centrifugación para separar el aceite de la emulsión de aceite y agua. Los métodos de separación acuosa se pueden dividir principalmente en separación por centrifugación asistida enzimáticamente y separación por centrifugación asistida mecánicamente (Qin et al., 2016).

Tradicionalmente, el método mecánico da bajos rendimientos, sin embargo, pueden aumentarse manteniendo el pH entre 4.0 y 5.5 agregando tiza ( $\text{CaCO}_3$ ,  $\text{CaSO}_4$ ) o sal ( $\text{NaCl}$ ) a la pasta antes de la centrifugación. La presencia de cationes monovalentes y divalentes activan enzimas con actividad pectinasa, por lo tanto, a ciertas concentraciones, las actividades celulolíticas y proteolíticas no se ven afectadas. (Costagli & Betti, 2015)

### **2.5.3.1 Centrifugación asistida por enzimas.**

En la técnica de centrifugación asistida por enzimas, antes de la centrifugación, las enzimas exógenas agregadas hidrolizan y degradan las paredes celulares, favoreciendo la liberación de aceite de las células. Las enzimas exógenas añadidas pueden ser pectinasas,  $\alpha$ -amilasa, proteasas, celulosas y enzimas pectolíticas (Qin et al., 2016). El rendimiento varía según la concentración y el tipo de enzima utilizada, el tiempo de reacción y el porcentaje de agua utilizada. Se destaca que este método mejora el aceite hasta en 25 veces, en comparación con el desempeño de una centrifugación no enzimática (Flores et al., 2019).

El estudio realizado por Buelvas, Patiño y Cano (2012), demostró que el mejor desempeño se logró con la enzima Pectinex en una concentración de 200 mL de enzima/total de mezcla, en la cual se obtuvo un rendimiento de extracción de aceite del 60% en el estado de madurez representado como E3-M (maduro).

Por otra parte, Qin et al. (2016), en su estudio: “Una revisión de las técnicas de extracción de aceite de aguacate”, reportaron un rendimiento de extracción de aproximadamente 78% en condiciones optimizadas: 1% de  $\alpha$ -amilasa, tiempo de reacción enzimática de 1 h y temperatura de 65 ° C, con una posterior centrifugación para separar el aceite.

### **2.5.3.2 Centrifugación asistida mecánicamente.**

En el método de centrifugación asistida mecánicamente, las células de la pulpa de aguacate que contienen gotitas de aceite se rompen mediante fuerza mecánica y el aceite se libera mediante la fuerza centrífuga (Flores et al., 2019).

En la investigación realizada por Vargas et al. (2020), la pulpa de aguacate fue colocada en una termo-batidora a 50 rpm, temperatura de 60 °C por un tiempo de 2 horas, con la finalidad de triturar el mesocarpio y formar una pasta fina, permitiendo

de esa manera romper las células que contienen aceite y promover su liberación durante el termobatido. La pasta resultante se llevó a centrifugación a 4000 rpm, temperatura de 22 °C por un tiempo de 15 minutos, logrando de esta manera la separación del aceite de la pulpa. Los resultados del rendimiento y los parámetros fisicoquímicos se detallan en la Tabla 2.24 y los valores de ácidos grasos presentes en el aceite se muestran en la Tabla 2.25.

**Tabla 2.24** Parámetros del aceite de aguacate extraído por termobatido.

PARÁMETRO	TERMOBATIDO
Rendimiento (%)	16.39 ± 1.38
Índice de acidez (mg KOH/g aceite).	0.4110 ± 0.02
Índice de peróxido (mEq O <sub>2</sub> /kg aceite).	5.9721 ± 0.02
Índice de refracción (20°C).	1.4630 ± 0.00
Humedad (%).	0.0800 ± 0.00

Fuente: (Vargas et al., 2020).

**Tabla 2.25** Composición de ácidos grasos en el aceite aguacate extraído por termobatido.

ÁCIDO GRASO	VALOR
Palmítico (C16:0)	12.68 ± 0.19
Palmitoleico (C16:1)	2.37 ± 0.05
Estearico (C18:0)	0.68 ± 0.02
Oleico (C18:1 ω-9)	65.71 ± 0.20
Vaccénico (C18:1 ω-7)	4.63 ± 0.06
Linoleico (C18:2 ω-6)	12.48 ± 0.03
Alfa-linolénico (C18:3 ω-3)	1.27 ± 0.01
Eicosaenoico (C20:1 ω-9)	0.22 ± 0.01

Continúa...

**Tabla 2.25** Composición de ácidos grasos en el aceite aguacate extraído por termobatido (Continuación).

ÁCIDO GRASO	VALOR
Saturados	13.36 ± 0.19
Monoinsaturados	72.89 ± 0.15
Poliinsaturados	13.75 ± 0.03

Fuente: (Vargas et al., 2020).

En otro estudio realizado por Jorge, Carregari, Silva, Jorge y Telis (2015), se caracterizó los aceites de aguacate variedad Hass y Margarida obtenidos por centrifugación, en donde se extrajo manualmente la pulpa de las frutas desinfectadas y se homogeneizó en una licuadora. La pasta resultante se tamizó y se mantuvo en un mezclador térmico a una temperatura de 40 °C durante 40 minutos. Finalmente, la pasta se colocó en una centrífuga horizontal para obtener el aceite. Los resultados de las características fisicoquímicas se muestran en la Tabla 2.26.

**Tabla 2.26** Características fisicoquímicas del aceite de aguacate variedad Margarida y Hass, extraído por centrifugación.

PARÁMETRO	VAIEDAD MARGARIDA	VARIEDAD HASS
Acidez (mg KOH / g aceite)	3.64 ± 0.00	1.58 ± 0.00
Índice de peróxido (mEq O <sub>2</sub> / kg aceite)	4.98 ± 0.36	5.54 ± 0.25
Índice de yodo (g I <sub>2</sub> / 100 g aceite)	80.80 ± 0.00	84.70 ± 0.00
Índice de refracción	1.4615 ± 0.00	1.4607 ± 0.00
Valor de saponificación (mg KOH / g aceite)	194.92 ± 0.02	195.79 ± 0.07
Materia insaponificable (%)	1.19 ± 0.09	0.76 ± 0.03
Clorofila (mg / kg aceite)	3.26 ± 0.00	10.07 ± 0.00

Continúa...

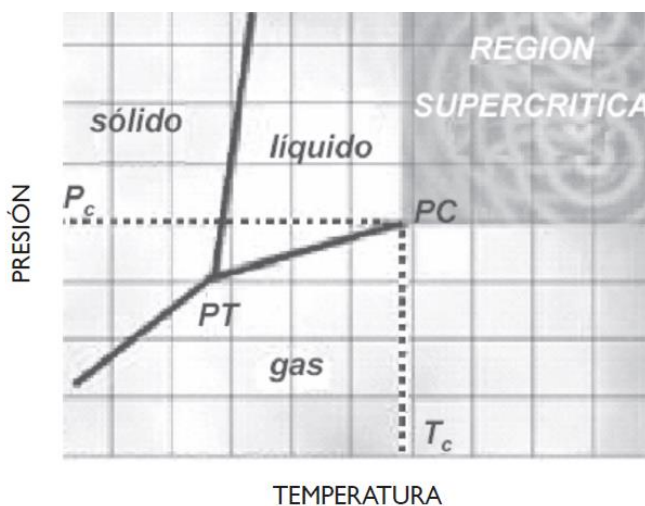
**Tabla 2.26** Características fisicoquímicas del aceite de aguacate variedad Margarida y Hass, extraído por centrifugación (Continuación).

PARÁMETRO	VAIEDAD MARGARIDA	VARIEDAD HASS
Total de compuestos polares (%)	7.50 ± 0.0	8.83 ± 0.29
Dienos conjugados (%)	0.15 ± 0.00	0.20 ± 0.01
p-anisidina	0.04 ± 0.00	0.95 ± 0.00
Índice de estabilidad oxidativa (h)	3.87 ± 0.08	3.87 ± 0.08

Fuente: (Jorge et al., 2015).

#### 2.5.4 Extracción por fluidos supercríticos (EFSC).

Un fluido supercrítico (FSC) es cualquier substancia a una temperatura y presión por encima de su punto crítico termodinámico, como se muestra en la Figura 2.11. Tiene la propiedad de difundirse a través de los sólidos como un gas, y de disolver los materiales como un líquido. Adicionalmente, puede cambiar rápidamente la densidad con pequeños cambios en la temperatura o presión. Estas propiedades lo hacen conveniente como un sustituto de los solventes orgánicos en los procesos de extracción (Velasco, Villada y Carrera, 2007).



**Figura 2.11** Diagrama de fases. (PT: punto triple. PC: punto crítico, Pc: presión crítica, Tc: temperatura crítica) Fuente: (Velasco et al., 2007).

Como se mencionó anteriormente un fluido supercrítico es aquel que se encuentra a valores superiores a los de su punto crítico y bajo estas condiciones no se licua por más que se aumente la presión ni se vaporiza por más que la temperatura se eleve. Por consiguiente, la fase líquida es indistinguible de la fase vapor. En este punto la sustancia no puede considerarse ni como gas ni como líquido. Este comportamiento se ve reflejado en las características que poseen los FSC, ya que algunas de ellas son inherentes a los gases y otras a los líquidos (Velásquez, 2008).

La extracción supercrítica es una operación unitaria de transferencia de masa que se efectúa por encima del punto supercrítico del solvente, similar a la extracción clásica con la particularidad de utilizar como agente extractor un FSC en lugar de un líquido. El proceso de extracción con fluidos supercríticos según Velásquez (2008), consiste de cuatro etapas:

- I. Etapa de presurización: se eleva la presión del gas a utilizar como solvente a un valor  $P_1$  por encima de su presión crítica ( $P_c$ ); esta operación se realiza por medio de un compresor o bomba.
- II. Etapa de ajuste de temperatura: se remueve o adiciona energía térmica, ya sea con un intercambiador de calor, baños térmicos o resistencias eléctricas, para llevar el solvente comprimido a la temperatura de extracción requerida, estado que está por encima de su temperatura crítica.
- III. Etapa de extracción: se conduce el FSC al extractor donde se encuentra la muestra o materia prima que contiene el soluto de interés.
- IV. Etapa de separación: el gas se descomprime a una presión  $P_2$  inferior a la presión crítica, liberándose el soluto en un recipiente separador.

#### **2.5.4.1 Extracción con CO<sub>2</sub> supercrítico.**

El CO<sub>2</sub> es el fluido supercrítico más utilizado debido a que es no tóxico, no es inflamable, no es corrosivo, es incoloro, no es costoso, se elimina fácilmente, no deja



residuos, sus condiciones críticas son relativamente fáciles de alcanzar, se consigue con diferentes grados de pureza y se puede trabajar a baja temperatura, (Velasco et al., 2007). Además, la extracción con fluidos supercríticos no deja residuos químicos y la extracción con CO<sub>2</sub> supercrítico permite su fácil recuperación por procesos de reciclaje, teniendo un menor impacto sobre el medio ambiente (Velásquez, 2008).

En la Tabla 2.27 se comparan las condiciones críticas para el agua, CO<sub>2</sub> y metanol.

**Tabla 2.27** *Parámetros críticos del agua, el dióxido de carbono y el metanol.*

<b>FLUIDO</b>	<b>TEMPERATURA CRITICA</b>	<b>PRESIÓN CRITICA</b>
Agua	374.2	220.5
Dióxido de carbono	31.1	73.8
Metanol	239.5	81.0

Fuente: (Velásquez, 2008)

La extracción con FSC, específicamente con CO<sub>2</sub>, resulta una alternativa interesante para la extracción y fraccionamiento de aceites vegetales, porque no posee los inconvenientes de los disolventes orgánicos tradicionales, tal como se mencionó anteriormente sobre algunas ventajas que ofrece el uso del CO<sub>2</sub> supercrítico al ser no tóxico, ni dejar residuo en sus productos (Velasco et al., 2007).

En la investigación realizada por Restrepo et al. (2012), la muestra de aguacate fue secada por liofilizado y después fue sometida a la extracción del aceite en un equipo de extracción por FSC a escala semi-industrial con las especificaciones que se muestran en la Tabla 2.28.

**Tabla 2.28** Información técnica del equipo de extracción por fluidos supercrítico.

CARACTERÍSTICAS	LÍMITES
Capacidad máxima del extractor	12 litros x 2
Presión del extractor	45 bar
Temperatura máxima del extractor	90°C
Presión máxima de la columna de separación	22 Bar
Temperatura máxima de la columna de separación	90°C
Capacidad máxima de la columna de separación	4 L
Presión del separador	9.8 Bar
Temperatura máxima del separador	90°C
Capacidad máxima del separador	5 L
Solvente	Dióxido de Carbono (CO <sub>2</sub> ) Pureza > 99.5% Humedad < 0.2%

Fuente: (Restrepo et al., 2012).

Restrepo et al. (2012) evaluó la calidad del aceite de aguacate extraído por tres métodos: Soxhlet, prensado en frío y por fluido supercrítico con CO<sub>2</sub>, determinando la calidad del aceite en términos de ácidos grasos libres, índice de peróxido, índice de yodo, saponificación y gravedad específica. Los valores de los parámetros evaluados se muestran en la Tabla 2.29.

La extracción con fluidos supercríticos fue la técnica mediante la cual se obtuvieron los mayores rendimientos y calidad en comparación con los otros métodos evaluados. El estudio reveló un rendimiento de aceite de aguacate en relación a la pulpa fresca de 18.9%, lo que indica la efectividad de la tecnología emergente.

**Tabla 2.29** Pruebas de calidad del aceite de aguacate extraído por diferentes métodos.

PROPIEDAD	MÉTODO DE EXTRACCIÓN		
	Soxhlet	Prensado en frío	Fluidos supercríticos
Índice de yodo (cg I <sub>2</sub> /g aceite)	77.85 ± 2.1	78.44 ± 1.41	90.18 ± 0.78
Índice de peróxido (mEq O <sub>2</sub> /kg aceite)	31.66 ± 2.47	22.86 ± 1.94	16.87 ± 1.15
Índice de acidez (% ácido oleico)	1.68 ± 0.14	4.63 ± 0.03	0.48 ± 0.35
Índice de saponificación (mg KOH/g aceite)	175.07 ± 2.98	223.69 ± 6.57	226.18 ± 1.11
Gravedad específica	0.874 ± 0.05	0.914 ± 0.03	0.915 ± 0.04

Fuente: (Restrepo et al., 2012)

En el estudio realizado por Flórez (2017), se caracterizó el aceite de aguacate variedad Hass a escala semi-industrial con CO<sub>2</sub> como fluido supercrítico. Las condiciones de operación se muestran en la Tabla 2.30, dichas condiciones permitieron obtener un rendimiento de extracción en cuanto al porcentaje de aceite extraído de un 21.7%.

**Tabla 2.30** Condiciones de extracción de aceite de aguacate a escala semi industrial, con CO<sub>2</sub> como fluido supercrítico.

CONDICIÓN	PARÁMETRO
Temperatura de extracción (°C)	60
Presión extracción (MPa)	20
Flujo de CO <sub>2</sub> (Kg/h)	70
Masa de materia prima (kg)	2.35
Tiempo (minutos)	181.29

Fuente: (Flórez, 2017).

El resultado de las propiedades fisicoquímicas y perfil de ácidos grasos se muestran en la Tabla 2.31 y 2.32 respectivamente.

**Tabla 2.31** Caracterización fisicoquímica del aceite de aguacate extraído por fluidos supercríticos a escala semi-industrial.

PROPIEDAD	VALOR
Índice de saponificación (mg KOH/g aceite)	198.28 ± 1.02
Índice de yodo (cg I <sub>2</sub> /g aceite)	87.13 ± 0.64
Índice de peróxido (mEq O <sub>2</sub> /kg aceite)	4.79 ± 0.98
Índice de acidez ( % ácido oleico)	1.46 ± 0.26
Índice de refracción a 25°C	1.47 ± 0.01
Densidad (g/mL)	0.94 ± 0.09

Fuente: (Flórez, 2017).

**Tabla 2.32.** Perfil de ácidos grasos del aceite de aguacate extraído por fluidos supercríticos a escala semi-industrial.

COMPUESTO	VALOR
Ácido palmitoleico %	13.33
Ácido palmítico %	26.59
Ácido linoleico %	3.75
Ácido oleico %	44.20
Ácido esteárico %	0.90
Total saturados	27.49
Total monoinsaturados	68.76
Total poliinsaturados	3.75

Fuente: (Flórez, 2017)

## **2.6 CARACTERIZACIÓN DEL ACEITE DE AGUACATE.**

Los aceites que poseen propiedades terapéuticas son usados como componente o vehículo en productos farmacéuticos por sus características físicas y químicas. La estabilidad de un aceite se refiere a la capacidad para mantener su frescura, sabor y color durante su almacenamiento y uso. Esto está relacionado con la composición de los lípidos, su naturaleza y la presencia o ausencia de antioxidantes y de inhibidores (Jiménez, Aguilar, Zambrano y Kolar, 2001).

En la actualidad existen parámetros y valores estandarizados para muchos aceites vegetales, enlistados bajo normativas como la ASTM, ICONTEC y AOCS. Para el caso del aceite de aguacate no hay parámetros definidos internacionalmente. Los valores que se usan comúnmente son los recomendados por la Norma Mexicana para aceite de aguacate, también se utilizan los recomendados para el aceite de oliva. El estándar de calidad para el aceite de oliva está disponible en el Codex Alimentarius, y el Consejo Internacional del Aceite de Oliva (Flores et al., 2019).

### **2.6.1 Composición del aceite de aguacate.**

El aceite de aguacates es de bastante interés en la industria farmacéutica y cosmética, pues la materia insapo-nificable, que contiene carotenoides, clorofilas, tocoferoles y compuestos fenólicos son de gran interés por sus propiedades antioxidantes y antiinflamatorias, debido a sus altas propiedades de penetración en la piel, además de presentar altas cantidades de minerales como magnesio, potasio y fósforo (Vargas et al., 2020).

Se han realizado diversos estudios en regiones de América del Sur sobre el análisis y la caracterización del aceite de aguacate, mostrando un alto contenido de ácidos grasos monoinsaturados (69.4%) y una menor cantidad de ácidos grasos poliinsaturados y saturados, con valores de hasta 16.6% y 14%, respectivamente. Indicando

además que el aceite de aguacate tiene una estabilidad térmica cercana a 176 °C y tiene una concentración más baja de compuestos fenólicos totales que el aceite de oliva.

Según la investigación realizada por Flores et al. (2019), la calidad del aceite de aguacate, se ve afectado por la calidad del fruto, así se tiene el aguacate variedad Hass que tiene alrededor de 62% de lípidos, entre ellos los de mayor proporción es el oleico (42-51%) y el palmítico (20-25%). Así mismo, estudios realizados en las variedades Fortuna, Collinson y Barker, revelaron un contenido en la pulpa del fruto de ácidos grasos saturados del 22.3, 29.4 y 41.3% respectivamente. Siendo las variedades Fortuna y Collinson de mejor calidad en términos de perfil de ácidos grasos respecto a la variedad Barker.

La Tabla 2.33 y 2.34 se muestra la composición de los ácidos grasos y antioxidantes más comunes respectivamente del aceite de aguacate de diferentes variedades.

**Tabla 2.33** Composición (%) de los ácidos grasos comunes del aceite de aguacate.

<b>Variedad</b>	<b>Palmitico 16:0</b>	<b>Esteárico 18:0</b>	<b>Palmitoleico 16:1 Ω7</b>	<b>Oleico 18:1 Ω9</b>	<b>Linoleico 18:2 Ω6</b>	<b>α linoleico 18:3 Ω3</b>
<b>Hass</b>	18.17 ± 0.02	0.37 ± 0.00	4.03 ± 0.01	51.76 ± 0.04	11.12 ± 0.01	0.59 ± 0.00
	17.37 ± 0.0015	0.63 ± 0.0002	7.52 ± 0.0002	62.89 ± 0.0019	10.64 ± 0.0004	0.72 ± 0.0001
<b>Fortuna</b>	10.75	0.48	3.14	74.32	10.03	0.85
<b>Fuerte</b>	21.312 ± 0.550	0.762 ± 0.021	2.391 ± 0.188	64.436 ± 0.666	9.147 ± 0.030	0.467 ± 0.016
<b>Criolla Mexicana [1]</b>	28.12 - 4.48	0.23 - 1.07	6.64 - 8.5	40.73 - 42.72	15.52 - 18.88	1.51 - 2.14
<b>Antillana</b>	18.87	0.59	4.16	63.07	11.83	1.32
<b>Breda [2]</b>	19.9 - 21.3	-	2.7 - 7.0	57.1 - 64.5	10.6 - 11.0	0.4 - 0.6
<b>Margarida</b>	23.66	-	3.58	47.20	3.46	1.60

Fuente: (Flores et al., 2019).

[1] Composición estudiada bajo diferentes métodos de extracción (solventes, SCO<sub>2</sub> y extracción acuosa asistida por ultrasonido).

[2] Composición estudiada bajo diferentes métodos de extracción (Prensado en frío y Solventes).

**Tabla 2.34** Compuestos antioxidantes presentes en el aceite de aguacate. Concentración [=] mg x kg<sup>-1</sup>.

Variedad	$\beta$ -sitoesterol	$\alpha$ -tocoferol	$\gamma$ -tocoferol	$\Delta 5$ -avenasterol	Campesterol	Estigmasterol	Sitoestanol
<b>Hass</b>	82.95 0.06	86.75 0.62	9.02 0.09	6.63 0.07	5.88 0.01	-	0.46 0.01
<b>Bacon</b>	82.6 0.03	51.90 0.04	71.61 0.57	9.16 0.03	3.71 0.01	0.40 0.01	0.58 0.04
<b>Fuerte</b>	80.56 0.08	103.11 6.87	20.35 1.22	8.81 0.03	4.62 0.02	0.15 0.00	-
<b>Antillana</b>	91.2	-	-	-	8.6	-	-

Fuente: (Flores et al., 2019)



### **2.6.2 Propiedades físicas.**

Entre los parámetros físicos más comunes para evaluar un aceite se encuentran la densidad y la humedad, aunque también existen métodos sensoriales como son la claridad, olor y sabor.

#### **I. Densidad.**

No es un factor decisivo en la calidad del aceite, pero es de suma importancia al momento de realizar el desarrollo de maquinaria (Condori, 2016).

#### **II. Humedad.**

Esta característica define la proporción de H<sub>2</sub>O que se encuentra presente en el aceite. La presencia de agua influye negativamente porque se pueden crear vínculos fisicoquímicos no apropiados, generando de esta manera degeneración del aceite. La técnica usada para determinar este criterio es utilizar una mufla u horno para remover el agua contenida en la materia prima, esto a temperaturas determinadas según el producto (Condori, 2016). El valor máximo es de 0.5% según la Norma Mexicana para aceite de aguacate.

#### **III. Claridad.**

Se pueden evaluar tanto aceites crudos como refinados. Este parámetro evalúa la presencia de sustancias extrañas en el aceite o que este posea algún tipo de turbulencia. Existen aceites que presentan a bajas temperaturas una ligera nebulosidad o se observa la solidificación, que al aumentar la temperatura debe desaparecer, esto se debe a la presencia de glicéridos cristalizados (Vargas, 2004). un claro ejemplo de esta característica se observa en el aceite de coco.

#### **IV. Color.**

El color en un aceite es importante puesto que muchos aceites se oscurecen con la oxidación, lo que permite que a través del color se pueda comparar la calidad de un aceite con respecto a otro (Vargas, 2004).

#### **V. Olor.**

El aceite debe tener un olor característico al fruto, este olor no debe ser ni fuerte ni penetrante. Debe evaluarse esta característica debido a que en todo el proceso el aceite pudo haber adquirido algún olor indeseable (Vargas, 2004).

#### **2.6.3 Propiedades químicas.**

Las propiedades químicas como el índice de acidez, índice de saponificación, índice de yodo, índice de peróxido y rancidez, son características que evalúan la calidad de un aceite vegetal.

##### **I. Índice de yodo.**

El índice de yodo es una expresión del grado de insaturación de los ácidos grasos que componen un aceite y es utilizado para caracterizar diferentes aceites vegetales. Cuanto mayor es la cantidad de dobles enlaces presente en una unidad de aceite, mayor será el índice de yodo. Por tanto, el índice de yodo es un indicador del grado de insaturación, que se define como los gramos de yodo absorbido por cada 100 g de muestra (Condori, 2016).

Entre mayor es el índice de yodo mejor calidad tiene el aceite, puesto que indica que contiene altos valores de ácidos grasos insaturados. El límite máximo establecido por la Norma mexicana es de 85-90 cg I<sub>2</sub>/g de aceite (Restrepo et al., 2012).

## **II. Índice de acidez.**

Indica la proporción de ácidos grasos libres que contiene una muestra determinada, así valores menores en el índice de acidez, representan una mejor calidad ya que los ácidos grasos presentes se encuentran estables (Vélez et al., 2014). Químicamente se define como la cantidad de Hidróxido de Sodio o de potasio necesarios para neutralizar la cantidad de ácidos grasos libres presentes en un gramo de grasa. El índice de acidez del aceite de aguacate es expresado en relación al ácido oleico debido a que es el que se encuentra en mayor proporción (Condori, 2016).

El valor establecido por la Norma Mexicana para aceite de aguacate, es de un valor máximo de 1.5 % de ácido oleico; resultado, que se traduce en un bajo contenido de ácidos grasos libres y a la vez menor riesgo de oxidación (Vargas et al., 2020).

## **III. Índice de peróxido.**

Este índice es expresado como la cantidad determinable de oxígeno activo contenida en 1 kg de muestra. Es una medida del oxígeno unido a las grasas en forma de peróxido. Se forman especialmente hidroperóxidos como productos de oxidación primarios, además de cantidades reducidas de otro tipo de peróxidos como consecuencia de procesos oxidativos. Por tal motivo, el índice de peróxidos proporciona información acerca del grado de oxidación de la muestra, además de proporcionar información si el aceite ha sufrido alteraciones (Condori, 2016).

En la Norma Mexicana para el aceite de aguacate, se establece un valor máximo de 10 mEq O<sub>2</sub>/kg de aceite (Vargas et al., 2020).

## **IV. Índice de saponificación.**

Se puede definir como la cantidad de ácidos grasos libres y de ácidos grasos acoplados presentes en sustancias oleosas. Es considerado como un índice de pureza,

puesto que un alto índice de saponificación indica un alto nivel de oxidación. En términos químicos representa la cantidad de hidróxido de sodio o de potasio necesarios para la saponificación de un gramo de grasa (Melo et al., 2018).

Teniendo en cuenta que el índice de saponificación es una medida inversamente proporcional al peso molecular de los ácidos grasos presentes en el aceite, es decir un aceite con alta presencia de ácidos grasos de bajo peso molecular presenta un alto índice de saponificación y viceversa, para el caso de aceite de aguacate se dice que tiene una gran cantidad de ácidos grasos de bajo peso molecular, incluso menor que aquellos presentes en el aceite de oliva (Vélez et al., 2014).

Lo anterior puede explicarse sobre la base de que los aceites están formados por triglicéridos principalmente, y que cada triglicérido necesita 3 moléculas de KOH para saponificarse; este valor da la medida del peso molecular promedio de los triglicéridos, ya que, si estos contienen ácidos grasos de bajo peso molecular, el número de moléculas presentes en 1 g de muestra será mayor que si los ácidos grasos son de alto peso molecular. Lo establecido en la norma mexicana de aceites y grasas para el índice de saponificación es de 177-198 mg KOH/g de aceite (Restrepo et al., 2012).

## **V. Índice de refracción.**

El índice de refracción de un aceite se define como la relación entre la velocidad de la luz en el aire (técnicamente, un vacío) y la velocidad de la luz en el aceite. Está relacionado con el grado de saturación y disminuye linealmente conforme disminuye el índice de yodo (Vargas, 2004). Es un indicador de pureza del mismo, pues está relacionado con el grado de saturación y con la relación cis/trans de los dobles enlaces (Vélez et al., 2014).

Las propiedades tanto físicas como químicas de los aceites vegetales se ven afectadas por el método de extracción como se muestra en la Tabla 2.35 y también se ven influenciadas por la variedad del fruto, como se observa en la Tabla 2.36.

**Tabla 2.35** Propiedades fisicoquímicas del aceite de aguacate según método de extracción.

PARÁMETRO	MÉTODO DE EXTRACCIÓN		
	Termobatido	Prensado hidráulico	Prensado por expeller
Índice de acidez (mg KOH/g aceite).	0.4110 ± 0.02	0.2032 ± 0.00	0.4679 ± 0.01
Índice de peróxido (mEq O <sub>2</sub> /kg aceite).	5.9721 ± 0.02	5.6200 ± 0.01	14.8084 ± 0.49
Índice de refracción (20°C).	1.4630 ± 0.00	1.4620 ± 0.00	1.4640 ± 0.00
Humedad (%).	0.0800 ± 0.00	0.2656 ± 0.01	0.2375 ± 0.03

Fuente: (Vargas et al., 2020).

**Tabla 2.36** Comparación de las características fisicoquímicas del aceite de aguacate variedad Margarida, Hass y Comercial.

CARACTERÍSTICA	VARIEDAD		
	Margarida	Hass	Comercial
Acidez (mg KOH/g aceite)	3.64 ± 0.00	1.58 ± 0.00	0.82 ± 0.00
Índice de peróxido (mEq O <sub>2</sub> /kg aceite).	4.98 ± 0.36	5.54 ± 0.25	4.80 ± 0.29
Índice de yodo (g I <sub>2</sub> /100g aceite).	80.80 ± 0.00	82.87 ± 0.00	84.70 ± 0.00
Índice de refracción	1.4615 ± 0.00	1.4607 ± 0.00	1.4632 ± 0.00
Índice de saponificación (mg KOH/g aceite).	194.92 ± 0.02	195.79 ± 0.07	193.13 ± 0.03
Índice de estabilidad oxidativa.	3.87 ± 0.08	5.57 ± 0.07	6.31 ± 0.18

Fuente: (Jorge, Carregari, Silva, Jorge, & Telis, 2014)

#### 2.6.4 Propiedades microbiológicas.

Deben efectuarse a todos los cosméticos, excepto a los que no sean susceptibles a la contaminación microbiológica por la propia naturaleza del cosmético (por ejemplos los perfumes con alto contenido de alcohol, productos con más de 10 % de clorhidrato de aluminio, productos oleosos, productos con base de cera, productos que contienen peróxidos).

Según el Reglamento Técnico Centroamericano (RTCA), 71.03.45:07 (2008), los aceites y grasas utilizadas para el uso cosmético deben tener ciertos límites de contenido microbiológico, de acuerdo con esta resolución los análisis microbiológicos que deben ser evaluados en el aceite de aguacate se presentan en la Tabla 2.37.

**Tabla 2.37** Especificación de límites microbianos (expresados en UFC/g o UFC/cm<sup>3</sup>).

PRODUCTO	DETERMINACIÓN	ESPECIFICACIÓN
Para Bebé.	Recuento Total de Mesófilos aerobios.	$\leq 10^2$
	Recuento Total de Mohos y Levaduras.	$\leq 10^2$
Para el contorno de ojos.	Recuento Total de Mesófilos aerobios.	No más de $5 \times 10^2$
	Recuento Total de Mohos y Levaduras.	$\leq 10^2$
Todos los otros.	Recuento Total de Mesófilos aerobios.	$\leq 10^3$
	Recuento Total de Mohos y Levaduras.	$\leq 10^2$

Fuente: (RTCA, 2008).

## 2.7 CONSIDERACIONES FINALES.

Para el desarrollo del proceso de producción de aceite de aguacate es indispensable contar con herramientas guía para el diseño. Se deben incluir condiciones de sostenibilidad y medioambientales intrínsecamente, de manera que no sólo se minimice el impacto ambiental, sino que se mejore en todo sentido la eficiencia del proceso, generando actividades limpias y seguras.

Para llevar a cabo el diseño del proceso, se tomarán de base algunas disciplinas esenciales de sostenibilidad, como la ingeniería verde, química verde y producción más limpia. Más específicamente se evaluarán criterios como la selección de las materias primas, el uso eficiente del agua y la energía eléctrica, la minimización y reutilización de residuos generados en las operaciones unitarias del proceso de producción, generando así un proceso eficiente, innovador y limpio que contribuya al desarrollo sostenible, sin dejar de ser competitivo frente a otras industrias. Teniendo como base las metas de los Objetivos de Desarrollo Sostenible.

Como punto de partida se tomarán los estudios de los procesos de extracción de aceite de oliva debido a la similitud en la composición y estructura de la pasta, ambas denominadas pastas difíciles, puesto que presentan dificultades para la extracción del aceite por lo que se hace necesario el uso de coadyuvantes como el agua. La pasta de aceituna, presenta una estructura que no favorece la extracción del aceite de la misma debido a dos factores: el pequeño tamaño de las gotas de aceite y la existencia de microgeles formados por restos de tejidos y agua que retienen las pequeñas gotas de aceite. Para corregir esta situación, la pasta pasa a una batidora en la que se calienta para reducir la viscosidad de la misma mientras unas palas la remueven lentamente para permitir la agregación de las gotas y la ruptura de los geles (Cano, Gómez, Aguilera y Gámez, 2011). Así mismo la pasta de aguacate también presenta una estructura compleja, conteniendo el aceite en una emulsión finamente dispersa en las células de la pulpa de la fruta. Por lo tanto, el proceso de

extracción requiere ruptura, no sólo de las paredes celulares, sino también la estructura de la emulsión, por lo que también se hace necesario al igual que en el caso de pasta de aceituna el uso de batidoras y temperaturas que favorezcan la ruptura (Costagli et al., 2015).

Tanto el aceite de aguacate como el de oliva son extraídos de la pulpa de la fruta y comparten algunos principios básicos del proceso de producción. Dado que las características del aceite de oliva han sido investigadas en profundidad y correlacionadas con factores agronómicos y tecnológicos, se recomienda lo mismo para el aceite de aguacate, lo que podría ofrecer una gama inexplorada y amplia de características potenciales. Además, el aceite de oliva es objeto de una continua investigación para seguir mejorando su tecnología de producción, lo que conduce a una mejora potencial en su calidad general. El mismo enfoque de desarrollo tecnológico adoptado para el aceite de oliva debe aplicarse al aceite de aguacate para garantizar su mejora continua (Costagli et al., 2015).

Si bien la composición y calidad del aceite de aguacate depende del origen, las condiciones climáticas, variedad y métodos de extracción, en general se caracteriza por ser un aceite principalmente monoinsaturado (principalmente ácido oleico), con una adecuada proporción de ácidos grasos poliinsaturados, similar al aceite de oliva. En el Anexo A se presenta la composición fisicoquímica de ambos aceites.



## **CAPÍTULO 3: METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN.**

En el presente capítulo se desarrolla la metodología de selección del método de extracción de aceite de aguacate, presentando los criterios a evaluar para todas las tecnologías existentes, con el fin de seleccionar aquella que contribuya a un proceso sostenible.

Para la metodología del diseño del proceso de producción sostenible de aceite de aguacate es necesario tomar en cuenta diferentes principios de sostenibilidad, tales como, eficiencia energética, uso adecuado del agua, selección de materias primas y reutilización de residuos.

Como punto final se describe la metodología para identificar los impactos ambientales provenientes de las diferentes operaciones unitarias del proceso de extracción de aceite y en base a estas, proponer medidas ambientales, para minimizar, corregir o mitigar los impactos negativos generados.

### **3.1 METODOLOGÍA PARA LA REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA.**

La búsqueda sistemática de bibliografía es una de las primeras fases en toda investigación, pues ello va a permitir conocer a profundidad la temática, desarrollar un marco teórico y establecer las hipótesis adecuadas sobre las que se debe centrar la investigación (Alfalla, Marín y Medina, 2010).

La metodología propuesta por Gómez et al (2014) para la revisión bibliográfica puede ser aplicada a cualquier tema de investigación para determinar la relevancia e importancia del mismo y asegurar la originalidad de una investigación. La metodología propuesta se compone de tres fases, las cuales son:

## **I. Definición del problema.**

Debe ser lo suficientemente claro para poder realizar una búsqueda bibliográfica que responda a las necesidades del investigador.

## **II. Búsqueda y organización de la información.**

Para el proceso de investigación bibliográfica se debe contar con material informativo como (Medina et al., 2010):

- i. Revistas.
- ii. Artículos científicos.
- iii. Actas de congreso.
- iv. Tesis.
- v. Libros.
- vi. Internet.
- vii. Otras fuentes como: informes, reportajes, estudios y periódicos.

Una manera de organizar la información es por relevancia, distinguiendo los principales documentos de los secundarios. Así se obtiene una estructura o diagrama que permite identificar los pilares del tema bajo estudio. Además, es necesario definir una estructura para organizar la información de forma jerárquica y la cantidad de datos que se van a incluir en esta.

## **III. Análisis de la información.**

La última fase es analizar la información ya organizada, indagando sobre cuáles son los documentos más útiles para la temática en estudio. También se debe realizar un análisis detallado de los artículos que se identifiquen, cuidando que estén directamente relacionados con las ideas más importantes y los aspectos relevantes para el tema que se está estudiando (Medina et al., 2010).

### **3.2 METODOLOGÍA PARA LA SELECCIÓN DEL MÉTODO DE EXTRACCIÓN DE ACEITE DE AGUACATE.**

El aceite de aguacate puede extraerse por diferentes métodos, cada uno de ellos con especificaciones y parámetros establecidos. El método de extracción adecuado para que el aceite sea utilizado en la industria de cosméticos es aquel que permita que el aceite conserve todas las propiedades, cumpla con las características fisico-químicas mínimas para que este sea aceptado, aportando al organismo elementos como los ácidos grasos, y además el método debe considerar los criterios de un proceso sostenible.

Para la selección del método de extracción de aceite se desarrollará una matriz de decisión en la cual se compararán los métodos principales de extracción de aceite de aguacate, definiendo los criterios que ayudarán a elegir el método óptimo para el desarrollo del diseño de producción.

#### **3.2.1 Matriz PUGH.**

Un modelo de decisión multi-criterio de uso común es el análisis de matriz de PUGH, donde diferentes alternativas de posibles escenarios están involucradas en un proceso de toma de decisiones (Burgren & Thorén, 2015).

El análisis de la matriz PUGH es una técnica de toma de decisiones, que se enfrenta a un problema que tiene múltiples dimensiones y factores. Este método se utiliza para comparar lógicamente diferentes opciones basadas en criterios predefinidos. El uso del proceso PUGH ayuda a seleccionar la mejor opción entre varias alternativas a escoger y potencialmente varios factores que intervienen los cuales deben tenerse en cuenta.

Como muchos otros tipos de técnicas de comparación, la metodología PUGH se basa en el modelado de preferencia, siendo esta una técnica de decisión múltiple basada en la teoría de utilidad de múltiples atributos.

El análisis de la matriz PUGH se ha convertido en uno de los modelos más extendidos en el área debido a su simplicidad de minimizar el uso de problemas matemáticos complejos.

En la teoría del diseño, Stuart Pugh desarrolló el modelo pretendiendo dar a las personas involucradas en el conocimiento del proceso una buena comprensión de por qué la elección final se hizo (Clausing et al., 2009).

### **I. Pasos para desarrollar la matriz PUGH (Thorén et al., 2015).**

Los pasos para desarrollar la matriz PUGH se detallan a continuación:

1. Paso uno. Dividir el proceso de 7 a 15 criterios o factores.
2. Paso dos. Seleccionar los conceptos o alternativas que se compararán en la matriz.
3. Paso tres. Dibujar la matriz.
4. Paso cuatro. Ponderar los diferentes criterios o factores. La ponderación puede tener valores que van desde 1 hasta 10.
5. Paso cinco. Completar los puntajes de cada alternativa. Cada alternativa tiene la siguiente puntuación que a su vez se divide en tres clasificaciones: 1, 0 y -1.
6. Paso seis. Es el último paso en la matriz el cual presenta las siguientes etapas:
  - I. Multiplicar cada valor con su alternativa.
  - II. Cada criterio tiene un valor, y estos valores se suman entre si siempre y cuando pertenezcan a la misma clasificación de la alternativa a analizar.
  - III. Las puntuaciones de cada alternativa se suman.

Para concluir se sabe que la alternativa con la puntuación más alta no es necesariamente la más importante, pero es la de principal preocupación y vale la pena considerarla más cuidadosamente. A continuación, en la Tabla 3.1 se presenta la matriz PUGH estructurada.

**Tabla 3.1 Estructura de la matriz PUGH.**

CRITERIOS	PONDERACIÓN	ALTERNATIVA 1	ALTERNATIVA 2	ALTERNATIVA 3
Criterio 1				
Criterio 2				
Criterio 3				
Criterio 4				
Total de ponderación				

Fuente: (Burgren et al., 2015).

### **3.2.2 Desarrollo de la matriz PUGH para la selección del método de extracción de aceite de aguacate.**

Para construir la matriz se tomarán determinados factores que se consideran críticos para la selección del método de extracción, estos factores serán ubicados en una columna, uno tras otro y se valoran en un orden de importancia de 1 a 3 como sigue:

- 1- Poco importante.
- 2- Importante.
- 3- Muy importante.

Una vez ubicados los criterios verticalmente en la tabla se procede a colocar los diferentes métodos de extracción de forma horizontal, esto se hace con el fin de evaluar cada uno de los criterios escogidos para todos los métodos de extracción.

Para llenar la tabla se debe asignar por cada criterio y para cada método un signo que tendrán los siguientes valores:

- a) Positivo (+). Un signo positivo indica que se debe sumar el valor que fue asignado al criterio.
- b) Neutro (0). El valor cero indica que es un valor neutro y que no se suma ni se resta, es decir no alterará el resultado final.
- c) Negativo (-). Un signo negativo indica que se debe restar el valor que fue asignado al criterio.

Una vez evaluados todos los criterios se procede a realizar la sumatoria total de los valores por cada uno de los métodos, el que tengan un mayor resultado será el escogido para desarrollar el diseño del proceso de extracción del aceite.

### **3.2.3 Criterios para la selección del método de extracción.**

Una vez seleccionadas y analizadas las fuentes de información, de estas se procederá a elegir el mejor método de extracción de aceite de aguacate, evaluando los siguientes criterios:

#### **3.2.3.1 Inversión inicial.**

Es importante evaluar la inversión inicial, ya que es la cantidad de dinero que es necesario invertir para poner en marcha un proyecto, siendo necesario evaluar la factibilidad del mismo a través de criterios como el valor actual neto, la tasa interna de retorno y el tiempo de recuperación del capital. Todos estos criterios son importantes para saber si el proyecto genera utilidades en un tiempo de corto plazo.

Este criterio tendrá un orden de importancia de 2 (importante) donde evaluarlo con un signo positivo (+) significa que el proyecto es factible económicamente, mientras un signo negativo (-) indica que el proyecto no es factible económicamente.

### **3.2.3.2 Costos del proceso y mantenimiento.**

Para una empresa es de vital importancia evaluar los costos de producción y el mantenimiento del mismo que se pretende realizar, esto ocurre debido a la viabilidad financiera de un proyecto, si los costos son muy altos, es más difícil recuperar la inversión.

A este criterio se le asigna un valor de 1 (poco importante) donde evaluarlo con un signo positivo (+) significa que los costos del método son relativamente menores, mientras que un signo negativo (-) indica que los costos son altos o mayores en comparación con los demás métodos.

### **3.2.3.3 Pretratamiento de la materia prima.**

El pretratamiento se realiza con el objetivo de poder acondicionar el tamaño y el aspecto físico de la materia prima antes de llevarla al proceso de extracción. Se requiere que estos procesos no eliminen las propiedades, los valores nutritivos y medicinales del aceite, y además que sea una tecnología accesible.

Este criterio tendrá un orden de 2 (importante) donde evaluarlo con un signo positivo (+) significa que es un método que no necesariamente necesita de una etapa de pretratamiento, mientras que un signo negativo (-) significa que posee por lo menos una etapa de pretratamiento.

### **3.2.3.4 Rendimiento de extracción.**

El rendimiento del proceso es sinónimo de mayor producción, si el rendimiento es mayor por un método eso quiere decir que el método a utilizar proporcionará mayor producción por lo tanto se tendrá mayor cantidad de aceite de aguacate, además, un alto rendimiento también significa producir más con menos materia prima.

A este criterio se le asigna un orden de importancia de 3 (muy importante) donde evaluarlo con un signo positivo (+) significa que es un método con un rendimiento alto, mientras que un signo negativo (-) indica que los rendimientos para el método son bajos.

### **3.2.3.5 Características fisicoquímicas del producto final.**

#### **I. Índice de yodo.**

Se define como la manifestación del nivel de elementos insaturados presentes en la sustancia oleosa.

Este criterio tendrá un valor de 1 (poco importante) donde evaluarlo con un signo positivo (+) significa que es un método que permite obtener un aceite con un contenido alto de índice de yodo y que cumple con la norma NMX-F-052-SCFI-2008, mientras que un signo negativo (-) indica que el contenido de yodo del aceite es bajo e incumple la norma.

#### **II. Índice de saponificación.**

Se puede definir como la magnitud de ácidos grasos libres y de ácidos grasos acoplados que están presentes en las sustancias oleosas.

Este criterio tendrá un valor de 3 (muy importante) donde evaluarlo con un signo positivo (+) significa que es un método que permite obtener un aceite con un contenido alto de índice de saponificación, mientras que un signo negativo (-) indica que los resultados son bajos.

#### **III. Índice de peróxidos.**

Este índice es expresado como la cantidad determinable de oxígeno activo contenida en 1 kg de muestra de aceite.



Este criterio tendrá un valor de 3 (muy importante) donde evaluarlo con un signo positivo (+) significa que es un método que produce un aceite con un índice de peróxido bajo, mientras que un signo negativo (-) indica que los resultados son altos.

#### **IV. Índice de acidez.**

Indica la proporción de ácidos grasos libres que contiene una muestra determinada, así valores menores en el índice de acidez, representan una mejor calidad ya que los ácidos grasos presentes se encuentran estables.

Este criterio tendrá un valor de 2 (importante) donde evaluarlo con un signo positivo (+) significa que es un método que produce un aceite con bajo contenido de acidez, mientras que un signo negativo (-) indica que los resultados son altos.

#### **V. Porcentaje de humedad.**

Esta característica define la proporción de agua (H<sub>2</sub>O) que se encuentra presente en el aceite. La presencia de agua influye negativamente porque se pueden crear vínculos fisicoquímicos no apropiados.

Este criterio tendrá un valor de 3 (muy importante) donde evaluarlo con un signo positivo (+) significa que es un método con que arroja resultados de humedad baja en el aceite producido, mientras que un signo negativo (-) indica que los resultados son altos.

#### **VI. Índice de refracción.**

Permite establecer el valor de la variación de rapidez y dirección de ondulación de luz, al atravesar esta última por la materia de interés.

Este criterio tendrá un valor de 3 (muy importante) donde evaluarlo con un signo positivo (+) significa que es un método que produce un aceite que cumple con las especificaciones establecidas en la norma NMX-F-052-SCFI-2008, mientras que un signo negativo (-) indica que los resultados no cumplen con la norma.

## **VII. Riesgos para la seguridad y salud ocupacional.**

Es importante evaluar si los diferentes métodos de extracción de aceite representan un peligro para el personal, poniendo en riesgo su seguridad.

Este criterio tendrá un orden de importancia de 2 (importante) donde evaluarlo con un signo positivo (+) significa que no hay peligro notable de seguridad industrial, mientras que un signo negativo (-) indica que hay que tomar medidas de precaución al ejecutar el método.

## **VIII. Compatibilidad con el medio ambiente.**

Este es un criterio de mucha importancia, pues para que el proceso sea amigable con el medio ambiente, el método seleccionado debe permitir la aplicación de criterios de sostenibilidad, como la recirculación del agua, ciclos cerrados de materia y energía, reutilización y reciclaje de residuos generados, minimización de requerimientos energéticos y además que permita la utilización de materia prima proveniente de fuentes renovables.

A este criterio se le adjudicará un orden de importancia de 3 (muy importante) donde evaluarlo con un signo positivo (+) significa que es un método que permite aplicar en lo posible los criterios de sostenibilidad para no dañar la integridad del medio ambiente, mientras que un signo negativo (-) indica que es un método que puede afectar la estabilidad del medio ambiente.

## **IX. Uso del método en la industria.**

Es un factor indispensable pues para llevar a cabo el proceso se requiere saber cuáles métodos son los más convenientes para ser utilizados en la industria cosmética, además, es necesario tomar en cuenta la cantidad de estudios que existen para cada método, esto con el objetivo de seleccionar aquel que haya sido estudiado a profundidad.

Este criterio tendrá un orden de importancia de 3 (muy importante) donde evaluarlo con un signo positivo (+) significa que el método es bastante estudiado a nivel industrial con estudios detallados del proceso de extracción del aceite, mientras que un signo negativo (-) indica que es un método poco común para extraer aceite para para la industria cosmética y que hay pocas investigaciones relacionadas con dicho método.

### **3.3 METODOLOGÍA PARA EL DISEÑO DEL PROCESO DE PRODUCCIÓN SOSTENIBLE DE ACEITE DE AGUACATE.**

Por producción sostenible se entiende al modelo de producción de bienes y servicios que minimiza el uso de recursos naturales, la generación de materiales tóxicos, residuos y emisiones contaminantes, evitando poner en riesgo las necesidades de las generaciones futuras.

Para desarrollar un proceso de producción sostenible se debe tener presente las disciplinas de desarrollo sostenible abordadas en la sección 2.1.2 del presente trabajo, en donde se contemplan los principios y objetivos bases para lograr dicha sostenibilidad.

#### **3.3.1 Definición de los criterios de sostenibilidad a aplicar.**

En el marco teórico se ha realizado una revisión bibliográfica exhaustiva a cerca del diseño de un proceso industrial sostenible, en base a lo investigado se considerarán las siguientes disciplinas de sostenibilidad:

- a) Química verde.
- b) Ingeniería verde.
- c) Producción más limpia.
- d) Ecología industrial.
- e) Cero residuos.

Todas estas disciplinas permitirán establecer las bases para desarrollar un proceso de extracción sostenible de aceite de aguacate en donde se contemple el evitar la utilización de sustancias tóxicas, la minimización de los costos de producción, la innovación en el proceso productivo y con ello lograr la disminución de los riesgos relevantes al ser humano y al medio ambiente.

### **3.3.2 Especificaciones del aguacate como materia prima.**

Se establecerán las especificaciones fisicoquímicas mínimas del aguacate que se usará como materia prima en la extracción del aceite para garantizar la calidad del mismo.

Los parámetros que se controlarán para garantizar la calidad del aguacate son los siguientes:

**Variedad del fruto.** Es muy importante definir la variedad a procesar, debido a que el rendimiento y la calidad del aceite dependen de ello.

**Tiempo de maduración.** El grado de maduración del aguacate tiene un gran impacto en el rendimiento del aceite y calidad del mismo. Por tanto, el rendimiento de aceite mejora a medida que madura la fruta, ya que se incrementa el porcentaje de aceite y se reduce el contenido de humedad.

**Determinación del peso.** El pesado del aguacate se realiza para tener una idea de la cantidad de materia prima que entra al proceso, que cantidad es aprovechada para obtener el aceite y que cantidad queda como residuo. También el rendimiento de aceite suele expresarse en relación a la totalidad del aguacate procesado.

**Determinación del contenido de pulpa.** Esta medida es muy importante ya que en la pulpa se encuentra el mayor contenido de aceite, por tanto, es la pulpa la que será procesada para extraer el aceite. Además de expresarse el rendimiento en base a la cantidad de pulpa procesada.

**Determinación de pH.** La medición del pH es indicador de calidad del fruto, puesto que se relaciona con el estado de madurez del aguacate. Y es de ayuda para determinar el tiempo de maduración del aguacate post cosecha. El comportamiento del pH se asocia con el contenido de ácidos orgánicos presentes en el fruto, ya que en el periodo de maduración estos tienden a disminuir debido a que se consumen en los diferentes ciclos metabólicos.

**Determinación del contenido de humedad.** La humedad es un parámetro de calidad, puesto que el contenido de aceite se incrementa cuando se reduce la humedad, además de ser un indicativo del estado de madurez del aguacate.

**Contenido de aceite en la pulpa.** Se mide este parámetro como un indicador de calidad, ya que entre mayor es el contenido de aceite en la pulpa, mayor será el rendimiento de extracción. El rendimiento también suele expresarse en términos del contenido de aceite de la pulpa.

### **3.3.3 Especificaciones del aceite de aguacate como producto terminado.**

Se establecerán las características y especificaciones que tipifican al producto (aceite) y rigen su producción. A partir de estas características es posible determinar los requerimientos técnicos de la materia prima, así como del proceso de elaboración del aceite de aguacate.

Para darle uso a cualquier tipo de aceite o grasa vegetal en el sector cosmético es necesario cumplir requisitos fisicoquímicos, los cuales se basarán en la norma mexicana de aceites y grasas NMX-F-052-SCFI-2008, la cual establece los requisitos sanitarios que deben cumplir los aceites y grasas de origen vegetal que se procesen, envasen, almacenen, transporten, exporten e importen.

Los análisis fisicoquímicos serán los siguientes:

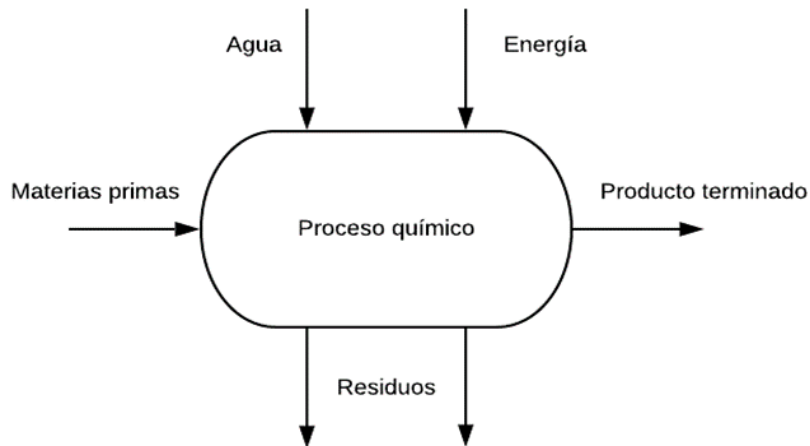
- a) Índice de yodo.
- b) Índice de saponificación.
- c) Índice de peróxidos.
- d) Índice de refracción.

Según el RTCA 71.03.45:07 (2008), los productos destinados para uso cosmético deben tener límites en el contenido microbiológico, por lo tanto, de acuerdo con esta resolución los análisis microbiológicos que serán evaluados en el aceite de aguacate son:

- a) Recuento Total de Mesófilos aerobios.
- b) Recuento Total de Mohos y Levaduras.
- c) *Pseudomonas aeruginosa*.
- d) *Staphylococcus aureus*
- e) *Escherichia coli*.

#### **3.3.4 Diagrama global del proceso.**

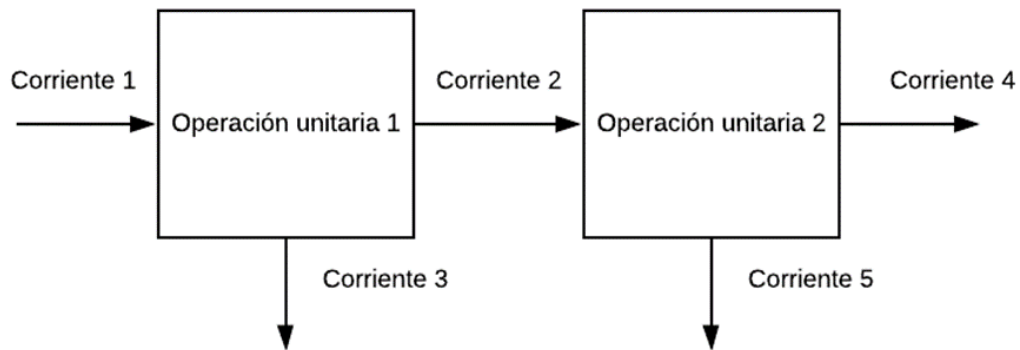
Mediante el diagrama global se busca representar el proceso de forma general, como un volumen de control que abarca todas las operaciones unitarias del proceso, esto se elaborará con el fin de definir cuáles son las corrientes de entrada y de salida del proceso de extracción de aceite de aguacate de acuerdo al método seleccionado, como se muestra en la Figura 3.1.



**Figura 3.1 Diagrama global del proceso.**

### 3.3.5 Diagrama de bloques del proceso.

Cada operación unitaria por la que atraviesa la materia prima se encierra en un rectángulo; cada rectángulo o bloque se une con el anterior y el posterior por medio de flechas que indican tanto la secuencia de las operaciones como la dirección del flujo. Este tipo de diagrama permite conocer los flujos de entrada y de salida de cada operación unitaria y observar cómo estas están conectadas, tal como se muestra en la Figura 3.2.

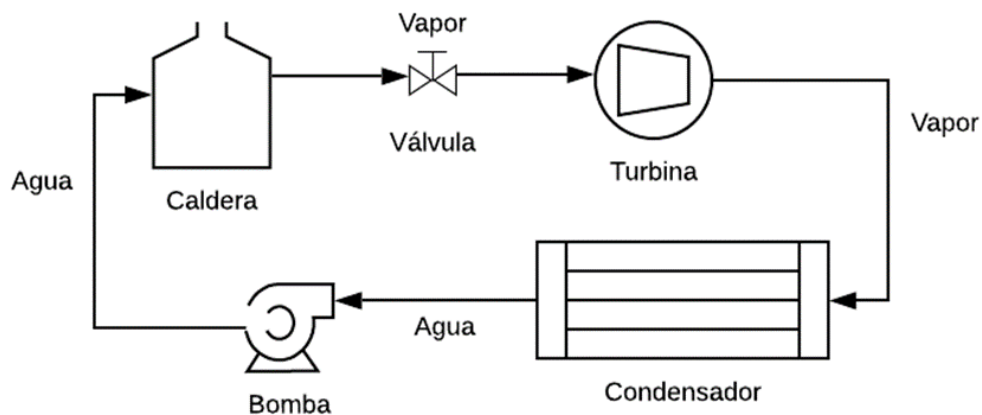


**Figura 3.2 Diagrama de bloques del proceso.**

La selección de las operaciones unitarias se hará en base al método de extracción seleccionado, a través de la revisión de investigaciones relacionadas al proceso de extracción de aceite de aguacate y a los procesos de extracción de aceites vegetales en general, considerando además algunos de los criterios de sostenibilidad.

### 3.3.6 Diagrama de flujo de proceso.

Son una representación esquemática del proceso, sus condiciones de operación normal y su control básico. Este diagrama representado en la Figura 3.3, proporciona una información clara, ordenada y concisa de todos los pasos que componen las distintas operaciones unitarias, donde se usa una simbología internacionalmente aceptada para representar las operaciones efectuadas.

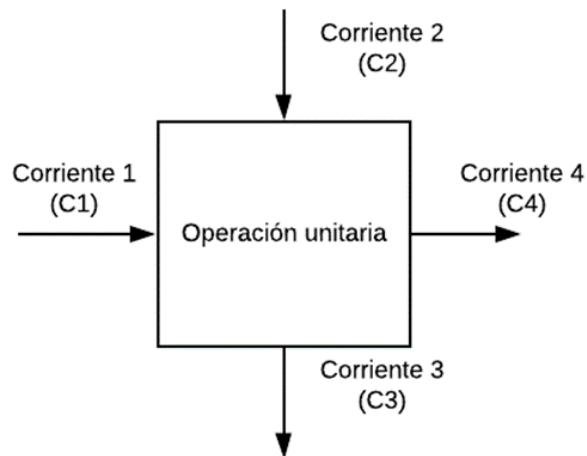


**Figura 3.3 Ejemplo de diagrama de flujo de proceso del agua-vapor, en un sistema de generación de energía eléctrica.**

### 3.3.7 Balances de materia.

En esta etapa se describen los parámetros fisicoquímicos y cantidades de masa de todas las entradas y salidas de las operaciones unitarias que comprenden el proceso productivo. La Ecuación 3.1 muestra la forma de cálculo para el balance de masa, esquematizado en la Figura 3.4.





**Figura 3.4 Balance de materia para operación unitaria específica.**

$$C1 + C2 = C3 + C4$$

**Ecuación 3.1**

### **3.3.8 Selección y dimensionamiento de equipos.**

Para decidir sobre el equipo y maquinaria, se deben tomar en cuenta una serie de factores que afectan directamente la elección. La mayoría de la información que es necesaria recabar será útil en la comparación de varios equipos. A continuación, se presenta la información que se debe reunir y especificar de cada uno de los equipos utilizados en las diferentes operaciones unitarias del proceso de extracción de aceite de aguacate y en base a ello seleccionar los equipos que mejor se apeguen a los criterios establecidos para un proceso sostenible.

- a) Operación unitaria a realizar.
- b) Capacidad instalada.
- c) Parámetros de control.
- d) Consumo de agua
- e) Consumo de energía.
- f) Generación de residuos.
- g) Utilización de productos químicos.

### **3.3.9 Consumo energético de los equipos.**

Una vez establecidos los equipos que se utilizarán en el proceso de extracción de aceite de aguacate, es necesario determinar el consumo energético de estos, teniendo en cuenta principalmente el tiempo que se utilizan y la capacidad de los equipos.

Para su cálculo se toma en cuenta las siguientes variables: potencia requerida de los equipos, la cantidad de equipo utilizado por etapa y la cantidad de horas de uso al mes.

## **3.4 METODOLOGÍA PARA LA EVALUACIÓN DE IMPACTOS AMBIENTALES.**

Para la evaluación de los impactos ambientales se comenzará por identificar los aspectos ambientales asociados a cada etapa del proceso de extracción de aceite de aguacate. Posteriormente se identificarán los impactos, para luego ser evaluados aplicando el método de criterios relevantes integrados (CRI).

### **3.4.1 Identificación de aspectos ambientales.**

Para identificar si una actividad genera un impacto negativo en el medio ambiente, primero es necesario identificar los aspectos ambientales derivados de las actividades del proceso y posteriormente evaluar el impacto que estos tienen en el medio ambiente (Ihobe, 2009).

Para la identificación de los aspectos ambientales derivados del proceso de extracción de aceite de aguacate, se analizarán las etapas del proceso, definiendo las condiciones de funcionamiento del proceso, es decir, si la identificación de los aspectos se hará en condiciones normales o anormales de operación. La información se presentará, como se muestra en la Tabla 3.2.

**Tabla 3.2** Formato ejemplo para presentar la identificación de aspectos ambientales.

OPERACIÓN UNITARIA	ASPECTO	DESCRIPCIÓN
Operación unitaria 1	Descripción 1	Aspecto 1
Operación unitaria 2	Descripción 2	Aspecto 2

Las etapas del proceso serán retomadas del capítulo 4, sección 4.3.6.2 del presente trabajo.

### 3.4.2 Identificación de los impactos ambientales.

Una vez identificados los aspectos ambientales, se debe analizar los impactos ambientales asociados a cada aspecto, para ello se hará uso de una matriz de causa-efecto (véase Tabla 3.3), la cual contribuye a predecir los efectos que tienen las actividades del proyecto sobre los factores ambientales o área de incidencia, que son la parte del ambiente que interactúa con el proyecto y por ende el receptor potencial de sus impactos. La Tabla 3.3 permite identificar los posibles impactos (columnas), ocasionados por las actividades del proceso (filas).

**Tabla 3.3** Ejemplo de matriz para la identificación de impactos ambientales.

ASPECTO AMBIENTAL	FACTOR AMBIENTAL					
	Factor 1		Factor 2		Factor 3	
	Impacto 1	Impacto 2	Impacto 1	Impacto 2	Impacto 1	Impacto 2
Aspecto 1						
Aspecto 2						
Aspecto 3						

Fuente: (PALMA Y TRABAJO S.A.S., 2017).

### **3.4.3 Evaluación de los impactos ambientales.**

Para la evaluación de los impactos ambientales identificados se hará uso de la metodología CRI, la cual se ha explicado en detalle en el apartado 2.3.1.2 del presente trabajo. Para ello cada impacto identificado será sometido a la evaluación en base a cinco indicadores:

1. Intensidad (I).
2. Extensión (E).
3. Duración (D).
4. Reversibilidad (R).
5. Riesgo (RG).

Cada criterio tiene su respectiva valoración, como se muestra en las Tablas 2.5 y 2.6, lo que permite el cálculo del factor VIA y la posterior clasificación de los impactos en las categorías siguientes:

1. Categoría I.
2. Categoría II.
3. Categoría III.
4. Categoría IV.

La clasificación de los impactos en estas categorías permitirá la elaboración de las medidas ambientales de prevención, mitigación o corrección.

La información de la evaluación se presentará en una matriz de impactos ambientales (véase Tabla 3.4).

**Tabla 3.4** Ejemplo de matriz para la evaluación de impactos ambientales.

<b>FACTOR</b>	<b>IMPACTO AMBIENTAL</b>	<b>INTENSIDAD</b>	<b>EXTENSIÓN</b>	<b>DURACIÓN</b>	<b>REVERSIBILIDAD</b>	<b>RIESGO</b>	<b>VIA</b>	<b>SIGNIFICANCIA</b>	<b>CATEGORIA</b>
Factor 1	Impacto 1								
	Impacto 2								
Factor 2	Impacto 1								
	Impacto 2								
Factor 3	Impacto 1								
	Impacto 2								

### 3.5 METODOLOGÍA PARA LA GESTIÓN DE IMPACTOS AMBIENTALES.

Una vez identificados y evaluados los impactos ambientales del proceso de extracción de aceite de aguacate, se procederá a plantear las medidas de manejo ambiental, englobando los impactos de acuerdo al aspecto que los genera.

Para dar una propuesta de evaluación del desempeño sostenible del proceso, se utilizarán indicadores ambientales, los cuales permiten el seguimiento de las medidas tomadas para reducir los impactos ambientales.

La información se presentará como se muestra en la Tabla 3.5.

**Tabla 3.5** Presentación de la información de las medidas de manejo.

<b>IMPACTOS ASOCIADOS</b>			
I. Impacto 1			
II. Impacto 2			
<b>MEDIDA DE MANEJO</b>	<b>TIPO</b>	<b>ESTADO</b>	<b>ODS</b>
Medida 1	I. Mitigación	I. Propuesta	ODS: 7,12,13,14 y 15
Medida 2	II. Prevención	II. Fase de investigación	
Medida 3	III. Corrección	III. Obligatorio	
<b>CRITERIOS DE SOSTENIBILIDAD</b>			
I. Criterio sostenible 1			
II. Criterio sostenible 2			

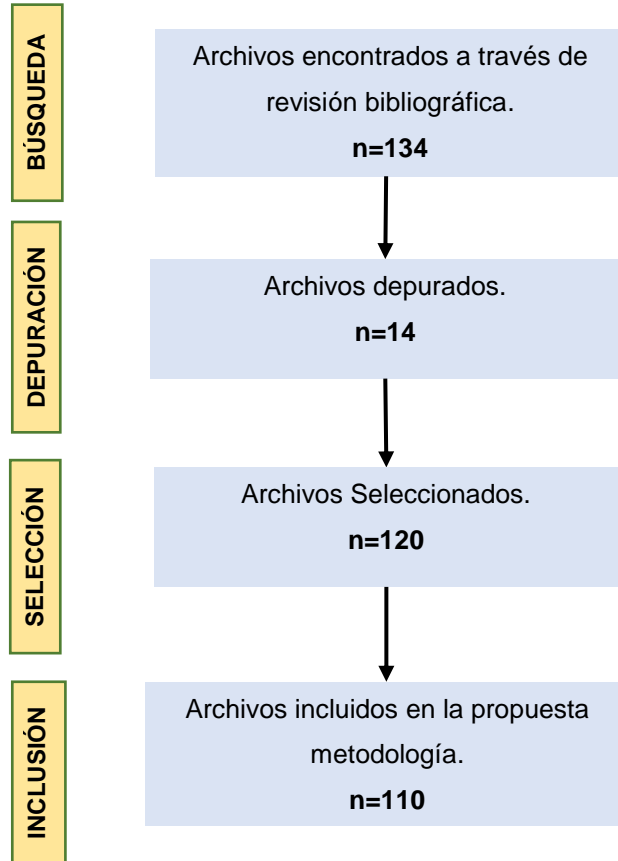
Teniendo planteadas las medidas de manejo ambiental, se procederá a identificar los indicadores ambientales que ayudarán a monitoreo de las medidas ambientales propuestas.

## **CAPÍTULO 4: ANÁLISIS Y PRESENTACIÓN DE RESULTADOS.**

En el presente capítulo se desarrolla un análisis detallado de los resultados obtenidos en las diferentes metodologías propuestas, se explica por qué razón se eligió el método de extracción de aceite de aguacate, se interpretan los resultados del diseño del proceso de producción sostenible, y por último se presentan los análisis de las propuestas de gestión ambiental para mitigar los impactos ambientales que se puedan generar en el proceso de extracción de aceite de aguacate.

### **4.1 REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA.**

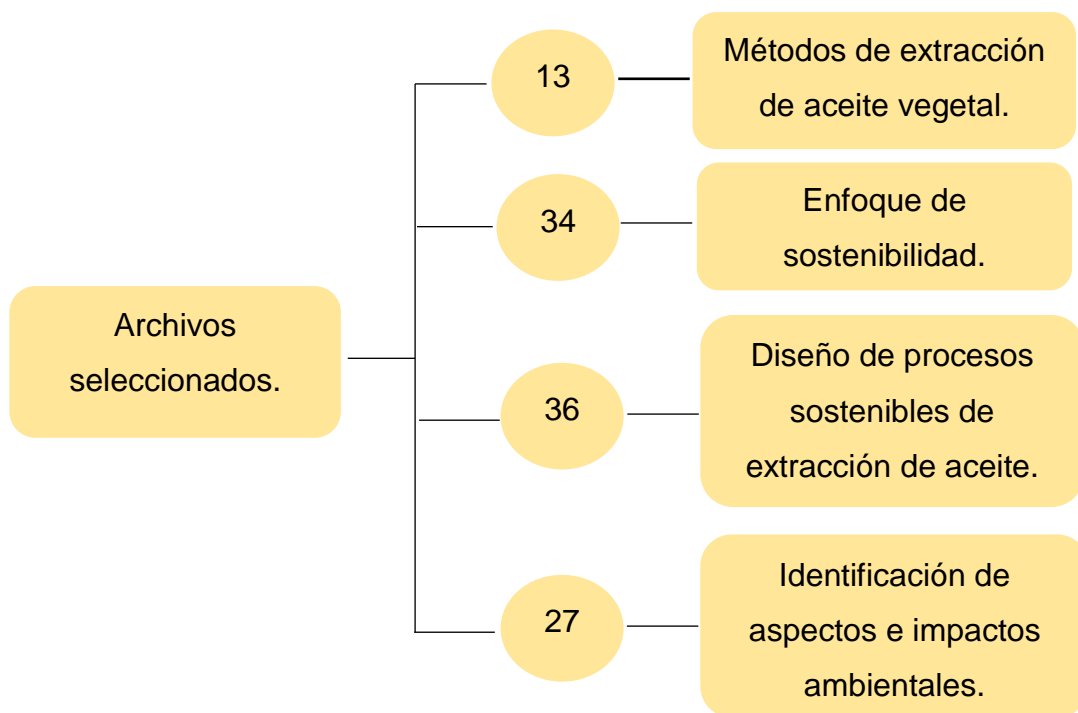
La búsqueda bibliográfica se inició con las investigaciones realizadas por Woolf, A., Wong, M., Eyres, L., McGhie, T., Lund, C., Olsson, S., y Requejo-Jackman, C. (2009), publicadas por la revista *In Gourmet and health-promoting specialty*, El objetivo principal de la investigación es presentar un estudio completo del aceite de aguacate, desde la importancia en el arte culinario y el proceso de extracción, hasta presentar un estudio de los principales compuestos orgánicos del aceite; seguidamente se realizó una búsqueda sobre los procesos industriales sostenibles, estableciendo las bases para desarrollar el proceso de producción de aceite de aguacate, además, la revisión bibliográfica contempló la temática sobre la identificación y evaluación de aspectos e impactos ambientales como punto de partida para aplicarlo al proceso diseñado, todo esto con el objetivo de tener un proceso con enfoque de sostenibilidad. El desarrollo de la revisión bibliográfica contempló documentación como, tesis, tesinas y artículos científicos. En la Figura 4.1 se presenta esquematizado el proceso realizado para la búsqueda y síntesis bibliográfica.



**Figura 4.1 Esquema del proceso de análisis bibliográfico.**

Las investigaciones seleccionadas contemplan los métodos más utilizados en la extracción de aceites vegetales, las disciplinas y criterios que permiten darle un enfoque sostenible al proceso, además de abordar la manera de identificar y evaluar los impactos ambientales negativos asociados a las actividades del proceso. En la Figura 4.2 se presenta la distribución de los documentos incluidos en la propuesta metodológica.





**Figura 4.2 Distribución de los archivos incluidos en la propuesta metodológica.**

De la Figura 4.2 se puede concluir que, 34 archivos corresponden a temas relacionados con el enfoque sostenible, en donde se contemplan los criterios y disciplinas de sostenibilidad y 36 archivos están enfocados al diseño de procesos sostenibles para la extracción de aceites. La identificación de aspectos e impactos ambientales presenta 27 archivos seleccionados, estos archivos contienen la información que permitirá identificar los impactos ambientales y proponer medidas de manejo ambiental para el proceso diseñado. Por último, 13 archivos corresponden a los métodos para la extracción de aceites vegetales, los cuales son: extracción por solvente, extracción por prensado, extracción por centrifugación y extracción por fluidos supercríticos.

## 4.2 SELECCIÓN DEL MÉTODO DE EXTRACCIÓN DE ACEITE DE AGUACATE.

En este apartado se presentan y analizan los resultados de la selección del método de extracción de aceite de aguacate, mediante la comparación de las diferentes tecnologías existentes para llevar a cabo este proceso.

Los métodos evaluados son los siguientes:

- a) Extracción por solvente.
- b) Extracción por prensado.
- c) Extracción por centrifugación.
- d) Extracción por fluidos supercríticos.

Los criterios sobre los cuales se evaluaron los métodos de extracción de aceite son:

- a. Inversión inicial.
- b. Costo del proceso y mantenimiento.
- c. Pretratamiento de la materia prima.
- d. Rendimiento de extracción.
- e. Índice de yodo.
- f. Índice de refracción.
- g. Índice de peróxidos.
- h. Índice de acidez.
- i. Humedad.
- j. Riesgos para la seguridad y salud ocupacional.
- k. Compatibilidad con el medio ambiente.
- l. Uso del método en la industria.

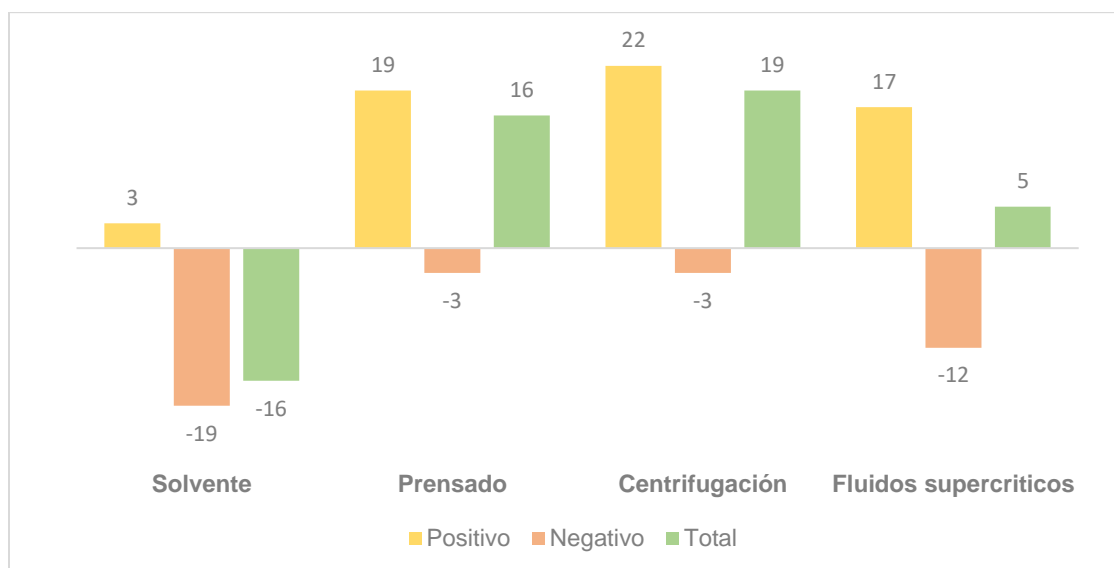
En la Tabla 4.1 se muestra la comparación de los cuatro métodos en base a los siete criterios seleccionados con su respectiva valoración.

**Tabla 4.1** Comparación de los métodos de extracción de aceite de aguacate a través de la matriz PUGH.

<b>CRITERIO</b>	<b>VALOR</b>	<b>SOLVENTES</b>	<b>PRENSADO</b>	<b>CENTRIFUGACIÓN</b>	<b>SUPERCRÍTICOS</b>
Inversión inicial	2	0	+	0	-
Costo del proceso y mantenimiento.	1	-	+	+	-
Pretratamiento de la materia prima.	3	-	-	+	0
Rendimiento de extracción.	3	+	0	-	+
Índice de yodo.	1	-	0	+	+
Índice de saponificación.	3	0	+	0	+
Índice de refracción.	3	-	+	+	-
Índice de peróxidos.	3	-	0	+	+
Índice de acidez.	2	-	+	0	+
Humedad.	3	-	+	+	-
Riesgos para la seguridad y salud ocupacional.	2	-	+	+	+
Compatibilidad con el medio ambiente.	3	-	+	+	+
Uso del método en la industria	3	0	0	+	-
<b>Positivo (+)</b>		<b>3</b>	<b>19</b>	<b>22</b>	<b>17</b>
<b>Neutro (0)</b>		<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>
<b>Negativo (-)</b>		<b>19</b>	<b>3</b>	<b>3</b>	<b>12</b>
<b>Total de ponderación</b>		<b>-16</b>	<b>16</b>	<b>19</b>	<b>5</b>

#### 4.2.1 Análisis comparativo a través de la matriz PUGH.

Los métodos más utilizados para la extracción de aceites vegetales son: extracción por solvente, extracción por prensado, extracción por centrifugación y extracción por fluidos supercríticos. Los resultados de la evaluación a través de la matriz Pugh de los diferentes métodos se presentan gráficamente en la Figura 4.3



**Figura 4.3 Gráfico comparativo de los métodos de extracción de aceite de aguacate evaluados a través de la matriz Pugh.**

En la Figura 4.3 las barras con los valores negativos representados por el color rosado son la suma de todos los criterios con asignación negativa (-), las representadas por color amarillo son la suma de los criterios con asignación positiva (+), al sumar estos dos valores se obtiene el total representado por el color verde, llegando a la conclusión que, el método de centrifugación es que tiene mayor puntuación, tal como se mostró en la Tabla 4.1, de los cuales veintidós puntos son positivos y tres puntos negativos, haciendo una suma total de diecinueve puntos. Por lo tanto, el método de centrifugación es el método elegido para la extracción de aceite de aguacate.

## **4.2.2 Justificación de factores y alternativas.**

En este apartado se explica el por qué se han asignado las puntuaciones correspondientes a cada criterio de la matriz y la razón por la cual un método obtuvo una mejor evaluación que otro.

### **4.2.2.1 Inversión inicial.**

Los métodos de prensado se le asignó signo positivo (+) debido a que, respecto a los otros métodos es más factible económicamente, es decir, su inversión inicial es menor y el tiempo de recuperación del capital es a corto plazo. Al método de fluidos supercríticos se les asignó signo negativo (-) ya que es una tecnología cara y por ende la inversión inicial es alta y el tiempo de recuperación de capital es a largo plazo. Los métodos de solventes y centrifugado se les asignó cero (0) debido a que la inversión inicial es más alta que el método de prensado, pero menor que el de fluidos supercríticos.

### **4.2.2.2 Costo del proceso y mantenimiento.**

A los métodos por solvente y fluidos supercríticos se le asignó signo negativo (-), ya que en el método por solventes los precios de los disolventes a utilizar son altos y algunos de estos requieren permisos especiales debido a su toxicidad e inflamabilidad; en caso del método de fluidos supercríticos los costos de operación y mantenimiento son elevados. Los métodos de prensado y centrifugado se les asignó un signo positivo (+), debido a que en ambos métodos los costos de operación y mantenimiento representan costos relativamente bajos en comparación con los demás métodos.

#### **4.2.2.3 Pretratamiento de la materia prima.**

Los métodos por solventes y prensado se les asignó signo negativo (-) debido a que las etapas previas a la extracción para acondicionar la materia prima, tales como el secado de la pulpa pueden requerir de altas temperaturas y tiempos prolongados de exposición, en consecuencia, la materia prima puede perder sus propiedades obteniéndose un aceite de baja calidad, además del gasto energético que genera. El método de centrifugado se le asignó signo positivo (+), ya que para este caso el pretratamiento no requiere de altas temperaturas, ya que la extracción se puede realizar en medio acuoso a temperaturas menores o iguales a 50°C (323.15 K) con menores tiempos de exposición. Para el caso de fluidos supercríticos se le asignó un valor de cero (0) ya que también se requiere de secado, pero este se suele realizar por liofilización, proceso que permite conservar intactas las propiedades del aceite, con la desventaja que es una tecnología costosa y poco usada en la industria de aceites vegetales.

#### **4.2.2.4 Rendimiento de extracción.**

Al criterio de rendimiento de extracción se le asignó un valor de importancia de 3, puesto que es uno de los parámetros más importantes a tener en cuenta para diseñar el proceso. Al método por solventes y fluidos supercríticos se les evaluó con un signo positivo (+) ya que según la bibliografía consultada son los que tienen mayores rendimientos de extracción, seguido por el método de prensado con un valor asignado de cero (0) y por último el método con menor rendimiento de extracción es el de centrifugación con un signo negativo (-).

#### **4.2.2.5 Índice de yodo.**

El índice de yodo es una expresión del grado de insaturación de los ácidos grasos que componen un aceite. Entre mayor es el índice de yodo mejor calidad tiene el

aceite, ya que contiene altos valores de ácidos grasos insaturados. El límite máximo establecido por la norma mexicana de aceite y grasas, especificaciones de aceite de aguacate (NMX-F-052-SCFI-2008) es de 85-90 cg I<sub>2</sub>/g de aceite. Los métodos con mejores resultados de calidad respecto a este criterio son, el método de centrifugado y el método de fluidos supercríticos, los cuales tienen valores altos de índice de yodo, por tanto, se les asignó un signo positivo (+). Para el caso del método de prensado se le asignó una evaluación de cero (0) puesto que da resultados de contenido de yodo cercanos a las especificaciones. Por último, el que da resultados más bajos de índice de yodo es el método de solvente, al cual se le asignó un signo negativo (-).

#### **4.2.2.6 Índice de saponificación.**

Se puede definir como la cantidad de ácidos grasos libres y de ácidos grasos acoplados presentes en sustancias oleosas. Lo establecido en la norma mexicana de aceites y grasas para el índice de saponificación es de 177-198 mg KOH/g de aceite. Para la industria cosmética es ventajoso poseer valores altos de índice de saponificación.

Al método de prensado y fluidos supercríticos se les asignó un signo positivo (+) puesto que son los métodos que presentan valores más altos de índice de saponificación. Para el caso del método de centrifugado y método de solvente se le asignó un valor de cero (0), debido a que el aceite que se obtiene presenta bajo índice de saponificación.

#### **4.2.2.7 Índice de refracción.**

El índice de refracción es una medida de pureza, los valores deben de estar 1.458 a 1.465. Según los estudios el método de presando y centrifugado presentan los mejores índices de refracción, por lo que se les asignó un signo positivo (+). Para el

caso del método de fluidos supercríticos y solvente se les asignó un signo negativo (-) debido a que no cumple con el rango recomendado por la norma NMX-F-052-SCFI-2008.

#### **4.2.2.8 Índice de acidez.**

Entre menor es el índice de acidez, mejor es la calidad de un aceite vegetal. Los métodos que presentan un menor índice de acidez son el método de prensado y el método de fluidos supercríticos a los cuales se les asignó un signo positivo (+), seguido por el método de centrifugación con un valor asignado de cero (0), y por último el método de solvente presenta la menor calidad en relación a dicho índice, por lo que se evaluó con un signo negativo (-).

#### **4.2.2.9 Humedad.**

Refleja el contenido de agua presente en el aceite y entre menor es este parámetro, mejor es la calidad del aceite. El método de centrifugado y prensado permiten obtener aceites con bajo contenido de humedad (menores al 0.5%), por lo tanto, se les asignó un signo positivo (+).

Para el caso del método por solventes y fluidos supercríticos no se encontraron estudios, por lo tanto, se les asignó un signo negativo (-).

#### **4.2.2.10 Riesgos para la seguridad y salud ocupacional.**

Los métodos de prensado, centrifugación y fluidos supercríticos se les asignó signo positivo (+) debido a que no hay peligro notable al ejecutar el método. Mientras que el método por solventes se le asignó un signo negativo (-) debido a que los disolventes a utilizar pueden ser inflamables y tóxicos, así mismo, el método requiere de altas temperaturas y tiempos largos para la extracción, poniendo en peligro la seguridad del personal.



#### **4.2.2.11 Compatibilidad con el medio ambiente.**

Los métodos de prensado, centrifugación y fluidos supercríticos fueron evaluados con signo positivo (+), debido a que permiten implementar técnicas amigables con el medio ambiente. En el caso del prensado y centrifugado permiten la reutilización de los residuos que se generan, al no utilizar químicos para la extracción, además en el método de centrifugado se pueden aplicar técnicas como la recirculación del agua, incorporándola nuevamente al proceso con un tratamiento previo. El método de fluidos supercríticos, evaluado también con signo positivo es una tecnología denominada limpia ya que la extracción se puede realizar con dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) que es el fluido supercrítico más utilizado ya que no es tóxico, no es inflamable, no es corrosivo, es incoloro, no es costoso, se elimina fácilmente y no deja residuos químicos, permitiendo su fácil recuperación por procesos de reciclaje, teniendo un menor impacto sobre el medio ambiente. En el caso de la extracción con solvente fue evaluada con signo negativo (-) puesto que, los solventes utilizados son altamente inflamables por lo cual son muy peligrosos, además la recuperación y eliminación total del solvente también es un problema ambiental lo que requiere una planta muy sofisticada para su eliminación, además del gasto energético que es elevado al requerir tiempos largos de extracción.

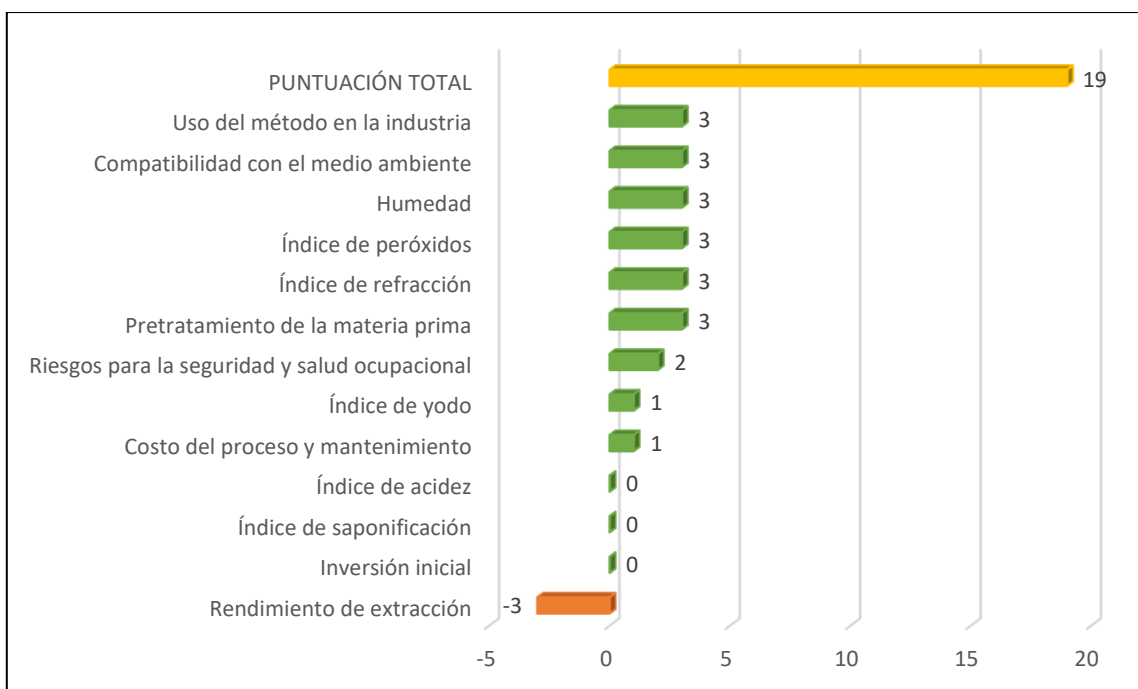
#### **4.2.2.12 Uso del método en la industria.**

A la extracción por centrifugación se les asignó signo positivo (+) debido a que es uno de los métodos más utilizados a nivel industrial, tanto en la industria de cosméticos como alimenticia, además, se cuenta con una buena cantidad de referencias bibliográficas para desarrollar el método. Al método de prensado se le asignó un 0 debido a que, si bien es la tecnología más antigua usada para extraer aceite, suele dar bajos rendimientos, los cuales en el caso del aguacate se incrementan al someter a altas temperaturas la materia prima antes de su extracción, lo que ha hecho que se opte por nuevas tecnologías que permitan la extracción a temperaturas menores

para conservar las propiedades del aceite. Al método de fluidos supercríticos se le asignó signo negativo (-), esto debido a que, a pesar de ser un método bastante investigado en una forma general, no se cuenta con estudios tan exhaustivos enfocados en la extracción de aceite de aguacate y así poder ejecutarlo en la investigación.

#### 4.2.3 Justificación de la selección del método de extracción.

En la Figura 4.4 se presenta de manera gráfica el resultado de la puntuación de cada criterio evaluado por medio de la matriz Pugh para el método de centrifugación.



**Figura 4.4 Resultados de la evaluación del método de centrifugación.**

La barra de color rosado en la Figura 4.4 representa los criterios asignados con valores negativos, de color verde los criterios con asignaciones positivas y de color rojo los criterios con asignaciones de valor nulo, así mismo, la barra de color amarillo representa la puntuación total. Se puede observar que de todos los criterios evaluados el que presenta una menor puntuación es el rendimiento de extracción, lo que

quiere decir que, el método si bien no presenta una buena eficiencia con respecto a los demás métodos, si lo es con respecto a criterios como uso del método en la industria, compatibilidad con el medio ambiente, pretratamiento de la materia prima y criterios de calidad del aceite, de estos últimos el índice de yodo es el único que presenta un resultado desfavorable, por lo tanto la puntuación global se inclinó a este método.

De acuerdo al método seleccionado se procederá a diseñar el proceso de extracción de aceite de aguacate partiendo de tres operaciones unitarias claves: pretratamiento de la materia prima antes de la extracción, centrifugación y purificación del aceite.

Como ya se mencionó en el capítulo 2, sección 2.5.3 del presente trabajo, el método de centrifugación se realiza a través de la fuerza centrípeta. La separación del agua del aceite de aguacate se realiza mediante la destrucción enzimática o mecánica de las células del tejido que contienen lípidos, seguida de la centrifugación para separar el aceite de la emulsión de aceite y agua. Los métodos de separación acuosa se dividen principalmente en separación por centrifugación asistida enzimáticamente y separación por centrifugación asistida mecánicamente.

En general la centrifugación asistida con enzimas agregadas en la etapa de batido no ha producido los aumentos significativos esperados en el rendimiento de aceite, además presenta la desventaja que las enzimas necesitan condiciones específicas de pH, temperatura y tiempo para que la extracción sea óptima. Por tanto, para este caso se optará por aplicar la centrifugación asistida mecánicamente, en la cual las células que contienen el aceite se rompen mediante fuerza mecánica y el aceite se libera mediante la fuerza centrífuga. El batido se hará a una temperatura y tiempo controlado (termobatido), el cual se da entre temperaturas menores o iguales a 50°C (323.15 K) para evitar la degradación de las propiedades del aceite (Costagli et al., 2015). Esta tecnología es más accesible, las condiciones de operación permiten un

menor gasto energético y los residuos generados son viables como subproductos para otras industrias.

### **4.3 DISEÑO DEL PROCESO DE PRODUCCIÓN SOSTENIBLE DE ACEITE DE AGUACATE.**

En este apartado se explican y analizan los aspectos del diseño del proceso tales como, las operaciones unitarias, entradas y salidas del proceso global y por cada etapa, los equipos más adecuado para el diseño propuesto, así como los balances de materia y los requerimientos energéticos. Todo ello teniendo en cuenta los criterios de sostenibilidad ambiental que contribuyen a minimizar el impacto al medio ambiente.

#### **4.3.1 Definición de los criterios de sostenibilidad a aplicar.**

Las disciplinas de sostenibilidad como, la química verde, ingeniería verde, producción más limpia, ecología industrial y cero residuos se basan en principios y objetivos que contribuyen a minimizar el impacto ambiental que se genera al medio ambiente. Sin embargo, estas disciplinas tienen principios y objetivos comunes, por ejemplo: elegir entre reutilizar, reciclar o rechazar el residuo final, cerrar ciclos de materia y energía, cero residuos, minimizar requerimientos energéticos, entre otros.

En la Tabla 4.2 se presenta los criterios comunes entre disciplinas que serán seleccionados para el diseño del proceso de producción de aceite de aguacate.

**Tabla 4.2.** Criterios comunes entre disciplinas de sostenibilidad.

<b>CRITERIO</b>	<b>DISCIPLINA</b>
Prevenir o minimizar la producción de residuos.	Química verde.
	Ingeniería verde.
	Ecología industrial.
	PML.
	Cero residuos.
Aplicar procesos que eviten el uso de sustancias tóxicas.	Química verde.
Extracción por métodos mecánicos (sin uso de solventes tóxicos).	Ingeniería verde.
	PML.
Materia prima de fuentes renovables.	
Control y prevención de la contaminación.	Ecología industrial.
	PML.
Elegir entre reutilizar, reciclar o rechazar el residuo final.	Ingeniería verde.
	Ecología industrial.
	PML.
Cerrar los ciclos de materia y energía.	Ingeniería verde.
	PML.
Diseñar productos fácilmente degradables.	Química verde.
	Cero residuos.

#### **4.3.2 Especificaciones del aguacate como materia prima.**

Los valores de los parámetros fisicoquímicos (tiempo de maduración, peso del aguacate, porcentaje de la pulpa, pH, humedad y contenido de aceite) recomendados para el aguacate antes de la extracción del aceite se muestran en la Tabla 4.3.

**Tabla 4.3** *Parámetros fisicoquímicos recomendados para el aguacate como materia prima para extraer aceite.*

PARÁMETRO	ESPECIFICACIÓN
Tiempo de maduración.	El aguacate debe ser adquirido durante la etapa de maduración, logrando completarla en un período de 8 días bajo condiciones de oscuridad y a 22 °C de temperatura. Se considerará como indicador de madurez el cambio de color de la cáscara de verde a negro-violeta, además del ablandamiento de la pulpa (cuando el aguacate ceda ligeramente a la presión de los dedos) [a]
Peso del aguacate	200 a 300 g (el peso promedio de aguacate salvadoreño es de 50 a 300 para variedad mexicana (CENTA, 2018)).
Porcentaje de pulpa	Mínima 55.7% [b]
pH	6.88 ± 0.16 [c]
Humedad	68.69 ± 1.47 [d]
Contenido de aceite en la pulpa	21.62-25% [d].

Fuente: [a] (Krumreich et al., 2018), [b] (Forero, García y Sandoval, 2010), [c] (Astudillo y Rodríguez, 2017) y [d] (Vélez et al., 2014).

#### 4.3.3 Especificaciones del aceite de aguacate como producto terminado.

Los valores de los parámetros fisicoquímicos y microbiológicos recomendados para el aceite de aguacate para uso cosmético se muestran en la Tabla 4.4 y 4.5 respectivamente.

**Tabla 4.4** Parámetros fisicoquímicos recomendados para el aceite de aguacate.

PARÁMETROS	LÍMITES PERMISIBLES (NORMA MEXICANA)
Índice de Yodo.	85-90 cg I <sub>2</sub> /g de aceite.
Índice de saponificación.	177-198 mg KOH/g de aceite.
Índice de refracción.	1.458-1.465 (nD 40°C).
Índice de acidez.	Max 1.5 (% ácido oleico).
Humedad y material volátil.	Máximo 0.5 %
Color (escala Lovibond).	Máximo 3.5

Fuente: (Norma Mexicana NMX-F-052-SCFI-2008).

**Tabla 4.5** Límites microbianos a evaluar en el aceite de aguacate.

PARÁMETRO	ESPECIFICACIÓN
<b>LÍMITES MICROBIANOS UFC/g o UFC/cm<sup>3</sup></b>	
Recuento de microorganismos aerobios, mesófilos.	$\leq 10^3$
Recuento Total de Mohos y Levaduras.	$\leq 10^2$
<b>MICROORGANISMOS</b>	
Staphylococcus aureus.	Ausente.
Escherichia coli.	Ausente.
Pseudomonas aeruginosa.	Ausente.

Fuente: (RTC, 2018).

#### 4.3.4 Diagrama global del proceso.

El proceso de manera global incluye entradas, tales como, el aguacate, agua, energía y solución de higienizante, que para este caso será una solución de hipoclorito de sodio. Para el caso de las salidas, se tiene al producto de interés que es el aceite,

también el proceso tendrá corrientes de salidas correspondientes al orujo, agua residual, semillas y cáscaras de aguacate. El diagrama global del proceso se muestra en la Figura 4.5.

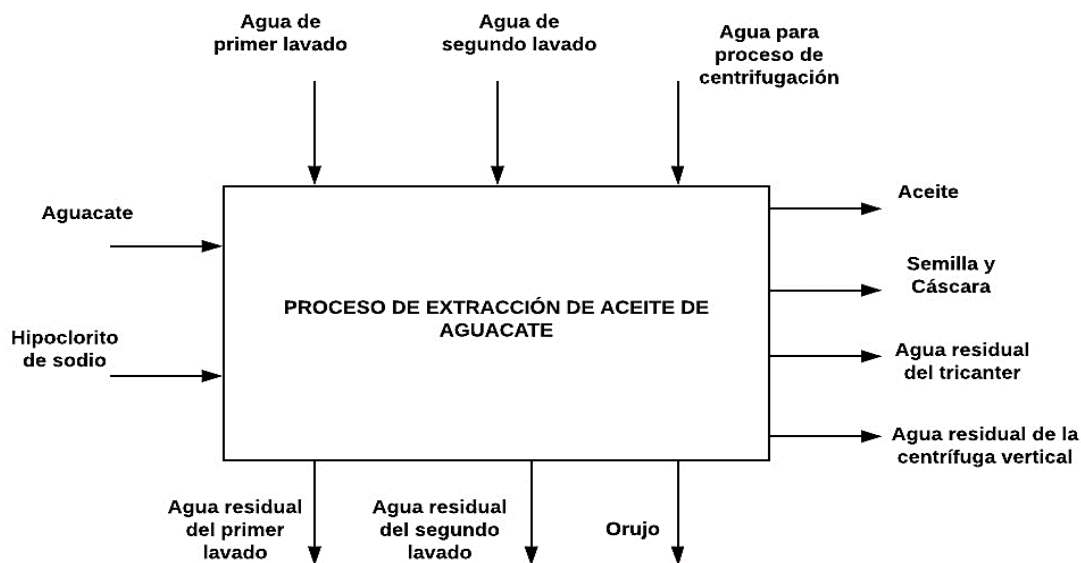


Figura 4.5 Diagrama global de proceso de extracción de aceite de aguacate.

#### 4.3.4.1 Descripción de las entradas y salidas del proceso.

##### I. Aguacate.

Es la materia prima principal a utilizar. El fruto cuando entra al proceso, se introduce de manera íntegra, es decir, con piel y hueso, debe verificarse que posea el estado de madurez adecuado para que su porcentaje de aceite sea mayor. El aguacate a través de las diferentes etapas del proceso se transforma en aceite.

##### II. Solución de hipoclorito de sodio.

El hipoclorito de sodio es utilizado en el proceso de lavado y desinfección del fruto, como agente para desinfectar el aguacate contra microorganismos presentes en la



superficie del fruto. La dosis agregada es en función del tipo de fruto a desinfectar y la cantidad de carga microbiana.

### **III. Agua del primer lavado.**

El agua del primer lavado se utiliza para quitar los restos de materia orgánica de la superficie del aguacate y desinfectarlos, agregando una solución de hipoclorito de sodio.

### **IV. Agua de segundo lavado.**

El agua de segundo lavado se utiliza para quitarle al aguacate los restos de materia orgánica que pudo haberse quedado en la superficie del aguacate después del primer lavado y también para quitar restos de hipoclorito de sodio.

### **V. Agua para la centrifugación.**

El agua es agregada para diluir la pasta y ayudar al transporte hasta el Tricanter, mejorando el proceso de extracción.

### **VI. Aceite.**

El aceite es el producto de interés en el proceso y debe cumplir con las especificaciones recomendadas tanto fisicoquímicas como microbiológicas, mostradas en la Tabla 4.4 y 4.5 respectivamente.

### **VII. Orujo.**

El orujo es una mezcla en su mayoría de sólidos y agua, con rastros de aceite, producto de la centrifugación en el Tricanter.

### **VIII. Semillas y cáscaras.**

Este residuo resulta de la etapa de despulpado donde se separan la pulpa de la cáscara y semilla. Esta parte de la fruta no puede ser utilizada para la elaboración

de aceite, sin embargo, como es materia orgánica con propiedades importantes que le dan un valor agregado puede ser utilizado en otra industria.

#### **IX. Agua residual del primer lavado.**

El agua residual del primer lavado contiene restos de materia orgánica e hipoclorito de sodio, esta agua puede ser recirculada nuevamente al proceso de lavado con un tratamiento previo.

#### **X. Agua residual del segundo lavado.**

Esta agua sale con algunos rastros de materia orgánica e hipoclorito de sodio. Para reducir el consumo de agua, también en esta etapa de lavado el agua puede ser recirculada.

#### **XI. Agua residual de la centrifugación.**

Esta agua corresponde a la fase acuosa producto de la separación en el Tricanter. Mayormente contiene agua, restos de sólidos y un mínimo porcentaje de aceite.

#### **XII. Agua residual de la purificación.**

Esta agua es producto de la purificación de la fase oleosa que sale del Tricanter, la cual tiene restos de agua que es eliminada en una centrifuga vertical, generando una corriente de agua con un mínimo contenido de aceite.

#### **4.3.5 Diagrama de bloques del proceso.**

Según el método de extracción seleccionado (centrifugación), el proceso constará de una etapa de recepción y selección de materia prima, lavado y desinfección del fruto, despulpado, termobatido como pretratamiento, centrifugación y, por último, el aceite extraído pasará a través de una centrifugación vertical como etapa de purificación, para eliminar el agua remanente, finalizando con el envasado y almacenamiento del aceite. El diagrama de bloques del proceso se muestra en la Figura 4.6.

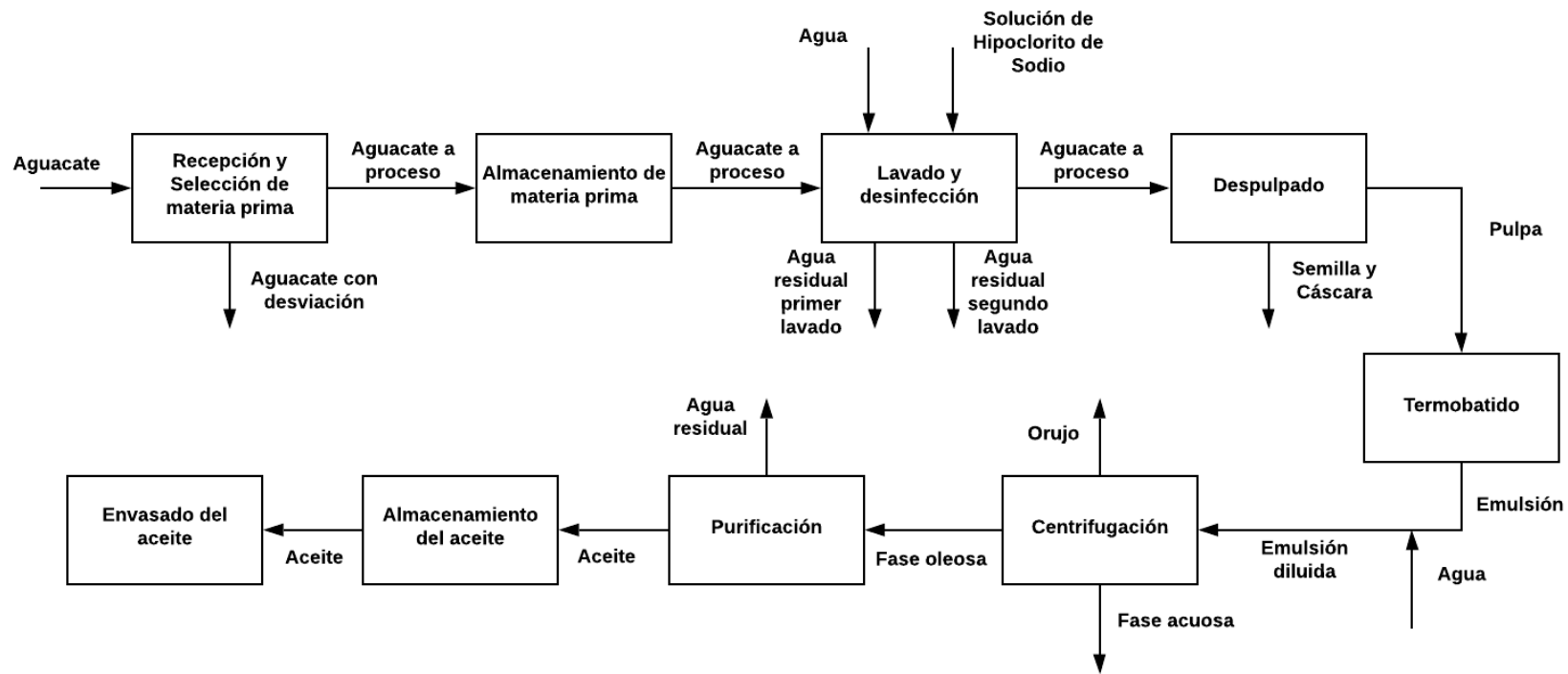


Figura 4.6 Diagrama de bloques del proceso de extracción de aceite de aguacate.

A continuación, se presenta la descripción de cada una de las etapas del proceso de producción de aceite de aguacate.

#### **4.3.5.1 Recepción y selección de materia prima.**

La recepción de la materia prima es la primera etapa en la elaboración del aceite, en este paso se recibirá el aguacate procurando ser obtenido de fuentes cercanas donde se cultiva el fruto. El aguacate recibido, así como el seleccionado al momento de extraer el aceite tiene que cumplir con características como: estado de madurez adecuado, sin daños muy severos que puedan afectar la calidad del aceite y además sin ningún tipo de plaga.

#### **4.3.5.2 Almacenamiento de materia prima.**

El lugar de almacenamiento del aguacate debe cumplir las siguientes características:

- a) El área destinada a la descarga, debe estar techada, para evitar la entrada de lluvia, la exposición prolongada del sol y la contaminación cruzada.
- b) No debe depositarse la materia prima en el suelo, si no en recipientes que ayude a la conservación del fruto.
- c) El aguacate debe ser almacenado en un lugar fresco y cerrado, procurando que los recipientes que los contienen estén a una distancia correcta del suelo y las paredes, evitando la humedad, hasta lograr un estado de madurez adecuado para la extracción.

#### **4.3.5.3 Lavado y desinfección.**

La limpieza y desinfección son operaciones dirigidas a combatir la proliferación y actividades de los microorganismos que pueden contaminar la materia prima y causar el deterioro del mismo. El proceso en general se lleva a cabo en las siguientes etapas:

- I. Limpieza manual de los residuos grandes que se encuentra en la superficie.
- II. Lavado con agua, para eliminar impurezas y tierra remanente.
- III. Lavado con una solución de hipoclorito de sodio, para despegar la capa de bacterias e impurezas que no se eliminaron con el agua.

Usualmente en el proceso de lavado y desinfección se suele utilizar grandes cantidades de agua y dosis inadecuadas de hipoclorito de sodio, teniendo impactos negativos sobre el medio ambiente, por lo que es de suma importancia optimizar este proceso. Es difícil evitar el uso de hipoclorito de sodio puesto que los estudios que se encuentran de alternativas de desinfectantes no están completos ni probados a nivel industrial, por ello la alternativa que se tiene es en la medida de lo posible utilizar dosis adecuadas de hipoclorito y que el sistema de lavado permita utilizar agua regenerada (Gil, López-Gálvez, Tudela y Allende, 2019).

#### **4.3.5.4 Despulpado.**

El despulpado es un proceso que permite extraer la pulpa tanto de frutas y vegetales como de hortalizas. Para el caso del aguacate al ser sometido a esta operación, se logra separar la pulpa de la semilla y cáscara. Presenta la ventaja de cero pérdidas del fruto al momento de despulpar, no necesita agua y la pulpa que es obtenida del proceso, sale con consistencia homogénea, con lo que elimina o reduce el tiempo en la etapa de molienda dada la consistencia fina de la pasta.

#### **4.3.5.5 Termobatido.**

El termobatido es un proceso mecánico en donde la extracción se realiza a través de extracción acuosa que es un proceso utilizado para recuperar el aceite de los recursos vegetales. La separación de agua del aceite de aguacate se realiza mediante la destrucción mecánica de las células del tejido que contienen lípidos, dado que el aceite de aguacate viene en una emulsión finamente dispersa dentro de las

células de la pulpa del fruto, el proceso de extracción requiere romper no sólo las paredes celulares, sino también la estructura de la emulsión.

Según Costagli et al., (2015), se puede obtener una pasta sin aceite y un buen rendimiento aprovechando la acción mecánica. Al batir la pulpa, pequeñas gotas de aceite se funden en gotas grandes (fenómenos de coalescencia), facilitando el proceso de extracción. En el caso del puré de aguacate, se recomienda que el tiempo de batido no exceda los 90 minutos y la temperatura sea inferior a 50 °C (323.15 K).

#### **4.3.5.6 Centrifugación.**

Es una etapa donde gracias a la fuerza centrífuga se puede lograr que las partículas de un fluido se sedimenten a una velocidad determinada y que líquidos de diferentes densidades se separen con el propósito de incrementar la tasa de sedimentación, la fuerza de gravedad debe ser sustituida por una fuerza de mayor potencia como la fuerza centrífuga. Cuando la diferencia de densidades de los líquidos es muy pequeña, como sucede en el caso de estudio, la fuerza de la gravedad es muy débil para separar los líquidos en un tiempo razonable. La separación se debe llevar a cabo bajo los principios de la fuerza centrífuga.

Para este caso se debe tener en cuenta las características del líquido que se va a manejar. La pasta de aguacate es considerada desde el punto de vista fisicoquímico como un sistema bastante complejo. Sin embargo, sus características pueden asemejarse a las de una emulsión compuesta de aceite, agua y una gran cantidad de sólidos en suspensión (Fawcett, 2004).

#### **4.3.5.7 Purificación.**

Una vez la fase oleosa proveniente de la centrifugación es recuperada, inmediatamente se somete a un proceso de purificación, a determinadas condiciones de operación, todo esto para recuperar el aceite y separar la fase acuosa. El aceite que

fluye de la etapa de centrifugado todavía tiene una cierta cantidad de agua y trazas de sólidos, este se envía a una centrifugadora vertical para eliminar el agua residual y los sólidos que aún están contenidos en él (Fawcett, 2004).

#### **4.3.5.8 Almacenamiento y envasado.**

Tiene una función muy importante la cual es proteger y conservar las propiedades del aceite, teniendo también en cuenta todos los factores que puedan generar una oxidación o enranciamiento del mismo. Estos factores pueden ser: luz, temperatura, metal, ventilación, entre otros (Gutarra et al., 2018).

#### **4.3.6 Diagrama de flujo del proceso de extracción de aceite de aguacate.**

Para llevar a cabo el desarrollo del diagrama de flujo del proceso de extracción de aceite de aguacate se define los parámetros que controlan el proceso, esto se realiza a través del análisis de cada operación unitaria, además de caracterizar cada una de las corrientes.

##### **4.3.6.1 Definición de parámetros de control.**

Los parámetros de control permiten que un proceso pueda funcionar de manera adecuada y constante en todo el tiempo de operación. Cada operación unitaria está ligada a una serie de parámetros que se tendrán que monitorear para garantizar que el proceso de extracción de aceite de aguacate y por ende su calidad no varíe. A continuación, se describen cada uno de ellos.

##### **I. Recepción y selección de materia prima.**

Los parámetros a monitorear en la etapa de recepción y selección de materia prima se muestran en la Tabla 4.6.

**Tabla 4.6** *Parámetros de control en la etapa de recepción y selección de materia prima.*

PARÁMETROS	DESCRIPCIÓN
<b>RECEPCIÓN Y SELECCIÓN</b>	
Estado de madurez	Con un contenido de aceite de 10.6% aprox. al momento de la cosecha.
Aspecto físico	Sin abolladuras, picaduras o plagas

Fuente: (Cerdas et al., 2014).

## II. Almacenamiento de la materia prima.

Para garantizar un aceite de calidad, el control de la materia prima es de suma importancia, condiciones tales como la temperatura y la humedad relativa evitarán, en cierta medida, pérdidas de peso por las deshidrataciones que suele suceder cuando los frutos son sometidos a temperaturas superiores de maduración o a almacenamiento en frío muy prolongados (Rodríguez, Grisales y Escobar, 2019). Los parámetros que se deben controlar según Cerdas, Calderón y Somarribas (2014) en el almacenamiento del aguacate se muestran la Tabla 4.7.

**Tabla 4.7** *Parámetros de control en la etapa de almacenamiento de materia prima.*

PARÁMETROS	DESCRIPCIÓN
Temperatura	22°C (295.15 K)
Humedad relativa	80%
Tiempo de maduración	8 días
Aspecto físico al final del tiempo de maduración	Coloración morada oscuro, con un evidente ablandamiento de la pulpa

Fuente: (Cerdas et al., 2014).

Cabe mencionar que los parámetros pueden variar según el lugar de cosecha del aguacate y la variedad. Para este caso, los parámetros están basados en la variedad Hass, cultivado a 1750 msnm (Cerdas et al., 2014).



Según Woolf et al., 2009 la fruta debe almacenarse durante no más de 3 semanas después de la cosecha, antes de la extracción del aceite, este tiempo considerando que la temperatura de almacenamiento debe ser de 5 a 7°C (278 a 280 K), por lo tanto, si se requiere almacenar por más tiempo el aguacate se tendrá que considerar disminuir la temperatura de almacenamiento.

Con el fin de evaluar la calidad del aguacate, se deben observar ciertos parámetros. Primero, al ser rebanado en cuartos, la cáscara debe desprenderse con la yema de los dedos sin ningún esfuerzo. Esto indica una maduración homogénea y una posible ausencia de enfermedades en la superficie de la pulpa. Segundo, al tener el fruto abierto deben observarse superficies aceitosas y no tan acuosas, así como tonalidades verdes y amarillas en la pulpa (y no verdes muy claros o blancos, que evidencian un aguacate con poco contenido de sólidos y un índice bajo de madurez, lo que implica una percepción al gusto de insipidez, astringencia y poca cremosidad). Finalmente, las texturas fundentes y las ausencias de daños o pudriciones juegan un papel muy importante en la calidad del aguacate es por esto que se deben realizar procesos de almacenamiento idóneos, para poder tener aguacates de buena calidad (Rodríguez et al., 2019).

## **II. Lavado y desinfección.**

El principal objetivo del lavado y desinfección es eliminar los restos de suciedad y carga microbiana presente en la superficie del fruto. El lavado y desinfección tienen importantes implicaciones tanto económicas como medioambientales, principalmente por los grandes volúmenes de agua que es necesario utilizar para asegurar que la calidad de agua de lavado sea adecuada tanto al principio como al final del proceso de lavado. El reto para hacer que este proceso sea sostenible es reducir el consumo de agua y caudales de vertidos, lo cual depende de la tecnología de desinfección utilizada, que permita desinfectar tanto el agua de proceso como la superficie del fruto, reduciendo el vertido de agua y disminuyendo el impacto ambiental.

La calidad del agua de lavado se deteriora por el aumento de la carga orgánica, procedentes de los restos de tierra, hojas, así como microorganismos presentes en la superficie del fruto. Por tanto, es importante monitorear la carga orgánica presentes en el agua, lo que sería un indicativo para renovar el agua de lavado y evitar la contaminación cruzada (Gil et al., 2019).

Sin embargo, las enormes cantidades de agua que se consumen usando ese sistema hacen que tenga un gran impacto desde el punto de vista de la sostenibilidad medioambiental (consumo de recursos y generación de vertidos) y desde el punto de vista económico para la empresa. La alternativa a esta opción es el uso de tratamientos de desinfección del agua (filtración, coagulación-floculación) que permitan la regeneración del agua de lavado en un sistema en paralelo para después volver a reutilizarla en la zona de lavado. Esta agua puede utilizarse en duchas, o por inmersión en tanques de lavado cruzada (Gil et al., 2019).

Para hacer sostenible el proceso de lavado y desinfección, se debe optimizar la cantidad de hipoclorito de sodio, de modo que el agua de lavado tenga la cantidad necesaria de cloro residual y así evitar la contaminación cruzada. Es importante establecer el tiempo de lavado y el pH en la que la acción desinfectante se optimice.

El proceso de lavado y desinfección se hará en tres etapas:

**Etapas I.** Los aguacates son transportados a través de bandas, donde serán limpiados manualmente para eliminar parte de la materia orgánica presente en la superficie, esto para reducir el tiempo de lavado y la cantidad de desinfectante utilizado.

**Etapas II.** Esta etapa el lavado es por aspersion, los aguacates son transportados a través de rodillos y lavados por chorros de agua con higienizante para eliminar la carga microbiana. En la Tabla 4.8 se muestran los parámetros y los valores aproximados que se deben considerar en el proceso de desinfección usando hipoclorito de sodio como higienizante (Organismo Internacional Regional de Sanidad Agropecuaria [OIRSA], 2020).

**Tabla 4.8** Parámetros de operación en el proceso de lavado y desinfección del aguacate.

PARÁMETROS	DESCRIPCIÓN
Concentración de hipoclorito de sodio.	100 ppm.
Temperatura.	25 - 27°C (298.15 - 300.15 K).
Tiempo.	5 minutos.

Fuente: (OIRSA, 2020).

**Etapa III.** Los aguacates luego de ser desinfectados, son lavados con chorros de agua limpia para eliminar los restos de desinfectante, esto se hace en la misma línea de lavado por aspersión.

### **III. Despulpado.**

El despulpado es el proceso que permite extraer la pulpa del resto del fruto, este proceso genera gran cantidad de desechos orgánicos en forma sólida (cáscara y semilla del fruto) (Castro y Tirira, 2014).

El proceso de despulpado es un proceso físico, es decir, que las características biológicas y químicas del fruto no han tenido ninguna degradación, por lo tanto, sus propiedades siguen intactas. Debido a esto, los residuos sólidos generados pueden utilizarse como abono orgánico (lombricultura, compost), siendo una medida de sostenibilidad industrial (Castro et al., 2014).

La tecnología en este proceso es muy importante puesto que se puede lograr reducir el tamaño del fruto y en el caso del aguacate, la pulpa sale del proceso con consistencia homogénea, lo que puede evitar el proceso de molienda o bien reducir el tiempo de este.

El proceso físico de despulpado depende de cada equipo, pero generalmente el proceso inicia con la alimentación automática, que se realiza por medio de una banda transportadora donde la descarga esta direccionada hacia la tolva de entrada a la despulpadora. Este proceso es continuo y rápido, lo cual ahorra tiempo.

Una vez en la tolva la fruta es sometida a la acción de golpeo y raspado por medio de paletas y la acción de la fuerza centrífuga formada por el giro de unas paletas. La fuerza centrífuga hace que la fruta se desintegre y sea lanzada contra un tamiz, pasando la pulpa por un cilindro con perforaciones. Los otros componentes que no pueden atravesar el tamiz, tales como semillas y cáscaras, siguen a través del cilindro y salen por un extremo (Castro et al., 2014).

Las condiciones de operación del proceso de despulpado del aguacate se muestran en la Tabla 4.9.

**Tabla 4.9** *Parámetros de operación en el proceso de despulpado del aguacate.*

PARÁMETROS	DESCRIPCIÓN
Tiempo.	Rango de 2-3 minutos. Este parámetro varía dependiendo del tamaño del fruto.
Temperatura.	25 - 27°C (298.15 - 300.15 K).

Fuente: (Castro et al., 2014).

#### **IV. Termobatido.**

En el proceso de termobatido el puré de aguacate se bombea a la sección equipada con batidoras, aquí se agita la maceración lenta y continuamente a una temperatura controlada. El efecto de la amasadora sobre la pasta de aguacate es romper las células que contienen el aceite, que pueden separarse fácilmente con la centrifugación.

En el termobatido los parámetros importantes a controlar son la temperatura y tiempo de batido. Estos parámetros (véase Tabla 4.10) son fundamentales porque garantizan que las propiedades del aceite no se vean afectadas.

**Tabla 4.10** *Parámetros en el proceso de batido de la pasta de aguacate.*

<b>PARÁMETROS</b>	<b>DESCRIPCIÓN</b>
Tiempo	120 minutos.
Temperatura	50 °C (323.15 K).

Fuente: (Alarcón, Castañeda, Manzano, Ramírez & Tapia, 2018).

En sistemas continuos, las batidoras suelen tener disposición horizontal con varios cuerpos de acero inoxidable. Incorporan un sistema de calefacción usando agua caliente como fluido caloportador, el cual circula a través de una camisa que rodea cada uno de los cuerpos.

## **V. Centrifugación.**

La separación del aceite de la fase sólida y líquida se realiza mediante una centrífuga decantadora horizontal. Este dispositivo explota la aceleración centrípeta para separar continuamente una mezcla de partículas sólidas y líquidas con fases que tienen diferentes densidades. Alfa Laval descubrió que la mejor centrífuga decantadora horizontal aplicable a la extracción de aceite de aguacate es la versión de tres salidas. En esta máquina, la emulsión de pulpa se alimenta junto con aproximadamente un 10 - 20% de agua caliente (a la misma temperatura que el termobatido). El puré dentro de la centrífuga se separa en aceite, agua de vegetación y sólidos (pulpa agotada y residuos de piel), (Costagli et al., 2015).

En la etapa de centrifugación se utiliza un Tricanter, el cual permite la separación de mezclas de tres fases, es decir, la separación simultánea de dos fases líquidas no miscibles con diferentes densidades y una fase sólida la cual es la más pesada de todas las fases. A menudo el agua es añadida durante el bombeo, ya que la pasta puede ser muy viscosa (Flottweg, 2014).

En la Tabla 4.11 se presentan los parámetros de operación para la etapa de centrifugación.

**Tabla 4.11** *Parámetros de operación en la etapa de centrifugación de la pasta de aguacate.*

<b>PARÁMETROS</b>	<b>DESCRIPCIÓN</b>
Velocidad.	3,000 – 4,000 rpm.
Relación Agua-Pulpa.	1 – 3
Tiempo.	10 minutos.
Temperatura.	40 - 50 °C (313.15 - 3232.15 K).

Fuente: (Woolf et al., 2009).

## **VI. Purificación.**

El aceite procedente de la etapa de separación (centrifugación) es purificado mediante una centrífuga vertical lo que constituye ser la última etapa de extracción del proceso.

La centrífuga vertical separa el aceite de los sólidos residuales y del agua utilizando una fuerza centrífuga mucho más elevada que en la etapa de separación, para conseguir aceite de aguacate de alta calidad (Flottweg, 2014).

En la Tabla 4.12 se muestran los parámetros de operación para la etapa descrita

**Tabla 4.12** *Parámetros de operación en la etapa de purificación del aceite de aguacate.*

<b>PARÁMETROS</b>	<b>DESCRIPCIÓN</b>
Velocidad.	3,500 rpm.
Tiempo.	10 minutos.
Temperatura.	40 - 60 °C (313.15 - 333.15 K).

Fuente: (Condori, 2016).

## VII. Envasado y almacenado.

El almacenamiento del aceite es esencial para evitar su oxidación y mantener su calidad; se deben evitar tres factores fundamentales: la luz, el aire y las altas temperaturas. Por lo tanto, las instalaciones del lugar deben estar construidas con aislantes térmicos que permitan reducir las diferencias de temperatura en diferentes épocas del año y evitar la presencia de oxígeno y luz en el recinto.

El equipo recomendado que se debe utilizar para almacenar y reposar el aceite son tanques sellados construidos con acero inoxidable, recubiertos en el exterior con una capa de nitrógeno, esto se hace para evitar que se descomponga debido a la exposición de la luz, la alta temperatura o al oxígeno.

Ya que el aceite de aguacate tiene un punto de fusión entre 22 - 24°C (295.15 - 297.15 K), se puede almacenar a temperatura ambiente ya que está en su forma líquida (Yepes, Sánchez y Márquez, 2017).

Las condiciones de almacenamiento del aceite de aguacate se presentan en la Tabla 4.13.

**Tabla 4.13** Condiciones de almacenamiento para el aceite de aguacate.

PARÁMETROS	DESCRIPCIÓN
Temperatura.	25°C (298.15 K).
Tiempo de reposo.	14 días.

Fuente: (González, Palancar, Pérez y Vergara, s.f)

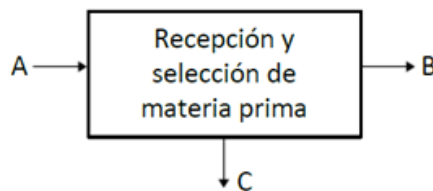
En el envasado del aceite se recomienda embotellarlo en recipientes opacos, color ámbar, ya sea de vidrio o de plástico, ya que esta clase de recipientes (color ámbar) protegen de la luz solar y no permiten el paso de determinadas longitudes de onda del espectro visible, por lo cual no pueden dañar las propiedades del aceite evitando que este se oxide.

#### 4.3.6.2 Balances de masa de cada operación unitaria.

A continuación, se realizan los balances de masa de cada operación unitaria, basado en datos experimentales de investigaciones anteriores y a una producción estimada de 1000 kg/h de aguacate, además se describen las condiciones de entrada y salida de cada operación unitaria, caracterizando las composiciones de cada una de ellas.

##### I. Recepción y selección de la materia prima.

En la Figura 4.7 se muestra el diagrama de bloques de entradas y salidas en el proceso de recepción y selección de materia prima.



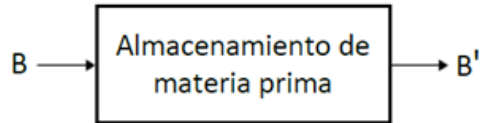
**Figura 4.7 Entradas y salidas en el proceso de recepción y selección de materia prima.**

El aguacate que entra en la corriente A se encuentra en estado de madurez de cosecha, debe ser evaluado por el personal de control de calidad para garantizar que se cumplan las características y se encuentre en buen estado físico. La corriente C representa los aguacates que no cumplen con las especificaciones de calidad para ser utilizado en la extracción de aceite, mientras que la corriente B representa los aguacates aptos para el proceso de producción, ya que estos cumplen con los parámetros de calidad anteriormente descritos.



## II. Almacenamiento de la materia prima.

En la Figura 4.8 se presenta el diagrama de bloques de entradas y salidas en el proceso de almacenamiento de materia prima.

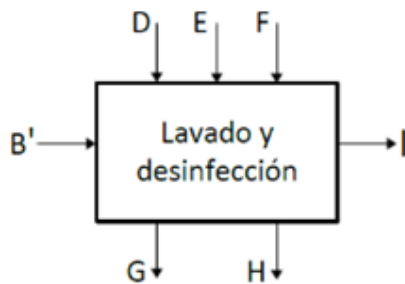


**Figura 4.8 Entradas y salidas en el proceso de almacenamiento de materia prima.**

El aguacate que entra en la corriente B se encuentra en estado de madurez de cosecha, debe ser almacenado hasta que su estado de maduración sea adecuado para el proceso de extracción. La corriente B' representa los aguacates que han alcanzado una madurez óptima y están listos para ser utilizados en el proceso de extracción de aceite.

## III. Lavado y desinfección.

En la Figura 4.9 se muestra el diagrama de bloques de entradas y salidas del aguacate al proceso de lavado y desinfección. Cada corriente se caracteriza en la Tabla 4.14.



**Figura 4.9 Entradas y salidas en el proceso de lavado y desinfección del aguacate.**

En el proceso de lavado los aguacates que entran al proceso (corriente B') se encuentran sucios y con posible presencia de microorganismos, al ser sometidos al

proceso de lavado salen de este (corriente I), libre de materia orgánica y microorganismos.

En la corriente D se introduce el agua que será utilizada en el primer lavado, que para este caso será de 150 L (0.15 m<sup>3</sup>). Para los cuales se necesitará 14.96 gramos de hipoclorito de sodio (corriente E). En la corriente G sale el agua residual del primer lavado, la cual contiene hipoclorito de sodio y materia orgánica. La corriente H es casi agua en su totalidad, con restos mínimos de hipoclorito de sodio y materia orgánica. Los cálculos de la cantidad de hipoclorito de sodio se presentan en el Anexo B.

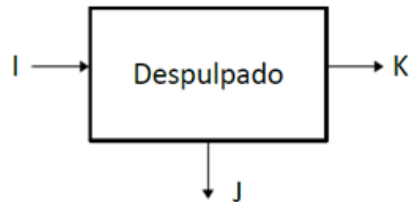
En la Tabla 4.14 se presenta la descripción de la etapa de lavado y desinfección.

**Tabla 4.14** Descripción de entradas y salidas en el proceso de lavado y desinfección del aguacate.

CORRIENTE	CARACTERIZACIÓN
B'	1000 kg/h de aguacate sucio entran al proceso de lavado a temperatura ambiente.
D	Entran 150 L (0.15 m <sup>3</sup> ) de agua para el primer lavado.
E	Hipoclorito de sodio a 100 ppm. 14.96 g de hipoclorito de sodio para 150 L (0.15 m <sup>3</sup> ) de agua.
F	Entran 150 L (0.15 m <sup>3</sup> ) de agua para el segundo lavado.
G	Agua residual con hipoclorito y materia orgánica.
H	Agua, con restos mínimos de hipoclorito de sodio y materia orgánica.
I	1000 kg/h de aguacate limpio.

## II. Despulpado.

En la Figura 4.10 se muestra el diagrama de bloques de entradas y salidas del proceso de despulpado del aguacate. Cada corriente se caracteriza en la Tabla 4.15.



**Figura 4.10 Entradas y salidas en el proceso de despulpado.**

El proceso de despulpado comprende una entrada y dos salidas. En la corriente I entran 1000 kg/h, los cuales son despulpados. El 90% de la piel y 100% de la semilla se recuperan en la corriente J (Costagli et al., 2015), saliendo en la corriente K el 100% de pulpa húmeda que entró al proceso, más la piel que no se fue en la corriente J. En la Ecuación 4.1 se muestra el balance general de la operación unitaria y el desarrollo del balance de masa se muestra en el Anexo B.

$$m^o_I = m^o_J + m^o_K$$

**Ecuación 4.1**

Siendo:

$m^o_I$  : Flujo másico de aguacates en la corriente I.

$m^o_J$  : Flujo másico de sólidos (cáscara+ semilla) en la corriente J.

$m^o_K$  : Flujo másico de pulpa húmeda más piel en la corriente K.

**Tabla 4.15** Caracterización de entradas y salidas en el proceso del despulpado del aguacate.

CORRIENTE	CARACTERIZACIÓN
I	Entra un flujo de 1000 kg/h de aguacate a temperatura ambiente, de los cuales: La pulpa humedad representa 68% del aguacate, la semilla el 18% y la de piel el 14% (Wong et al., 2011).
J	En esta corriente sale la semilla y piel del aguacate a temperatura ambiente. $m^o_J = 306$ kg/h que son residuos orgánicos, de los cuales, el 58.82% es semilla y el 41.18% es piel.
K	En esta corriente sale la pulpa del aguacate a temperatura ambiente, con un flujo másico ( $m^o_K$ ) de 694 kg/h de pulpa húmeda mas piel, de los cuales la pulpa representa el 97.98% y la piel el 2.02%.

### III. Termobatido.

En la Figura 4.11 se muestra el diagrama de bloques de entradas y salidas del aguacate al proceso de batido. Cada corriente se describe en la Tabla 4.16.



**Figura 4.11** Entradas y salidas en el proceso de termobatido.

En el proceso de termobatido el flujo másico ( $m^o_K$ ) y las composiciones de la corriente K se mantiene a la salida del proceso (corriente L), con la diferencia que

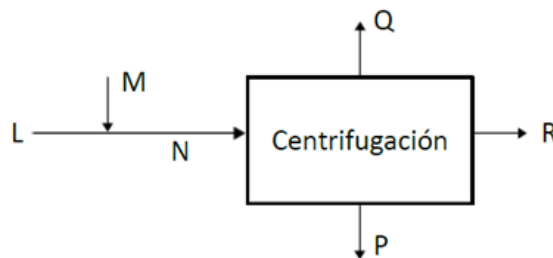
salen a una temperatura de 50°C (323.15 K). El balance de masa se desarrolla en el Anexo B.

**Tabla 4.16** Caracterización de entradas y salidas en el proceso de termobatido de la pasta de aguacate.

CORRIENTE	CARACTERIZACIÓN
K	680 kg/h de pulpa más 14 kg/h de piel ya triturada entra al proceso de termobatido en forma de pasta. La pulpa contiene 67.30% de humedad y un 24.50% en peso de aceite (véase Tabla 4.3). Esta corriente entra al proceso a temperatura ambiente.
L	La pulpa macerada sale del proceso de termobatido en donde se han formado gotas de aceite, que después serán separadas por centrifugación. La composición de aceite, agua y sólidos es la misma que a la entrada, pero a una temperatura de 50°C (323.15 K).

## V. Centrifugado.

En la Figura 4.12 se presenta el diagrama de las entradas y salidas en la etapa de centrifugación.



**Figura 4.12** Entradas y salidas en el proceso de centrifugación.

En el proceso de centrifugación se le agrega agua (corriente M) a la emulsión (corriente L) en una relación de 1 - 3, respectivamente. El agua que entra a una temperatura de 50°C (323.15 K), se mezcla con la emulsión para darle mayor fluidez al momento de ser transportada y ayudar en el proceso de centrifugación. La corriente N que entra al Tricanter contiene la misma cantidad de aceite y sólidos y una mayor cantidad de agua con respecto a la corriente L. El balance general en el punto de mezcla se presenta en la Ecuación 4.2.

$$m^{\circ}_N = m^{\circ}_L + m^{\circ}_M$$

**Ecuación 4.2**

$m^{\circ}_L$  : Flujo másico de la emulsión en corriente L.

$m^{\circ}_M$  : Flujo másico del agua entrando en la corriente M.

$m^{\circ}_N$  : Flujo másico de la emulsión diluida en la corriente N.

La emulsión diluida (corriente N) entra al Tricanter y se separa en una fase oleosa rica en aceite (corriente R), una fase acuosa (corriente Q) y una fase llamada Orujo (corriente P), que contiene en su mayoría humedad y sólidos y una menor cantidad de aceite. Dammak et al., (2015) realizó el procesamiento de frutos de oliva para extraer aceite, mediante un sistema de tres fases (Tricanter), el rendimiento de separación indicó que en la corriente Q (fase acuosa) se separa el 24.5% de aceite, un 41.76% de agua y un 32.61% de sólidos en relación a lo que entra al Tricanter. En la corriente P (Orujo) se separa el 8.9% de aceite, el 57.178% de agua y el 66.38% de sólidos que entran al Tricanter y en la corriente R (fase oleosa), se recupera 66.6 % de aceite, 1.061% de agua y el 1.0055% de sólidos que entran en N.

Tomando como referencia la eficiencia del Tricanter para la extracción de aceite de oliva, se procederá a hacer el balance de masa para la extracción de aceite de aguacate. El balance general en el Tricanter se muestra en la Ecuación 4.3.

$$m^{\circ}_N = m^{\circ}_L + m^{\circ}_P + m^{\circ}_R$$

**Ecuación 4.3**

$m^{\circ}_N$ : Flujo másico de la emulsión diluida en corriente N.

$m^{\circ}_L$  : Flujo másico de la fase acuosa en corriente L.

$m^{\circ}_P$  : Flujo másico de orujo en corriente P.

$m^{\circ}_R$  : Flujo másico de la fase oleosa en corriente R

En la Tabla 4.17 se muestra la caracterización de cada corriente y el desarrollo del balance de masa se muestra en el anexo B.

**Tabla 4.17** Caracterización de entradas y salidas en el proceso de centrifugación de la pasta de aguacate.

CORRIENTE	DESCRIPCIÓN
L	El $m^{\circ}_L = 694$ kg/h, de los cuales el agua representa el 67.3%, el aceite el 24.45% y un 8.2% de sólidos.
M	Un flujo de 231.33 kg/h de agua ( $m^{\circ}_M$ ) a 50°C es agregada al proceso.
N	La emulsión diluida entra a una temperatura de 50 °C (323.15 K) al Tricanter. El $m^{\circ}_N = 925.33$ kg/h, con $X_{\text{aceite (N)}} = 0.1837$ , $X_{\text{agua (N)}} = 0.7548$ y $X_{\text{sólidos (N)}} = 0.0615$ .
Q	La corriente Q corresponde a la fase acuosa, con un flujo másico ( $m^{\circ}_Q$ ) de 351.87 kg/h, con $X_{\text{aceite (Q)}} = 0.1184$ , $X_{\text{agua (Q)}} = 0.8289$ y $X_{\text{sólidos (Q)}} = 0.0527$ .

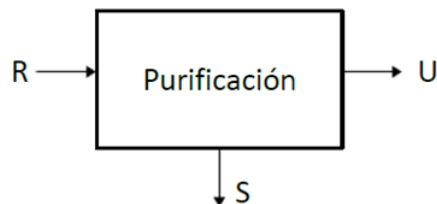
Continúa...

**Tabla 4.17** Caracterización de entradas y salidas en el proceso de centrifugación de la pasta de aguacate (Continuación).

CORRIENTE	DESCRIPCIÓN
P	Esta corriente contiene el orujo de aguacate con un flujo másico ( $m^o_Q$ ) de 452.25 kg/h, $X_{aceite(P)} = 0.0335$ , $X_{agua(P)} = 0.8830$ y $X_{solidos(P)} = 0.0835$ .
R	Esta corriente contiene la fase oleosa con un flujo másico ( $m^o_R$ ) de 121.20 kg/h, con $X_{aceite(R)} = 0.9341$ , $X_{agua(Q)} = 0.0611$ y $X_{solidos(P)} = 0.0047$ .

## VI. Purificación.

En la Figura 4.13 se presenta el diagrama de las entradas y salidas en la etapa de purificación del aceite.



**Figura 4.13** Entradas y salidas en el proceso de purificación del aceite.

La purificación se realiza para eliminar de la fase oleosa (corriente R) la humedad y los restos de sólidos. El agua residual (corriente S), es casi en su totalidad agua y sólidos, con un menor porcentaje de aceite, que, según Woolf et al. (2009) debe ser idealmente menor al 5% del aceite que entra para ser purificado. También el aceite que sale de la centrifuga vertical (corriente U) debe contener menos del 0.1% de agua, recuperándose el 98% del aceite que entra al proceso de purificación.



En base a estos datos se tomó una pérdida de aceite en el agua residual (corriente S) del 2% y un porcentaje de agua en la corriente de aceite purificado (corriente U) del 1% respecto a la que entra (corriente R).

La Ecuación 4.4 muestra el balance general en el proceso de purificación.

$$m^{\circ}_R = m^{\circ}_S + m^{\circ}_U$$

**Ecuación 4.4**

$m^{\circ}_R$ : Flujo másico de la fase oleosa en corriente R.

$m^{\circ}_S$ : Flujo másico de agua residual en corriente S.

$m^{\circ}_U$ : Flujo másico de aceite purificado en corriente U.

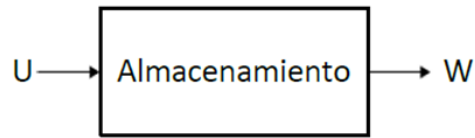
La caracterización de cada corriente se muestra en la Tabla 4.18. El balance de masa se desarrolla en el Anexo B.

**Tabla 4.18** Caracterización de entradas y salidas en el proceso de purificación del aceite.

CORRIENTE	DESCRIPCIÓN
R	121.20 kg/h de fase oleosa sale del Tricanter y entra a la centrífuga a una temperatura de 50 °C (323.15 K).
S	El flujo másico de agua residual ( $m^{\circ}_S$ ) es 10.17 kg/h, con $X_{\text{agua}(S)} = 0.7212$ , $X_{\text{solidos}(S)} = 0.0562$ y $X_{\text{aceite}(R)} = 0.2226$ .
U	El flujo de aceite que sale de la centrifuga vertical es 111.02 kg/h, de los cuales la $X_{\text{aceite}(U)} = 0.999$ y $X_{\text{agua}(U)} = 0.0006674$ .

**VII. Almacenado.**

En la Figura 4.14 se muestran las entradas y salidas en la etapa de almacenado y envasado, con su respectiva descripción en la Tabla 4.19.



**Figura 4.14 Entradas y salidas en el proceso de almacenado del aceite.**

El aceite crudo entra al proceso de almacenado (corriente U), para su posterior envasado.

**Tabla 4.19 Descripción de entradas y salidas en el proceso de almacenamiento del aceite.**

CORRIENTE	DESCRIPCIÓN
U	El aceite entra a la etapa de almacenado con una concentración del 99.9% y una temperatura menor a 50°C (323.15 K).
W	El aceite sale listo para ser envasado a temperatura ambiente.

El rendimiento de extracción del proceso en relación a la pulpa húmeda es del 16.32%. Este rendimiento concuerda con los obtenidos en otras investigaciones, utilizando el método de centrifugación con un pretratamiento de termobatido.

La cantidad de aceite extraído (corriente U) es de 111.02 kg/h siendo el rendimiento con relación al aceite presente en la pulpa (170 kg) de 65.32%. Si se consideran pérdidas del 3% de aceite en la despulpadora (que representan un 5.1 kg/h), entonces se obtiene un flujo de aceite extraído de 110.96 kg/h, teniendo un rendimiento del 62.32%.

La representación del diagrama se muestra en la Figura 4.15.

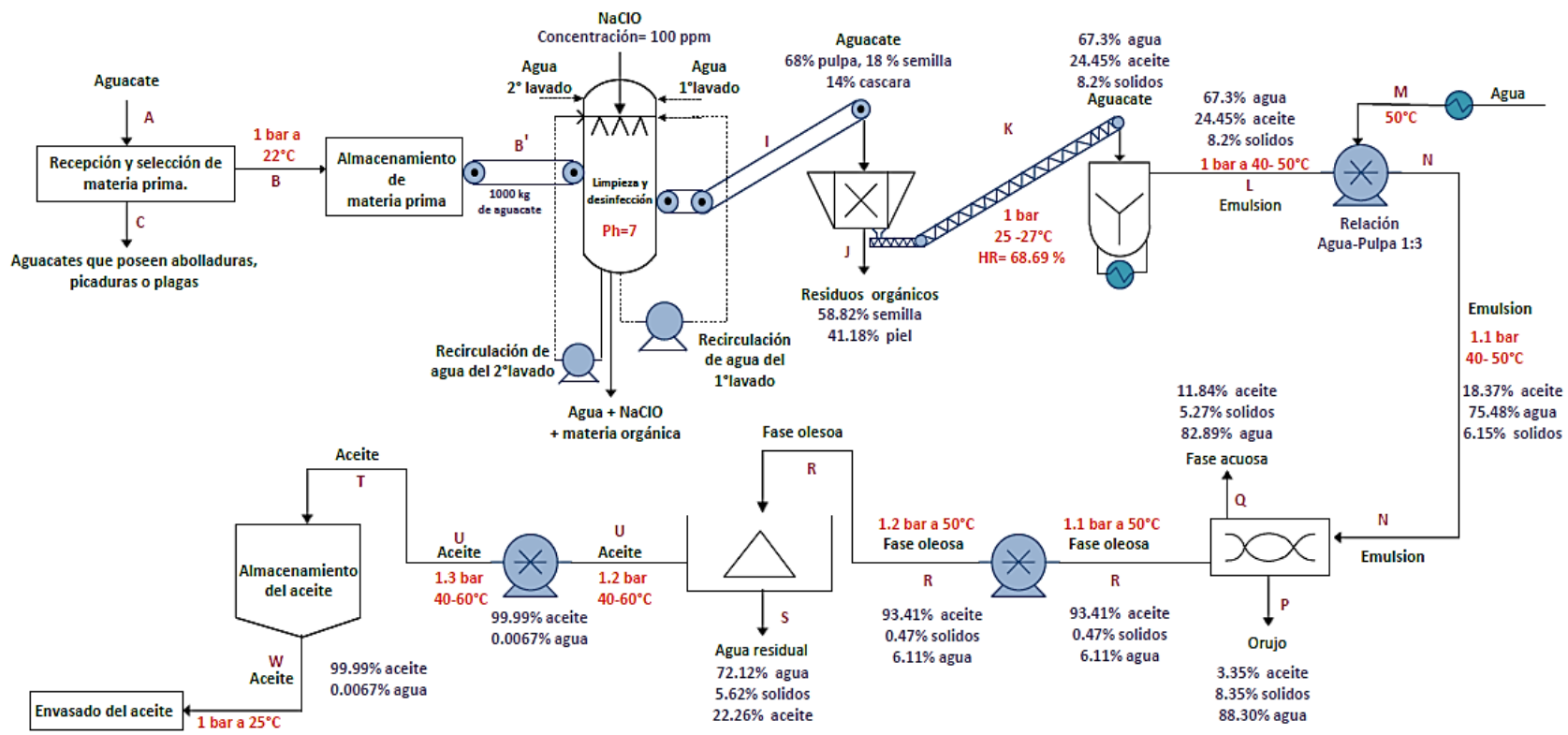


Figura 4.15 Diagrama de flujo del proceso de extracción de aceite de aguacate.

La descripción de la simbología utilizada en el diagrama de flujo del proceso se muestra en el Anexo C.

### **4.3.7 Selección y dimensionamiento de equipos.**


Todo proceso para llevarse a cabo necesita de equipos que desarrollen las operaciones unitarias que lo componen. En este apartado se comparan y analizan los equipos para cada una de las etapas del proceso de extracción de aceite de aguacate, para seleccionar aquel que se apegue más a los criterios, tanto de funcionamiento acorde al proceso, como aquellos que hagan un proceso sostenible.

#### **4.3.7.1 Selección del equipo para almacenamiento del aguacate.**

El almacenamiento del aguacate es muy importante ya que en esta etapa se complementa la maduración del mismo después de ser cosechado. Con el fin de evaluar la calidad del aguacate se deben controlar en el almacenamiento, parámetros como la temperatura, humedad y tiempo de maduración.

Los equipos utilizados para este fin son conocidos como cámaras de maduración (véase Tabla 4.20) que son recintos construidos mediante capas aislantes y en las cuáles se regula la temperatura, la inyección de etileno y la renovación de aire para la maduración de la fruta. Estas cámaras de maduración, suelen funcionar con una temperatura entre 15 - 25°C (288.15 - 298.15 K) en su etapa de maduración. Esta instalación precisa de equipos de refrigeración, calor, inyección de etileno y renovación de aire (REFLICLIM, 2019). La maduración en cámaras genera homogeneidad en la respiración, dado que los frutos se encuentran en un ambiente controlado; esto, a su vez, permite que el fruto desarrolle sus cambios físicos y bioquímicos de manera óptima (Rodríguez et al., 2019).

**Tabla 4.20** Descripción del equipo para la maduración del aguacate.



EQUIPO	CARACTERÍSTICAS
 <p data-bbox="250 863 670 930"><b>Cámara de maduración OPTIMO (Interko)</b></p>	<p data-bbox="708 338 1385 867">La cámara de maduración OPTIMO de Interko puede albergar de 8 a 24 palets de aguacates. Es una cámara de un solo nivel que se puede dividir en cuatro zonas. Cada zona está equipada con un equipo de refrigeración individual y un sistema de guía de aire, que permite a los usuarios encender y apagar cada una de las cuatro zonas de forma independiente para adaptarse rápidamente a los requisitos de volumen y a la demanda del mercado.</p> <p data-bbox="708 940 1385 1144">Los ventiladores REVERSO preensamblados optimizan el flujo de aire con un consumo de energía mínimo y aumentan la homogeneidad de maduración en los palets de frutas.</p>

Fuente: (Interko, 2020).

#### 4.3.7.2 Selección del equipo para el lavado y desinfección.

El lavado y desinfección del aguacate se puede realizar a través de equipos de lavado por inmersión, tipo cilindro o lavadora tipo cepillo. Es común utilizar combinaciones de los diferentes diseños, por ejemplo, lavado por inmersión, seguido de un sistema por aspersion. En la Tabla 4.21 se muestra la comparación entre los equipos más utilizados para el lavado de frutas como el aguacate.

**Tabla 4.21** Comparación de los equipos para el lavado y desinfección del aguacate.

EQUIPO	CARACTERÍSTICAS
 <p><b>Lavadora tipo inmersión marca CI Talsa</b></p>	<p>Lava de manera continua frutas y verduras agitándolas y sumergiéndolas en una tina con agua recirculada. Luego son transportadas en un elevador tipo malla recibiendo un baño con agua a presión. Permite el ahorro de agua gracias a su sistema de recirculación (CI Talsa, s.f).</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Construida con acero inoxidable 304.</li> <li>• Posee tolva de descarga.</li> <li>• Capacidad de hasta 1,000 kg/h.</li> <li>• Tanque con capacidad de 0.5 m<sup>3</sup> de agua.</li> <li>• Bomba con potencia 1.5 HP (1.12 kW).</li> <li>• Motorreductor con potencia 1.2 HP (0.9 kW).</li> </ul>
 <p><b>Lavadora tipo cepillo, marca Astimec</b></p>	<p>Lava frutas y verduras aplicando chorros de agua recirculada y enjuagando después con chorros de agua limpia, sobre una serie de rodillos (ASTIMEC, 2017).</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Fabricada con acero inoxidable AISI 304.</li> <li>• Presión de espray generado por bomba centrífuga.</li> <li>• Tanque para agua de lavado.</li> <li>• Filtro en tina para retención de partículas.</li> <li>• Tolva inferior de recolección de agua a tanque.</li> <li>• Volumen de la tina: 150 L (0.15 m<sup>3</sup>).</li> <li>• Capacidad desde 300 Kg/h hasta 3,000 Kg/h.</li> <li>• Motor reductor 0.75 HP (0.55 kW) 220 VAC 1F (rodillos).</li> <li>• Bomba centrífuga de 1.5 HP (1.1 kW).</li> </ul>



Al comparar las características y especificaciones de los diferentes equipos, se puede evidenciar las diferencias en los diseños de cada uno, siendo el más adecuado para el proceso de extracción de aceite, la lavadora tipo cepillo. En este diseño los aguacates son transportados a través de rodillos recibiendo una primera lavada con chorros de agua a presión, con una dosificación de desinfectante y una segunda lavada con agua limpia, también a través de chorros a presión. Este equipo presenta la ventaja de ahorro del agua, debido al sistema de recirculación y al sistema de lavado por aspersion, además su diseño permite que el agua de lavado final también pueda estar siendo recirculada. La capacidad del equipo permite procesar hasta 3 kg/h de materia prima y tanto la tina del primer lavado como del segundo poseen una capacidad de 150 L (0.15 m<sup>3</sup>) de agua, siendo mucho menor que la cantidad de agua requerida en el lavado por inmersión.

Otra ventaja de este sistema es que se reduce la contaminación cruzada, que en el caso del lavado por inmersión existe más riesgo debido a que los aguacates tendrían más contacto unos con otros, al estar todos sumergidos en la misma tina con agua.

#### **4.3.7.3 Selección de equipo despulpador de aguacate.**

El proceso de despulpado se puede realizar a través de equipos conocidos como despulpadoras, la mayoría de estos equipos están hechos con acero inoxidable AISI304, ya que este material es resistente a la corrosión (Marín, 2015) y ofrece gran resistencia a las variaciones térmicas (J. Fernández de Castillo y S. Fernández, 2002). En la Tabla 4.22, se muestra la comparación entre los equipos más utilizados para el proceso de despulpado de frutas.

**Tabla 4.22** Comparación de los equipos para despulpar frutas.

EQUIPO	CARACTERÍSTICAS
 <p><b>Modelo MDJ2-7.5</b></p>	<p>Equipo para despulpar todo tipo de fruta, posee dos tamices para garantizar una mejor filtración.</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>a) Capacidad: 2 - 4 ton/h (2,000 - 4,000 kg/h).</li> <li>b) Potencia: 18.5 kW.</li> <li>c) Diámetro del 1º tamiz: 12 mm.</li> <li>d) Diámetro del 2º tamiz: 0.6 mm.</li> <li>e) Material: acero inoxidable (AISI304).</li> </ul>
 <p><b>Despulpadora</b> <b>Marca: VUL-</b> <b>CANO</b> <b>Modelo: DFV 27-</b> <b>60</b></p>	<p>Máquina para despulpar todo tipo de frutas para procesamiento de néctares, mermeladas, compotas, jaleas y pastas. Posee compuerta superior separable para fácil lavado, compuerta para descarga de pepas y cáscaras, tamices de fácil intercambio de 1.5 mm a 6.0 mm.</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>a) Capacidad: 400 a 700 Kg/h.</li> <li>b) Potencia: 4 HP (2.98 kW).</li> <li>c) Material: AISI304, de acero inoxidable.</li> <li>d) Posee facilidad para intercambio de tamiz.</li> </ul>

Al comparar las características y especificaciones de las diferentes despulpadoras, la más apta para el despulpado en el proceso de extracción es el modelo MDJ2-7.5. Este equipo presenta la ventaja de menor consumo de energía, además de estar fabricado con acero inoxidable. Posee una capacidad de 2,000 - 4,000 kg/h y su diseño permite el acoplamiento de una banda transportadora para el traslado del aguacate desde la etapa de lavado y desinfección hasta la despulpadora, esta es una característica importante, ya que el proceso es continuo. En contraste con los otros modelos, poseen capacidades mayores de producción, y por ende mayor consumo energético, además, por la capacidad de producción proyectada es mejor un equipo con capacidad intermedia. Este tipo de despulpadora presenta la ventaja,



específicamente para procesar aguacate, de no necesitar adición de agua para realizar esta etapa, al tratarse de un fruto con alto contenido de agua.

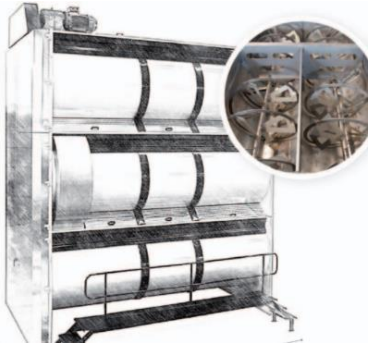

#### **4.3.7.4 Selección del equipo para el termobatido.**

El proceso de termobatido consiste en agitar lentamente la pasta, a la vez que se calienta. En este proceso se favorece la acción enzimática natural del aguacate que produce la liberación de aceite. La temperatura de la pasta, el grado de agitación y el tiempo de batido son cuidadosamente controlados.

Los equipos para batir están compuestos por cuerpos o vasos que pueden estar diseñados en paralelo (maquillas), de forma que cada cuerpo se llena y se vacía independientemente, lo que es ventajoso si se quiere procesar aguacate de diferente variedad, evitando la mezcla de las pastas. También puede estar dispuesto en serie, en donde la pasta es descargada sólo en el primer cuerpo, y por rebose la pasta atraviesa la totalidad de los cuerpos hasta su salida por el último compartimento. En la Tabla 4.23 se comparan los equipos que son utilizados para batir pastas con el fin de extraer aceite de recursos vegetales.

El equipo que mejor se apega al proceso de extracción de aceite de aguacate, es la termobatido tipo A de la marca alemana, ya que es un sistema por lotes que permite procesar por cada cuerpo 1000 kg/h de pasta, esto hace posible que los cuerpos puedan trabajar independientemente o si fuese necesario poner los dos en funcionamiento. Además, otra ventaja que presenta este diseño es que se puede adicionar un molino para triturar más la pasta de aguacate y así reducir el tiempo de batido. Al comparar la potencia entre los dos diseños se puede observar que, para una misma capacidad, la potencia del modelo elegido es menor que la potencia de la batidora modelo B-2000.

**Tabla 4.23** Comparación de batidoras para la etapa de termobatido.

EQUIPO	CARACTERÍSTICAS
 <p><b>Batidora modelo B-2000 (INDUSTRIAS DE LA ROSA, 2020)</b></p>	<p>Construida en acero inoxidable, está diseñado para una buena preparación de la pasta, los depósitos están contruidos de forma que el producto recorre todos los vasos que componen el equipo, lo que le permiten mezclarse en el tiempo necesario para su homogenización.</p> <p>Numero de vasos: 2. Capacidad: 2000 kg/h. Potencia: 5 CV (3.72 kW).</p>
 <p><b>Termobatidora de lotes tipo A ( Centrifugación Alemana, 2020)</b></p>	<p>Fabricada con vasos horizontales de acero inoxidable, con motorreductores independientes acoplados a cada eje de cada vaso, dotado de paletas para el batido. Calefacción por cámara de agua caliente en toda la sección de batido. Sinfín de reparto de masa acoplado al molino o tubería para acople a bomba pistón con válvulas manuales y sinfín de salida conectado a cada uno de los vasos con válvulas manuales, sondas de nivel de llenado y registro superior para su control.</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>a) Capacidad: 1,000 kg/h en cada vaso.</li> <li>b) Número de vasos: 2.</li> <li>c) Potencia: 2 CV/vaso (1.49 kW/vaso).</li> <li>d) Volumen agua en cámara de calefacción: 140 L/vaso (0.14 m<sup>3</sup>/vaso).</li> <li>e) Velocidad del eje: 14 rpm.</li> </ul>

#### **4.3.7.5 Selección de equipo para la centrifugación.**

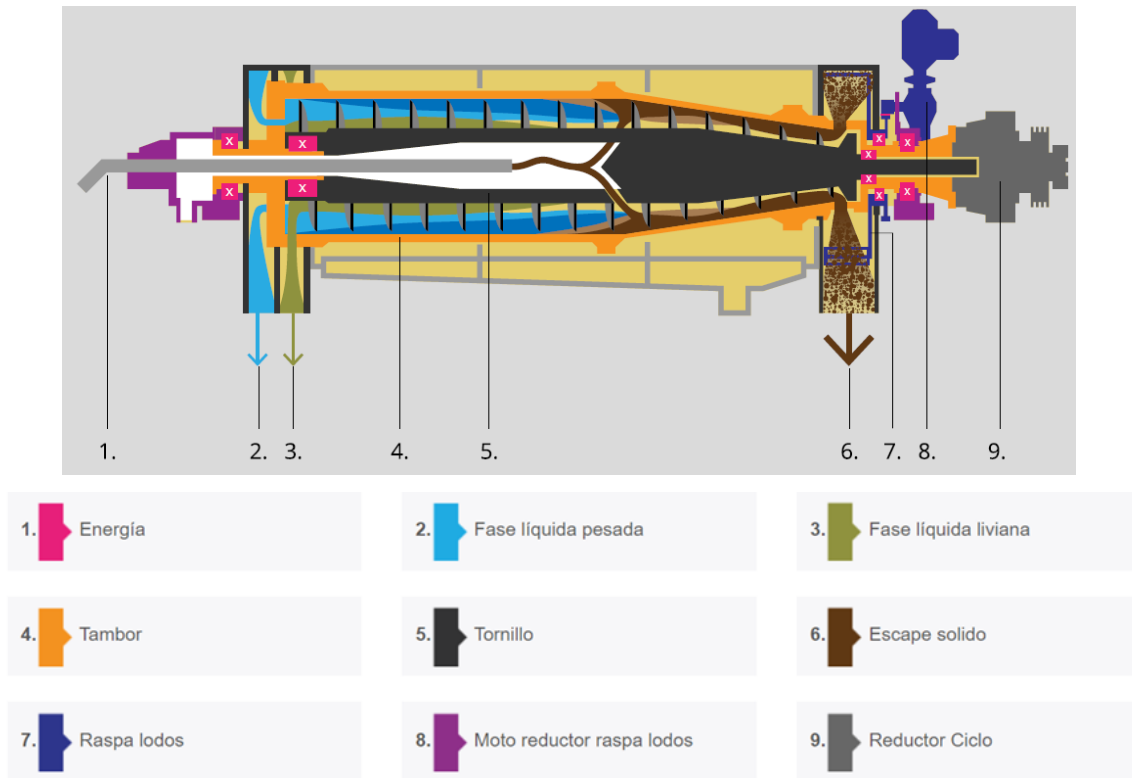
Como ya se mencionó anteriormente, la etapa de extracción del aceite se realizará en un Tricanter. Estos decantadores realizan una separación trifásica de dispersiones de material sólido y dos líquidos no mezclables de diferentes densidades (Centrimax, 2010).

##### **I. Características funcionales y constructivas de los tricantadores.**

Debido a la alta velocidad de rotación del tambor, las partículas de material sólido se depositan en la pared interior del tambor; al mismo tiempo, los dos líquidos se separan entre sí. Las partículas de material sólido que se desprenden hacia el exterior se transportan continuamente a la descarga de material sólido mediante el transportador de tornillo integrado. Las dos fases líquidas, separadas entre sí y casi completamente libres de material sólido, se superponen según su densidad y salen de la cámara de separación por aberturas separadas en el extremo opuesto del tambor cilíndrico (Centrimax, 2010).

La parte esencial de un Tricanter es el rotor, el cual consiste en un tambor cilíndrico/cónico con un tornillo extrusor que gira a una velocidad diferencial y funciona aplicando presión para separar la fase oleaginosa a medida que desplaza la masa hacia la salida para separar las tres fases presentes. El rotor es accionado por un motor eléctrico mediante correas trapezoidales. Ambos se unen a través de poleas y correas. El producto entra al rotor a través de un tubo de alimentación central. Por boquillas de salida situadas en el cuerpo del sinfín, el producto pasa al tambor, dónde tiene lugar la separación por fuerza centrífuga. El producto se separa en una fase líquida ligera (aceite), una fase líquida pesada (agua de vegetación) y una fase sólida (pulpa agotada). La descarga del aceite se realiza por gravedad y la fase acuosa separada se descarga mediante una palanca excéntrica bajo presión o por gravedad. El tornillo sinfín transporta los sólidos separados a la parte cónica final

del tambor para su descarga. En la Figura 4.16 se presenta un esquema del funcionamiento de un Tricanter (Flottweg, 2014).



**Figura 4.16 Esquema del funcionamiento de un Tricanter.**

Fuente: (CBB Decanter, 2015).


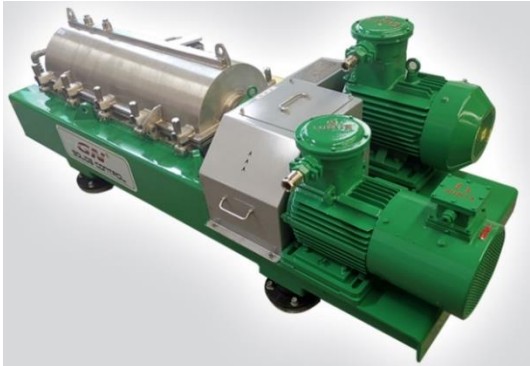
Después de haber descrito y explicado el funcionamiento de un decantador trifásico, así como cada una de sus partes que lo componen, se han comparado distintos equipos, y se ha escogido el Tricanter Z5E Flottweg de acuerdo a las siguientes características:

- Máxima pureza de los líquidos a ser procesados utilizando el rodete ajustable.
- Se pueden prescindir de otras etapas de procesamiento/separación lo que resulta en costos reducidos para el titular de la planta.
- Es posible la adaptación a condiciones variables en la alimentación.

Además de estas características mencionadas anteriormente, el Tricanter Z5E Flottweg presenta una menor potencia de motor y mayor capacidad instalada con respecto a la otra opción.

En la Tabla 4.24 se presentan los datos técnicos de los dos equipos comparados, los cuales son considerados como las tecnologías más recientes encontradas en la bibliografía.

**Tabla 4.24** Comparación de decantadores trifásicos para la etapa de centrifugación.

Tricanter Z5E Flottweg		
	Datos técnicos	
	Velocidad máxima de tambor (rpm).	4,200
	Dimensiones generales (L, AN, A).	3,400 x 1,000 x 1,200 mm
	Potencia del motor (kW).	45
	Potencia del tornillo (kW).	22
	Capacidad (kg/h).	4,000 – 5,000
Tricanter GNSX-520 Solids Control		
	Datos técnicos	
	Velocidad máxima de tambor (rpm).	3,000
	Dimensiones generales (L, AN, A).	3,100 x 1,200 x 1,000 mm
	Potencia del motor (kW).	55
	Potencia del tornillo (kW).	15
	Capacidad (kg/h).	1,500 – 3,000

#### **4.3.7.6 Selección de equipo para la purificación del aceite.**

En muchos procesos, las centrifugas de discos son indispensables para la separación mecánica de suspensiones sólido-líquido.

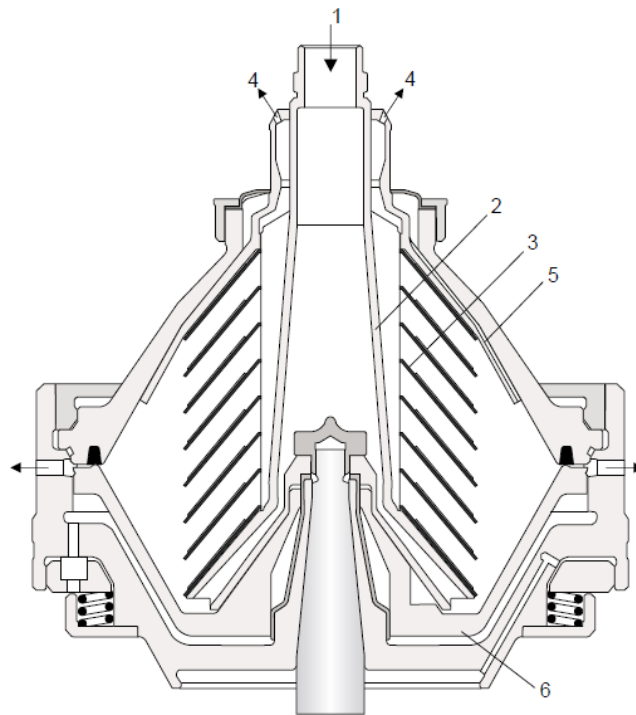
En comparación con la mayoría de centrifugas industriales, las centrifugas de discos trabajan con velocidades más altas, lo que significa que la fuerza centrífuga del tambor de una centrifuga de discos es más fuerte que la de un Tricanter, por ejemplo. En consecuencia, las centrifugas de discos son predestinadas para tareas de separación que requieren mucha precisión, especialmente para separaciones de partículas muy finas. Mediante las centrifugas de discos también es posible separar suspensiones líquido/líquido con diferencias de densidades muy pequeñas.

Por ello, las posibilidades de uso y aplicación de las centrifugas de discos son múltiples en los sectores industriales como por ejemplo en la industria alimentaria y de bebidas, en la industria del tratamiento de aceites y grasas, en la química, farmacia y biotecnología, en la industria del aceite mineral y en la producción de energía (Alfa Laval, 2018).

##### **I. Principio de funcionamiento de la centrifuga de discos.**

La purificación tiene lugar dentro de un decantador vertical. Como se muestra en la Figura 4.17, el aceite se introduce en el recipiente giratorio de la centrifuga desde la parte superior a través de un tubo de entrada fijo (1) y se acelera en el distribuidor (2), que está especialmente diseñado para garantizar una aceleración suave del líquido de alimentación. Al salir del distribuidor, el aceite entra en la pila de discos (3). La separación de aceite-agua-sólidos se lleva a cabo entre los discos, con la fase de aceite moviéndose a través de la pila de discos hacia el centro y se descarga en el marco colector superior (4). El agua y los sólidos pesados separados del aceite se desplazan hacia la periferia, el agua es conducida a través de canales en el disco superior (5) al marco colector inferior.

Los sólidos se recogen en la periferia, desde donde se descargan de forma intermitente en la tapa de recogida de sólidos debajo del recipiente. La descarga de sólidos se logra mediante un sistema hidráulico que, a intervalos preestablecidos adecuados, obliga al fondo deslizante del recipiente (6) a descender y, por lo tanto, abre los puertos de sólidos en la periferia del recipiente (Alfa Laval, 2018).



**Figura 4.17 Esquema de funcionamiento de una centrífuga de discos.**

Fuente: (Alfa Laval, 2018).



Luego de haber descrito y explicado el funcionamiento de una centrífuga de discos, se han comparado distintos equipos, y se ha escogido la centrífuga AC1500-440 Flottweg de acuerdo a las siguientes ventajas:

- a) Mayor rendimiento y diseño compacto.
- b) Separación de sólidos muy finos de líquidos.
- c) Separación de suspensiones líquidos-líquidos con escasas diferencias de densidades.

- d) Construcción cerrada y/o hermética para evitar la contaminación del producto o del medio ambiente.
- e) No se requiere la utilización de materiales auxiliares para la filtración o floculantes.

En la Tabla 4.25 se presentan los datos técnicos de los tres equipos comparados, los cuales son considerados como las tecnologías más recientes encontradas en la bibliografía.

**Tabla 4.25** Comparación de centrífugas de discos para la etapa de purificación del aceite.

<b>Centrífuga UVPX 507 Alfa Laval</b>		
	<b>Datos técnicos</b>	
	<b>Temperatura de operación.</b>	Máx. 100 °C (373 K)
	<b>Potencia del motor (kW).</b>	5.5
	<b>Capacidad (kg/h).</b>	2,400
<b>Centrífuga AC1500-440 Flottweg</b>		
	<b>Datos técnicos</b>	
	<b>Temperatura de operación.</b>	Máx. 60 °C (333 K)
	<b>Potencia del motor (kW).</b>	11
	<b>Capacidad (kg/h).</b>	2,000



#### 4.3.7.7 Selección del equipo para el almacenamiento y envasado de aceite.

Para el almacenamiento de aceite de aguacate se puede realizar a través de equipos hechos de acero inoxidable lo que lo hacen resistentes a la corrosión. Además, este material presenta la ventaja de evitar que el aceite sufra alteraciones por el



oxígeno y la luz, por lo cual lo convierte en un material ideal en el almacenamiento del aceite. En la Tabla 4.26, se presenta la comparación de los diferentes equipos para el almacenamiento del aceite.

**Tabla 4.26** Comparación de los equipos para el almacenamiento de aceite.

EQUIPO	CARACTERÍSTICAS
 <p><b>Equipo A</b> (Industria In VIA, 2019)</p>	<p>Este equipo se utiliza para el almacenamiento de líquidos en la industria alimentaria, química, cosmética, farmacéutica y textil.</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>I. Capacidad de 500 a 1,500 L (0.5 a 1.5 m<sup>3</sup>).</li> <li>II. Fabricado con acero inoxidable.</li> </ol>
 <p><b>Equipo B</b> (Industria In VIA, 2019)</p>	<p>Son ideales para el almacenamiento de aceite y presentan características como:</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>I. Capacidad de 50 a 1,600 L (0.05 a 1.6 m<sup>3</sup>).</li> <li>II. Fabricado con acero inoxidable AISI304.</li> <li>III. Se pueden obtener diferentes configuraciones, según los accesorios que se deseen o necesiten agregar.</li> </ol>

Al comparar las características y especificaciones de los equipos de almacenamiento, se puede observar diferencias en los diseños, siendo el equipo B el más adecuado, ya que este posee amplia capacidad de almacenamiento, además es de acero inoxidable. En contraste con el otro equipo posee las mismas características, pero diferenciando en que no hay posibilidad de adaptación de otros accesorios que se deseen agregar, el cual es una característica importante ya que se necesita agregar válvulas para la descarga del aceite en el momento que se quiera embotellar.

Para el envasado del aceite, se recomienda un recipiente de plástico color ámbar, ya que este color evita que luz penetre en el recipiente y por lo tanto evita que el aceite se oxide. Así mismo, se recomienda que sea de plástico ya que permite poder reutilizar el recipiente y en caso de desecharlo, el tratamiento para su reutilización representa menos gasto energético.

En la Tabla 4.31 se presenta los criterios de sostenibilidad aplicados a cada equipo utilizado por etapas de producción, cabe destacar que los tres criterios utilizados son minimización de requerimientos energéticos, cerrar ciclos de materia y energía y el ahorro de agua debido a que estos tres criterios permite cumplir con el objetivo doce del desarrollo sostenible.

#### **4.3.7.8 Equipos auxiliares para el proceso de extracción de aceite.**

En el proceso de obtención de aceite de aguacate, el fruto pasa por diferentes operaciones unitarias las cuales permiten la transformación de la materia prima en producto terminado. Para poder realizar la transformación de la materia prima, se necesitan de equipos auxiliares, estos equipos permiten realizar algunas funciones como: transportar y elevar la temperatura de los fluidos cuando estos lo requieran.

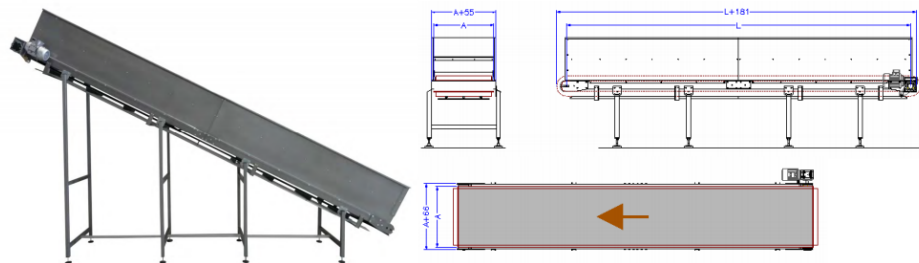
La selección de estos equipos se basa en condiciones como: distancia, temperatura, presión, consistencia del fluido. Entre los equipos auxiliares utilizados en el proceso de transformación de la materia prima tenemos: cintas transportadoras, transportador de tornillo, tuberías de acero inoxidable, bomba de desplazamiento positivo, e intercambiador de placas. Estos equipos se describen a continuación:

##### **I. Cintas transportadoras.**

Para poder transportar la materia prima desde el sistema de lavado y desinfección se utiliza una banda transportadora, la función de este equipo es el de transportar y

elegir el fruto de una operación a otra. El uso de cintas transportadoras permite que el proceso sea continuo y rápido.

El equipo seleccionado es de acero inoxidable, el cual es ideal para cargas semipe-sadas. Presenta la ventaja de transportar a grandes distancias, además, es capaz de adaptarse a la inclinación deseada (Maskepack, 2019). En la Figura 4.18, se puede observar el esquema de una cinta transportadora.



**Figura 4.18** Cinta transportadora. Fuente: (Maskepack, 2019).

En la Tabla 4.27, se presenta los parámetros de operación de la cinta transportadora.

**Tabla 4.27** Parámetros de operación de la cinta transportadora.

PARÁMETROS DE OPERACIÓN	
Longitud entre centros de tambores (mm)	1000 a 20000
Ancho de banda (mm)	500 a 1500
Capacidad de carga máxima (kg)	350
Velocidad (m/minuto)	5 a 100

Fuente: (Maskepack, 2019).

## II. Transportador de tornillo.

Para poder transportar la pasta con textura cremosa desde la despulpadora hasta la termobatidora se necesita un tornillo transportador. Estos equipos son ideales para transportar fluidos con consistencia semilíquida como la pasta de aguacate.

Una de las características de estos transportadores es que son totalmente cerrados, esto asegura la protección del producto y evita derrames dentro de la planta procesadora (Bega, 2020).

En la Figura 4.19, se presenta la transportadora de tornillo seleccionada.



**Figura 4.19 Transportador de tornillo.** Fuente: (Bega, 2020).

### III. Tuberías de acero inoxidable.

Desde el proceso de termobatido se necesitan tuberías de acero inoxidable con grado alimenticio para transportar los fluidos, debido a que este material se mantiene limpio por más tiempo a cualquier temperatura y en consecuencia no contamina los alimentos. Además, este material es no corrosivo por lo cual evita la contaminación, así mismo, permite la conservación óptima de todas las propiedades organolépticas tales como textura, olor, sabor, color y apariencia, entre otras (JN aceros, 2017). En la Figura 4.20, se presenta un ejemplo de una tubería de acero inoxidable.



**Figura 4.20 Tubería de acero inoxidable.** Fuente: (JN aceros, 2017).

En la Tabla 4.28, se presenta los parámetros de operación de la tubería de acero inoxidable.

**Tabla 4.28** *Parámetros de operación de tubería de acero inoxidable.*

DIÁMETRO EXTERNO (mm)	NOMINAL	NORMA
76.20	DN 80	DIN 11866

Fuente: (GRUPO CUÑADO, 2001).

#### IV. Bombas de desplazamiento positivo.

Para transportar los fluidos de una etapa a otra se necesitan bombas de desplazamiento positivo. Estos equipos permiten transportar fluidos viscosos y semilíquidos con mucho cuidado, además, tiene la capacidad de bombear un volumen definido a bajas presiones. Las bombas de desplazamiento positivo se utilizan en la fabricación de productos cosméticos y farmacéuticos (Jung Process Systems, s.f). En la Figura 4.21, se presenta un ejemplo de una bomba de desplazamiento positivo.



**Figura 4.21 Bomba de desplazamiento positivo.** Fuente: (Bombas hasa, 2018).

En la Tabla 4.29 se encuentra los parámetros de operación de la bomba de desplazamiento positivo.

**Tabla 4.29** Parámetros de operación de bomba de desplazamiento positivo.

PARÁMETROS DE OPERACIÓN	
Serie	CO Inox 316L
Tipo	Acero inoxidable
Caudal (m <sup>3</sup> /h)	0.52 – 1
rpm	2900
Temperatura (K)	263.15 hasta 393.15
Aplicación	Para la industria alimentaria.

Fuente: (Bombas hasa, 2018).

## V. Intercambiador de calor de placas.

Para poder elevar la temperatura del agua y mantener la pasta del aguacate a la temperatura óptima en el proceso de termobatido, se necesita un intercambiador de calor de placas. Este tipo de intercambiador presenta la ventaja que cuando pasa el fluido a través del equipo inmediatamente lo calienta llevándolo hasta la temperatura requerida. Además, ocupa menos espacio en comparación con un sistema tradicional como el serpentín (Coditer, 2016). En la Figura 4.22, se presenta un intercambiador de calor de placas.



**Figura 4.22** Equipo de intercambiador de calor de placas.

Fuente: (Alfa Laval, 2016).

En la Tabla 4.30 se presenta los parámetros de operación del intercambiador de calor de placas.

**Tabla 4.30** *Parámetros de operación del intercambiador de placas.*

PARÁMETROS DE OPERACIÓN	
Modelo	CBH10
Material	Acero inoxidable 316
Caudal máximo (m <sup>3</sup> /h)	4.1
Dirección de caudal	Paralelo
Número de placas min.	4
Número de placas máx.	60

Fuente: (Alfa Laval, 2016).

#### 4.3.7.9 Identificación de los criterios de sostenibilidad aplicado a los equipos utilizados en el proceso producción de aceite de aguacate.

Los criterios de sostenibilidad que se tomaron en cuenta para la selección de los equipos en el proceso de producción de aceite de aguacate se presentan en la Tabla 4.31.

**Tabla 4.31** *Identificación de los criterios de sostenibilidad aplicado a los equipos de producción.*

ETAPA	EQUIPO	CRITERIO DE SOSTENIBILIDAD
Almacenamiento de materia prima	Cámara de maduración OPTIMO (Interko)	Minimización de requerimientos energéticos.
Lavado y desinfección	Lavadora tipo cepillo, marca Astimec.	Cerrar los ciclos de materia y energía.
		Ahorro de agua.
Despulpado	Modelo MDJ2-7.5	Minimización de requerimientos energéticos.

Continúa

**Tabla 4.31** Identificación de los criterios de sostenibilidad aplicado a los equipos de producción (Continuación).

ETAPA	EQUIPO	CRITERIO DE SOSTENIBILIDAD
Termobatido	Modelo Z5E Flottweg	Minimización de requerimientos energéticos.
Centrifugación	Termobatidora de lotes tipo A (centrifugación alemana)	Ahorro de agua.
		Minimización de requerimientos energéticos.
Purificación	Modelo AC1500-440 Flottweg	Ahorro de agua.
		Minimización de requerimientos energéticos.

#### 4.3.8 Consumo energético de los equipos.

Una vez establecidos los equipos que se utilizan en el proceso de extracción de aceite de aguacate, es necesario determinar el consumo energético de estos teniendo en cuenta la cantidad de equipos utilizados por etapa, la potencia requerida y el tiempo de uso.

Sin embargo, debido a que el proceso es una propuesta de carácter teórico, no se cuenta con el tiempo de uso real al día de los equipos, por lo que se dejará como una propuesta. El cálculo del consumo energético por equipo al mes se presenta en la Ecuación 4.5

$$\text{Consumo energético por equipo al mes} = \text{Potencia} * \text{cantidad de unidades} * \text{horas de uso al mes}$$

**Ecuación. 4.5**

En la Tabla 4.32 se presenta la potencia de funcionamiento de los equipos utilizados para el proceso de extracción de aceite de aguacate, en la cual se puede observar que la etapa que presenta mayor potencia es la centrifugación en el Tricanter, con

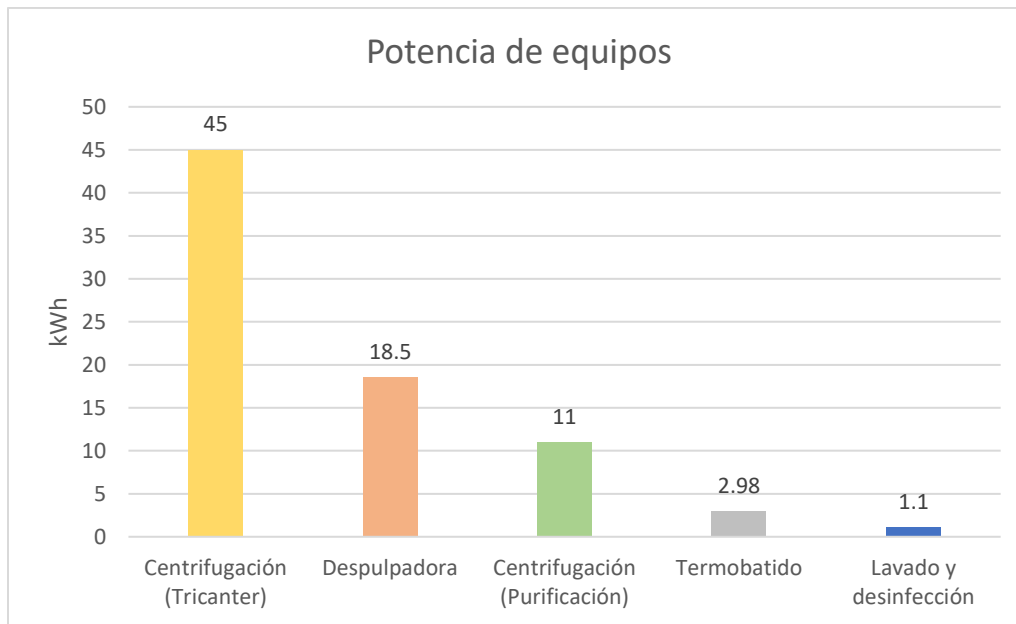


un valor de 45 kW/h, esto debido a la capacidad de procesamiento del equipo y porque en esta etapa se separa el aceite que esta finamente disperso como una emulsión, por lo tanto, requiere de mayor potencia para realizar su función. El segundo equipo que requiere de mayor potencia es la etapa de despulpado con un valor de 18.5 kW/h, en esta etapa se realiza la trituración del fruto, por lo cual requiere de un mayor esfuerzo para triturar y separar la pulpa de la semilla y la piel.

**Tabla 4.32** Consumo energético de los equipos para la extracción de aceite de aguacate.

ETAPA	EQUIPO	CANTIDAD	POTENCIA (kWh)	CAPACIDAD
Lavado y desinfección	Lavadora tipo cepillo, marca Astimec	1	1.1	300 Kg/h
Despulpadora	Modelo MDJ2-7.5	1	18.5	2000 Kg/h
Termobatido	Termobatidor a de lotes tipo A	1	2.98	1000 kg/vaso
Centrifugadora (Tricanter)	Modelo Z5E Flottweg	1	45	4000 kg/h
Centrifugadora (Purificación)	Modelo AC1500-440 Flottweg	1	11	2000 Kg/h

Gráficamente la Figura 4.23, muestra el resumen de la potencia de funcionamiento de los equipos detallados en la Tabla 4.32.



**Figura 4.23 Gráfico comparativo de las potencias de los equipos utilizados para la extracción de aceite de aguacate.**

La Figura 4.23 muestra que, la etapa de centrifugación en el Tricanter (representada de color amarillo) es la que tiene un mayor consumo energético, seguido de la despulpadora (representada de color rosado) y centrifugación en la etapa de purificación (representada de color verde), la etapa que posee menor consumo energético es el de lavado y desinfección de la materia prima (representada de color azul).

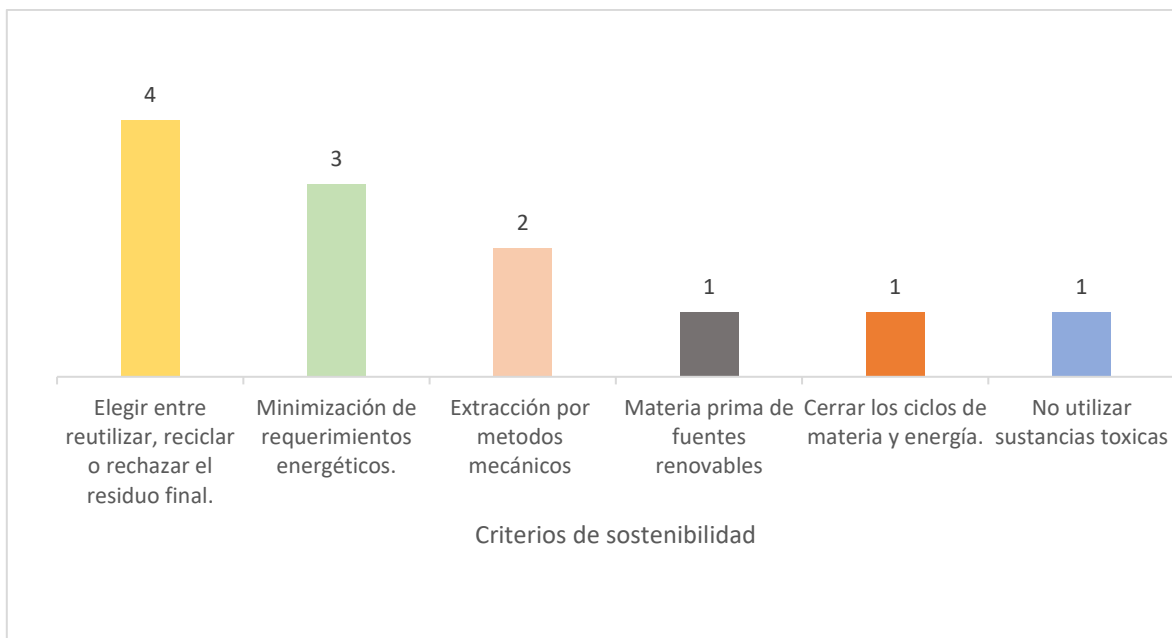
#### **4.3.9 Análisis de los criterios de sostenibilidad aplicados al proceso de extracción de aceite de aguacate.**

En la Tabla 4.33 se muestran los criterios de sostenibilidad y los ODS contemplados en cada una de las etapas del diseño del proceso de producción de aceite de aguacate. Dichos criterios permiten que el proceso sea más amigable con el medio ambiente logrando así minimizar el impacto ambiental que este puede generar.

**Tabla 4.33.** Identificación de los criterios de sostenibilidad aplicados a cada etapa del proceso de producción de aceite de aguacate.

CRITERIO	ETAPAS	ODS
Aplicar procesos que eviten el uso de sustancias tóxicas	Lavado y desinfección.	ODS 12,14 y 15
Extracción por métodos mecánicos (sin uso de solventes tóxicos)	Centrifugación (Tricanter).	ODS 12,14 y 15
	Purificación.	
Minimización de requerimientos energéticos.	Lavado y desinfección.	ODS 7 y 13
	Centrifugación (Tricanter).	
	Almacenamiento del aceite.	
Materia prima de fuentes renovables.	Recepción y selección de materia prima.	ODS 12
Elegir entre reutilizar, reciclar o rechazar el residuo final.	Limpieza y desinfección.	ODS 12 y 15
	Despulpado.	
	Centrifugación (Tricanter).	
	Purificación.	
Cerrar los ciclos de materia y energía.	Lavado y desinfección.	ODS 12, 14 y 15

En la Figura 4.24 se presenta el número de etapas asociadas a cada criterio de sostenibilidad.



**Figura 4.24 Gráfico que representa la distribución de etapas por criterio de sostenibilidad.**

Tanto en la Tabla 4.33 como en la Figura 4.24 se puede observar que el criterio más aplicado al proceso es el de elegir entre reutilizar, reciclar o rechazar el residuo final (representado de color amarillo). Las etapas en las cuales se toma en cuenta este criterio son, limpieza y desinfección, despulpado, centrifugación y purificación.

Este criterio se considera muy importante en el diseño del proceso, debido a que está enfocado en utilizar los residuos generados como fuente de materia prima para la obtención de diferentes subproductos como se describe en el presente capítulo sección 4.5.1. Elegir entre reutilizar, reciclar o rechazar el residuo final, ayuda a la protección de los suelos de una mala disposición final y evita que estos se acumulen en los ríos, mares y océanos.

El criterio de aplicar procesos que eviten el uso de sustancias tóxicas (representado de color azul), se aplica en las siguientes etapas: lavado y desinfección. Además, el criterio de separación por métodos mecánicos (representado de color rosado), está enfocado a aplicar procesos físicos para la extracción del aceite, teniendo como ventaja que no se encuentran presentes sustancias tóxicas en los efluentes y residuos que salen del proceso, las etapas a las que se les aplica este criterio son:

centrifugación y purificación. Así mismo en el proceso se ha buscado que los equipos utilizados minimicen los requerimientos energéticos.

El uso de materia prima de fuentes renovables y el cierre de ciclos de materia y energía, se representan de color azul. El aguacate como materia prima principal para la extracción de aceite se considera materia prima de fuente renovable, teniendo en cuenta que, el cultivo de este fruto debe ser ambientalmente sostenible, es decir, que se evite la sobreexplotación del suelo. El criterio de cierre en los ciclos de materia prima y energía se aplican en la etapa de lavado y desinfección con el sistema de recirculación del agua.

En la Figura 4.25 se muestra el diagrama de flujo del proceso con los con los criterios de sostenibilidad identificados en cada etapa y corriente del proceso, haciendo énfasis en los objetivos de sostenibilidad a los que se contribuye.

Los objetivos del desarrollo sostenible aplicados al proceso son:

**ODS 7: energía asequible y no contaminante.** Se contribuye a este objetivo en la minimización de los requerimientos energéticos, con la implementación de alternativas sostenibles de producción de energía, siendo esta alternativa segura, limpia y de fuente renovable, logrando así, disminuir el consumo de energía en los equipos que transforman la materia prima en producto terminado.

**ODS 12: producción y consumo responsable.** Se contribuye a este objetivo cerrando los ciclos de materia y energía, evitando la toxicidad en el proceso, utilizando materias primas de fuentes renovables y reutilizando, reciclando o rechazando el residuo final. En el caso del lavado y desinfección se trata de cerrar el ciclo proponiendo la recirculación del agua y utilizando dosis adecuadas de hipoclorito de sodio. En el caso de la extracción de aceite se optó por implementar un método mecánico libre de solventes. La reutilización o el reciclaje del residuo final tienen un gran potencial de aplicación en todas las corrientes donde se tiene la salida de residuos al ser totalmente orgánicos sin ninguna sustancia química que requiera un tratamiento de eliminación.

**ODS 13: acción por el clima.** Se contribuye a este objetivo, con la implementación de alternativas de producción de energía de fuentes renovables (fotovoltaica y biomasa), las cuales contribuyen a evitar el uso de combustibles fósiles, reduciendo la huella de carbono. Además, a través de medidas como el reciclaje y el reúso del residuo final, se evita la contaminación de las aguas y de los suelos, que son una de las causas principales del desequilibrio de los ecosistemas ocasionando una desregulación de temperatura y presión en la atmósfera, modificando las condiciones climáticas.

**ODS 14 y 15: vida submarina y vida de ecosistema terrestres.** Los criterios que contribuyen a estos objetivos son: el cierre de ciclos de materia y energía y la aplicación de procesos que eviten el uso de sustancias tóxicas. La implementación de estos criterios evita que el proceso requiera de uso de sustancias químicas en la etapa de extracción del aceite, logrando así que los efluentes de salida del proceso sean más fáciles de tratar o de disponer de ellos, como es el caso de las aguas residuales y los residuos que se generan en el proceso. Con esto se evita la contaminación de la flora y la fauna acuática y terrestre. En general, implementar medidas para reutilizar, reciclar o disponer de una manera adecuada las aguas residuales o desechos que se generan en el proceso también contribuye a los ODS 14 y 15

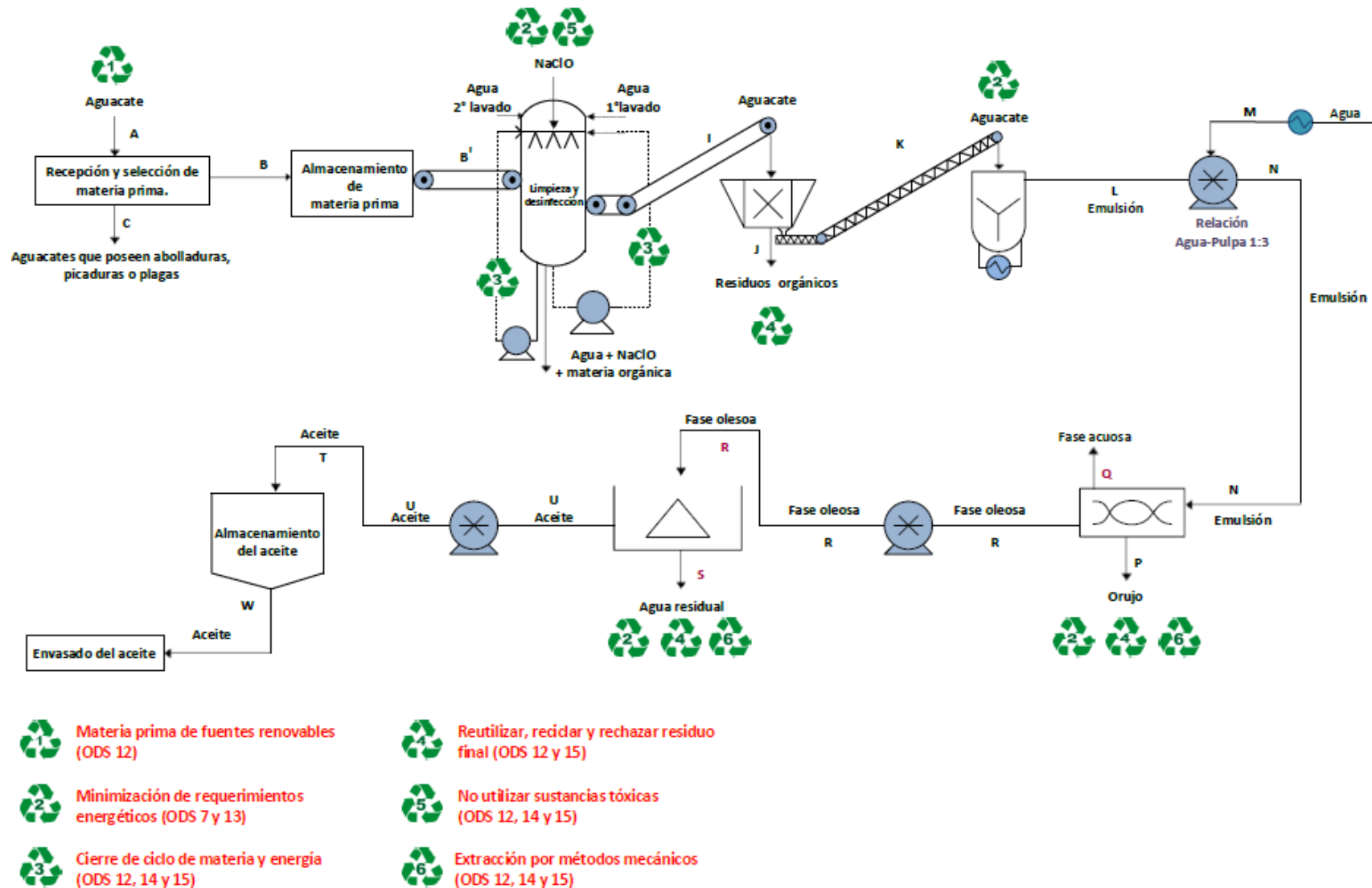


Figura 4.25 Diagrama de flujo con los criterios de sostenibilidad aplicados al proceso.

#### 4.4 EVALUACIÓN DE IMPACTOS AMBIENTALES DEL PROCESO.

En esta sección se presenta el desarrollo y el análisis de la evaluación de los impactos ambientales de cada una de las etapas del proceso. A partir de la identificación y evaluación de estos impactos, se podrá tener un panorama más completo acerca de la sostenibilidad del proceso, dando la posibilidad de identificar las etapas y corrientes que representan una problemática ambiental.

##### 4.4.1 Identificación de aspectos ambientales.

Para identificar los aspectos generados en el proceso de extracción de aceite de aguacate, se analizaron las entradas y salidas de cada una de las operaciones unitarias. Estas etapas fueron retomadas de la sección 4.3.6.2 del presente trabajo.

La Tabla 4.34 muestra el resumen de las etapas del proceso, los aspectos ambientales asociados a cada etapa y la descripción de cada uno de ellos.

**Tabla 4.34** *Identificación y descripción de aspectos ambientales del proceso de extracción de aceite de aguacate.*

ETAPAS DEL PROCESO	ASPECTOS	DESCRIPCIÓN DEL ASPECTO
Recepción y selección de materia prima.	Generación de residuos orgánicos.	Residuo orgánico generado por el descarte de aguacate de mala calidad.
	Consumo de materia prima de origen vegetal.	Consumo de aguacate para la producción del aceite.
	Consumo de combustible.	Consumo de combustible para el transporte del aguacate.

Continúa...



**Tabla 4.34** Identificación y descripción de aspectos ambientales del proceso de extracción de aceite de aguacate (Continuación).

ETAPAS DEL PROCESO	ASPECTOS	DESCRIPCIÓN DEL ASPECTO
Almacenamiento de la materia prima.	Consumo de energía eléctrica.	Consumo de energía eléctrica en cámara de almacenamiento del fruto.
Lavado y desinfección de materia prima.	Consumo de productos químicos.	Consumo de hipoclorito de sodio para la desinfección del aguacate.
	Generación de agua residual.	Agua, hipoclorito de sodio y materia orgánica proveniente del lavado y desinfección.
	Consumo de energía eléctrica.	Consumo de energía eléctrica por el equipo de lavado y desinfección y por el funcionamiento de la banda transportadora.
	Generación de ruido.	Generación de ruido provocado por las bombas de inducción para transporte y recirculación del agua.
Despulpado.	Generación de residuos orgánicos.	Semilla y cáscara del aguacate, producto del despulpado.
	Consumo de energía eléctrica.	Consumo de energía eléctrica por el equipo despulpador y para el tornillo transportador.
	Generación de ruido.	Ruido provocado por la máquina despulpadora.

Continúa...

**Tabla 4.34** Identificación y descripción de aspectos ambientales del proceso de extracción de aceite de aguacate (Continuación).

ETAPAS DEL PROCESO	ASPECTOS	DESCRIPCIÓN DEL ASPECTO
Termobatido.	Consumo de energía.	Consumo de energía eléctrica por la termobatidora.
	Consumo de agua.	Agua utilizada para mantener la temperatura constante en el batido de la pasta de aguacate.
Centrifugación (Tricanter).	Consumo de agua.	Agua que entra al proceso para mejorar el transporte de la emulsión y ayudar al proceso de separación.
	Consumo de energía eléctrica.	Para el funcionamiento del Tricanter y el calentamiento del agua agregada en la etapa.
	Generación de agua residual.	Agua residual compuesta por aceite y sólidos.
	Generación de residuos orgánicos.	Residuos con alto contenido de humedad y rastros de aceite.
Purificación.	Consumo de energía eléctrica.	Consumo de energía eléctrica por el equipo purificador.
	Generación de agua residual.	Agua separada de la parte oleosa que ha salido del Tricanter. Esta agua contiene rastros de aceite y sólidos.

Continúa...

**Tabla 4.34** Identificación y descripción de aspectos ambientales del proceso de extracción de aceite de aguacate (Continuación).

ETAPA DEL PROCESO	ASPECTOS	DESCRIPCIÓN DEL ASPECTO
Almacenamiento del aceite.	Consumo de energía eléctrica.	Consumo de energía eléctrica para el almacenamiento del aceite.
Envasado del producto terminado.	Consumo de energía eléctrica.	Consumo de energía eléctrica para el envasado de aceite.
	Consumo de plástico y papel.	Recipientes plásticos y papel utilizado para el envasado y etiquetado respectivamente.
	Generación de residuos sólidos.	Papel y plásticos que es desechado en el proceso de envasado.

#### 4.4.2 Identificación de impactos ambientales.

Para la identificación de los impactos ambientales, se hizo uso de la matriz causa-efecto, en donde se colocan en las filas los aspectos generados en las actividades del proceso y en las columnas los impactos que pueden provocar dichos aspectos.

Como se muestra en la Tabla 4.35, la identificación se hizo marcando con una x los impactos generados por cada uno de los aspectos.

**Tabla 4.35** Identificación de impactos ambientales en el proceso de extracción de aceite de aguacate.

ASPECTO AMBIENTAL	FACTOR AMBIENTAL E IMPACTO AMBIENTAL													
	Suelo				Agua			Aire			Flora	Fauna	Recursos naturales	Social
	Alteración de la calidad	Contaminación	Alteración de la estructura	Compactación	Alteración de la calidad del agua superficial	Alteración de la calidad del agua subterránea	Contaminación	Efecto invernadero	Lluvia acida	Alteración de la calidad	Perdida de vegetación	Cambio de dinámicas	Agotamiento	Salud y seguridad
Consumo de materia prima vegetal.													✗	
Consumo de combustible.								✗					✗	
Consumo de energía eléctrica.													✗	
Consumo de agua.													✗	
Generación de residuos orgánicos (subproductos).	✗				✗									
Generación de residuos orgánicos (torta o lodo).	✗	✗			✗		✗			✗				
Generación de agua residual.					✗	✗	✗				✗			
Consumo de plástico.													✗	
Consumo de papel.													✗	
Generación de residuos (papel, plástico).	✗	✗					✗					✗		
Generación de ruidos.														✗

#### **4.4.2.1 Descripción de los impactos ambientales identificados.**

Los impactos ambientales identificados en el proceso se describen a continuación:

##### **I. Contaminación del suelo.**

Según Rodríguez-Eugenio, Pennock y McLaughlin (2019), la contaminación se refiere a la presencia de un producto químico o sustancia fuera de lugar y/o presente en una concentración más alta de lo normal, lo cual provoca efectos adversos sobre cualquier organismo al que no está destinado (este volumen). Grandes volúmenes de desechos, aunque sean orgánicos cambian la dinámica del suelo ya que agregan materia orgánica y nutrientes. Sin embargo, sino han sido tratados antes de su aplicación, muchos contaminantes como los metales pesados y grasas pueden acumularse en el suelo.

Por otro lado, los residuos como el plástico tienen la característica de presentar baja densidad, por lo cual en el agua se dispersan con facilidad, además, su degradación en los suelos es a largo plazo (cientos de años). Uniendo ambas características acaban contaminando el recurso suelo y agua, representando un peligro para los organismos acuáticos y terrestres.

##### **II. Alteración de la calidad del suelo.**

La alteración del suelo es el producto de la contaminación del mismo y es un proceso degenerativo que reduce la capacidad actual o futura de los suelos para seguir desempeñando sus funciones características. La alteración se puede generar en el caso de los residuos provenientes del proceso de despulpado, por el manejo inadecuado de los mismos.

### **III. Alteración de la calidad del agua superficial.**

El aceite presente en el agua residual eleva la demanda química de oxígeno (DQO), lo que afecta el intercambio gaseoso, reduciendo así la oxigenación del agua y su calidad físicoquímica (Jiménez, 2012). Además, la presencia de sólidos suspendidos presenta riesgo de descomposición orgánica generando así contaminación biológica.

### **IV. Alteración de la calidad del agua subterránea.**

El agua residual y residuos orgánicos generados en el proceso de extracción de aceite, pueden influir negativamente en la calidad del agua subterránea, producto de la descomposición orgánica de los residuos (Ávila y Sansores, 2003) y los rastros de aceite remanente influyen directamente en la DQO (Jiménez, 2012).

### **V. Contaminación del agua.**

La contaminación del agua es causada por la descarga de residuos, pesticidas, nitratos, fosfatos y plásticos. La descarga de estos elementos al agua, hacen que se generen problemas en la demanda química de oxígeno (DQO), entre estos problemas está el fenómeno de eutrofización (Cuie, Gutiérrez y Soto, 2012). La eutrofización es el agotamiento del oxígeno en el agua, teniendo como consecuencia que los organismos que lo necesitan empiezan a morir por la falta de este vital recurso (Cuevas, Franco y Manzano, 2010).

### **VI. Efecto invernadero.**

El dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ), el metano ( $\text{CH}_4$ ) y el óxido nitroso ( $\text{N}_2\text{O}$ ) son los responsables del efecto invernadero, estos gases son generados el uso excesivo y no controlado de los combustibles fósiles (Andrade, Arteaga y Segura, 2017).

## **VII. Alteración de la calidad de aire.**

La descomposición de los residuos orgánicos, generan gases de distinta naturaleza como el amoníaco ( $\text{NH}_3$ ), metano ( $\text{CH}_4$ ) y óxido nitroso ( $\text{N}_2\text{O}$ ), los cuales son emitidos a la atmosfera, afectando la calidad del aire (RETEMA, 2015).

## **VIII. Pérdida de vegetación.**

La pérdida de la vegetación marina es una de las consecuencias de la presencia de nitrógeno, fosforo y sales en el agua residual. La presencia de estos componentes provoca desequilibrios químicos en el agua como la eutrofización (exceso de nutrientes) y el fenómeno de reoligotrofización (escases de nutrientes) teniendo múltiples consecuencias, pero en especial provocando la pérdida de la vegetación marina y afectando el tamaño y profundidad de los ríos y océanos (RETEMA, 2019)

## **IX. Cambios de dinámica en la fauna.**

La contaminación en general afecta la dinámica poblacional en los animales, por lo que muchas especies se ven obligadas a cambiar la interacción con el medio ambiente. Una mala disposición de residuos como papel y plástico o una mala disposición de las aguas residuales contribuyen a alterar la calidad de los ecosistemas y el hábitat de los animales.

## **X. Agotamiento de los recursos.**

El aguacate como materia prima se clasifica como un recurso renovable, sin embargo, el suelo que se utiliza para la siembra pierde sus nutrientes por el uso frecuente de la siembra, por lo cual, este se debe recuperar de 2 a 3 años para volver a ser una tierra fértil. Las consecuencias negativas al no cuidar este recurso es que

de ser una tierra cultivable se puede convierte solo en un área de pastoreo. (Ibarra y Rojas, 2003).

Por otro lado, el consumo de combustible se considera dentro del agotamiento de los recursos debido a que no puede ser regenerado en un corto plazo de tiempo. En el caso del agua es un recurso natural no renovable cuando su ciclo natural es interferido por cualquier tipo de contaminación (Vargas, 2010).

## **XI. Salud y seguridad social.**

La exposición del ruido en el lugar de trabajo disminuye la coordinación y la concentración, lo cual aumenta la posibilidad de que se produzcan accidentes, además, los trabajadores pueden presentar nerviosismo, insomnio y fatiga (CEPRIT, 2014).

### **4.4.3 Evaluación de Impactos Ambientales generados en el proceso de extracción de aceite de aguacate.**

Para la evaluación de los impactos ambientales se utilizó el método de criterios relevantes integrados (CRI), el cual se divide en dos fases, la primera fase es la evaluación de la magnitud del impacto y la segunda fase es la determinación del valor del índice ambiental (VIA), en donde se evalúa la magnitud, reversibilidad y el riesgo que presenta el impacto al medio ambiente. El valor del índice ambiental (VIA) es el que determina la significancia y la categoría en el que se clasifica el impacto y dependiendo de la categoría en la que se encuentra así serán las medidas ambientales que se deben aplicar.

La evaluación de impactos ambientales del proceso de extracción de aceite de aguacate se presenta en la Tabla 4.36 y el ejemplo de cálculo del factor suelo, en relación al impacto en la alteración de la calidad se muestra en el Anexo D.



**Tabla 4.36** Evaluación de impactos ambientales por el método CRI.

FACTOR	IMPACTO	INTENSIDAD	EXTENSIÓN	DURACIÓN	MAGNITUD	REVERSIBILIDAD	RIESGO	VIA	SIGNIFICANCIA	CATEGORÍA
Suelo	Alteración de la calidad	9	5	5	6.6	5	10	6.66	Alto	II
	Contaminación del suelo	8	5	5	6.2	5	5	5.70	Moderado	III
Agua	Alteración de la calidad del agua superficial	9	10	5	8.6	5	10	7.83	Alto	II
	Alteración de la calidad del agua subterránea	6	10	5	7.4	5	2	5.34	Moderado	III
	Contaminación	8	10	5	8.2	5	2	5.79	Moderado	III
Aire	Efecto invernadero	8	5	2	5.6	5	5	5.35	Moderado	III
	Alteración de la calidad	5	5	2	6.4	2	5	3.78	Bajo	IV
Flora	Perdida de la vegetación	3	5	2	3.6	2	2	2.86	Bajo	IV
Fauna	Cambio de dinámicas	3	5	2	3.6	2	2	2.86	Bajo	IV
Recursos naturales	Agotamiento	5	5	5	5	5	5	5	Moderado	III
Social	Salud y seguridad	4	2	2	2.8	2	2	2.46	Bajo	IV

#### 4.4.3.1 Análisis de resultados de la evaluación de impactos ambientales.

En la Tabla 4.37 se presenta los resultados obtenidos de la evaluación de los impactos ambientales para el proceso de producción de aceite de aguacate.

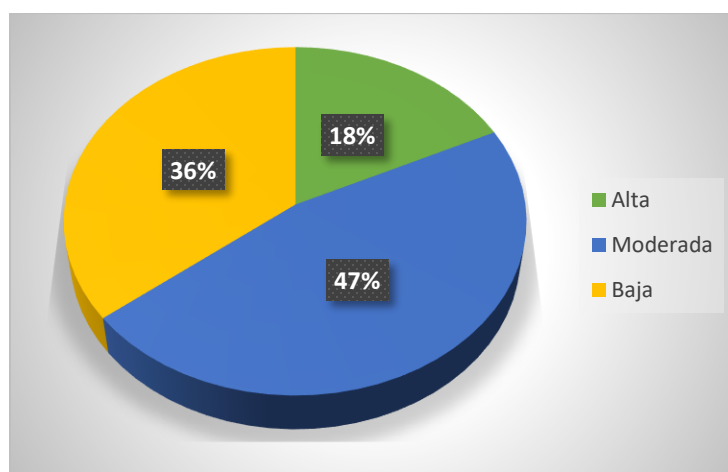
**Tabla 4.37** Resultados de la evaluación de los impactos ambientales.

CATEGORÍA	SIGNIFICANCIA	IMPACTO	ASPECTO
II	Alta.	Alteración de calidad del suelo	Generación de residuos (cáscara, semilla, piel, pulpa y lodos), agua residual, papel y plástico.
		Alteración de la calidad del agua superficial.	
III	Moderada.	Contaminación del suelo.	Generación de residuos (semilla, cáscara, piel, pulpa y lodos), agua residual, papel y plástico.
		Alteración de la calidad del agua subterránea.	
		Contaminación del agua	Consumo de materia prima, agua, energía eléctrica, plástico, papel y combustible.
		Efecto invernadero.	
		Agotamiento de los recursos naturales.	
IV	Baja.	Alteración de la calidad del aire.	Generación de agua residual, residuos (papel y plástico) y ruido generado por el equipo utilizado para la transformación de la materia prima.
		Pérdida de la vegetación.	
		Cambio de dinámicas en la fauna.	
		Salud y seguridad social.	

En base a los resultados de la evaluación (véase Tabla 4.37) se puede concluir que el proceso genera mayores impactos ambientales en las etapas de lavado y desinfección, despulpado, centrifugado y purificación. Los impactos que presentan una

mayor valoración son los que se generan por el vertido de aguas residuales en la etapa de lavado y desinfección, los residuos en la etapa de despulpado, la generación de residuos en forma de lodos y el agua residual en la etapa de centrifugación y purificación.

En la Figura 4.26 se presentan los resultados de la evaluación de los impactos ambientales (véase Tabla 4.36), en la cual se puede observar que los impactos con una significancia moderada representan el 47%, siendo el resultado con mayor puntuación, seguidamente los impactos con una significancia baja representan un 36% y los impactos con una significancia alta representan el 18%. Sumando los porcentajes de la significancia baja con la moderada, se tiene un resultado del 83%, lo que significa que el proceso de producción de aceite de aguacate está diseñado tomando en cuenta los criterios de sostenibilidad y contribuyendo a los Objetivos de Desarrollo Sostenible. Sin embargo, ya que el 18% de los impactos están catalogados con una significancia alta y el 45% presentan una significancia moderada, requieren de atención, es decir, de hacer uso de estrategias o medidas de manejo ambiental que minimicen o prevengan el daño medioambiental.



**Figura 4.26 Gráfico de porcentajes de los diferentes niveles de significancia en la evaluación de impactos ambientales.**

#### **4.5 MEDIDAS DE MANEJO AMBIENTAL PARA CONTRIBUIR A LA SOSTENIBILIDAD DEL PROCESO.**

Para que un proceso industrial sea sostenible es importante implementar medidas de manejo ambiental que mejoren los procesos productivos. Estas medidas se establecen con el fin de anular, atenuar, evitar, corregir o compensar los efectos negativos que las acciones derivadas del proceso de extracción de aceite producen sobre el medio ambiente.

En la Figura 4.27 se resumen de manera general los aspectos ambientales relacionados al proceso de extracción de aceite de aguacate. Cabe destacar que los criterios de sostenibilidad a aplicar están relacionados con la minimización en la generación de residuos, aplicación de procesos que eviten el uso de sustancias tóxicas, el control y prevención de la contaminación, reutilización, reciclaje o rechazo del residuo final y la implementación de medidas para cerrar los ciclos de materia y energía. Para el caso de las medidas de manejo ambiental estas pueden ser, obligatorias, estar en fase de investigación o ser una propuesta factible de aplicar.

- I. Obligatoria. Esta medida como la misma palabra lo dice, es de carácter obligatorio, es decir que cualquier corriente de salida del proceso debe ser tratada o darle una disposición final adecuada para cumplir con la reglamentación vigente y evitar la contaminación.
- II. Fase de investigación. Las medidas que entran en esta categoría son aquellas que requieren de estudios más profundos con los cuales se logre identificar todas las variables involucradas y así determinar la viabilidad de la misma.
- III. Propuesta. Las medidas que se dan como una propuesta son aquellas que tienen un potencial más alto de aplicación ya que hay estudios que las respaldan, siendo un punto de partida para ser desarrolladas y aplicadas al proceso.

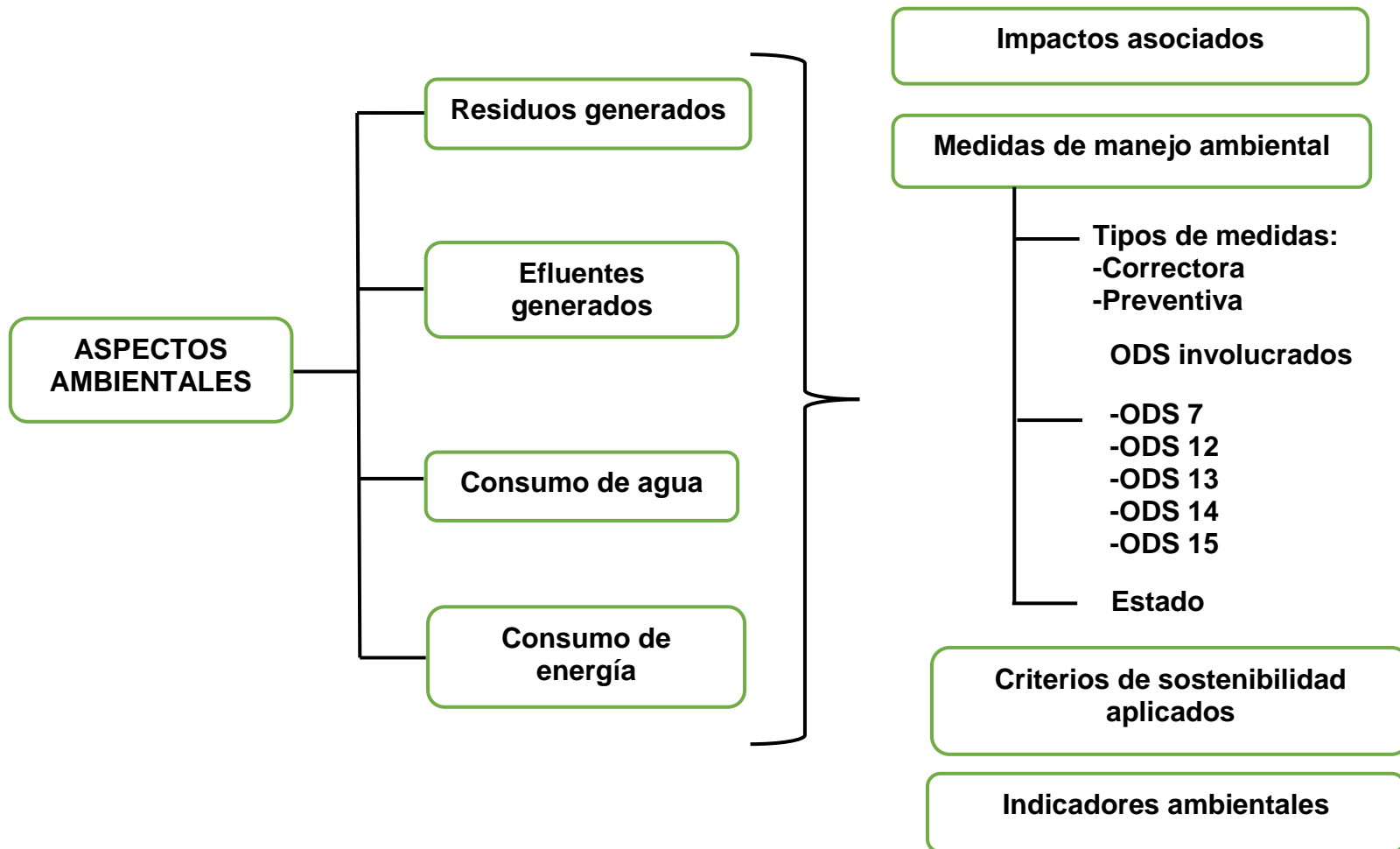
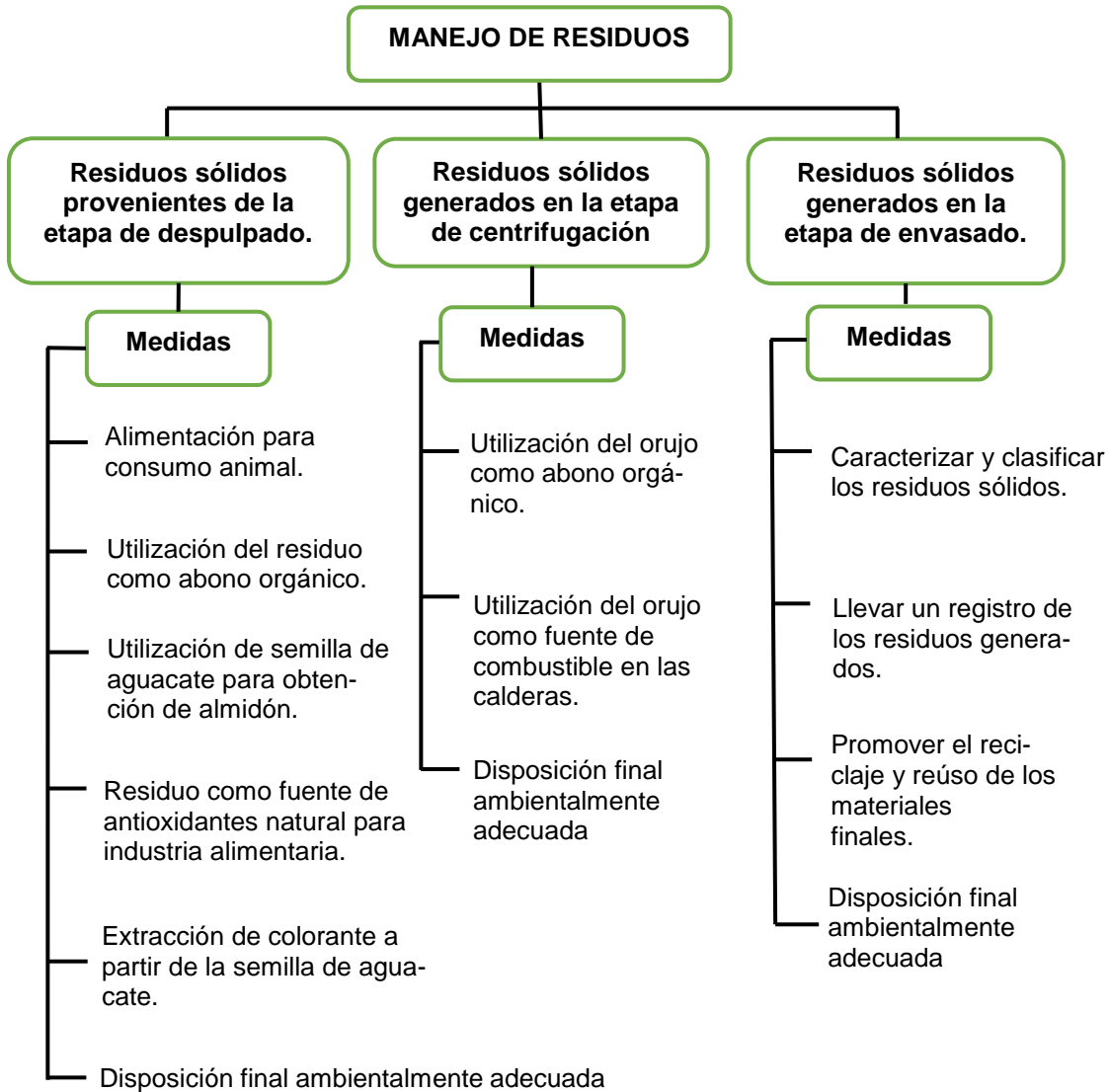


Figura 4.27 Resumen general de los aspectos ambientales relacionados al proceso de extracción aceite de aguacate.

### 4.5.1. Manejo de residuos.

En el proceso de extracción se dan tres tipos de residuos, los provenientes de la etapa de despulpado, los provenientes de la etapa de centrifugación y los residuos de la etapa de envasado, describiéndose para cada uno de ellos las medidas de manejo ambiental (véase Figura 4.28).



**Figura 4.28 Diagrama general de los residuos sólidos generados en el proceso y las medidas de manejo ambiental.**

## I. Residuos sólidos provenientes de la etapa de despulpado.

Estos residuos que son la cáscara y la semilla del aguacate, presentan en su mayoría humedad, también componentes como fibra, nitrógeno, proteínas, hierro, y en menores cantidades presentan fósforo, magnesio, potasio, zinc y cobre. (Ceballos y Montoya, 2013). En la Tabla 4.38 se muestran el resumen de los impactos, medidas de manejo ambiental, el estado de la medida con respecto a su implementación y los criterios de sostenibilidad asociados a los sólidos provenientes de la etapa de despulpado. Según el balance de masa se tiene que por 110.96 kg/h de aceite producido, se obtiene una cantidad de 306 kg/h de residuos.

**Tabla 4.38** Impactos, medidas de manejo y criterios de sostenibilidad asociados a los desechos generados en la etapa de despulpado.

<b>IMPACTOS ASOCIADOS</b>			
I. Alteración de la calidad del suelo.			
II. Alteración de la calidad del agua superficial.			
<b>MEDIDA DE MANEJO</b>	<b>TIPO</b>	<b>ESTADO</b>	<b>ODS</b>
Alimentación para consumo animal.	Correctora.	En fase de investigación.	12 y 15
Utilización de los residuos como abono orgánico.	Correctora.	En fase de investigación.	
Utilización de la semilla de aguacate para la extracción de almidón.	Correctora.	Propuesta.	
Residuos como fuente de antioxidantes naturales para la industria alimentaria.	Correctora.	En fase de investigación.	
Extracción de colorante a partir de la semilla de aguacate.	Correctora.	Propuesta.	
Disposición final.			
<b>CRITERIOS DE SOSTENIBILIDAD APLICADOS</b>			
Reutilización de residuo final.			
Aplicar procesos que eviten el uso de sustancias tóxicas.			
Control y prevención de la contaminación.			

Las medidas ambientales presentadas en la Tabla 4.38 son de tipo correctora, ya que son medidas implementadas a un residuo que es inevitable que se genere. Estas medidas van enfocadas a tratar de corregir el impacto ambiental que se genera y están relacionadas a la prevención de la contaminación de los ecosistemas terrestres a través de los diferentes sistemas de restauración del suelo (ODS 15). Así mismo, contribuyen a una producción responsable a través del reciclaje y reutilización de los residuos generados (ODS 12).

#### **A. Descripción de las medidas de manejo ambiental.**

**Alimento para consumo animal.** De una manera general se debe recoger los residuos procedentes de la fase de preparación de la materia prima para su acondicionamiento (secado) y reprocesamiento (molturación) para la obtención del subproducto, al cual se le debe evaluar el grado de toxicidad. La cáscara de aguacate Hass puede considerarse como una fuente alternativa de nutrientes, sugiriendo su uso en la alimentación, principalmente por su composición en minerales. Los estudios realizados en este sentido han sido enfocados en determinar el potencial de los desechos del aguacate (principalmente la pulpa fresca) como alimento en cerdos. Por tanto, la implementación de esta medida requiere una mayor investigación para conocer la factibilidad de utilizar los desechos del despulpado (semilla, cáscara y aguacate no apto para el proceso) para la alimentación en animales.

**Utilización de los residuos como abono orgánico.** Gonzales et al. (2013) en su estudio evaluó el compostaje de los residuos (semilla, cáscara y aguacate de mala calidad) con otros dos materiales fácilmente disponibles, restos de poda de jardín, como estructurante, y gallinaza, como fuente de nitrógeno, y se evaluó la calidad del compost obtenido. Los compost obtenidos en las diferentes mezclas con restos de poda y gallinaza, presentaron, en general, un nivel de calidad medio-alto, con un buen resultado para usarse como sustrato en viveros y plantaciones de aguacate.



En el caso de usarse como sustrato, podría ser recomendable su mezcla con materiales ácidos que compensen su pH alcalino.

Cabe destacar que esta medida todavía esta es una fase de investigación, teniendo en cuenta que para su implementación se necesita realizar un estudio a profundidad para evaluar si los residuos necesitan algún pretratamiento antes de ser utilizado como abono o si es factible su uso directo en el suelo, además, también se sugiere que en el estudio se evalúe que tipo de suelo es el más adecuado para el tipo de abono elaborado.

**Utilización de la semilla de aguacate para la extracción de almidón.** La importancia de la semilla está relacionada con su contenido en almidón, que es alrededor del 60 al 70%. Cárdenas, Correas, Guancha y Vallencilla, 2019 plantearon en su estudio el aprovechamiento de la semilla de aguacate variedad Hass para la extracción de almidón, para ello lavaron las semillas y las cortaron en cubos de aproximadamente 1 cm. A la muestra se le adicionó NaOH al 5% en relación 1:20 y se dejó en agitación durante 24 horas a 500 rpm. A continuación, las muestras se lavaron con agua destilada hasta que las aguas de lavado tuvieran pH neutro. Las muestras obtenidas se trataron con metabisulfito de sodio al 0.2% y relación 1:20 por 24 horas y la mezcla obtenida se pasó por un procesador de alimentos para reducir el tamaño de partícula. La muestra final se agitó en Ultra-Turrax por 30 minutos a 10000 rpm. Seguidamente, la muestra se filtró en un tamiz de 150 micras. El filtrado obtenido se dejó precipitar por gravedad y se eliminó el sobrenadante. Los lavados se realizaron hasta verificar la eliminación de la coloración marrón de las aguas de lavado. El precipitado final se secó a 50 °C (323.15 K) hasta peso constante (véase Anexo E). Los resultados parciales indicaron que se puede extraer almidón a partir de residuos de semillas de aguacate. El rendimiento de almidón fue del 4.5% (en peso húmedo).

Para que esta propuesta sea factible se debe realizar investigaciones enfocadas a la optimización del proceso de extracción para mejorar el rendimiento y la caracterización fisicoquímica como: viscosidad, índice de solubilidad en agua, microscopía electrónica de barrido y análisis de grupos funcionales.

**Residuos como fuentes de antioxidantes naturales para aplicación en la industria alimentaria.** La cáscara de aguacate Hass puede considerarse como una fuente alternativa de nutrientes, sugiriendo su uso en la alimentación, principalmente por su composición en minerales. Sin embargo, aún son necesarios estudios de factores antinutricionales y evaluación de productos en forma de harina. Ya que la piel y la semilla presentan una mayor actividad antioxidante en relación a la pulpa del aguacate Hass, se sugiere el uso de estos dos residuos como fuentes de antioxidantes naturales para la aplicación en la industria alimentaria como una alternativa a los antioxidantes sintéticos (Daiutu et al., 2014).

**Extracción de colorante a partir de la semilla de aguacate.** Devia y Saldarriaga (2004) plantearon en su estudio la extracción de colorante a partir de la semilla del aguacate. Debido a que el pigmento presente en la semilla es la antocianina, este se puede extraer empleando métodos fisicoquímicos, como el método de lixiviación (véase Anexo F).

La metodología desarrollada por Devia y Saldarriaga (2004) para extraer el colorante consiste en una masa de 12.5 g de semilla de aguacate, la cual se pone en contacto con un volumen de solvente de hidróxido de sodio (NaOH) a 0.5%. La solución debe permanecer en una fuente de calor por un tiempo de 60 minutos a una temperatura de 75 °C (348.15 K) y con una agitación constante. Seguidamente se filtra la solución coloreada obtenida, teniendo como resultado el colorante de la semilla de aguacate.

Con el colorante obtenido se puede realizar el teñido en la fibra de algodón. La metodología consiste en agregar la tela de algodón junto con el colorante en un recipiente, la mezcla se debe realizar a una temperatura de 30°C (303.15 K), a la cual se le debe agregar 2 g de cloruro de estaño o alumbre potásico, ya que estos cumplen la función de mordientes, es decir, de fijadores de color en la fibra textil. La mezcla se debe llevar a una temperatura de 60°C (333.15 K) y posteriormente dejar reposar la tela por un tiempo 30 minutos en constante agitación. Seguidamente se retira la fibra textil de la mezcla, se deja secar y se lava para eliminar impurezas. Teniendo como resultado una fibra textil teñida con colorante extraído de la semilla de aguacate.

Esta medida al implementarse podría tener potencial no solo a nivel ambiental, sino también a nivel social, ya que puede ser fuente de trabajo para comunidades rurales. La mejor forma de llevar a cabo la labor sería trabajar con las alcaldías, para que a través de esta entidad se les pueda proporcionar las semillas como fuente de materia prima, implementando talleres de cómo llevar a cabo el proceso de extracción del colorante y los procesos de teñido en fibra de algodón.

**Disposición final:** La disposición final de los residuos sólidos generados en el proceso debe ir enfocada a la reducción de la contaminación ambiental, más específicamente de los factores suelo y agua, que son los principalmente afectados al no disponer de una forma adecuada de los desechos que se generan en el proceso. La disposición final de los residuos se puede realizar a través de instituciones gubernamentales tales como: Ministerio de Medio Ambiente y Recursos Naturales (MARN) o por medio de la alcaldía municipal, del departamento o municipio donde este instala la planta procesadora. Además, se puede dar una disposición final a través de empresas que se encargan de darle un tratamiento adecuado tales como: Geo Protection Energy, GEOCYCLE, EL SALVADOR, SA. DE C.V y OPERADORA DE LA SIERRA, S.A. DE C.V, entre otras.

## **II. Residuos generados en forma de lodos en la etapa de centrifugación.**

Este tipo de residuo (orujo) posee un alto contenido de humedad y sólidos. En este residuo también queda parte del aceite que no se logra separar. Al igual que el orujo de aceite de oliva, el orujo de aceite de aguacate puede generar contaminación sino se le da una disposición final adecuada. En el caso del orujo de oliva la aplicación directa en el suelo modifica las propiedades fisicoquímicas y biológicas del terreno provocando un aumento en el contenido de potasio, carbono orgánico, fósforo, nitrógeno orgánico y pH del suelo. Asimismo, sus altos niveles de fenoles pueden originar síntomas de fitotoxicidad en los cultivos (Gómez y Rubio, 2016). En base al aceite de oliva se puede decir que el orujo de aguacate puede presentar los mismos problemas medioambientales, por lo que se vuelve necesario implementar o alternativas de tratamiento y aprovechamiento (véase Tabla 4.39) para contribuir a la sostenibilidad ambiental del proceso.

En general la Tabla 4.39 presentan las medidas de manejo ambiental las cuales son de tipo correctora, ya que el orujo debido a sus propiedades orgánicas permite una disposición responsable (ODS 12) al utilizarse como fuente de materia prima en otra unidad de producción. Así mismo estas medidas tienen como objetivo evitar la degradación de los ecosistemas terrestres (ODS 15) cuando se le agrega una utilidad al desecho en lugar de descartarlo. Además, utilizar el orujo como una fuente de combustible contribuye a reducir la huella de carbono con la generación de combustibles limpios y seguros (ODS 7), contribuyendo a la prevención del cambio climático (ODS 13).

**Tabla 4.39.** Impactos, medidas de manejo, criterios de sostenibilidad e indicadores asociados a los lodos generados en la etapa de centrifugación.

<b>IMPACTOS ASOCIADOS</b>			
I. Alteración de la calidad del suelo.			
II. Contaminación del suelo.			
III. Alteración de la calidad del agua superficial.			
IV. Contaminación del agua.			
V. Alteración de la calidad del agua.			
<b>MEDIDA DE MANEJO</b>	<b>TIPO</b>	<b>ESTADO</b>	<b>ODS</b>
Utilización del orujo como abono orgánico.	Correctora.	Propuesta.	12 y 15
Utilización del orujo como fuente de combustible en calderas.	Correctora.	En fase de investigación.	7 y 13
Disposición final.			
<b>CRITERIOS DE SOSTENIBILIDAD APLICADOS</b>			
Reutilización de residuo final.			
Control de la contaminación.			

#### **A. Descripción de las medidas de manejo ambiental.**

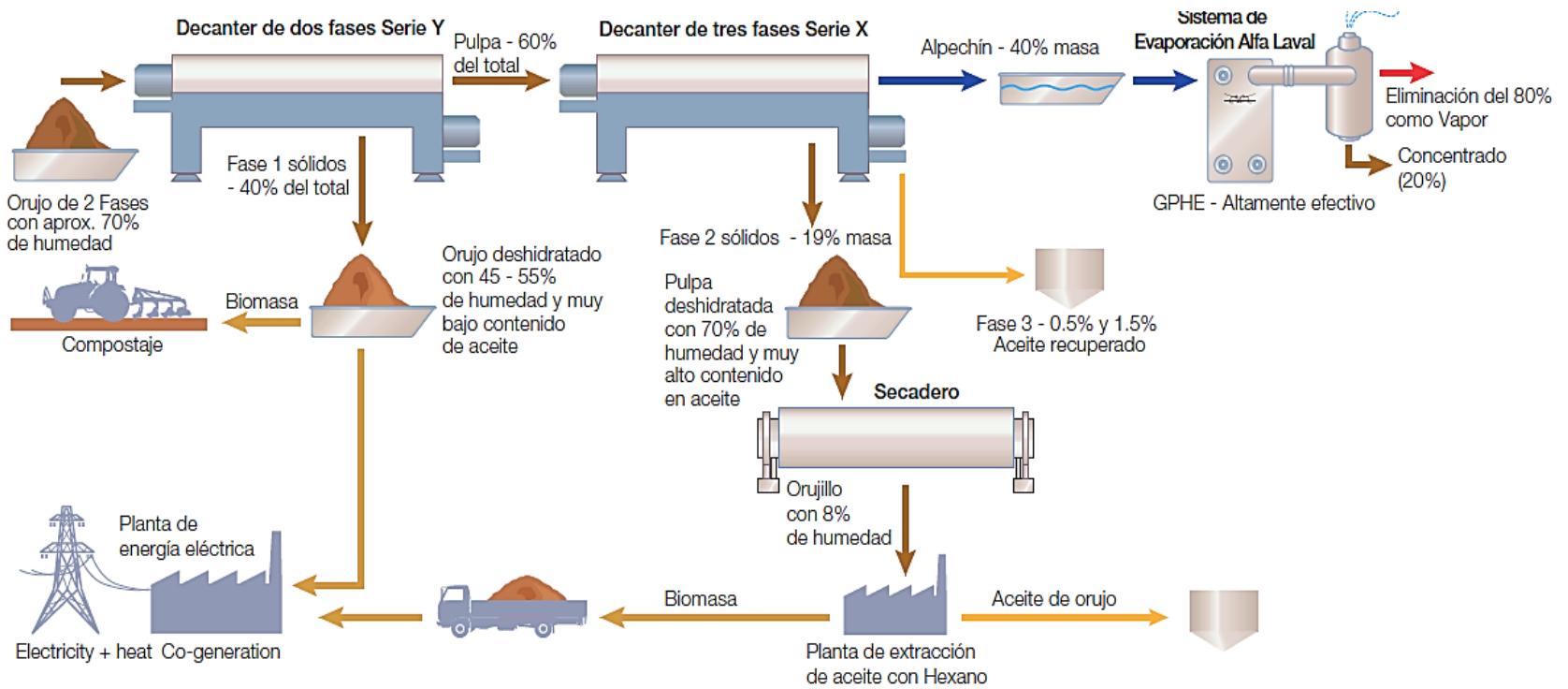
**Utilización del orujo como abono orgánico.** Debido a que la aplicación directa al suelo como abono implica contaminación, resulta de mayor interés utilizar el residuo previamente compostado, es decir, aportar un material estructurante que optimice su manejabilidad, favoreciendo el secado y aireación del producto (Gómez et al., 2016). Al igual que los residuos generados en la etapa de despulpado, es necesario en este caso evaluar los nutrientes de los desechos, teniendo en cuenta el procesamiento a llevar a cabo para convertirlo en un compost con todas las características necesarias para que funcione como abono orgánico.

**Utilización del orujo como fuente de combustible en calderas.** Para que el orujo tenga las condiciones óptimas para ser utilizado como combustible, se debe hacer pasar por una centrifugación para separar el máximo de aceite que posee y debe tener una humedad aproximada del 40%, lo que requiere de un proceso de secado. (Gómez et al., 2016).

Tanto la utilización del orujo para abono orgánico, como su utilización para combustible necesitan de la extracción del aceite que ha quedado en esta fase, lo que es ventajoso ya que se logra un mayor rendimiento de extracción del proceso. Esta medida todavía se encuentra en fase de investigación, dado que se necesita realizar más estudios para conocer el poder calórico del orujo de aguacate, de igual forma se necesita diseñar el proceso para pasar de un orujo húmedo a un orujo apto para ser utilizado como combustible.

**Disposición final:** El residuo generado en esta etapa posee alto contenido de humedad y sólidos, por lo que no se puede descargar directamente al cuerpo receptor. Para descargar y tratar este tipo de residuos se debe realizarse a través empresas autorizadas por el Ministerio de Medio Ambiente y Recursos Naturales que realizan una disposición final adecuada. Las empresas autorizadas para el manejo de este tipo de sólidos son: GEOCYCLE, EL SALVADOR, SA. DE C.V, OPERADORA DE LA SIERRA, S.A. DE C.V, entre otras.

La empresa Alfa Laval en su catálogo de soluciones a problemas de ingeniería, da una propuesta de tratamiento a los lodos que salen de la etapa de centrifugación, la cual se esquematiza en la Figura 4.29.



**Figura 4.29 Proceso de re-triturado en cuatro fases de Alfa Laval para el tratamiento de orujo de aceite.**

Fuente: (Alfa Laval, 2014).

Según la Figura 4.29 el primer paso Alfa Laval sugiere la utilización de un decantador centrífugo de dos fases para quitarle la humedad al orujo, mismo que se convierte en biomasa para ser utilizado como compostaje o ser utilizado para la cogeneración de energía eléctrica. La fase acuosa que sale del decantador pasa a otro decantador, pero en este caso de tres fases (Tricanter), en esta etapa se obtiene: el aceite que había quedado en el orujo, una fase acuosa (alpechín) que se envía a un sistema de evaporación y por último una fase sólida que contiene pulpa deshidratada con un alto contenido de aceite que puede ser recuperado en una planta de extracción con hexano y la biomasa resultante puede incorporarse a un sistema de cogeneración de energía eléctrica.

### **III. Residuos sólidos generados en la etapa de envasado.**

Los residuos sólidos generados en esta etapa corresponden a residuos tipo plástico generados por envases de mala calidad o que se dañan en el proceso. El otro tipo de residuo es papel que puede generarse en el proceso de etiquetado. En la Tabla 4.40 se muestran las medidas de manejo y los criterios de sostenibilidad aplicados a los residuos que se generan en la etapa de envasado, estas medidas son de tipo correctoras y preventivas que reducen considerablemente la generación de desechos mediante actividades de prevención, reducción, reciclaje y reutilización, que es una de las metas del ODS 12 para lograr una producción responsable.



**Tabla 4.40** Impactos, medidas de manejo, criterios de sostenibilidad e indicadores asociados a los lodos generados en la etapa de envasado.

IMPACTOS ASOCIADOS			
I. Alteración de la calidad del suelo. II. Contaminación del suelo. III. Contaminación del agua. IV. Cambios en la dinámica de la fauna.			
MEDIDA DE MANEJO	TIPO	ESTADO	ODS
Caracterizar y clasificar los residuos sólidos para determinar usos y disposición final.	Correctora.	Obligatoria.	12
Promover el reciclaje, reúso y recuperación e incluir el material reutilizable a la cadena operativa.	Preventiva.	Obligatoria.	
Llevar un registro de residuos generados.	Preventiva.	Obligatoria.	
Disposición final.			
CRITERIOS DE SOSTENIBILIDAD APLICADOS			
Minimizar la producción de residuos.			
Prevención de la contaminación.			
Reciclar el residuo final.			

#### A. Descripción de las medidas de manejo ambiental.

**Caracterizar y clasificar los residuos sólidos para determinar usos y disposición final.** Todo proceso genera residuos de papel y plástico que se deben clasificar para determinar el tipo de disposición final se le puede dar. El Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial de Colombia, en el año 2004 en su guía ambiental de residuos plástico propone como tratar el residuo plástico y papel final. Esta propuesta consiste en seleccionar el tipo de residuo, es decir, si es plástico o papel, seguidamente verificar si este se le puede dar un nuevo uso dentro de la empresa o si es necesario descartarlo, en caso de que el descarte sea una opción

se debe realizar a través de una empresa recicladora. Esta medida es de carácter obligatoria y para implementarla se debe elaborar un plan de gestión medioambiental, con procedimientos detallados de la disposición final que se les darán a los residuos ya sea dentro o fuera de la planta.

**Promover el reciclaje, reúso y recuperación e incluir el material reutilizable a la cadena operativa.** El reciclaje permite disminuir costos de operación y ayuda a disminuir la contaminación, así mismo, el reúso de los materiales permite alargar la vida útil del mismo. Esta medida debe ser de carácter obligatorio, puesto que toda empresa debe estar comprometida con el buen manejo de los residuos finales.

**Llevar un registro de residuos generados.** Es importante llevar un registro de los residuos generados en el proceso de manera periódica. Se debe registrar la etapa que lo genera, la cantidad de residuo generado y el tipo de residuo. De manera preventiva esta medida permitirá llevar el control de los residuos generados y a partir de ello implementar mejoras en el proceso que reduzcan las pérdidas de material.

**Disposición final:** La disposición final de los residuos plásticos y papel debe estar bajo lo que establece la ley de gestión integral de residuos y fomento al reciclaje, el organismo regulador es el ministerio de medio ambiente y recursos naturales (MARN). La disposición final se debe realizar a través de entidades que se encarguen de disponerlos adecuadamente. En El Salvador las empresas a las que se puede recurrir para el plástico son: MA-QUIPLASTIC, AVANGARD, CHONSA PLÁSTICOS INDUSTRIAL, entre otras. Por otro lado, las empresas encargadas de darle una disposición final a los residuos de papel son: Alas Doradas, HISPALIA S.A. de C.V., CONAVE, entre otras.

#### 4.5.2 Manejo de efluentes.

En el proceso se generan tres tipos de efluentes, los cuales se muestran en la Figura 4.30, juntamente con las medidas de manejo ambiental que se pueden aplicar.

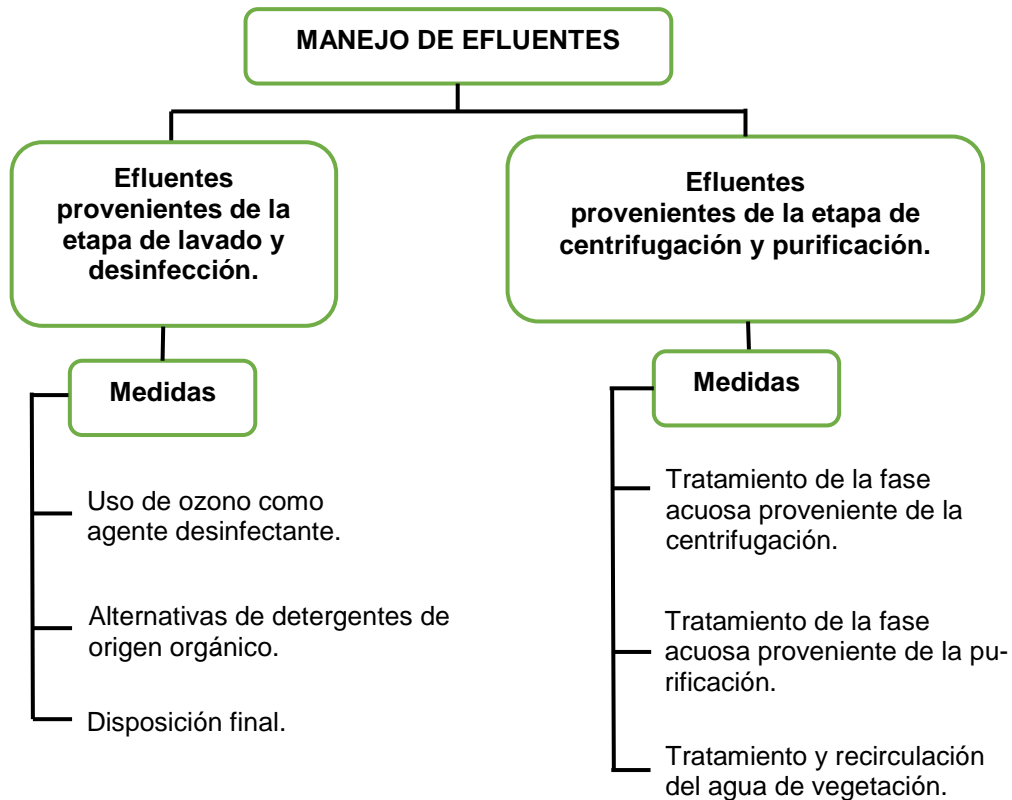


Figura 4.30 Diagrama general de los tipos de efluentes generados en el proceso.

##### I. Efluente proveniente de la etapa de lavado y desinfección.

Este efluente está compuesto por agua, hipoclorito de sodio y materia orgánica. Por lo tanto, se presenta alta demanda biológica (DBO) y química de oxígeno (DQO), así mismo, puede contener altas concentraciones de sólidos suspendidos, nitrógeno orgánico (proteínas y aminoácidos) y en menor medida concentración de residuos de plaguicidas proveniente de la etapa agrícola (Grupo banco mundial, 2015). Según el balance de masa para el proceso de lavado y desinfección, se

consume, tanto para el primer como segundo lavado, 250 L (0.25 m<sup>3</sup>) de agua, con 14.996 g de Hipoclorito de sodio (NaClO). La Tabla 4.41 detalla las medidas ambientales, el tipo de medida, los ODS y los criterios de sostenibilidad aplicados a los efluentes de la etapa de lavado y desinfección.

**Tabla 4.41** Impactos, medidas de manejo, criterios de sostenibilidad e indicadores asociados a los efluentes generados en la etapa de lavado y desinfección.

<b>IMPACTOS ASOCIADOS</b>			
I. Alteración de la calidad del agua superficial.			
II. Alteración de la calidad del agua subterránea.			
III. Contaminación del agua.			
<b>MEDIDA DE MANEJO</b>	<b>TIPO</b>	<b>ESTADO</b>	<b>ODS</b>
Uso de ozono como agente desinfectante.	Correctora.	Propuesta.	12 y 14
Alternativas de detergentes de origen orgánico.	Preventiva.	En fase de investigación	12
Disposición final.			
<b>CRITERIOS DE SOSTENIBILIDAD APLICADOS</b>			
Recirculación del agua.			
Aplicar procesos que eviten el uso de sustancias tóxicas.			

Las medidas presentadas en la Tabla 4.41 son de tipo correctoras y preventivas. Con la aplicación de estas medidas se está contribuyendo al consumo responsable del agua al cual hace referencia el ODS 12 cuando plantea las bases para desarrollar procesos de producción sostenibles. Así mismo evitar el uso de sustancias químicas en el proceso hace más fácil el tratamiento de los efluentes y por ende se hace más fácil disponer de ellas ya sea para descartarlas a un cuerpo receptor o para su reutilización en el proceso. Esta medida está estrechamente relacionada con el ODS 14, el cual está enfocado en la protección de la vida marina.

## **A. Descripción de las medidas de manejo ambiental.**

**Uso de ozono como agente desinfectante.** Un estudio realizado por Bustamante (2014), expone que el ozono juega un papel importante en el proceso de lavado no solo por su poder de desinfección (es un detergente de amplio espectro y reduce la carga microbiana en un 90%) sino porque permite reutilizar el agua del proceso, logrando ahorrar grandes volúmenes de la misma. Presenta ventajas sobre los limpiadores y desinfectantes tradicionales ya que se descompone rápidamente y no deja residuos tóxicos o indeseados, puede oxidar parcialmente la materia orgánica y las moléculas surfactantes presentes en las aguas de desecho de procesos de lavado, reduciendo su demanda química de oxígeno y facilitando su tratamiento biológico.

Esta medida es bastante factible y existen estudios sobre la implementación del ozono como desinfectante, con la desventaja que al ser corrosivo tiende a dañar los equipos.

**Alternativas de detergentes de origen orgánico.** Para el lavado y desinfección del fruto existen otras alternativas de detergentes que ayuda a la eliminación de agentes bacterianos. Generalitat de Catalunya (2015) en su guía de prácticas correctas de higiene para vegetales y derivados menciona algunos detergentes de origen orgánico para uso alternativo, tales como, ácidos orgánicos (láctico, cítrico, acético) y aceites esenciales de plantas (romero, tomillo, eucalipto). La ventaja de implementar estas alternativas es que no se necesita un tratamiento de aguas residuales exhaustivo antes de descargar el agua a un cuerpo receptor. Todas estas alternativas pretenden ser más amigables con el medio ambiente, contribuyendo así a la sostenibilidad del proceso. Sin embargo, cabe destacar que estos detergentes todavía están en fase de estudio pues no se ha probado su efectividad a nivel industrial.

**Disposición final.** El agua residual proveniente del lavado y desinfección puede ser descartada a un cuerpo receptor, para esto debe cumplirse el reglamento técnico salvadoreño RTS 13.05.01:18, el cual describe los parámetros máximos permisibles para su descarga (véase Anexo G). Para su tratamiento puede utilizarse filtros de arena para remoción del material orgánico y filtros de carbón activado para reducir la concentración de hipoclorito de sodio, además, se puede disponer de esta agua residual para uso en la planta, ya sea para lavado de sanitarios o limpieza de pisos debido a su concentración de hipoclorito de sodio, solo sería necesario remover su material orgánico.

## **II. Efluente proveniente de la etapa de centrifugación y purificación.**

El efluente proveniente de la centrifugación está compuesto por agua, sólidos y aceite. Por lo tanto, contiene alta demanda biológica (DBO) y química de oxígeno (DQO), con una alta concentración de sólidos suspendidos y nitrógeno orgánico (proteínas y aminoácidos) (Grupo banco mundial, 2015). Además, se encuentran presentes fenoles (oligómeros de procianidinas, catequina, epicatequina) en bajas concentraciones, estos provienen de los restos de los residuos sólidos de la pulpa de aguacate (Salmerón, 2014). El pH se encuentra entre un rango de 4 - 5.5 considerándolo como un efluente de carácter ácido (Loto, 2016).

En el Anexo B, del presente trabajo se muestra el balance de masa para el proceso de centrifugación (Tricanter), en el cual se detalla que para una cantidad de 110.96 kg/h de aceite producido se genera un efluente de 351.87 kg/h (Corriente Q), compuesto por 41.65 kg/h de aceite, 291.66 kg/h de agua y 18.56 kg/h de residuos sólidos.

La fase acuosa proveniente de la purificación presenta una mayor proporción de agua, con rastros de aceite y sólidos, que al igual que la fase acuosa producto de la centrifugación en el Tricanter, puede presentar bajas concentraciones de fenoles.

Según el balance de masa para la etapa de purificación el flujo másico de la fase acuosa (Corriente S) es de 10.17 kg/h del cual 2.26 kg/h es aceite, 0.57 kg/h son sólidos y 7.34 kg/h es agua.

La Tabla 4.42 muestra las medidas de manejo, el tipo de medida, los ODS y los criterios de sostenibilidad aplicado a la corriente de efluentes que salen de las etapas de centrifugación y purificación

**Tabla 4.42** Impactos, medidas de manejo, criterios de sostenibilidad e indicadores asociados a los efluentes generados en la etapa de centrifugación y purificación.

<b>IMPACTOS ASOCIADOS</b>			
I. Alteración de la calidad del agua superficial.			
II. Alteración de la calidad del agua subterránea.			
III. Contaminación del agua.			
IV. Alteración de la calidad del suelo.			
<b>MEDIDA DE MANEJO</b>	<b>TIPO</b>	<b>ESTADO</b>	<b>ODS</b>
Tratamiento de la fase acuosa proveniente de la centrifugación.	Correctora.	Propuesta.	12 y 14
Tratamiento de la fase acuosa proveniente de la purificación.	Correctora.	Propuesta.	
Tratamiento y recirculación del agua de vegetación.	Correctora.	Obligatoria.	
<b>CRITERIOS DE SOSTENIBILIDAD APLICADOS</b>			
Cerrar los ciclos de materia y energía.			
Control y prevención de la contaminación.			

Las medidas presentadas en la Tabla 4.42 son de tipo correctora, contribuyendo en gran medida al ODS 14, el cual está relacionado con la protección de los ecosistemas marinos y al ODS 12 que básicamente está ligado a una producción respon-

sable en donde el crecimiento económico no involucre la degradación medioambiental, aumentando la eficiencia de recursos, dando tratamiento y recirculando las aguas generadas.

#### **A. Descripción de las medidas de impacto ambiental.**

**Tratamiento de la fase acuosa proveniente de la centrifugación.** Para un mayor rendimiento de extracción de aceite y del aprovechamiento del efluente en el Tricanter, la empresa Alfa Laval (2014) en su catálogo de soluciones a problemas de ingeniería sugiere un tratamiento para la fase acuosa, para ello, se necesita una centrífuga concentradora, la cual tiene como función principal separar el aceite remanente del agua en esta corriente. El aceite recuperado de esta centrífuga concentradora es transportado a la centrífuga separadora donde se junta con la fase oleosa proveniente del Tricanter, todo esto para darle un proceso de refinado y obtener un mayor rendimiento de extracción de aceite.

**Tratamiento de la fase acuosa proveniente de la purificación.** La fase acuosa proveniente de la etapa de purificación (centrífuga separadora) todavía contiene cierta cantidad de aceite, por lo cual puede ser recirculada a la centrífuga concentradora para unirse con la fase acuosa proveniente del Tricanter y poder así cerrar los ciclos.

**Tratamiento y recirculación del agua de vegetación.** Gracias a la inclusión de la centrífuga concentradora y a la recirculación de la fase acuosa proveniente de la purificación, se cierran los ciclos y se obtiene solamente un efluente señalado como agua de vegetación, tal como se muestra en la Figura 4.26.

La investigación propuesta por Bonomie y Reyes (2012) para la eliminación de sólidos suspendidos, nitrógeno orgánico y fenoles, es a través del método de purificación del efluente por bacterias anaeróbicas.



Con base al plan de gestión ambiental de PALMA Y TRABAJO S.A.S. (2017), el sistema de tratamiento está compuesto de la siguiente manera:

- I. Laguna de enfriamiento. Es una laguna de homogenización de caudal, donde llega el agua de vegetación del proceso, su función es disminuir la temperatura del vertimiento líquido de la planta, que puede estar entre los 50°C (323.15 K) y 70°C (343.15 K), hasta temperaturas menores de 40°C (313.15 K).
  
- II. Lagunas anaeróbicas. En estas tres lagunas sucede la parte central del proceso de depuración realizado por bacterias en condiciones anaeróbicas y se da en dos fases; en la primera participan las bacterias anaeróbicas primero de tipo Hidrolíticas que por medio de sus enzimas extracelulares descomponen a moléculas más simples las moléculas de la materia orgánica presentes en el residuo líquido y luego las de tipo acidogénicas que intracelularmente actúan sobre las moléculas de la materia orgánica transformándolas en ácidos grasos volátiles, dióxido de carbono, sulfuros, amonios y material celular. En la segunda fase actúan el segundo grupo de bacterias que son de tipo acetogénicas y metanogénicas, sobre los ácidos orgánicos formando como productos intermedios acetato e hidrógeno y como productos finales metano y dióxido de carbono. Para ello es necesario que las condiciones ambientales en referencia a alcalinidad, pH y concentración de ácidos grasos volátiles sean favorables, para no producir ácido sulfúrico el cual genera malos olores, fenómeno que conlleva a la acidificación del sistema y por ende a la pérdida de la capacidad de remoción de la carga orgánica de los vertimientos.
  
- III. Laguna facultativa. Su función es culminar el proceso de digestión de la materia orgánica que se ha escapado de las lagunas anaeróbicas, donde no solo se hacen presente bacterias anaerobias, puesto que por las condiciones

ambientales que ofrece la laguna estas evolucionan a bacterias facultativas, también existe la presencia de algas y microorganismos protozoarios y dentro de los procesos que se gestan encontramos la oxidación, sedimentación, hidrólisis, nitrificación, digestión anaerobia y transferencia de oxígeno entre otros.

Del sistema de tratamiento se recogen periódicamente los lodos producidos por la descomposición de la materia orgánica y son enviados a los lechos de secado donde se produce biomasa que posteriormente se utiliza en los cultivos de aguacate como abono orgánico. Luego de haber pasado por el sistema de tratamiento, el agua está lista para ser incorporada nuevamente al proceso.

#### 4.5.3 Consumo de agua.

En el proceso se consume agua tanto en la etapa de lavado y desinfección como en la etapa de centrifugación (Tricanter). La Figura 4.31 esquematiza las etapas que generan consumo de agua y de forma general muestra las medidas propuesta en cada caso.

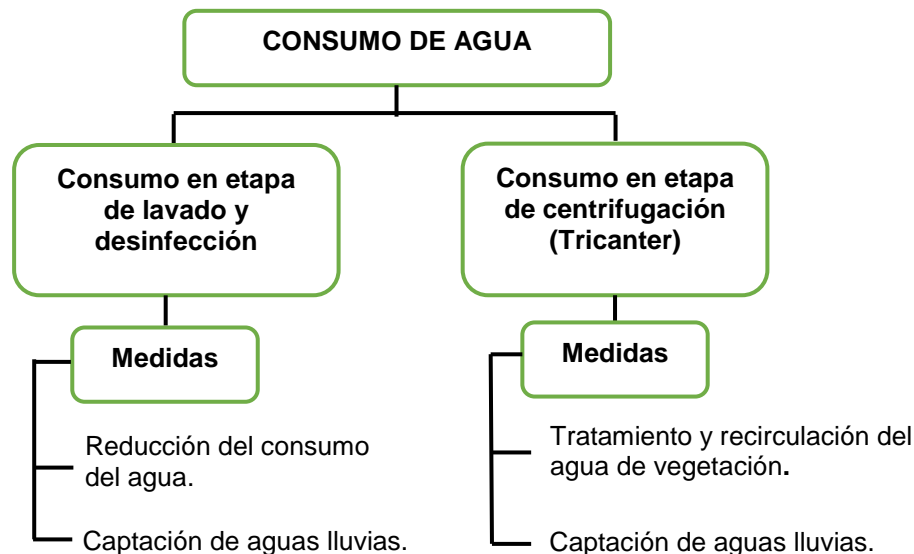


Figura 4.31 Diagrama general de las etapas que consumen agua en el proceso.

En la Tabla 4.43 se presentan las medidas para reducir el consumo de agua, juntamente con los criterios de sostenibilidad aplicados y los ODS a los cuales se contribuye.

**Tabla 4.43** Impactos, medidas de manejo, criterios de sostenibilidad e indicadores de agua del proceso.

<b>IMPACTOS ASOCIADOS</b>			
I. Agotamiento de recursos naturales.			
<b>MEDIDA DE MANEJO</b>	<b>TIPO</b>	<b>ESTADO</b>	<b>ODS</b>
Reducción del consumo de agua.	Preventiva.	Propuesta.	12
Tratamiento y recirculación del agua de vegetación.	Correctora.	Propuesta.	12 y 14
Captación de agua lluvia.	Preventiva.	En fase de Investigación.	12
<b>CRITERIOS DE SOSTENIBILIDAD APLICADOS</b>			
Cerrar los ciclos de materia y energía.			
Control y prevención de la contaminación.			

El consumo de agua es una de las problemáticas más frecuentes en este tipo de proceso, comenzando en la etapa de lavado del fruto en donde se consume según el balance propuesto 2.69 Kg de agua por 1 Kg de aceite producido. La otra etapa que requiere de una cantidad significativa de agua es la centrifugación en el Tricanter, consumiendo 2.89 kg de agua por 1 Kg aceite producido. La ventaja del sistema de lavado es que el agua se está recirculando por cierto tiempo lo que permite el ahorro del recurso.

Todas las medidas implementadas contribuyen de manera directa al ODS 12, el cual tiene como meta que los procesos sean responsables tanto a nivel social como ambiental. Así mismo darles tratamiento a las aguas residuales protege los ecosistemas marinos de la degradación por la mala disposición de los efluentes.

## **A. Descripción de las medidas de manejo ambiental.**

**Reducción del consumo de agua.** Rojas (2016), recomienda para los sistemas de lavado instalar sistemas de reducción de consumo de agua mediante el uso de boquillas de menor caudal con sistema de rodillo. El rodillo posee la capacidad de voltear la fruta, lo que permite un mayor contacto superficial, por lo tanto, el lavado y la desinfección son más eficientes sin necesidad de utilizar volúmenes grandes de agua.

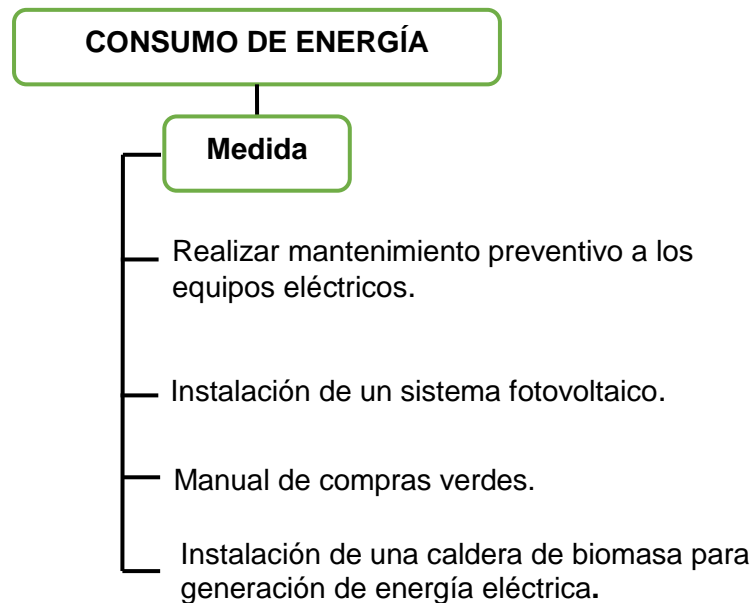
**Tratamiento y recirculación del agua de vegetación.** Como ya se ha explicado en la sección 1.5.2, apartado II, el agua de vegetación puede ser recirculada con previo tratamiento para utilizarse en la etapa de centrifugación (Tricanter), enviando el agua hacia la corriente que sale de termobatido para diluir la emulsión que va a ser centrifugada en el Tricanter, disminuyendo así el consumo de agua en esta etapa ya que se requerirá una cantidad menor de agua fresca.

**Captación de agua lluvia.** El Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (INTA) de la República Argentina ha investigado los sistemas de captación de agua de lluvia para consumo humano. El INTA presenta que el mejor sistema para captar y consumir agua lluvia está diseñado por un sistema compacto de prefiltrado, decantación, filtración, y desinfección (véase Anexo H), el sistema de prefiltrado está diseñado con mallas en su interior, el sistema de filtrado consiste en un decantador y su filtro es arena de mar, donde el agua pasa por los mismos, impidiendo el ingreso de tierra o de cualquier elemento que no se ha podido eliminar en el sistema de prefiltrado, y por último el proceso de desinfección se puede realizar a través de hipoclorito de sodio de grado comercial, el cual se debe agregar una gota por cada litro de agua lluvia filtrada (Basán, Sánchez, Tosolini, Tejerina y Jordan, 2018). Esta medida se debe acoplar y utilizar como una alternativa para minimizar el consumo de agua en el proceso de producción de aceite de aguacate, sin embargo, es necesario conocer los parámetros de calidad del agua que se necesita para el proceso con el fin de adecuar el tratamiento antes mencionado. La captación de agua en

época de lluvia es una alternativa sostenible para contribuir a una producción responsable.

#### 4.5.4 Consumo de energía eléctrica.

En la Figura 4.32 se muestran las medidas de manejo ambiental que se pueden aplicar para reducir el consumo de energía.



**Figura 4.32 Diagrama general de las medidas ambientales para el consumo de energía en el proceso**

Uno de los principales estándares de sostenibilidad, es el compromiso por controlar el consumo de energía de fuentes no renovables. Por tanto, es clave contar con un programa para el uso eficiente de la energía, con el monitoreo constante a través de indicadores ambientales.

La Tabla 4.44 se detallan los tipos de medidas tomadas, los ODS y los criterios sostenibilidad involucrados en el consumo de energía.

**Tabla 4.44** Impactos, medidas de manejo, criterios de sostenibilidad e indicadores ambientales asociados al consumo de energía del proceso.

<b>IMPACTOS ASOCIADOS</b>			
I. Consumo de energías no renovables.			
<b>MEDIDA DE MANEJO</b>	<b>TIPO</b>	<b>ESTADO</b>	<b>ODS</b>
Realizar mantenimiento preventivo a los equipos eléctricos para garantizar un uso eficiente con el máximo del aprovechamiento de energía.	Preventiva.	Obligatorio.	7 y 12
Instalación de un sistema solar fotovoltaico para ahorrar energía en las áreas de la planta de producción.	Preventiva.	Propuesta.	
Manual de compras verdes.	Preventiva.	Obligatorio.	
Instalación de una caldera de biomasa para generación de energía eléctrica.	Preventiva.	Propuesta.	
<b>CRITERIOS DE SOSTENIBILIDAD APLICADOS</b>			
Adoptar tecnologías más limpias y seguras.			
Minimización de requerimientos energéticos.			

Las medidas presentadas en la Tabla 4.44 son de tipo preventiva, puesto que tienen como objetivo evitar que el impacto se genere implementando acciones para prescindir de energía de fuentes no renovables. Estas medidas proponen alternativas más sostenibles de producción de energía que sea segura, limpia y de fuente de uso renovable (ODS 7), logrando así, disminuir el consumo de energía eléctrica abastecida por las compañías distribuidoras. También estas medidas contribuyen de manera general al ODS 12 al implementar actividades que contribuyen a una producción sostenible

## **A. Descripción de las medidas de manejo ambiental.**

**Realizar mantenimiento preventivo a los equipos eléctricos para garantizar un uso eficiente con el máximo del aprovechamiento de energía.** Identificar y monitorear aquellos puntos críticos del proceso con un alto consumo energético, e instalar instrumentos para visualizar el consumo, además, realizar monitoreo periódicamente (Optimagrid, s, f). Esta medida es de carácter obligatorio, ya que es responsabilidad de toda empresa velar por el buen funcionamiento de los equipos, para evitar posibles paros de líneas de producción y por consiguiente perder recursos y dinero.

**Instalación de un sistema solar fotovoltaico para ahorrar energía en las áreas de la planta de producción.** La energía solar fotovoltaica es una fuente de energía que produce electricidad de origen renovable, obtenida directamente a partir de la radiación solar. La implementación de un sistema fotovoltaico proporciona energía limpia y ecológica. Además, los costos de funcionamiento y mantenimiento del sistema fotovoltaico se consideran bajos, en comparación a otros sistemas de energía de fuentes renovables. (De telecomunicaciones, 2002).

Se recomienda, que la instalación de los paneles solares se realice en área expuestas al sol con un ángulo de inclinación de 30° para un óptimo aprovechamiento de la luz incidente de los rayos solares (Cervantes y Fernández, 2017).

En caso de implementar el proceso de producción de aceite, se recomienda que esta medida como una propuesta, evaluando el costo beneficio, si bien un sistema fotovoltaico contribuiría a la reducción en costos energéticos y a la sostenibilidad de una empresa, la inversión es costosa, además de evaluar si las instalaciones son adecuadas para instalar el sistema.

**Manual de compras verdes.** La Fundación Centro de Gestión Tecnológica e Informática Industrial (CEGESTI) es una fundación sin fines de lucro, dicha fundación propone un manual para la implementación de Compras Verdes en el cual establece

que una compra verde es una contratación que satisface las necesidades del comprador, pero sin descuidar el medio ambiente. CEGESTI señala que los beneficios de las compras verdes ayudan a disminuir los impactos ambientales e impulsa la innovación en productos y servicios que son más amigables con el ambiente (CEGESTI, 2008). Para la implementación de un manual de compras verdes se deben aplicar políticas que ayuden a establecer un compromiso de compra de materias primas de origen de fuentes renovables, pero que de alguna manera tenga responsabilidad con el medio ambiente, por ejemplo, establecer proveedores cerca de la zona de producción, que las plantaciones de donde proviene la materia prima utilicen sistemas que ayuden a disminuir el consumo de agua en su riego, por ejemplo tener sistema de riego adecuado, utilización de sistema de captación de agua lluvia, utilizar abono de origen orgánico, entre otras. Esta medida es de carácter obligatorio ya que la empresa debe tener el compromiso de obtener su principal materia prima con el cuidado de no explotar y desabastecer los cultivos.

### **Instalación de una caldera de biomasa para generación de energía eléctrica.**

Los sistemas de biomasa, ayudan a minimizar los gases de efecto invernadero, son una fuente renovable e inagotable de energía y su materia prima son los residuos.

Lalanne (s.f) en su estudio propone que el orujo proveniente del proceso de extracción de aceite de oliva sirve para la generación de la energía eléctrica y debido a la similitud de las propiedades del fruto del olivo con el aguacate, este sistema se puede implementar para el proceso de aceite de aguacate y el sistema cuenta con la recepción de la materia prima (orujo) y la parrilla para almacenar la biomasa, seguidamente se presenta la caldera que es la parte principal ya que en ella se lleva a cabo la generación de vapor, la caldera en su extremo inferior se le anexa un condensador el cual extrae el calor latente del agua de trabajo para volver a tener agua líquida y en su extremo superior se le anexa una turbina para poder aprovechar el trabajo mecánico, el trabajo mecánico realizado pasa a un generador eléctrico y este lo distribuye por toda la red eléctrica anexada a este sistema. El esquema del sistema se presenta en el Anexo I.



Esta propuesta puede ser acoplada al sistema de producción de aceite de aguacate, para generar energía limpia y contribuir a la disminución del impacto ambiental a través de la utilización energías de fuentes renovables (ODS 7) como energía solar, energía eólica o la bioenergía.

En general la implementación de las medidas ambientales mejora significativamente la sostenibilidad de un proceso y el estudio ambiental evidencia que, para poner en marcha el proyecto se debe tener en cuenta todos los posibles aspectos que contribuyan a generar impacto negativo hacia el medio ambiente.

#### **4.5.5 Análisis de las medidas propuestas en el proceso de extracción de aceite de aguacate.**

En general las medidas ambientales anteriormente planteadas son de tipo correctora, puesto que en la mayoría de los casos es inevitable que el aspecto ambiental se genere. El estudio realizado para dar solución a los impactos negativos más significativos del proyecto de extracción de aceite de aguacate arroja medidas como la reutilización de los residuos que se generan aplicando diferentes estrategias y la recirculación del agua para incorporarla al proceso o bien para el aprovechamiento en otras áreas de la planta, de modo que el consumo de agua se vea reducido contribuyendo a la sostenibilidad del proceso.

Las medidas ambientales como reutilización de residuos, tratamiento y recirculación de agua y corrientes a reproceso se muestran en la Figura 4.33.

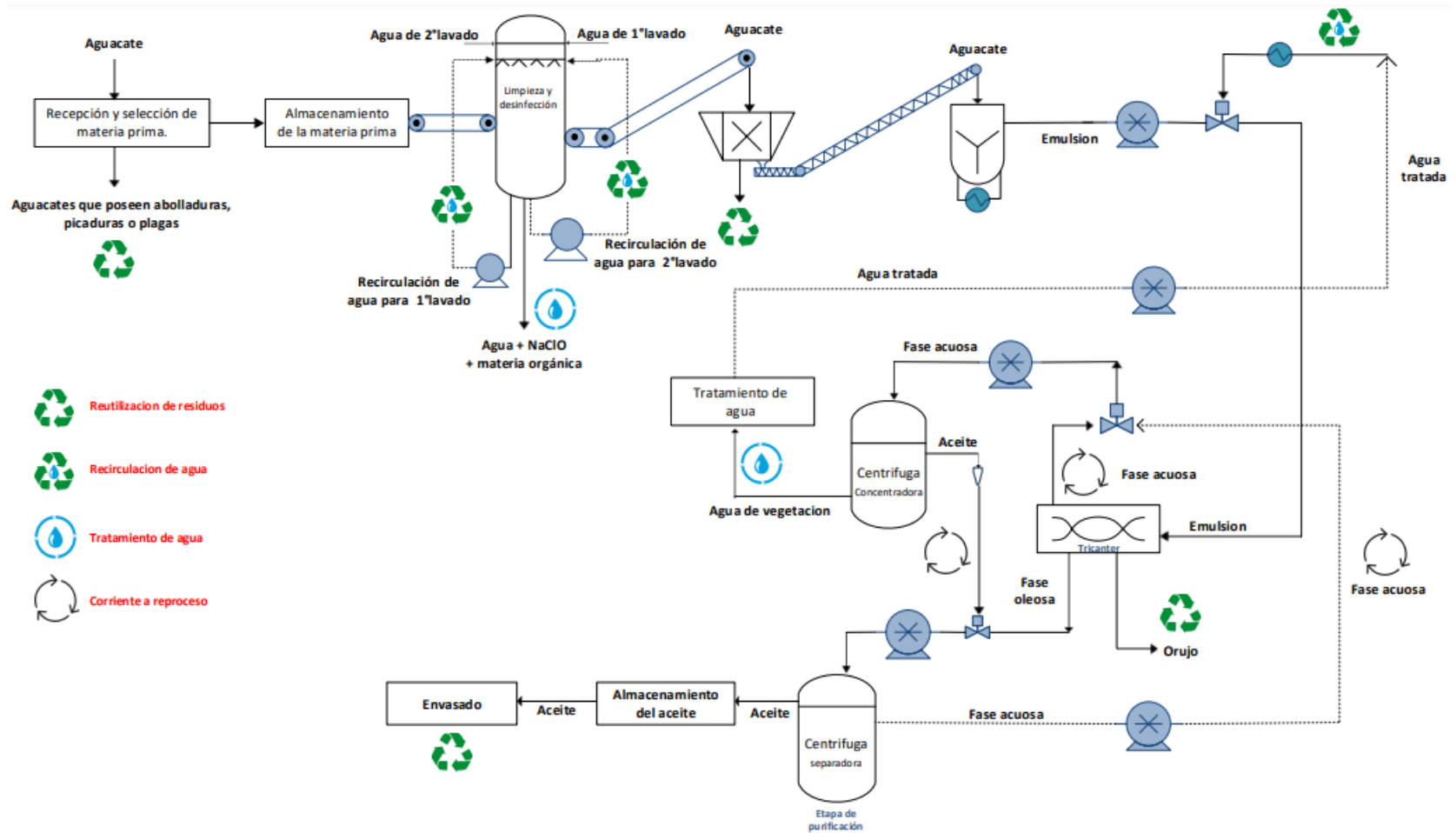


Figura 4.33 Diagrama de flujo del proceso de extracción de aceite de aguacate con recirculación de agua.

Como se muestra en la Figura 4.33, entre las medidas ambientales más factibles a implementar en el proceso se encuentra la reutilización de residuos, mientras que el tratamiento del agua es una medida de carácter obligatorio, ya que hay un reglamento salvadoreño que cumplir con respecto al manejo de las aguas residuales. Por otro lado, las medidas ambientales de “corriente a reproceso” y “recirculación de agua” deben ser evaluadas para su implementación por no ser tan factibles ya que requieren incluir ciertos equipos para realizar dicha operación, no obstante, es de vital importancia tomarlas en cuenta ya que con ello se reducen las corrientes de salida de aguas residuales a una sola o a cero salidas considerando la recirculación del agua tratada, contribuyendo así a la economía circular.

#### **4.5.6 Indicadores ambientales para la evaluación de las medidas propuestas.**

Los indicadores ambientales son parámetros empleados para evaluar el desempeño ambiental de los procesos productivos. Los indicadores del proceso de producción de aceite de aguacate están planteados en cuatro categorías, las cuales son: generación de residuos, generación de efluentes, consumo de agua y consumo energético.

Los indicadores para la evaluación de las medidas ambientales de las actividades del proceso de producción sostenible de aceite de aguacate para uso en la industria cosmética se detallan en la Tabla 4.45.

**Tabla 4.45** Indicadores para la evaluación de las medidas ambientales propuestas para el proceso de producción sostenible de aceite de aguacate.

ASPECTO	INDICADOR	FORMA DE CÁLCULO	VALOR
<b>GENERACION DE RESIDUOS</b>			
Residuos provenientes de la etapa de despulpado (cáscara y semilla).	Cantidad de residuos generados por cantidad de aceite producido.	$\frac{\text{Kg de residuos generados}}{\text{Kg de aceite producido}}$	2.75
	Porcentaje de residuos utilizados para la obtención de colorante.	$\frac{\text{Kg residuos generados para extraccion de colorante}}{\text{Kg de residuos generados al dia}} * 100$	25%
	Porcentaje de residuos destinados a abono orgánico.	$\frac{\text{Kg residuos destinados para abono orgánico}}{\text{Kg de residuos generados al dia}} * 100$	75%
Residuos provenientes de la etapa de centrifugación.	Cantidad de orujo generado por cantidad de aceite producido.	$\frac{\text{Kg de orujo generado}}{\text{Kg de aceite producido}}$	4.54
	Porcentaje de lodos destinados para abono orgánico.	$\frac{\text{Kg lodos destinados para abono orgánico}}{\text{Kg de lodos generados al dia}} * 100$	40%

Continúa...

**Tabla 4.45** Indicadores para la evaluación de las medidas ambientales propuestas para el proceso de producción sostenible de aceite de aguacate (Continuación).

ASPECTO	INDICADOR	FORMA DE CÁLCULO	VALOR
Residuos provenientes de la etapa de centrifugación.	Porcentaje de lodos destinados para combustible en caldera.	$\frac{\text{Kg de lodos destinados para combustible}}{\text{Kg de lodos generados al día}} * 100$	60%
Residuos generados en la etapa de envasado.	Porcentaje de residuos de empaque reciclados o reutilizados.	$\frac{\text{Kg de residuos reciclados o reutilizados}}{\text{Kg de residuos generados al día}} * 100$	-
<b>GENERACIÓN DE EFLUENTES</b>			
Efluentes del proceso de producción.	Cantidad total de aguas residuales generadas en el proceso por cantidad de aceite producido.	$\frac{\text{Kg de aguas residuales}}{\text{Kg de aceite producido}}$	6.30
	Porcentaje de agua residual de lavado y desinfección.	$\frac{\text{Kg de agua residual de lavado y desinfección}}{\text{Kg de aguas residuales del proceso}}$	42.75%
	Porcentaje de agua residual en la etapa de centrifugación.	$\frac{\text{Kg de agua residual en la etapa de centrifugación}}{\text{Kg de aguas residuales del proceso}}$	55.67%
	Porcentaje de agua residual en la etapa de purificación.	$\frac{\text{Kg de agua residual en la etapa de purificación}}{\text{Kg de aguas residuales del proceso}}$	1.58%

Continúa...

**Tabla 4.45** Indicadores ambientales para la evaluación de las medidas ambientales propuestas para el proceso de producción sostenible de aceite de aguacate (Continuación).

ASPECTO	INDICADOR	FORMA DE CÁLCULO	VALOR
<b>CONSUMO DE AGUA</b>			
Consumo de agua	Consumo de agua en la etapa de lavado y desinfección por cantidad de aceite producido.	$\frac{\text{Kg de agua consumidos en la etapa de lavado y desinfección}}{\text{Kg de aceite producido}}$	2.69
	Consumo de agua en la etapa de centrifugación por cantidad de aceite producido.	$\frac{\text{Kg de agua consumidos en la etapa de centrifugación}}{\text{Kg de aceite producido}}$	2.89
	Consumo de agua de todo el proceso por cantidad de aceite producido.	$\frac{\text{Kg de agua consumidos en todo el proceso}}{\text{Kg de aceite producido}}$	5.58
	Porcentaje de agua recirculada.	$\frac{\text{Kg de agua recirculada con previo tratamiento}}{\text{Kg de agua que ingresa en la etapa de centrifugación}}$	-
	Huella hídrica azul operacional.	$\frac{\text{metros cúbicos de agua consumida de ANDA}}{\text{Kg de aceite producido al año}}$	-
	Huella hídrica gris operacional.	$\frac{\text{metros cúbicos de agua contaminada}}{\text{Kg de aceite producido al año}}$	-

Continúa...

**Tabla 4.45** Indicadores ambientales para la evaluación de las medidas ambientales propuestas para el proceso de producción de aceite de aguacate (Continuación).

ASPECTO	INDICADOR	FORMA DE CÁLCULO	VALOR
<b>CONSUMO ENERGÉTICO</b>			
Consumo de energía.	Consumo de energía del proceso por cantidad de aceite producido.	$\frac{\text{kW consumidos al mes}}{\text{Kg de aceite producido}}$	-
	Huella de carbono.	$\frac{\text{Kg de dióxido de carbono equivalente}}{\text{Kg de aceite producido}}$	-

Los Indicadores ambientales presentados en la Tabla 4.45 son los parámetros empleados para evaluar el desempeño ambiental que tiene el proceso de producción de aceite de aguacate. Estos indicadores permitirán mantener controlado el proceso, así mismo, contribuyen a minimizar los riesgos asociados a los aspectos ambientales significativos identificados en el presente capítulo, sección 4.4.1. Sin embargo, algunos indicadores no pueden ser calculados debido a que el estudio es de carácter teórico por lo tanto para los indicadores propuestos solo fue posible identificar las variables de medición.

En general, el cálculo de las variables de medición se expresa en kilogramos producido al día, sin embargo, cabe destacar que el presente estudio posee información de carácter teórico y no se cuenta con el dato de la cantidad de horas de producción en el día, por lo cual, se ha realizado la estimación en kilogramos producido por una hora de producción.

Los indicadores de agua recirculada, huella hídrica operacional, huella hídrica gris y consumo de energía, no presentan un valor numérico por las siguientes razones: para el indicador de agua recirculada es necesario conocer la cantidad de la misma previo a su tratamiento, y este dato no es posible conocerlo a nivel teórico, para el caso de la huella hídrica azul no se tiene un valor ya que no es posible conocer el dato de consumo de agua registrada por ANDA y por último para el cálculo de la huella hídrica gris operacional se tiene que conocer el registro de los metros cúbicos de agua contaminada, lo que se hace difícil ya que el estudio está planteado a nivel teórico.

Así mismo, los datos de consumo energético solo son valores teóricos según la potencia consumida de los equipos (presentado en la sección 4.3.8), por lo cual no es posible obtener un valor real del consumo de energía del proceso. Por otro lado, para el cálculo de la huella de carbono, se necesita más información de las actividades reales del proceso en funcionamiento para poder determinar la cantidad de dióxido de carbono equivalente producido.



## CONCLUSIONES.

- I. Con base a los resultados obtenidos se puede concluir que técnicamente y de forma teórica es posible diseñar un proceso de producción de aceite a partir del aguacate, que contemple los criterios de sostenibilidad ambiental y los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS), tomando como punto de partida el proceso de extracción de aceite de oliva.
  
- II. Teniendo en cuenta los diferentes criterios (inversión inicial, costo del proceso y mantenimiento, pretratamiento de la materia prima, rendimiento de extracción, especificaciones de calidad, riesgos para la seguridad y salud ocupacional, compatibilidad con el medio ambiente y uso del método en la industria), evaluados a través de la herramienta técnica matriz PUGH, se logró identificar el método más apto para desarrollar el proceso de producción de aceite de aguacate. En base a la puntuación obtenida, el método seleccionado entre las cuatro tecnologías evaluadas fue el método de extracción por centrifugación con una puntuación de 19. Las características de esta tecnología son: es accesible económicamente en comparación a la demás tecnología evaluadas, las condiciones de operación permiten un menor gasto energético, los residuos generados son viables como materia prima para otras unidades de producción al no utilizarse sustancias químicas para la extracción del aceite, y por último presenta la posibilidad de implementar sistemas de recirculación de agua.
  
- III. Con base a los criterios de sostenibilidad descritos en la sección 4.3.1 del presente trabajo se diseñó un proceso de producción de aceite que cuenta con nueve etapas, las cuales son: recepción y selección de materia prima, almacenamiento de materia prima, lavado y desinfección del fruto, despulpado, termobatido, centrifugación, purificación, almacenamiento y envasado del aceite. Las consideraciones hechas durante la planificación de estas etapas involucran la posibilidad de aprovechar al máximo los recursos, así mismo, la disminución del

impacto al medio ambiente a través de la minimización de los requerimientos energéticos, la recirculación del agua, el reciclaje de los desechos generados y el uso de químicos no tóxicos en el proceso de producción del aceite.

- IV. En la evaluación de los impactos ambientales se identificó que las etapas de lavado, despulpado, centrifugado y purificación son las etapas que generan mayor impacto negativo al medio ambiente, así mismo los impactos que presentan una mayor valoración según el método de criterios relevantes integrados (CRI) son: a) la alteración de la calidad del agua superficial con un VIA de 7.83 y b) alteración de la calidad del suelo, con un VIA de 6.66, ambos con una significancia alta. Los impactos con más puntuación con significancia moderada son: a) contaminación del agua, con un VIA de 5.78 y b) contaminación del suelo con un VIA de 5.70. Estos impactos se generan principalmente debido al vertido de aguas residuales en la etapa de lavado y desinfección, centrifugación y purificación, los residuos generados en la etapa de despulpado y la generación de residuos en forma de lodos en la etapa de centrifugación. Además, los aspectos como el consumo de energía (eléctrica y combustible fósil) y agua, y la generación de plástico y papel también contribuyen a la contaminación ambiental.
- V. Los resultados de la evaluación de los impactos ambientales para el proceso de producción de aceite de aguacate muestran que el 45% de los impactos tienen una significancia moderada, el 36% una significancia baja y el 18% una significancia alta. Sumando los porcentajes de la significancia baja con la moderada, se logra obtener un resultado del 81% lo que demuestra que el diseño propuesto es sostenible ambientalmente y contribuye en gran medida a los Objetivos del Desarrollo Sostenible (ODS), energía asequible y no contaminante (ODS 7), producción y consumo responsable (ODS 12), acción por el clima (ODS 13) y, vida submarina y vida de ecosistema terrestres (ODS 14 y 15).

- VI. Las medidas ambientales tomadas para contribuir a la sostenibilidad del proceso con respecto al manejo de residuos están enfocadas a la reutilización de los mismos para consumo animal, para abono orgánico, para uso como combustible en calderas, como fuente de antioxidantes o como una alternativa para la obtención de almidón o colorante (en el caso de la semilla del aguacate). Para el caso del manejo de efluentes, las medidas tomadas van enfocadas en alternativas de tratamiento y recirculación del agua, y alternativas menos contaminantes en el proceso de lavado y desinfección del fruto.
- VII. Los Indicadores ambientales presentados son los parámetros empleados para evaluar el desempeño ambiental que tiene el proceso de producción de aceite de aguacate. Estos indicadores permitirán mantener controlado el proceso y contribuir a minimizar los riesgos asociados a los aspectos ambientales más significativos y son una medida de evaluar el progreso de las medidas ambientales implementadas. De los indicadores propuestos no todos pueden ser evaluados numéricamente puesto que se necesitan datos reales del proceso en funcionamiento.

## RECOMENDACIONES.

- I. Debido a que existe diferentes estudios que proponen metodologías de extracción de aceite de aguacate a través del método de centrifugación, lo que implica que hay diferencias en los parámetros evaluados, se recomienda para este caso evaluar el rendimiento de extracción y la caracterización fisicoquímica del aceite de aguacate a escala de laboratorio, para comprobar los diferentes parámetros de operación consultados en la bibliografía con el fin de elegir los valores óptimos para el proceso.
- II. Ya que tradicionalmente, el método mecánico da bajos rendimientos, se recomienda en la etapa de termobatido mantener un pH entre 4.0 y 5.5 agregando tiza ( $\text{CaCO}_3$ ,  $\text{CaSO}_4$ ) o sal ( $\text{NaCl}$ ) a la pasta para promover la ruptura de las células que contienen el aceite (células idioblásticas), y así la separación del aceite sea más fácil en la etapa de centrifugación, aumentado el rendimiento de extracción. Esta alternativa debe ser probada a nivel de laboratorio para determinar los parámetros óptimos de operación.
- III. Debido a que se requiere de tiempos largos en la etapa de termobatido para romper las células que contienen el aceite, se recomienda evaluar la posibilidad de incorporar una etapa de molienda para triturar más la pasta de aguacate y que sea más fácil liberar el aceite en la etapa de batido y reducir así los tiempos agitación. Al mismo tiempo, esto tendría impactos positivos al medio ambiente como la disminución del consumo de agua y energía.
- IV. El balance de masa presentado en este estudio se realizó de forma teórica, tomando como referencia investigaciones previamente desarrolladas y para el caso del balance de masa realizado en la etapa de centrifugación se tomó como base la investigación presentada por Dammak et al., (2015), quienes realizaron el procesamiento de frutos de oliva para extraer aceite, mediante un sistema de tres

fases (Tricanter). Por lo tanto, se recomienda realizar los balances de masa de manera experimental a escala planta piloto para obtener rendimientos de separación más exactos para el caso de la extracción de aceite de aguacate.

- V. El estudio realizado presentó la posibilidad de diseñar un proceso evaluado de manera técnica, por lo tanto, para que el estudio sea completo se recomienda evaluar la factibilidad económica del proceso de producción de aceite de aguacate a través de herramientas de ingeniería económica, que puedan dar una base sólida al momento de montar un proceso a escala industrial.
- VI. Para futuras investigaciones del proceso de producción de aceite de aguacate, se recomienda para las medidas ambientales que están en fase de investigación, realizar estudios más profundos donde se logre identificar los parámetros tanto de operación como fisicoquímicos que involucran cada medida para evaluar la viabilidad de las mismas.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.

- Acosta Moreno, M. C. (2011). *EVALUACIÓN Y ESCALAMIENTO DEL PROCESO DE EXTRACCIÓN DE ACEITE DE AGUACATE UTILIZANDO TRATAMIENTO ENZIMÁTICO*. (Tesis de maestría, Universidad Nacional de Colombia). Colombia. Recuperado de <https://repositorio.unal.edu.co>
- Alcalde, T. M. (2007). Alimentos usados en formulación cosmética. *OFFARM*, 26(3), 100-109. España. Recuperado de: <https://bit.ly/391voaU>
- Alfa Laval. (2018). *Separador de aceite de oliva*. Suecia. Recuperado de [www.alfalaval.com](http://www.alfalaval.com)
- Alfa Laval. (2016). Intercambiador de placas. Suecia. Recuperado de [www.alfalaval.com](http://www.alfalaval.com)
- Alarcón Domínguez, K., Castañeda Saucedo, M. C., Manzano Hernández, A. J., Ramírez Anaya, J. P., & Tapia Campos, E. (2018). Influence of temperature and time during malaxation on fatty acid profile and oxidation of centrifuged avocado oil. *Food Science and Technology*, 38(1). México. Recuperado de: <http://dx.doi.org/10.1590/1678-457x.33116>
- Alfa Laval. (2014). *Soluciones para el proceso de extracción de aceite de oliva*. Suecia. Recuperado de <http://www.interempresas.net>
- Alnasan, Z. (2019). *Characteristics of the oil of different varieties of avocado grown in Brazil and a new methodology for extra-virgin avocado oil extraction*. (doctoral Thesis, University of brasilia). Brazil. Recuperado de <https://repositorio.unb.br>
- Andrade, H. J., Arteaga, C. C. y Segura, M. A. (2017). Emisión de gases de efecto invernadero por uso de combustibles fósiles en Ibagué, Tolima (Colombia). *Ciencia y Tecnología Agropecuaria*, 18(1), 103-112. Colombia. DOI: [http://dx.doi.org/10.21930/rcta.vol18\\_num1\\_art:561](http://dx.doi.org/10.21930/rcta.vol18_num1_art:561)
- ASTIMEC. (2017). *Limpiadora de frutas por cepillo*. Ecuador. Recuperado de <https://astimec.net/producto>
- Astudillo Ordoñez, C. E. y Rodríguez Fonseca, P. E. (04 - 07 de septiembre 2017). Evaluación de parámetros fisicoquímicos del aguacate (*Persea americana* Mill. cv. Hass) en su madurez de cosecha y consumo. Memorias del V Congreso Latinoamericano del Aguacate. México. Recuperado de <http://www.avocadosource.com>

- Ávila, J. P. y Sansores, A. C. (2003). Fuentes principales de nitrógeno de nitratos en aguas subterráneas. *Ingeniería*, 7(2), 47-54. México. Recuperado de: <https://www.redalyc.org/pdf/467/46770204.pdf>
- Azuola, R. y Vargas Aguilar, P. (2007). Extracción de sustancias asistida por ultrasonido (EUA). *Ingeniería*, 20(4). Costa Rica. Recuperado de: <https://dialnet.unirioja.es>
- bega helicoidales. (2020). Fabricación de Transportadores Helicoidales. México. Recuperado de <https://www.begahelicoidales.com>
- BOMBAS hasa. (2018). hidráulica alsina, s.a. Catálogo general. España. Recuperado de <https://www.bombashasa.com>
- Bonomie, M. y Reyes, M. (2012). Estrategia ambiental en el manejo de efluentes en la extracción de aceite de palma. *Telos*, 14(3), 323-332. Venezuela. Recuperado de <http://ojs.urbe.edu>
- Buelvas Salgado, G. A., Patiño Gómez, J. H. y Cano Salazar, J. A. (2012). Evaluación del proceso de extracción de aceite de aguacate hass (*Persea americana* Mill) utilizando tratamiento enzimático. *Revista Lasallista de Investigación*, 9(2), 138-150. Colombia. Recuperado de <http://www.scielo.org.co>
- Burgren, M., & Thorén, L. (2015). *Comparing the Outcomes of Two Decision Support Models: The Analytical Hierarchy Process and Pugh Matrix Analysis: Using an actual multi-criteria decision-making situation*. (Tesis de maestría, Universidad de Arkansas). Suecia. Recuperado de <https://www.diva-portal.org>
- Cano Marchal, P., Gómez Ortega, J., Aguilera Puerto, D. y Gámez García, J. (2011) Situación actual y perspectivas futuras del control del proceso de elaboración del aceite de oliva virgen. *Revista Iberoamericana de Automática e Informática industrial*, 8 (3), 258-269. España. Recuperado de <https://doi.org/10.1016/j.riai.2011.06.013>
- Cárdenas Tobar, K., Cárdenas Albarán, V., Guancha, M. y Vallencilla Castro, L. E. (2019) Aprovechamiento de la semilla de aguacate (*Persea americana* Mill.) tipo Hass para la extracción de almidón. *Informador técnico*, 83 (2), 120-123. Colombia. Recuperado de <http://revistas.sena.edu.co>
- Castaño Martínez, C.A. (2013). [Figura]. Los pilares del desarrollo sostenible: sofisma o realidad. Universidad Santo Tomás. Colombia. Recuperado de <https://repository.usta.edu.co>.

- Castro Macas, D. O. y Tirira Suárez, L. M. (2014). *Diseño y construcción de una máquina despulpadora de frutas*. (Trabajo de graduación a optar al título de: Ingeniero Mecánico. Escuela Superior Politécnica de Chimborazo). Ecuador. Recuperado de <http://dspace.esPOCH.edu.ec>
- Clausing, D., Frey, D., Herder, P., Katsikopoulos, K., Subrahmanian, E., & Wijnia, Y. (2009). The Pugh controlled convergence method: model-based evaluation and implications for design theory. *Research in Engineering Design*, 20 (1), 41-58. England. DOI: 10.1007/s00163-008-0056-z
- CBB Decanter. (2015). *Decantador centrífugo*. Italia. Recuperado de <https://www.cbbdecanter.com>
- CBB Decanter. (2015). *Separación tres fases*. Italia. Recuperado de <https://www.cbbdecanter.com>
- Ceballos, A. M. y Montoya S. (2013). EVALUACIÓN QUÍMICA DE LA FIBRA EN SEMILLA, PULPA Y CÁSCARA DE TRES VARIEDADES DE AGUACATE. *Bioteología en el Sector Agropecuario y Agroindustrial*, 11(1) ,103-112. Colombia. Recuperado de <http://www.scielo.org.co>
- CEGESTI. (2008). *Manual para la implementación de Compras Verdes en el sector público de Costa Rica*. Fundación Centro de Gestión Tecnológica e Informática. Costa Rica. Recuperado de <https://www.hacienda.go.cr>
- CENTA. (2003). *CULTIVO DEL AGUACATE*. Centro Nacional de Tecnología Agropecuaria y Forestal. El Salvador. Recuperado de <http://centa.gob.sv>
- CENTA. (2018). *CULTIVO DEL AGUACATE (Persea americana Miller)*. Centro Nacional de Tecnología Agropecuaria y Forestal. El Salvador. Recuperado de <http://centa.gob.sv>
- Centrifugación Alemana. (2020). *Termobatidora de Lotes Tipo A*. España. Recuperado de <https://bit.ly/3pRnYxJ>
- Centrimax. (2010). *Decantadores centrífugos*. Empresa de suministros industriales, Centrimax. Alemania. Recuperado de <https://www.centrimax.com>
- Centro de Promoción de Importaciones de países en desarrollo. (2008). EL MERCADO DE INGREDIENTES NATURALES PARA COSMÉTICOS EN LA UNIÓN EUROPEA. Bolivia. Recuperado de <https://bit.ly/3boTAXN>
- CEPRIT. (2014). *Ruidos en el lugar de trabajo. Boletín del centro de prevención de riesgos del trabajo*. Centro de prevención de riesgos del trabajo. Perú. Recuperado de <http://www.essalud.gob.pe>



- Cerdas Araya, M. M., Montero Calderón, M. y Somarribas Jones, O. (2014). VERIFICACIÓN DEL CONTENIDO DE MATERIA SECA COMO INDICADOR DE COSECHA PARA AGUACATE (*Persea americana*) CULTIVAR HASS EN ZONA INTERMEDIA DE PRODUCCIÓN DE LOS SANTOS, COSTA RICA. *Agronomía Costarricense*, 38(1), 207-214. Costa Rica. Recuperado de <https://revistas.ucr.ac.cr>
- Cervantes Torres, A. y Fernández García, L.G. (2017). *PROYECTO DE DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA FOTOVOLTAICO DE INTERCONEXIÓN A LA RED ELÉCTRICA EN LA UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE ALTAMIRA*. (Tesis de Maestría, UNIVERSIDAD AUTONOMA DE CHIHUAHUA). México. Recuperado de <https://cimav.repositorioinstitucional.mx>
- Chilealimentos. (2013). *Guía de Indicadores de Sustentabilidad en la Industria de Alimentos Procesados*. Segundo Acuerdo de Producción Limpia. Chilealimentos. Chile. Recuperado de <https://ledslac.org>
- CI Talsa. (sin fecha). *LAVADORA DE FRUTAS POR INMERSION CITALSA LIA1*. Colombia. Recuperado de <https://citalsa.com/lavadora-de-frutas-por-inmersion-citalsa-lia1>
- Coditer. (2016). *Catálogo técnico intercambiadores de calor de placas 2016*. coditer soluciones y sistemas ecológicos. Recuperado de <https://estaticos.qdq.com>
- Condori Cahui, M. (2016). *Análisis de extracción de aceite de palta (Persea americana) de la variedad Fuerte por evaporación rápida de agua*. (Trabajo de grado para optar: Ingeniero de Alimentos, Universidad Peruana Unión). Perú. Recuperado de: <http://repositorio.upeu.edu.pe>
- Contreras Camacho, J. (2014). *Aplicación de análisis de ciclo de vida de un producto (ACV) en la cadena productiva del cacao como estrategia de ventaja competitiva ambiental sostenible*. (Tesis de maestría, Universidad Piloto de Colombia). Colombia. Recuperado de <http://polux.unipiloto.edu>
- Costagli, G., & Betti, M. (2015). Avocado oil extraction processes: method for cold-pressed high-quality edible oil production versus traditional production. *Journal of Agricultural Engineering*, 46(3), 115-122. Italia. doi:10.4081/jae.2015.467.
- Daiuto, E. R., Tremocoldi, M. A., De Alarcar, S. M., Lopes Vieites, R., & Minarelli, P. H. (2014) COMPOSIÇÃO QUÍMICA E ATIVIDADE ANTIOXIDANTE DA POLPA E RESÍDUOS DE ABACATE 'HASS'. *Bras. Frutic*, 36 (2), 417-424. Brasil. Recuperado de <http://dx.doi.org/10.1590/0100-2945-102/13>

- Dammak, I., Neves, M., Souilem, S., Isoda, I., Sayadi, S., & Nakajima, M. (2014). Material Balance of Olive Components in Virgin Olive Oil Extraction Processing. *Food Science and Technology Research*, 21 (2), 193-205. Japón. doi: 10.3136/fstr.21.193
- De Miguel García, N., García Vílchez, E. J. y Sánchez Báscones, I. (2009). Indicadores para la medida del grado de desarrollo sostenible de una organización. *FORUM CALIDAD*, 198, 36-42. España. Recuperado de <https://www.fundacionseres.org>
- De Telecomunicación. (2002). Energía solar fotovoltaica. España. Recuperado de <http://www.instalacionesindustriales.es>
- Departamento de Desarrollo Económico, Sostenibilidad y Medio Ambiente (2017). Degradación del suelo. País Vasco. España Recuperado de <https://www.euskadi.eus>
- Donat, V. (2017). ACEITES VEGETALES EN COSMÉTICA. *INDUSTRIA COSMÉTICA*, 002, 52-55. Recuperado de <https://bit.ly/3rXopIU>
- FAO. (2020). *Las principales frutas tropicales Análisis del mercado 2018*. Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura. Roma. Recuperado de <http://www.fao.org>
- Cuevas, A. L., Franco, D. P. y Manzano, J. Q., (2010). Métodos para identificar, diagnosticar y evaluar el grado de eutrofia. *ContactoS*. 78, 25-33. México. Recuperado de <https://n9.cl/84m2z>
- Fawcett Vargas, I. (2004). *ANÁLISIS DE EXTRACCIÓN DE ACEITE DE AGUACATE POR MÉTODOS FÍSICOS Y EVALUACIÓN DE UNA PRODUCCIÓN A GRAN ESCALA*. (Trabajo de grado a optar por el título de: Ingeniero Químico, Universidad de los Andes). Colombia. Recuperado de <https://repositorio.uniandes.edu.co>
- Fernández de Castillo, J. y Fernández, S. (2002). El acero inoxidable en la industria alimentaria. España. Recuperado de <https://www.revistadyna.com>
- Finol, H. (2009). Curso alimentos. Técnicas y procesos de conservación. España. Recuperado de <https://docplayer.es>
- Flores, M., Saravia, C., Vergara, C. E., Avila, F., Valdés, H., & Ortiz-Viedma, J. (2019). Avocado oil: Characteristics, properties, and applications. *Molecules*, 24(11), 2172. Chile. doi:10.3390/molecules24112172

- Flórez Arroyave, J. (2017). *Obtención de aceite de aguacate con alto valor agregado para la industria de alimentos usando fluidos supercríticos*. (Tesis de Maestría, Corporación Universitaria Lasallista). Colombia. Recuperado de <http://hdl.handle.net>
- Flottweg. (2011). *Centrífugas de discos para la separación innovadora sólido - líquido*. Flottweg, Mechanical Separation Technology. Alemania. Recuperado de <https://www.schroedersa.com.ar>
- Flottweg. (2014). *Información técnica de maquinaria para la extracción de aceite de aguacate*. Flottweg, Mechanical Separation Technology. Alemania. Recuperado de <https://www.flottweg.com>
- Forero Longas, F., García Lozano, J. y Sandoval Aldana, A. (2010). *Postcosecha y transformación de aguacate: agroindustria rural innovadora*. Colombia. Recuperado de: <https://repository.agrosavia.co>
- García, D. y Alfaro, G. (2016). Competitividad exportadora del sector cosmético y del cuidado personal en México. *Revista de la facultad de Contaduría y Ciencias Administrativas, UMSNH*, 1(1), 3617-3639. México. Recuperado de <https://bit.ly/2KO8X0n>
- García. Valladares, R.Y., Khalil Zelada, M.E. y Portillo. Palacios, G.A. (2018). *EVALUACIÓN DEL IMPACTO AMBIENTAL Y OPTIMIZACIÓN DEL RECURSO ENERGÉTICO A TRAVÉS DE TÉCNICAS DE PRODUCCIÓN MÁS LIMPIA PARA LA PRODUCCIÓN DE MEZCLAS ASFÁLTICAS EN FRÍO Y EMULSIONES ASFÁLTICAS*. ((Trabajo de grado para optar al título de: Ingeniero Químico, Universidad de El Salvador). El Salvador. Recuperado de <http://ri.ues.edu.sv>
- Gil, I. M., Allende A., López Gálvez, F. y Selma, M. V. (2009). ¿Hay alternativas al cloro como higienizante para productos de IV gamma? *Horticultura*, 1(69), 30-45. España. Recuperado de <http://www.horticom.com>
- Gil, M. I., López-Gálvez, F., Tudela, J. A. y Allende, A. (2019). Consejos prácticos para optimizar la desinfección del agua de lavado de frutas y hortalizas. *Horticultura*. España. Recuperado de: <https://issuu.com>
- Gil, M. J., Gutiérrez, O. D., Soto, A. M. y Usma, J. I. (2012). Contaminantes emergentes en aguas, efectos y posibles tratamientos. *Producción+ limpia*, 7(2). Colombia. Recuperado de <http://repository.lasallista.edu.co>
- Gómez Pariente, M. C. y Rubio Cobos, M. J. (2016). *Instalación de tratamiento de aguas residuales de almazara*. (Trabajo de grado para optar al título de: Ingeniero Químico, Universidad de Sevilla). España. Recuperado de <http://bibing.us.es>

- Gómez, C. (2018). Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS): una revisión crítica. *Papeles de relaciones ecosociales y cambio global*, 1(14), 107-118. España. Recuperado de <https://www.fuhem.es>
- Gómez, C. (Sin fecha). El desarrollo sostenible: conceptos básicos, alcance y criterios para su evaluación. Cuba. Recuperado de <http://www.unesco.org>
- Gómez, V. (2019). *Matriz de Leopold: para qué sirve, ventajas, ejemplos*. Lifer.com. España. Recuperado de: <https://www.lifer.com>
- González Fernández, J. J., Álvarez, J. M., Galea, Z., Guirado, E., Hermoso, J.M., Hormaza, I. y López, R. (2013). *Reciclaje de residuos de la producción de guacamole mediante compostaje*. VII Congreso Ibérico de Agroingeniería y Ciencias Hortícolas. Madrid, España. Recuperado de <https://bit.ly/3oh4ORu>
- González Atienza, V., Palancar Olmo, M., Pérez Jiménez, M.A. y Vergara García, G. (sin fecha). TEC-15 estabilidad y conservación del aceite de oliva virgen producido en la comunidad de Madrid. España. Recuperado de <http://www.expoliva.com>
- GRUPO CUÑADO. (2018). Alimentación y farmacia. Catalogo. México. Recuperado de <https://grupocunado.com>
- Gutarra Sanabria, H. D. y Vargas Rodríguez, M. F. (2018). *DISEÑO DE UNA PLANTA DE ACEITE DE PALTA A PARTIR DE LA EVALUACIÓN DE TRES MÉTODOS DE EXTRACCIÓN*. (Trabajo de grado para optar al título de: Ingeniero Industrial y Comercial, Universidad San Ignacio de Loyola). Perú. Recuperado de <http://repositorio.usil.edu.pe>
- Hielscher. (2020). Tecnología de ultrasonido de Hielscher. Alemania. Recuperado de <https://www.hielscher.com>
- Huamán Pérez, M. D. (2014). *EVALUACIÓN DEL EFECTO DE TRATAMIENTOS CON SOLVENTES ORGÁNICOS, AGUA Y EL TIEMPO DE EXTRACCIÓN EN EL RENDIMIENTO DE POLIFENOLES TOTALES DE LA HARINA DE SEMILLA DE PALTA (Persea americana)*. (Trabajo de grado para optar al título de: Ingeniero en Industrias Alimentarias, Universidad Nacional del Centro de Perú). Perú. Recuperado de <http://repositorio.uncp.edu.pe>
- Ibarra, J. y Rojas, A. E. (2003). La degradación del suelo y sus efectos sobre la población. *Población y Desarrollo*, (25), 5-10. Paraguay. Recuperado de <https://dialnet.unirioja.es>
- Ihobe. (2009). *Identificación y evaluación de aspectos ambientales*. Sociedad pública de gestión ambiental. País Vasco. Recuperado de <https://bit.ly/3hKZ6oA>

- Industrias de la Rosa. (2020). *Batidora para la homogenización de la pasta de aceituna*. España. Recuperado de <https://bit.ly/38dZkkV>
- InVia. (2019). Catálogo de maquinaria para aceite de oliva. Asociación In Via. Barcelona, España Recuperado de <http://inviahobby.com>
- Interko. (2020). *Óptimo Cámara de maduración*. HEAT EXCHAMGERS & RIPE-NING SOLUTIONS. Holanda. Recuperado de: <https://www.interko.com>
- Jiménez Morales, S. (2012). *ESTUDIO TEÓRICO PARA EL CONTROL DE LA CONTAMINACIÓN POR GRASAS Y ACEITES GENERADA POR LA ACTIVIDAD INDUSTRIAL, DOMÉSTICA Y DE SERVICIOS*. (Trabajo de grado para optar al título de: Ingeniero Químico Industrial, Instituto Politécnico Nacional). México. Recuperado de <https://tesis.ipn.mx>
- Jiménez, M. A. P., Olmo, M. P., García, G. V. y Atienza, V. G. (2003). *TEC-15 ESTABILIDAD Y CONSERVACIÓN DEL ACEITE DE OLIVA VIRGEN PRODUCIDO EN LA COMUNIDAD DE MADRID*. Foro de la tecnología oleícola y el olivar. España. Recuperado de <http://www.expoliva.com>
- Jiménez, M. E., Aguilar, M. de R., Zambrano, M. y Kolar, E. (2001). Propiedades físicas y químicas del aceite de aguacate obtenido de puré deshidratado por microondas. *Revista de la Sociedad Química de México*, 45 (2), 89-92. México. Recuperado de <http://www.scielo.org.mx>
- Jn aceros, (2017). Empresa especialista en insumo de acero inoxidable para la industria. Jn aceros. Recuperado de: <https://jnaceros.com.pe>
- Jorge, T. de S., Carregari Polachini, T., Silva Dias, L., Jorge, N., & Telis Romero, J. (2015). PHYSICOCHEMICAL AND RHEOLOGICAL CHARACTERIZATION OF AVOCADO OILS, *Ciência e Agrotecnologia*, 39 (4), 390-400. Brazil. Recuperado de <https://doi.org/10.1590/S1413-70542015000400010>
- Jung Process Systems, (sin fecha). Bombas de desplazamiento positivo. Recuperado de <https://www.jung-process-systems.de>
- Krumreich, F. D., Borges, C. D., Mendonça, C. R. B., Jansen-Alves, C., & Zambiasi, R. C. (2018). Bioactive compounds and quality parameters of avocado oil obtained by different processes. *Food Chemistry*, 257, 376-381. Brasil. Recuperado de <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2018.03.048>
- Lalanne. B. (2010). *UTILIZACIÓN DE BIOMASA PARA LA GENERACIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA*. (Tesis de grado para optar al título de: Ingeniero Industrial, INSTITUTO TECNOLÓGICO DE BUENOS AIRES). Argentina. Recuperado de <https://ri.itba.edu.ar>

- Loaiza Chulli, P. y López Armijos, E. (2013). *Elaboración de una Salsa a Base de la Pulpa de Aguacate Variedad Hass y su Proyección a Nivel Industrial*. (Trabajo de grado para optar al título de: Ingeniera en Alimentos, Escuela Superior Politécnica del Litoral). Ecuador. Recuperado de <https://www.dspace.espol.edu.ec>
- Loayza Pérez, J. y Silva Meza, V. (2013). Los procesos industriales sostenibles y su contribución en la prevención de problemas ambientales. *Industrial Data*, 16(1), 108-117. Perú. Recuperado de <https://www.redalyc.org>
- Loayza, J. (2016). Procesos industriales sostenibles, innovación, seguridad y minimización de residuos [Material de clase, Ingeniería de Procesos]. Universidad Mayor de San Marcos. Perú. Recuperado de <https://www.usmp.edu.pe>
- Loto, L. A. (2016). *Descontaminación de efluentes provenientes del procesamiento del aceite de oliva mediante el tratamiento con hongos de pudrición blanca* (Tesis de Maestría, Universidad Nacional de Córdoba). Argentina. Recuperado de <https://rdu.unc.edu.ar>
- Macedo, B. (2005). El concepto de sostenibilidad. *Oficina Reg Educ para Am Lat y el Caribe-UNESCO*, 4. España. Recuperado de <https://bit.ly/3suYjwn>
- MAG. (2019). *Anuario de Estadísticas Agropecuarias El Salvador 2017-2018*. Ministerio de Agricultura y Ganadería. El Salvador. Recuperado de <http://www.mag.gob.sv>
- Marín Pons, M.A. (2015). Línea de despulpado de mango. Catalogó. Recuperado de <https://bit.ly/37p1Va1>
- Martínez, C. D., Morales, F.J. y Reyes, G.A. (2019). *ESTUDIO DE EVALUACIÓN DE IMPACTO AMBIENTAL EN LA FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA DE LA UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR*. (Trabajo de grado para optar al título de: Ingeniero Químico, Universidad Nacional de El Salvador). El Salvador. Recuperado de <http://ri.ues.edu.sv>
- Maskepack, (2019). Catalogo transportadores cintas. España. Recuperado de <https://bit.ly/3ICZC8F>
- MAVDT. (2004). *Principales procesos básicos de transformación de la industria plástica y Manejo, aprovechamiento y disposición de residuos plásticos post-consumo*. Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial. Colombia. Recuperado de <https://redjusticiaambientalcolombia.files.wordpress.com>

- Medina, L. C., Alfalla, L. R. y Marín, J. A. (2010). Una propuesta metodológica para la realización de búsquedas sistemáticas de bibliografía. *WPOM-Working Papers on Operations Management*. 1 (2), 13-30. España. Recuperado de <https://idus.us.es>
- Melo García, A. F. y Mora Medina, N. A. (2018). *EVALUACIÓN TÉCNICO-FINANCIERA PARA EL PROCESO DE OBTENCIÓN DE ACEITE VEGETAL A PARTIR DE AGUACATE (PERSEA AMERICANA) VARIEDAD LORENA* (Trabajo de grado para optar al título de: Ingeniero Químico, Fundación Universidad de América). Colombia. Recuperado de <https://repository.uame-rica.edu.co>
- Muñoz García, P. C., Urrutia Vásquez, C.L. y Vaquero Andrade, N.M. (2005). *APLICACIÓN DE TECNOLOGÍAS DE PRODUCCIÓN MÁS LIMPIA PARA LA PEQUEÑA Y MEDIANA INDUSTRIA DE CURTIEMBRE EN EL SALVADOR*. (Tesis de grado para optar al título de Ingeniero Químico, Universidad de El Salvador). Recuperado de <http://ri.ues.edu.sv>
- Neuberger-Cywiak, L. (2001). Diferentes Métodos utilizados en la Evaluación de Impacto Ambiental (EIA). *DOCTUM*, 4(2), 1. Chile. Recuperado de <https://www.academia.edu>
- Nickisch, M. B., Sánchez, L., Tosolini, R., Jordan, P. y Díaz, F. T. (2018). Sistemas de captación de agua de lluvia para consumo humano, sinónimo de agua segura. *Aqua-LAC*, 10(1), 15-25. Recuperado de <http://aqua-lac.org>
- NMX. (2008). *NMX-F-052-SCFI-2008, ACEITES Y GRASAS- ACEITE DE AGUACATE ESPECIFICACIONES*. Norma mexicana de aceite y grasas México. Recuperado de <https://bit.ly/2NR6pQy>
- OIRSA. (2020). *Guía para uso de cloro en desinfección de frutas y hortalizas de consumo fresco, equipos y superficies en establecimientos*. Organismo Internacional Regional de Sanidad Agropecuaria. El Salvador. Recuperado de <https://www.oirsa.org>
- Olaeta, J. A. (2003). *Industrialización del aguacate: estado actual y perspectivas futuras*. Actas V Congreso Mundial del Aguacate. Chile. Recuperado de <http://www.avocadosource.com>
- Olivero, J. y Pájaro, N. (2011). QUÍMICA VERDE: UN NUEVO RETO. *Ciencia e Ingeniería Neogranadina*, 21(2), 169-182. Colombia. Recuperado de <http://www.redalyc.org>
- ONUDI. (2018). *Informe anual 2018*. Organización de las Naciones Unidas para el Desarrollo Industrial. Austria. Recuperado de <https://bit.ly/3nj7ih9>

- OptimaGrid. (sin fecha). *Buenas prácticas para el ahorro de energía en la empresa*. Sistemas inteligentes de optimización y autogestión de micro-redes con energía renovables aplicados a áreas industriales. Recuperado de <https://bit.ly/3q0H7O6>
- Paredes Concepción, P. (2014). Producción más limpia y el manejo de efluentes en plantas de harina y aceite de pescado Industria. *Industria data*, 17(2), 77-80. Perú. Recuperado de <http://www.redalyc.org>
- PALMA Y TRABAJO S.A.S. (2017). PLAN DE MANEJO AMBIENTAL. Colombia. Recuperado de <https://bit.ly/3niKKNs>
- PNUD. (2000). *INFORME ANUAL DE EVALUACIÓN*. Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente. EE.UU. Recuperado de <https://wedocs.unep.org>
- PNUD. (2017). *Informe de los Objetivos de Desarrollo Sostenible*. Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo. Estados Unidos. Recuperado de <https://unstats.un.org>
- Pons, G. A. (2015). Aceites vegetales, hacia una producción sostenible. *El Hombre y la Máquina*, 46, 9-19. Colombia. Recuperado de <https://www.redalyc.org>
- Qin, X., & Zhong, J. (2016). A Review of Extraction Techniques for Avocado Oil. *Journal of Oleo Science*, 65 (11), 881-888. China. Recuperado de [https://www.jstage.jst.go.jp/article/jos/65/11/65\\_ess16063/\\_pdf/-char/en](https://www.jstage.jst.go.jp/article/jos/65/11/65_ess16063/_pdf/-char/en)
- Ramos Soberanis, N. A. (2014). *METODOLOGÍAS MATRICIALES DE EVALUACIÓN AMBIENTAL PARA PAÍSES EN DESARROLLO: MATRIZ DE LEOPOLD Y MÉTODO MEL-ENEL*. (Trabajo de grado para optar al título de: Ingeniero Civil, Universidad de San Carlos de Guatemala). Guatemala. Recuperado de <http://biblioteca.usac.edu.gt>
- REFLICLIM. (2020). Equipos frigoríficos. España. Recuperado de <https://refri-clim.com/es/equipos-frigorificos-2019/>
- Restrepo Duque, A. M., Londoño-Londoño, J., González Álvarez, D. G., Benavides Paz, Y. y Cardona Salazar, B. L. (2012). Comparación del aceite de aguacate variedad Hass cultivado en Colombia, obtenido por fluidos supercríticos y métodos convencionales: una perspectiva desde la calidad. *Revista Lasallista de Investigación*, 9(2), 151-161. Colombia. Recuperado de <http://www.scielo.org.co>



- RETEMA. (2015). Emisiones asociadas a los residuos orgánicos en forma sólida. *Revista técnica de medio ambiente*. España. Recuperado de <https://bit.ly/3u1afY2>
- RETEMA. (2019). La depuración de las aguas residuales urbanas provoca cambios en la flora y fauna de los ríos. España. Recuperado de <https://bit.ly/38j8i0l>
- Rincón, E. y Wellens, A. (2011). CÁLCULO DE INDICADORES DE ECOEFICIENCIA PARA DOS EMPRESAS LADRILLERAS MEXICANAS. *Int. Contam. Ambie*, 27(4), 333-345. México. Recuperado de <http://www.scielo.org.mx>
- Rodríguez Fonseca, P. E., Grisales, N. Y. y Escobar, J. V. (2019). *Protocolo de almacenamiento y maduración de aguacate cv. Hass (Persea americana Mill.) en Antioquia*. Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria Colombia. Recuperado de <https://repository.agrosavia.co>
- Rodríguez-Eugenio, N., Pennock, D. y McLaughlin, M. (2019). *La contaminación del suelo: una realidad oculta*. Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO). Roma. Recuperado de <http://www.fao.org>
- RTCA. (2008). *RTCA 71.03.45:07, PRODUCTOS COSMÉTICOS. VERIFICACIÓN DE LA CALIDAD*. Reglamento Técnico Centroamericano. Centroamérica. Recuperado de <https://bit.ly/3nmdFA6>
- RTS. (2018). *RTS 13.05.01:18, AGUA. AGUAS RESIDUALES. PARÁMETROS DE CALIDAD DE AGUAS RESIDUALES PARA DESCARGA Y MANEJO DE LODOS RESIDUALES*. Reglamento Técnico Salvadoreño. El Salvador. Recuperado de <https://members.wto.org>
- Sanes Orrego, A. (2012). *El análisis de ciclo de vida (ACV) en el desarrollo sostenible: propuesta metodológica para la evaluación de la sostenibilidad de sistemas productivos*. (Tesis de Maestría, Instituto de Estudios Ambientales). Colombia. Recuperado de <https://repositorio.unal.edu.co>
- Tamayo, U. y Vicente, A. (2007). Generación de valor mediante prácticas de producción limpia, ecodiseño y logística inversa. *Mediterráneo Económico*. España. Recuperado de <https://bit.ly/3bbtYxb>
- Vargas Rodríguez, M., Gutarra Sanabria, H., Delgado-Soriano, V., Cortés-Avenida, P. y Peñafiel, C. F. (2020). Ácidos grasos y criterios de calidad del aceite de palta obtenido mediante tres sistemas de extracción libres de solvente. *Agoindustrial Science*, 10(1), 71-77. Perú. Recuperado de <https://revistas.unitru.edu.pe>

- Vargas, B. W. (2010). Siglo XXI: El agua, ¿es un recurso natural renovable? *Revista Virtual REDESMA*, 4(2), 10-15. Bolivia. Recuperado de <http://www.revistasbolivianas.org.bo/pdf/rvr/v4n2/a03.pdf>
- Vargas, I. (2004). *ANÁLISIS DE EXTRACCIÓN DE ACEITE DE AGUACATE POR MÉTODOS FÍSICOS Y EVALUACIÓN DE UNA PRODUCCIÓN A GRAN ESCALA*. (Tesis de Maestría, Universidad de Los Andes). Colombia. Recuperado de <https://repositorio.uniandes.edu.co>
- Velasco, R. J., Villada, H. S. y Carrera, J. E. (2007). Aplicaciones de los Fluidos Supercríticos en la Agroindustria. *Información Tecnológica*, 18(1), 53-655. Colombia. Recuperado de <http://dx.doi.org>
- Vélez, L.M., Serpa, A. M., Ríos, A. F., Lezcano, M. P., Hincapié, G.A. y Echeverría. (2014). EXTRACCIÓN DE ACEITE DE AGUACATE VARIEDAD “Hass” (Persea americana Mill) LIOFILIZADO POR PRENSADO EN FRIO. *Investigaciones Aplicadas*, 8(2), 113 - 123. Colombia. Recuperado de <https://dialnet.unirioja.es>
- Venegas Valverde, P. (2016). *Evaluación de las condiciones experimentales para la extracción de aceite esencial de romero para su uso como antioxidante en aceites comerciales*. (Trabajo de grado para optar al título de: Licenciatura en Ingeniería Química, Universidad de Costa Rica). Costa Rica. Recuperado de <https://bit.ly/35v6HTx>
- Velásquez Valderrama, A.M. (2008). La tecnología de fluidos supercríticos, un proceso limpio para el sector industrial. *Producción + Limpia*, 3(2), 99-104. Colombia. Recuperado de <http://lasallista.edu.co>
- Vilella, M. (2018). Economía circular de cero residuos. Un cambio de reglas del juego del cambio sistemático contra el cambio climático. *Analysis for GHG emissions savings*, 1 (44). 7-23. Chile. Recuperado de [https://cl.boell.org/sites/default/files/cartilla\\_volumen\\_44\\_3.pdf](https://cl.boell.org/sites/default/files/cartilla_volumen_44_3.pdf)
- Woolf, A., Wong, M., Eyres, L., McGhie, T., Lund, C., Olsson, S., & Requejo-Jackman, C. (2009). Avocado oil. *Gourmet and Health-Promoting Specialty Oils*. 73-125. Estados Unidos. doi: 10.1016/B978-1-893997-97-4.50008-5
- Yepes Betancur, D. P., Sánchez Giraldo, L. y Márquez Cardozo, C. J. (2017). Extracción termomecánica y caracterización fisicoquímica del aceite de aguacate (*Persea americana* Mill. cv. Hass). *Informador Técnico*, 81(1), 75-85. Colombia. Recuperado de <http://doi.org/10.23850/22565035.728>

## ANEXOS.

### Anexo A. Composición fisicoquímica del aceite de aguacate y el aceite de oliva.

La Tabla A.1 presenta la comparación en la composición fisicoquímica del aceite aguacate y el aceite de oliva.

**Tabla A.1** Comparación de la composición fisicoquímica del aceite de aguacate y el aceite de oliva.

CARACTERÍSTICAS	ACEITE DE AGUACATE	ACEITE DE OLIVA
Clorofila (ppm)	40-60	4-6
Ácido Oleico (%)	0.08-0.17	0.15-0.25
PV (fresh-mEq/ kg fat)	0.1-0.2	1.0-2.0
Gravedad Especifica (25 °C)	0.915-0.916	0.914-0.918
Indice de Yodo (from GLC)	82-84	75-82
Beta-sitosterol (%)	0.45-1.0	0.1-0.2
Vitamina E (mg/kg)	130-200	100-150
Beta/Gamma-tocoferol	15	10
Delta-tocoferol	5	10
Cobre (ppm)	5	10
Pesticida	No se detecta	No se detecta

Fuente: (Finol, 2009)

## Anexo B. Balances de materia del proceso de extracción de aceite de aguacate.

### I. Balance de masa en la etapa de lavado y desinfección.

La cantidad de aguacate que entra al proceso de lavado y desinfección es la misma cantidad que sale.

$$m^0_{\text{aguacate(B)}} = m^0_{\text{aguacate(I)}} = 1000\text{kg/h}$$

a) Consumo de agua en el primer y segundo lavado.

La cantidad de agua a utilizar tanto en el primer como segundo lavado corresponde a la capacidad de la tina del equipo, que para este caso es 150 L para ambas tinas.

$$V_{\text{agua(D)}} = V_{\text{agua(F)}} = 150 \text{ L}$$

Con un total de 250 L de agua para el proceso.

b) Consumo de Hipoclorito de Sodio.

La concentración del hipoclorito es de 100 ppm y se utiliza en el primer lavado. La cantidad de hipoclorito de sodio para 150 L se calcula como sigue:

$$\rho_{\text{agua}} = 997\text{kg/m}^3$$

$$m_{\text{agua(D)}} = 150\text{L} * \frac{1\text{m}^3}{1000\text{L}} * \frac{997 \text{ kg}}{\text{m}^3} = 149.55\text{kg agua (D)}$$

$$m_{\text{NaClO(E)}} = \frac{100\text{mg NaClO}}{1\text{kg agua (D)}} * 149.55 \text{ kg agua (D)} = 14,955 \text{ mg NaClO} = 14.96 \text{ g NaClO}$$

## II. Balance de masa en la etapa de despulpado.

### Corriente I

$$m^{\circ}_{(I)} = \frac{1000\text{kg}}{\text{h}} \text{ de aguacate}$$

a) Composiciones de pulpa, semilla y piel en I

$$X_{\text{pulpa}(I)} = 0.68, \text{ equivalente a } m^{\circ}_{\text{pulpa}(I)} = 680 \text{ kg/h}$$

$$X_{\text{semilla}(I)} = 0.18, \text{ equivalente a } m^{\circ}_{\text{semilla}(I)} = 180 \text{ kg/h}$$

$$X_{\text{piel}(I)} = 0.14, \text{ equivalente a } m^{\circ}_{\text{piel}(I)} = 140 \text{ kg/h}$$

b) Flujo masico de aceite, agua y sólidos en la corriente I.

El porcentaje de aceite, agua y sólidos en la pulpa de aguacate es del 25%, 68.69% y 6.31% respectivamente.

$$m^{\circ}_{\text{aceite}(I)} = m^{\circ}_{\text{pulpa humeda}(I)} * 0.25 = 680 \frac{\text{kg}}{\text{h}} * 0.25 = 170 \frac{\text{kg}}{\text{h}} \text{ aceite en I}$$

$$m^{\circ}_{\text{agua}(I)} = m^{\circ}_{\text{pulpa humeda}(I)} * 0.6869 = 680 \frac{\text{kg}}{\text{h}} * 0.6869 = 467.092 \frac{\text{kg}}{\text{h}} \text{ agua en I}$$

$$m^{\circ}_{\text{solidos}(I)} = m^{\circ}_{\text{pulpa humeda}(I)} * 0.0631 = 680 \frac{\text{kg}}{\text{h}} * 0.0631 = 42.908 \frac{\text{kg}}{\text{h}} \text{ solido en I}$$

### Corriente J

El 0.9 de piel se recupera en la corriente J.

$$m^{\circ}_{(J)} = m^{\circ}_{\text{semilla}(I)} + m^{\circ}_{\text{piel}(I)} * 0.9$$

$$m^{\circ}_{(J)} = 180 \text{ kg/h} + 140\text{kg/h} * 0.9 = 306 \frac{\text{kg}}{\text{h}} \text{ de solidos en J}$$

c) Composiciones de semilla y piel en corriente J.

$$X_{\text{semilla(J)}} = \frac{180}{306} = 0.5882$$

$$X_{\text{piel(J)}} = \frac{126}{306} = 0.4118$$

### Corriente K

$$m^{\circ}_{(K)} = m^{\circ}_{\text{pulpa(I)}} + m^{\circ}_{\text{piel(I)}} * 0.1$$

$$m^{\circ}_{(K)} = 680 \frac{\text{kg}}{\text{h}} + \frac{140\text{kg}}{\text{h}} * 0.1 = 694 \frac{\text{kg}}{\text{h}} \text{ pulpa en K}$$

$$X_{\text{piel(K)}} = \frac{14}{694} = 0.0202$$

$$X_{\text{pulpa hum(K)}} = \frac{680}{694} = 0.9798$$

d) Composiciones en corriente K

$$m^{\circ}_{\text{solidos(K)}} = m^{\circ}_{\text{pulpa (K)}} - m^{\circ}_{\text{aceite(I)}} - m^{\circ}_{\text{agua(I)}}$$

$$m^{\circ}_{\text{solidos(K)}} = 694 \frac{\text{kg}}{\text{h}} - 170 \frac{\text{kg}}{\text{h}} - 467.092 \frac{\text{kg}}{\text{h}} = 56.908 \frac{\text{kg}}{\text{h}} \text{ solidos en K}$$

$$X_{\text{aceite(K)}} = \frac{170}{694} = 0.2450$$

$$X_{\text{agua(K)}} = \frac{467.092}{694} = 0.6730$$

$$X_{\text{solidos(K)}} = \frac{56.908}{694} = 0.0820$$

### III. Balance de masa en la etapa de termobatido.

Las masas y composiciones de entrada (corriente K), se mantienen a la salida (Corriente L)

### IV. Balance de masa en la etapa de centrifugación.

#### Punto de mezcla

$$m^{\circ}_{(N)} = m^{\circ}_{\text{pulpa humeda(L)}} + m^{\circ}_{\text{agua(N)}}$$

a) Agua agregada al proceso de centrifugación.

El agua agregada en la corriente M es un 1/3 de la pulpa que entra al Tricanter.

$$m^{\circ}_{\text{agua(M)}} = \frac{m^{\circ}_{\text{pulpa humeda(L)}}}{3} = \frac{694}{3} = 231.3333 \frac{\text{kg}}{\text{h}} \text{ agua en M}$$

$$m^{\circ}_{(N)} = 694 \frac{\text{kg}}{\text{h}} + 231.3333 \frac{\text{kg}}{\text{h}} = 925.3333 \frac{\text{kg}}{\text{h}}$$

#### Corriente N

b) Composiciones en corriente N

$$X_{\text{aceite(N)}} = \frac{170}{925.3333} = 0.1837$$

$$X_{\text{agua(N)}} = \frac{467.092 + 231.3333}{925.3333} = 0.7548$$

$$X_{\text{solidos(N)}} = \frac{56.908}{925.3333} = 0.0615$$

### Corriente P

En la corriente P (Orujo) se separa el 8.9% de aceite, el 57.178% de agua y el 66.38% de solidos que entran en N

c) Flujos másicos en corriente P.

$$m^{\circ}_{\text{aceite(P)}} = m^{\circ}_{\text{aceite(N)}} * 8.9\% = 170 * 0.089 = 15.13 \frac{\text{kg}}{\text{h}}$$

$$m^{\circ}_{\text{agua(P)}} = m^{\circ}_{\text{agua(N)}} * 57.18\% = 698.4253 * 0.5718 = 399.3456 \frac{\text{kg}}{\text{h}}$$

$$m^{\circ}_{\text{solidos(P)}} = m^{\circ}_{\text{solidos(N)}} * 66.79\% = 56.908 * 0.6638 = 37.7755 \frac{\text{kg}}{\text{h}}$$

$$m^{\circ}_{\text{(P)}} = 15.13 \frac{\text{kg}}{\text{h}} + 399.3456 \frac{\text{kg}}{\text{h}} + 37.7755 \frac{\text{kg}}{\text{h}} = 452.2512 \frac{\text{kg}}{\text{h}}$$

d) Composiciones en corriente P

$$X_{\text{aceite(P)}} = \frac{15.13}{452.2512} = 0.0335$$

$$X_{\text{agua(P)}} = \frac{399.3456}{452.2512} = 0.8830$$

$$X_{\text{solidos(P)}} = \frac{37.7755}{452.2512} = 0.0835$$

### Corriente Q

En la corriente Q se separa el 24.5% de aceite, el 41.76% de agua y el 32.61% de solidos que entran en N.

e) Flujos másicos en corriente Q.

$$m^{\circ}_{\text{aceite(Q)}} = m^{\circ}_{\text{aceite(N)}} * 24.5\% = 170 * 0.245 = 41.65 \frac{\text{kg}}{\text{h}}$$



$$m^{\circ}_{\text{agua(Q)}} = m^{\circ}_{\text{agua(N)}} * 41.76\% = 698.4253 * 0.4176 = 291.6624 \frac{\text{kg}}{\text{h}}$$

$$m^{\circ}_{\text{solidos(Q)}} = m^{\circ}_{\text{solidos(N)}} * 32.61\% = 56.908 * 0.3261 = 18.5577 \frac{\text{kg}}{\text{h}}$$

$$m^{\circ}_{\text{(Q)}} = 41.65 \frac{\text{kg}}{\text{h}} + 291.6624 \frac{\text{kg}}{\text{h}} + 18.5577 \frac{\text{kg}}{\text{h}} = 351.8701 \frac{\text{kg}}{\text{h}}$$

f) Composiciones en corriente Q.

$$X_{\text{aceite(Q)}} = \frac{41.65}{351.8701} = 0.1184$$

$$X_{\text{agua(K)}} = \frac{291.6624}{351.8701} = 0.8289$$

$$X_{\text{solidos(K)}} = \frac{18.558}{351.8701} = 0.0527$$

### Corriente R

En la corriente R se separa el 66.6% de aceite, el 1.061% de agua y el 1.0055% de solidos que entran en N.

g) Flujos másicos en corriente R.

$$m^{\circ}_{\text{aceite(R)}} = m^{\circ}_{\text{aceite(N)}} * 66.6\% = 170 * 0.666 = 113.22 \frac{\text{kg}}{\text{h}}$$

$$m^{\circ}_{\text{agua(R)}} = m^{\circ}_{\text{agua(N)}} * 1.061\% = 698.453 * 0.01061 = 7.4103 \frac{\text{kg}}{\text{h}}$$

$$m^{\circ}_{\text{solidos(R)}} = m^{\circ}_{\text{solidos(N)}} * 1.0056\% = 56.908 * 0.0100 = 0.5722 \frac{\text{kg}}{\text{h}}$$

$$m^{\circ}_{\text{(R)}} = 113.22 \frac{\text{kg}}{\text{h}} + 7.4103 \frac{\text{kg}}{\text{h}} + 0.5725 \frac{\text{kg}}{\text{h}} = 121.2025 \frac{\text{kg}}{\text{h}}$$

h) Composiciones en corriente R.

$$X_{\text{aceite(R)}} = \frac{113.22}{121.2025} = 0.9341$$

$$X_{\text{agua(R)}} = \frac{7.4103}{121.2025} = 0.0611$$

$$X_{\text{solidos(R)}} = \frac{0.5722}{121.2025} = 0.0047$$

### V. Balance de masa en la etapa de purificación.

En la corriente U se recupera el 98% del aceite de la fase oleosa que sale del Tri-canter. Como el aceite que sale debe contener un porcentaje menor al 0.1% de agua, se supondrá que, del agua que entra a la centrifuga un 1% sale en esta corriente y el 99% se separa en la corriente S, además la corriente S contiene el 2% del aceite que entra para ser purificado.

#### Corriente S

$$m^{\circ}_{\text{aceite(S)}} = m^{\circ}_{\text{aceite(R)}} * 0.02 = 113.22 \frac{\text{kg}}{\text{h}} * 0.02 = 2.2644 \text{ kg de aceite}$$

$$m^{\circ}_{\text{solidos(S)}} = m^{\circ}_{\text{solidos(R)}} = 0.5722 \frac{\text{kg}}{\text{h}}$$

$$m^{\circ}_{\text{agua(S)}} = m^{\circ}_{\text{agua(R)}} * 0.99 = 7.4103 * 0.99 = 7.3362 \frac{\text{kg}}{\text{h}} \text{ agua}$$

$$m^{\circ}_{(S)} = 2.2644 \frac{\text{kg}}{\text{h}} \text{ de aceite} + 0.5722 \frac{\text{kg}}{\text{h}} \text{ de solidos} + 7.3362 \frac{\text{kg}}{\text{h}} \text{ agua} = 10.1728 \text{ kg/h}$$

a) Composiciones en la corriente S.

$$X_{\text{aceite(S)}} = \frac{2.2644}{10.1728} = 0.2226$$

$$X_{\text{agua(S)}} = \frac{7.3362}{10.1728} = 0.7212$$

$$X_{\text{solidos(S)}} = \frac{0.5725}{10.1728} = 0.0562$$

### **Corriente U**

$$m^{\circ}_{\text{aceite(U)}} = m^{\circ}_{\text{aceite(R)}} * 0.98 = 113.22 * 0.98 = 110.9556 \text{ kg de aceite}$$

$$m^{\circ}_{\text{agua(U)}} = m^{\circ}_{\text{agua(R)}} * 1\% = 8.3652 * 0.01 = 0.0741 \text{ kg de agua}$$

$$m^{\circ}_{(U)} = 110.955 \text{ kg de aceite} + 0.08365 \text{ kg de agua} = 111.0297 \text{ kg/h}$$

b) Composiciones en la corriente U.

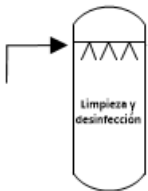
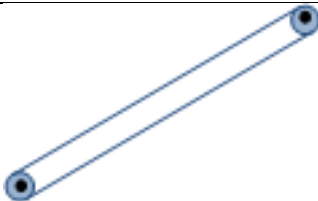

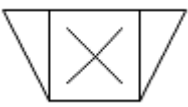
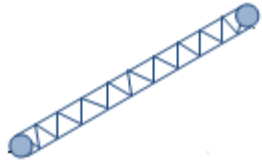

$$X_{\text{aceite(U)}} = \frac{110.9556}{111.0297} = 0.999$$

$$X_{\text{agua(U)}} = \frac{0.0741}{111.0386} = 0.0006674$$

## Anexo C. Simbología del diagrama de flujo de procesos de producción de aceite de aguacate.

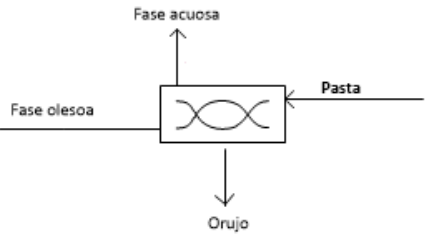
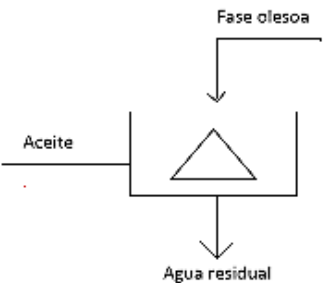
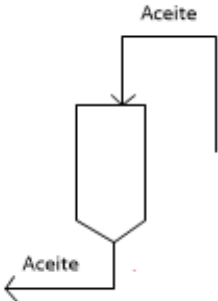
En la Tabla C.1, se encuentra la simbología del diagrama de flujo del proceso de extracción de aceite de aguacate.

**Tabla C.1** Simbología del diagrama de flujo del proceso de extracción de aceite de aguacate.

SÍMBOLO	CARACTERÍSTICA
	Equipo de lavado y desinfección de la materia prima.
	Banda transportadora con inclinación vertical.
	Bombas de desplazamiento positivo
	Despulpadora de aguacate
	Transportadora de tornillo.
	Termobatidora

Continúa...

**Tabla C.1** Simbología del diagrama de flujo del proceso de extracción de aceite de aguacate (continuación).

SÍMBOLO	CARACTERÍSTICA
	<p>Centrifugación (Tricanter)</p>
	<p>Centrifugación vertical (Purificación)</p>
	<p>Almacenamiento del aceite</p>

## **Anexo D. Ejemplo de cálculos de la evaluación de impactos ambientales a través del método CRI.**

Para la evaluación del impacto ambiental, se muestra en la sección 2.3.1.2, numeral III del presente trabajo la ponderación que tiene cada uno de los criterios en el método CRI y se presenta el carácter que tienen la evaluación de estos criterios.

### **I. Ejemplo de cálculo del factor suelo, en relación al impacto en la alteración de la calidad.**

a) Cálculo de la magnitud.

De la ecuación 2.1 se tiene:

$$Ma = (I * WI) + (E * WE) + (D * WD)$$

$$Ma = (9 * 0.40) + (5 * 0.40) + (5 * 0.2)$$

$$Ma = 6.6$$

b) Cálculo de valor del índice de Impacto Ambiental (VIA).

De la ecuación 2.2 se tiene:

$$VIA = R^{Xr} * RG^{Xg} * M^{Xm}$$

$$VIA = 5^{0.17} * 10^{0.22} * 10^{0.61}$$

$$VIA = 6.67$$

## Anexo E. Esquema del procedimiento utilizado para la extracción de almidón a partir de semillas de aguacate.

En el esquema E.1 se muestra el procedimiento para la extracción del almidón.

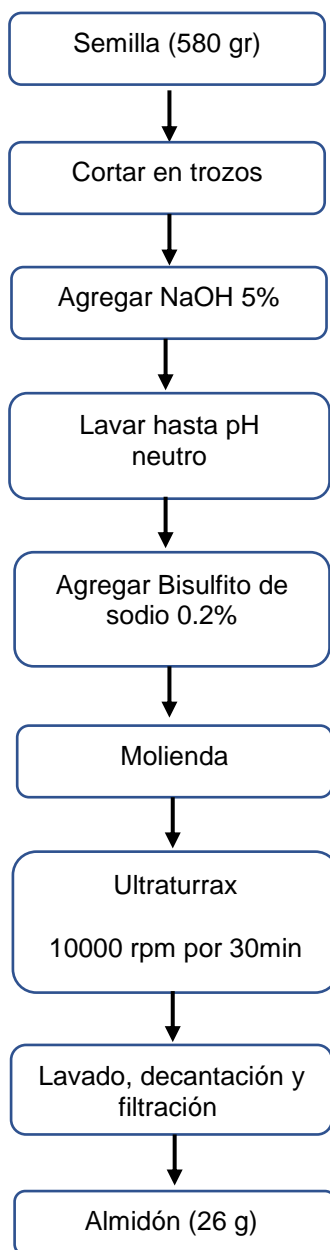
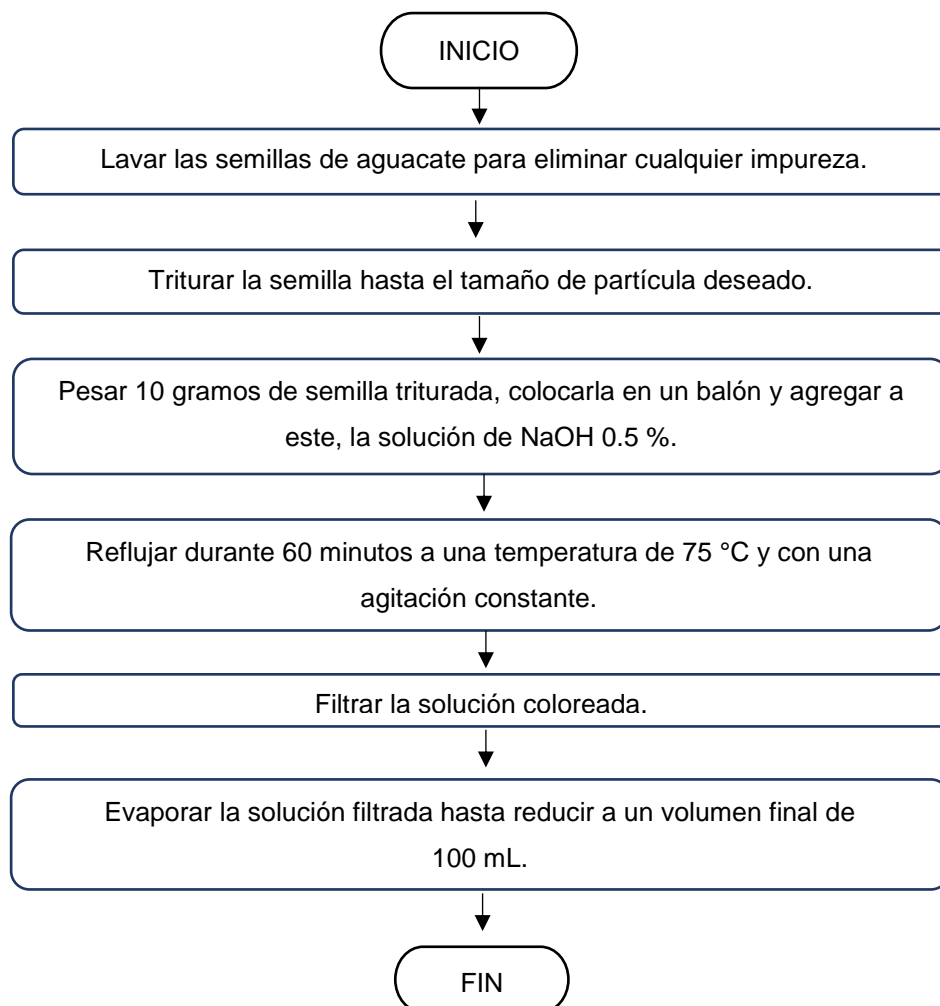


Figura E.1 Esquema del procedimiento utilizado para la extracción de almidón a partir de semillas de aguacate. Fuente: (Cárdenas et al., 2019)

**Anexo F. Procedimiento para la extracción de colorante de la semilla de aguacate a través del método de maceración por lixiviación con solvente.**

En el esquema F.1 se presenta el procedimiento para la extracción de colorante a partir de la semilla de aguacate.



**Figura F.1 Esquema de procedimiento para la extracción de colorante a partir de la semilla de aguacate.** Fuente: (Devia y Saldarriaga, 2004).



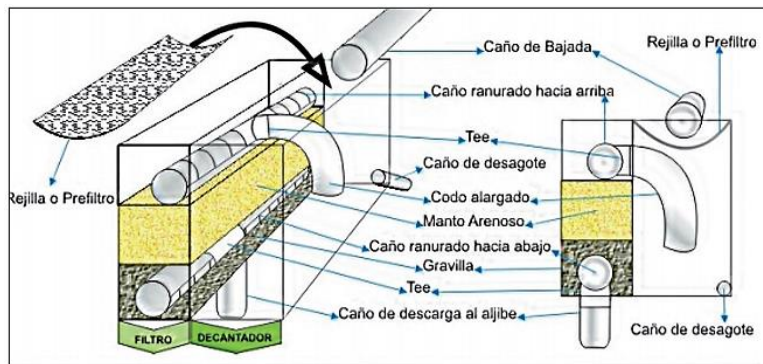
## Anexo G. Límites permisibles para la descarga de aguas residuales a un cuerpo receptor.

El Reglamento Técnico Salvadoreño (RTS 13.05.01:18, 2018) establece los límites permisibles de parámetros básicos para poder verter un efluente a un cuerpo receptor, los cuales son:

- i. Actividad: Extracciones de aceites y grasa.
- ii. DQO (mg/L): 700.
- iii. DBO5 (mg/L): 400.
- iv. Sólidos Suspendidos Totales (mg/L): 150.
- v. Aceites y grasas (mg/L): 100.
- vi. Potencial de Hidrogeno (Unidades de pH): 6.0 - 9.0.
- vii. Temperatura (°C): 20 – 35.

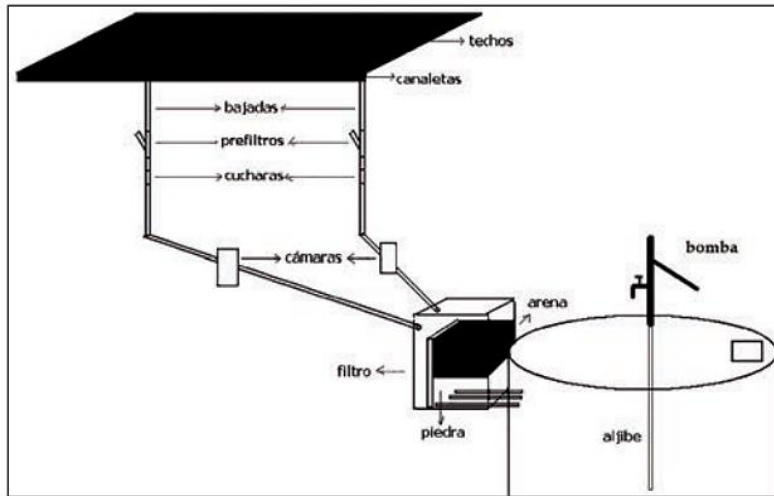
## Anexo H. Sistema de captación de agua lluvia.

En la Figura H.1 se presenta el Sistema de filtrado compuesto por prefiltro, decantador y filtro de arena.



**Figura H.1 Sistema de prefiltrado compuesto por prefiltro, decantador y filtro de arena.** Fuente: (Basan et al., 2018).

En la Figura H.2 se presenta el sistema de aprovechamiento del agua de lluvia para consumo humano.

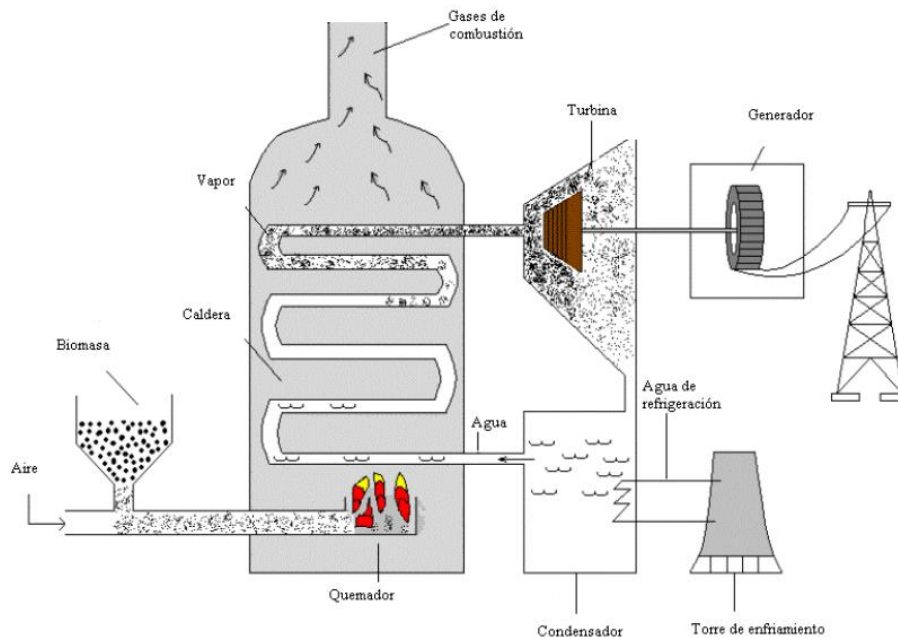


**Figura H.2 Sistema de aprovechamiento del agua lluvia para consumo humano.**

Fuente: (Basan et al., 2018).

### **Anexo I. Sistema de generación de energía eléctrica a partir de la biomasa.**

En la figura I.1 se presenta el sistema de generación de energía eléctrica a partir de la biomasa.



**Figura I.1 Sistema de instalación de una caldera de biomasa para generación de energía eléctrica. Fuente: (Lalanne, s.f).**