

UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR
FACULTAD DE INGENIERIA Y ARQUITECTURA
ESCUELA DE INGENIERIA QUIMICA E INGENIERIA DE
ALIMENTOS.



**EVALUACIÓN DE LOS USOS POTENCIALES DEL
TEBERINTO (*Moringa oleífera*) COMO GENERADOR DE
MATERIA PRIMA PARA LA INDUSTRIA QUÍMICA.**

PRESENTADO POR:

ANDREA GUADALUPE GARCIA TORRES

ROCIO KATHYA MARITZA MARTINEZ CUBIAS

INGRID ARELY RODRIGUEZ DIAZ

PARA OPTAR AL TITULO DE:

INGENIERA QUIMICO

CIUDAD UNIVERSITARIA, MARZO DEL 2013

UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR

RECTOR :

ING. MARIO ROBERTO NIETO LOVO

SECRETARIA GENERAL :

DRA. ANA LETICIA ZAVALA DE AMAYA

FACULTAD DE INGENIERIA Y ARQUITECTURA

DECANO :

ING. FRANCISCO ANTONIO ALARCÓN SANDOVAL

SECRETARIO :

ING. JULIO ALBERTO PORTILLO

**ESCUELA DE INGENIERIA QUIMICA E INGENIERIA DE
ALIMENTOS.**

DIRECTORA :

Mtra. INGA. TANIA TORRES RIVERA

UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR
FACULTAD DE INGENIERIA Y ARQUITECTURA
ESCUELA DE INGENIERIA QUIMICA E INGENIERIA DE
ALIMENTOS.

Trabajo de Graduación previo a la opción al Grado de:

INGENIERA QUIMICO

Título :

**EVALUACIÓN DE LOS USOS POTENCIALES DEL
TEBERINTO (*Moringa oleífera*) COMO GENERADOR DE
MATERIA PRIMA PARA LA INDUSTRIA QUÍMICA.**

Presentado por :

ANDREA GUADALUPE GARCIA TORRES

ROCIO KATHYA MARITZA MARTINEZ CUBIAS

INGRID ARELY RODRIGUEZ DIAZ

Trabajo de Graduación Aprobado por:

Docentes Directores :

Mae. ING. FERNANDO TEODORO RAMIREZ ZELAYA

Mtra. ING. TANIA TORRES RIVERA

San Salvador, Marzo de 2013

Trabajo de Graduación Aprobado por:

Docentes Directores :

Mae. ING. FERNANDO TEODORO RAMIREZ ZELAYA

Mtra. ING. TANIA TORRES RIVERA

AGRADECIMIENTOS

A la **Universidad de El Salvador**, prestigiosa universidad que nos abrió las puertas para adquirir los conocimientos necesarios para formarnos como ingenieras integralmente.

A la **Escuela de Ingeniería Química e Ingeniería de Alimentos y su personal docente**, por su aporte, dedicación, esmero y motivación para la culminación de nuestros estudios profesionales.

A la **Escuela de Química de la Facultad de Ciencias Naturales y Matemáticas**, por facilitarnos equipo y cristalería necesaria para la extracción de aceite de *Moringa oleífera*.

A la **Sra. Rhina de Rehmman**, por proporcionarnos las vainas y semillas de *Moringa oleífera* que serían utilizadas en la etapa experimental.

A la **Asociación Nacional de Acueductos y Alcantarillados (ANDA)**, por colaborar con el equipo de prueba de jarras para la evaluación de la *Moringa oleífera* como coagulante natural.

A nuestros asesores **Inga. Tania Torres Rivera e Ing. Fernando Teodoro Ramírez Zelaya**, que nos apoyaron y confiaron en nuestro trabajo, brindándonos la asesoría necesaria para culminar satisfactoriamente el trabajo de graduación.

A la **Inga. Eugenia Gamero de Ayala**, por proporcionarnos la idea e información principal sobre la *Moringa oleífera* para iniciar nuestro trabajo de graduación.

A la **Inga. Delmy del Carmen Rico Peña**, por sus aportes y sus consejos que fueron valiosos en cada momento a lo largo de nuestro camino universitario.

A la **Inga. Beatriz Lima de Zaldaña, Sr. Alexander Padilla y Sr. Oscar Morán**, por ayudarnos con la manipulación de equipos y facilitarnos el uso del material necesario de la Planta Piloto, para poder realizar las diferentes experimentaciones en el laboratorio.

DEDICATORIA

A Dios

Por enseñarme el camino de la sabiduría y la felicidad haberme permitido llegar hasta este punto y haberme dado salud para lograr mis objetivos, además de su infinita bondad y amor, ya que sin Él no podría llegar a ningún lado.

A mi madre Guadalupe

Por el gran amor y devoción que tiene a sus hijos, por el apoyo ilimitado e incondicional que siempre me ha dado, por tener siempre la fortaleza de salir siempre adelante sin importar los obstáculos, por enseñarme el valor del estudio, por haberme formado como una mujer de bien, y por ser la mujer que me dio la vida y me enseñó a vivirla.

A mi padre Wilfredo

Por los ejemplos de perseverancia y constancia que lo caracterizan y que me ha infundado siempre, por enseñarme el valor al estudio, por el valor mostrado para salir adelante y por su amor.

A mis familiares

A mis hermanos Willy y Alejandro con los cuales he compartido tristezas y alegrías, por enseñarme el valor de la hermandad, a mis abuelitas Ana y Mamá Chita que me brindaron su apoyo y cariño en tiempos difíciles, a mi tía Mercedes que es como una segunda madre y a todos los que me fomentaron el deseo de superación y el anhelo de triunfo en la vida.

 *A mis maestros*

A la Ing. Tania Torres y al Ing. Teodoro Ramírez por el gran apoyo y motivación en la culminación de mis estudios profesionales y para la elaboración de este trabajo de graduación, a la Ing. Delmy Rico por su apoyo y consejos ofrecidos a lo largo de la carrera y a todos los maestros de la Escuela de Ingeniería Química e Ingeniería de Alimentos por su tiempo compartido y por impulsar el desarrollo en mi formación profesional.

 *A mis amigos*

Que nos apoyamos mutuamente a lo largo de mi vida y de mi formación profesional y que hasta ahora seguimos siendo amigos.

“Mantente firme en la enseñanza, nunca te desanimas, guárdala bien pues ella es tu vida”. Prov. 4, 13

Andrea Guadalupe García Torres

DEDICATORIA.

Me encuentro en esta etapa de mi vida sintiéndome dichosa y contenta. He esperado con plena confianza en Dios que llegara este momento en el que pudiera dedicar, compartir y agradecer a seres tan especiales e importantes esta meta alcanzada.

Agradezco a nuestro **Padre Celestial** por su infinito amor, bondad y fidelidad a lo largo de toda mi vida. Porque gracias a Él he podido terminar este trabajo de graduación, porque en cada momento ha estado ahí para protegerme, guiarme y para demostrarme su grandeza, dándome la salud y las fuerzas necesarias para no dejarme vencer, luchando siempre por mis propósitos tomada de su mano. A ti **Virgencita de Guadalupe** por interceder siempre por mí, por cuidarme con tu manto santo en estos años de vida universitaria y en cada paso de mi vida.

A mis amados padres, **Juan José Tomás y Rosa Maritza**, por ser la bendición de mi vida, porque gracias a su ejemplo, amor incomparable, educación, consejos, regaños, comprensión, paciencia, apoyo y fortaleza han hecho de mis hermanas y de mi lo que ahora somos. No me alcanzarían las palabras para expresar todo lo que mi corazón siente cuando se trata de ustedes. Y sé que este logro los llena de mucho orgullo y lo celebramos juntos. Cumpliste la meta Tomasito! Ya puedes regresar de Honduras. Maritzita cada vez estamos más cerca de conocer el mundo!. A mis hermanas, **Johanna y Gaby** por haber cumplido siempre el rol de hermanitas mayores de esas que una ama con todo el alma, con quien puedes enojarte pero que no las cambiarías por nada porque siempre están ahí para consentir, ser apoyo, amigas y confidentes. Gracias por estar pendiente de mí y por amarme tal y como soy. En especial a ti gordita por ser como mi segunda mamá.

A mis abuelitos **Nicolás y Delmy** por enseñarme que el amor a Dios, el esfuerzo y lucha constante nos llevaran a alcanzar siempre nuestros objetivos. Gracias por sus oraciones, amor y ser mis mejores ejemplos a seguir.

A mis amigas y compañeras de tesis **Andrea e Ingrid** por quererme como una hermana, aguantarme y tenerme paciencia en mis cambios de humor todos estos años de estudio. Con ustedes he pasado momentos alegres, tristes, de enojo, inolvidables y únicos; me han hecho reír con sus locuras, he disfrutado de su amistad y de cada ocurrencia. Siempre estaré agradecida con Dios porque se me cruzaron en el camino llamado vida. Que nuestra amistad perdure! Las quiero.

A mis amigos, compañeros, y niño de mis ojos, que durante este tiempo universitario hemos aprendido de pruebas que fortalecen una verdadera amistad, que se han tomado el tiempo y el corazón para conocer a esta jovencita de carácter único y que a pesar de eso me han seguido queriendo. Justo en este instante vienen a mí tantos recuerdos en esas aulas, buenos y malos... pero la vida no sería interesante sin días de sol y otros con lluvia. Los quiero hasta el cielo... gracias por cada enseñanza y cariño... por ser parte de mi historia, y porque con ustedes todo ha sido más fácil. En especial a ustedes **Oscar Francisco, Carlos, Fidel, Marvin, María Rosa, Ricardo, Javier y Esmeralda**.

A mis maestros, por haber compartido y transmitido sus conocimientos, siendo nuestros consejeros y tenernos ese cariño que es correspondido, de manera especial a la **Inga Tania Torres, Inga Delmy Rico, Inga Eugenia Gamero, Inga Nohemí Laínez e Ing Teodoro Ramírez**.

*“Lo importante no cambia, tu fuerza y tu convicción no tienen edad. Tu espíritu es el plumero de cualquier telaraña.
Detrás de cada línea de llegada, hay una de partida. Detrás de cada logro, hay otro desafío.
Nunca digas adiós si todavía quieres tratar, nunca te des por vencido si sientes que puedes seguir luchando”.*
Madre Teresa de Calcuta

Rocío Martínez Cubías

DEDICATORIA

Al volver la vista atrás y revisar el camino recorrido hasta el momento, puedo ver que mi formación profesional ha sido un camino largo, el cual no hubiera finalizado sin el apoyo de todas las personas que forman parte de mi vida y que me han motivado para seguir adelante bajo cualquier circunstancia. Por tal razón quiero dedicarles el fruto de este esfuerzo que ahora comparto con ustedes.

A Dios, Por haberme permitido culminar mi carrera, que con amor y misericordia me dio las fuerzas necesarias para llegar a la meta, ayudándome a superar cada obstáculo en el camino. Sin él nada hubiera sido posible y el agradecimiento jamás será suficiente para cada una de las bendiciones que me ha regalado.

A mi familia, principalmente a **mis padres, Ramón y Blanca**, que con esfuerzo y sacrificio lograron ayudarme a cumplir mi objetivo, dándome el ejemplo de superación más grande y quiénes nunca cuestionaron la elección de mi carrera, confiando en mí y apoyándome para no desistir. Los valores inculcados y la educación brindada son invaluableles en mi vida. Gracias a su enorme amor y comprensión he llegado hasta este momento. **A mis hermanos Sergio y Ramón y mi primo Alberto**, que estuvieron ahí en el momento exacto para ofrecerme palabras de aliento, cariño y bromas que aun en la situación más agobiante lograban sacarme risas. **A mis abuelos, Lidia y Gilberto y mis tíos Raquel, Héctor, Gilberto y Lilian**, que con cariño me han tendido su mano en cualquier circunstancia. **A mis primitos, Mónica y Raulito**, que llenan de alegría mi vida.

A Mauri Guevara, una persona especial en mi vida que ha compartido cada uno de los sentimientos y soportado los diferentes estados de ánimo suscitados en esta etapa universitaria, en donde el apoyo, las palabras de aliento en el momento oportuno, su paciencia y amor me han brindado la ayuda necesaria para hacer este camino un poco más fácil de llevar.

A mis amigos, que forman parte de este esfuerzo y con quienes he compartido largas horas de estudio, alegrías, tristezas, llantos y enojos y que a lo largo del tiempo se han ido convirtiendo en algo más que amigos, especialmente **Fidel, Alfredo, Lily y Rebeca**, que me regalaron su cariño y su confianza, y quienes son responsables de tantos recuerdos gratos.

A Andrea García y Rocío Martínez, con quienes he compartido momentos inolvidables que han marcado mi vida y que me han hecho comprender que la amistad es un lazo fuerte apenas separado de la hermandad, que no hay barrera que con dedicación, unión y esfuerzo no se pueda derribar y que la fortaleza de esta amistad es la herencia que nos ha dejado todos los años de convivencia. Nuestros caminos ahora se separan, más no así nuestra amistad.

A mis maestros, que han dedicado de su tiempo y han aportado sus valiosos conocimientos a mi formación profesional a lo largo de la carrera de Ingeniería Química, especialmente a las **Ingenieras Tania Torres, Delmy Rico y Eugenia Gamero y el Ing. Teodoro Ramírez**, quienes constituyen un ejemplo a seguir y a quienes les guardo mucho cariño.

Cerrar esta etapa me genera tristeza, sin embargo el haber llegado a la meta y saber que son parte de este triunfo me llena de satisfacción. Infinitamente agradecida con Dios y con cada una de las personas a las que dedico este logro.

“El fin de una etapa es sólo el comienzo de otra. Los riesgos superados son la preparación necesaria para pasar mejor la próxima etapa”

Paulo Coelho

Ingrid Arely Rodríguez Díaz

INDICE DE CONTENIDOS

INDICE DE CONTENIDOS	i
INDICE DE FIGURAS	viii
INDICE DE TABLAS	xi
RESUMEN	xiv
INTRODUCCION	xvi
OBJETIVOS	xviii
OBJETIVO GENERAL	xviii
OBJETIVOS ESPECIFICOS	xviii
MARCO TEORICO	1
CAPITULO 1. HISTORIA Y EVOLUCION DE LA INDUSTRIA QUÍMICA EN EL SALVADOR	2
1.1 DEFINICIÓN DE INDUSTRIA QUÍMICA	2
1.2 LA INDUSTRIA QUÍMICA EN EL MUNDO	3
1.2.1 ESTADO ACTUAL DE LA INDUSTRIA QUÍMICA A NIVEL MUNDIAL	5
1.2.2 LA INDUSTRIA QUÍMICA EN EL SALVADOR	6
1.2.2.1 ESTADO ACTUAL DE LA INDUSTRIA QUÍMICA EN EL SALVADOR	8
1.3 DIVERSIFICACIÓN EN EL USO DE PLANTAS COMO MATERIA PRIMA EN EL SALVADOR	9
CAPÍTULO 2. GENERALIDADES DEL TEBERINTO (<i>Moringa oleífera</i>)	14
2.1 ORIGEN DEL TEBERINTO	14
2.1.1 DESCRIPCIÓN BOTÁNICA DE LA ESPECIE	16

2.2	ASPECTOS AGRONÓMICOS DEL TEBERINTO (<i>Moringa oleífera</i>)	18
2.2.1	CONDICIONES CLIMÁTICAS	19
2.2.2	SUELOS	20
2.2.3	SIEMBRA DEL TEBERINTO (<i>Moringa oleífera</i>)	22
2.2.4	MANEJOS DE LAS PLANTACIONES	24
2.2.5	FLORACIÓN, FRUCTIFICACIÓN Y COSECHA DEL TEBERINTO	27
2.3	PROPIEDADES FÍSICAS Y QUÍMICAS DEL TEBERINTO (<i>Moringa oleífera</i>)	27
2.3.3	TOXICIDAD Y CONTENIDO QUÍMICO.	30
CAPITULO 3. APLICACIÓN Y UTILIDADES DEL TEBERINTO (<i>Moringa oleífera</i>).		31
3.1	APLICACIONES PRÁCTICAS DEL TEBERINTO (<i>Moringa oleífera</i>)	31
3.2	USOS EN AGRICULTURA	33
3.2.1	SISTEMAS AGROFORESTALES	33
3.2.1.1	CORTINAS ROMPEVIENTOS	34
3.2.1.2	CERCOS VIVOS	35
3.2.1.3	CULTIVO EN CALLEJÓN	36
3.2.2	CONTROL DE EROSIÓN Y MEJORA DE SUELOS	37
3.2.3	FERTILIZANTES	38
3.2.4	FUENTE DE HORMONAS	38
3.2.5	ORNAMENTALES	39
3.3	USOS ALIMENTICIOS	39
3.3.1	ALIMENTACION ANIMAL	39
3.3.1.1	<i>Moringa oleífera</i> COMO ÁRBOL FORRAJERO	40
3.3.2	ALIMENTACION HUMANA	43
3.4	USOS QUIMICOS	45
3.4.1	COSMÉTICOS	45
3.4.2	BIODIESEL	46

3.4.3	BIOMASA	47
3.4.4	TRATAMIENTO DE AGUAS	49
3.4.5	ETANOL	51
3.4.6	FUENTE DE CELULOSA	51
3.4.7	TINTE Y GOMA	51
3.4.8	CARBÓN ACTIVADO	52
3.5	ESTUDIOS DEL TEBERINTO (<i>Moringa oleífera</i>) EN EL SALVADOR	53
CAPÍTULO 4. DESCRIPCIÓN DE PROCESOS EN LA INDUSTRIA QUÍMICA		
UTILIZANDO PLANTAS COMO MATERIA PRIMA		54
4.1	PROCESOS DE EXTRACCIÓN DE ACEITE A PARTIR DE SEMILLAS OLEAGINOSAS	54
4.1.1	EXTRACCION POR PRENSADO	55
4.1.1.1	PRENSADO DISCONTINUO	55
4.1.1.2	PRENSADO CONTINUO	56
4.1.2	EXTRACCIÓN CON SOLVENTES	57
4.1.2.1	EXTRACCIONES POR MEDIO DE LIXIVIACIÓN	58
4.1.2.2	EXTRACCIONES POR MEDIO DE PERCOLACIÓN	58
4.1.2.3	EXTRACCIONES TIPO SOXHLET	59
4.1.2.4	FACTORES QUE INFLUYEN EN EL PROCESO DE EXTRACCIÓN	61
4.1.3	EXTRACCIÓN CON FLUIDOS SUPERCRÍTICOS	61
4.1.4	EXTRACCIÓN POR ARRASTRE CON VAPOR	62
4.1.4.1	DESCRIPCIÓN DEL PROCESO/ EQUIPO EMPLEADO	63
4.2	PROCESOS DE PRODUCCIÓN DE COAGULANTES PARA LA PURIFICACION/ LIMPIEZA DE AGUAS	64
4.2.1	TIPOS DE COAGULANTES	64
4.2.1.1	COAGULANTES ARTIFICIALES	65
4.2.1.2	COAGULANTES NATURALES	66
4.2.2	PRODUCCIÓN DE COAGULANTES	69

4.2.2.1	COAGULANTES CONVENCIONALES	69
4.2.2.2	PRODUCCIÓN DE COAGULANTES ALTERNATIVOS (PAC'S)	69
4.2.2.3	PRODUCCIÓN DE COAGULANTES NATURALES	70
4.3	PROCESOS DE PRODUCCIÓN DE CARBÓN ACTIVADO	70
4.3.1	HISTORIA DE LA INDUSTRIALIZACIÓN DEL CARBÓN ACTIVADO	71
4.3.2	DEFINICIÓN DE CARBÓN ACTIVADO	72
4.3.3	PROCESOS DE PRODUCCIÓN DE CARBÓN ACTIVADO	73
4.3.3.1	ACTIVACIÓN FÍSICA	73
4.3.3.2	ACTIVACIÓN QUÍMICA	74
4.3.3.3	PROCESO DE REGENERACIÓN DEL CARBÓN ACTIVADO	75
4.3.3.4	OTROS TRATAMIENTOS DEL CARBÓN ACTIVADO	76
4.3.4	APLICACIONES DEL CARBÓN ACTIVADO	76
	ESTUDIO EMPIRICO	78
	CAPITULO 5. METODOLOGÍA EXPERIMENTAL PARA EL USO DE LA SEMILLA DE TEBERINTO (<i>Moringa oleífera</i>) EN LA EXTRACCIÓN DE ACEITE Y EN LA PURIFICACION DE AGUAS SUPERFICIALES	79
5.1	DESARROLLO EXPERIMENTAL PARA LA EXTRACCIÓN DE ACEITE DE SEMILLA DE TEBERINTO (<i>Moringa oleífera</i>)	80
5.1.1	PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL PARA ELECCION DEL TIPO DE SOLVENTE EN EXTRACCION DE ACEITE	80
5.1.1.1	CARACTERIZACIÓN DE LA MATERIA PRIMA PARA LA EXTRACCION DE ACEITE DE TEBERINTO (<i>Moringa oleífera</i>)	80
5.1.1.2	PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL PARA LA	

	EXTRACCIÓN DE ACEITE DE SEMILLA DE TEBERINTO (<i>Moringa oleífera</i>)	81
5.1.1.3	MONTAJE EXPERIMENTAL	83
5.1.1.4	PLANIFICACIÓN DE LOS EXPERIMENTOS. SELECCIÓN DE VARIABLES Y FACTORES	85
5.1.2	ESTUDIO DEL EFECTO DE LOS FACTORES QUE INFLUYEN EN EL PROCEDIMIENTO DE EXTRACCION DE ACEITE	88
5.1.2.1	PLANIFICACIÓN DE LOS EXPERIMENTOS. SELECCIÓN DE VARIABLES Y FACTORES	88
5.1.3	EVALUACIÓN DE PARÁMETROS DE CALIDAD PARA EL ACEITE OBTENIDO DE LA SEMILLA DE TEBERINTO (<i>Moringa oleífera</i>)	94
5.2	DESARROLLO EXPERIMENTAL PARA EVALUAR EL FUNCIONAMIENTO DEL POLVO DE COTILEDONES DE LA SEMILLA DE TEBERINTO (<i>Moringa oleífera</i>) COMO COAGULANTE	96
a)	CARACTERIZACIÓN Y ACONDICIONAMIENTO DE LOS MATERIALES COAGULANTES A UTILIZAR EN LA EXPERIMENTACION	97
b)	CARACTERIZACIÓN DE PROBETAS CONTROLADAS A LAS QUE SE LE APLICARÁN LOS TRATAMIENTOS	98
c)	PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL PARA EVALUAR EL FUNCIONAMIENTO DE LA SEMILLA DE <i>Moringa oleífera</i> COMO COAGULANTE	99
c.1)	MONTAJE EXPERIMENTAL PARA LA RECOLECCION DE DATOS	99
c.2)	PLANIFICACIÓN DE LOS EXPERIMENTOS. SELECCIÓN DE VARIABLES Y FACTORES. RECOLECCION DE DATOS	101
5.2.2	EVALUACION DE PARAMETROS DE CALIDAD PARA AGUA TRATADA UTILIZANDO COMO COAGULANTE TEBERINTO	

(<i>Moringa oleífera</i>)	107
5.3 DESARROLLO EXPERIMENTAL PARA PRODUCCION DE CARBON ACTIVADO A PARTIR DE VAINAS Y CASCARILLAS DE TEBERINTO	109
5.3.1 ACTIVACION DE CARBON OBTENIDO DE VAINA Y CASCARILLA DE TEBERINTO	110
5.3.1.1 METODO DE ACTIVACION QUIMICA	110
5.3.2 DETERMINACION DE LA CAPACIDAD DE ADSORCION DEL CARBON ACTIVADO OBTENIDO A PARTIR DE VAINAS Y CASCARILLAS DE SEMILLA DE TEBERINTO	112
 CAPÍTULO 6. PREDISEÑO PARA LA INSTALACIÓN DE UNA PLANTA DE EXTRACCIÓN DE ACEITE DE SEMILLA DE TEBERINTO (<i>Moringa oleífera</i>) BAJO EL ENFOQUE DE INGENIERÍA SOSTENIBLE	 119
6.1 ANÁLISIS DE MERCADO	120
6.1.1 CAPACIDAD DE PRODUCCIÓN	122
6.2 DISEÑO DE PLANTA DE PRODUCCIÓN DE ACEITE UTILIZANDO COMO MATERIA PRIMA SEMILLA DE TEBERINTO (<i>Moringa oleífera</i>)	124
6.2.1 DETALLES DE OPERACIÓN	124
6.2.1.1 DIAGRAMA DEL PROCESO DE PRODUCCIÓN	126
6.2.1.2 BALANCE DE MASA GLOBAL DEL PROCESO	132
6.2.1.3 ESPECIFICACIONES DE EQUIPO	139
6.2.2 PROPUESTA DE APROVECHAMIENTO DE RESIDUOS	146
6.2.2.1 APROVECHAMIENTO DE VAINA Y CASCARILLA COMO CARBÓN ACTIVADO	146
6.2.2.2 APROVECHAMIENTO DE TORTA RESIDUAL OBTENIDA EN LA EXTRACCIÓN DE ACEITE COMO COAGULANTE NATURAL	147

6.3 POTENCIALES IMPACTOS AMBIENTALES	148
CONCLUSIONES	150
RECOMENDACIONES	154
BIBLIOGRAFIA	155
ANEXOS	167
ANEXO I. ANÁLISIS FÍSICOQUÍMICOS REALIZADOS AL AGUA CON COAGULANTE NATURAL DE <i>Moringa Oleífera</i>	167
ANEXO II. MODELOS MATEMÁTICAS PARA LA ELABORACIÓN DE LA CURVA DE ADSORCIÓN DEL CARBÓN ACTIVADO	170

INDICE DE FIGURAS

Figura 2.1	Área de distribución natural de <i>Moringa Oleífera</i>	15
Figura 2.2	Zonas donde se utiliza la <i>Moringa Oleífera</i> actualmente	15
Figura 2.3	Preparación del suelo utilizando tracción animal	21
Figura 2.4	Preparación del suelo utilizando maquinaria	22
Figura 2.5	Semilla de <i>Moringa oleífera</i> en vaina	23
Figura 3.1	Usos potenciales de diferentes partes de la planta de <i>Moringa oleífera</i> en la industria y producción de alimentos	32
Figura 3.2	Esquematación de diferentes sistemas Agroforestales aplicados	34
Figura 3.3	Diseño básico de una Cortina Rompevientos	35
Figura 3.4	Árboles de Teberinto usados como Cerco Vivo en la división de un terreno	36
Figura 3.5	Características necesarias para que una especie vegetal sea adecuada para el cultivo en callejones	37
Figura 3.6	Biodiesel obtenido a partir de semillas de <i>Moringa oleífera</i>	47
Figura 4.1	Equipo de extracción tipo Soxhlet	60
Figura 4.2	Diagrama del proceso de Activación Química para la producción de Carbón Activado	75
Figura 5.1	Montaje Experimental del equipo Soxhlet para la extracción de aceite de la Semilla de <i>Moringa oleífera</i>	84
Figura 5.2	Esquema del Montaje de Destilación Simple	85
Figura 5.3	Diagrama de Dispersión por Nivel	87
Figura 5.4	Grafico de Probabilidad Normal para Rendimiento	92
Figura 5.5	Grafico de Pareto para Rendimiento	92
Figura 5.6	Grafico de Interacción Efecto BD	94
Figura 5.7	Montaje Experimental del equipo de prueba de jarras	100

Figura 5.8	Comparación de promedios del porcentaje de remoción de la turbidez en función de la dosis de coagulante	104
Figura 5.9	Comparación de promedios del porcentaje de remoción de la turbidez en función del tipo de material coagulante	104
Figura 5.10	Comportamiento del porcentaje de remoción de la turbidez como función de la interacción entre los factores	105
Figura 5.11	Análisis de residuos para el diseño bifactorial	106
Figura 5.12	Carbón activado obtenido a partir de cascarilla de Teberinto	111
Figura 5.13	Azul de metileno antes y después del contacto directo con carbón activado	113
Figura 5.14	Isoterma de Adsorción Linealizada de Langmuir para Carbón Activado a Partir de Cascarilla	116
Figura 5.15	Isoterma de Adsorción Linealizada de Langmuir para Carbón Activado a Partir de Vaina	118
Figura 6.1	Canales de comercialización para ingredientes naturales en Europa	122
Figura 6.2	Diagrama de bloques del Proceso de Producción de Aceite de Teberinto (<i>Moringa oleífera</i>)	126
Figura 6.3	Diagrama convencional del proceso de producción de aceite de semilla de Teberinto (<i>Moringa oleífera</i>)	127
Figura 6.4	Diagrama convencional del proceso de producción de Carbón Activado	130
Figura 6.5	Diagrama convencional de proceso de producción de polvo coagulante	131
Figura 6.6	Ilustración de Rodillos de baja Presión industriales	139
Figura 6.7	Ilustración de Tamiz Vibratorio	140
Figura 6.8	Ilustración de Cilindros dentados para la remoción de cascarillas de las semillas de <i>Moringa oleífera</i>	141
Figura 6.9	Ilustración de la Limpiadora de Semillas	141

Figura 6.10	Ilustración Picadora de Semilla	142
Figura 6.11	Extractor tipo Smet industrial y su esquema interno	143
Figura 6.12	Ilustración de Desolventizador Industrial	143
Figura 6.13	Destilador Industrial	144
Figura 6.14	Carro de Filtro de Aceite de semillas de <i>Moringa oleífera</i>	145
Figura 6.15	Molino de discos para la reducción de tamaño de la torta residual	145

INDICE DE TABLAS

Tabla 1.1 Síntesis cronológica sobre la evolución de la industria química hacia principios del siglo XX.	4
Tabla 1.2 Países que presentaron la facturación más alta en la industria química a nivel mundial en el 2007.	5
Tabla 1.3 Subsectores de mayor peso dentro del sector industria salvadoreño de acuerdo al valor agregado generado para los años 1995, 2000 y 2007.	8
Tabla 1.4 Tipos de plantas que se emplean en la industria	10
Tabla 1.5 Sectores involucrados en el uso de plantas	11
Tabla 2.1 Clasificación taxonómica de la <i>Moringa Oleífera</i>	16
Tabla 2.2 Características morfológicas del árbol <i>Moringa oleífera</i>	17
Tabla 2.3 Tipos de Siembra de Teberinto por Semilla.	23
Tabla 2.4 Prácticas de control en el manejo de las plantaciones de <i>Moringa oleífera</i> .	25
Tabla 2.5 Propiedades Físicas de la Vaina y Semilla de <i>Moringa oleífera</i>	28
Tabla 2.6 Características y Composición fitoquímica de la semilla de <i>Moringa oleífera</i>	28
Tabla 2.7 Contenido de ácidos grasos en la semilla de <i>Moringa oleífera</i>	29
Tabla 2.8 Análisis de vaina y hojas frescas de <i>Moringa oleífera</i> . Contenido en peso (gramos o miligramos) de una porción comestible de 100 gramos.	29
Tabla 3.1 Cantidad máxima (%) de proteína y fibra en el alimento para Ganado considerada segura para vacas y cerdos	41
Tabla 3.2 Comparación de la <i>Moringa oleífera</i> con otros alimentos	44
Tabla 4.1 Coagulantes más utilizados en la práctica	65
Tabla 4.2 Coagulantes Vegetales utilizados en la purificación de agua	66

Tabla 4.3 Principales aplicaciones del Carbón Activado para adsorción en fase gas y fase líquida	77
Tabla 5.1 Caracterización de la materia prima para la extracción de aceite de Teberinto	81
Tabla 5.2 Resultados obtenidos experimentalmente para el diseño unifactorial de efectos fijos en la extracción de aceite	86
Tabla 5.3 Análisis de varianza de un factor	86
Tabla 5.4 Niveles de los Factores Experimentales Para Extracción de Aceite	88
Tabla 5.5 Combinaciones de los factores en estudio	89
Tabla 5.6 Codificación de variables y notación de Yates	89
Tabla 5.7 Resultados Experimentales	90
Tabla 5.8 Estimación de efectos	91
Tabla 5.9 Análisis de Varianza Para Rendimiento	93
Tabla 5.10 Parámetros de calidad medidos para el aceite de Teberinto	96
Tabla 5.11 Caracterización de la torta residual del proceso de extracción de aceite.	97
Tabla 5.12 Niveles de los Factores Experimentales y variables respuesta	101
Tabla 5.13 Resultados obtenidos experimentalmente para el diseño bifactorial.	102
Tabla 5.14 Análisis de varianza del diseño bifactorial	103
Tabla 5.15 Descripción de equipo utilizado para algunos análisis fisicoquímicos del agua	107
Tabla 5.16 Propiedades Fisicoquímicas del agua	108
Tabla 5.17 Características Microbiológicas del Agua	109
Tabla 5.18 Rendimiento de Carbón Activado	111
Tabla 5.19 Adsorbancia de Azul de Metileno Tratado con Carbón Activado a Partir de Cascarilla	113

Tabla 5.20	Datos Obtenidos para graficar Isoterma de Adsorción de Carbón Activado a partir de Cascarilla	115
Tabla 5.21	Datos Obtenidos para graficar Isoterma de Adsorción de Carbón Activado a partir de Vaina	117
Tabla 6.1	Rendimiento de la semilla de Tempate (<i>Jatropha Curcas</i>) comparada con la Semilla de Teberinto (<i>Moringa oleífera</i>) en El Salvador	123
Tabla 6.2	Descripción de equipos para el proceso de producción de aceite de semilla de Teberinto	128
Tabla 6.3	Denominación de corrientes del proceso de extracción de aceite de semilla de Teberinto	128
Tabla 6.4	Descripción de equipos para el proceso de producción de Carbón Activado	130
Tabla 6.5	Denominación de corrientes para el proceso de producción de Carbón Activado	131
Tabla 6.6	Descripción de equipos para el proceso de producción de polvo coagulante	131
Tabla 6.7	Denominación de corrientes para el proceso de producción de polvo coagulante	132
Tabla 6.8	Pérdidas de Hexano en el Proceso de Producción de Aceite de Semilla de <i>Moringa oleífera</i>	133
Tabla 6.9	Balances de masa del proceso por lote de producción	135
Tabla 6.10	Resumen de Corrientes de Balance Global del Proceso por lote de producción.	138

RESUMEN

El Teberinto (*Moringa oleífera*) es un árbol de tamaño pequeño que crece en regiones tropicales y que presenta una gran plasticidad ecológica. Es altamente valorado a nivel mundial por las propiedades que posee y que le permiten ser catalogado como un árbol que ofrece una gran versatilidad como materia prima en las diferentes industrias.

La evolución de la industria a lo largo de los años ha buscado implementar materias primas naturales a sus procesos productivos, con el fin de suplir las necesidades de la sociedad conservando en la mayor parte de lo posible el medio ambiente y utilizando tecnologías nuevas y limpias que ayuden a su conservación. El uso de plantas como materia prima en la industria es una costumbre que la humanidad emplea desde tiempos remotos. En la actualidad este uso se ha ido ampliando a muchos campos incluyendo la industria química.

En este marco, el conocimiento de los usos potenciales del Teberinto en la industria química es importante, debido a la creciente demanda de productos naturalmente obtenidos. Para que la *Moringa oleífera* sea utilizada como materia prima en la industria química deben tomarse en cuenta sus características botánicas y morfológicas así como sus características agronómicas con el fin de obtener materia prima de alta calidad que se seleccione de acuerdo al tipo de industria a la que el producto va dirigido y de acuerdo a los estándares de calidad vigentes y así obtener un buen desempeño de los productos elaborados.

Dentro de la morfología de éste árbol, una de las partes más aprovechables es la semilla, ya que sus propiedades permiten obtener tres productos diferentes a partir

de ella y sus residuos, lo cual implica un aprovechamiento integral del recurso, generando un impacto ambiental mínimo y una rentabilidad ecológica, económica, social e industrial elevada. De la semilla de *Moringa oleífera* se puede extraer un aceite natural clasificado como exótico, que posee una alta calidad y sus residuos pueden aprovecharse para la elaboración de coagulante natural y carbón activado.

Estos procesos deben ser ensayados empíricamente con la finalidad de identificar todos aquellos factores que sean influyentes dentro del proceso y hacer las consideraciones de sus efectos. Para el caso del aceite natural, los efectos significativos son la cantidad de solvente en la extracción de aceite y el tiempo de extracción del mismo y al diseñar un proceso industrial, estos factores deben tomarse en cuenta, considerándose la transformación de los residuos en materias primas para otros procesos productivos, tal como la vaina y cascarilla en carbón activado y la torta residual de la extracción de aceite en polvo coagulante natural.

Por tal razón, en el presente estudio se realiza un enfoque para la producción de aceite natural a partir de semilla de Teberinto destinado como materia prima para la industria cosmética, planteando a la vez el aprovechamiento de los residuos generados vaina y cascarilla para la elaboración de carbón activado y torta residual de la extracción de aceite para la elaboración de coagulante natural para el tratamiento de aguas. Todo basado en un estudio empírico de los procesos a escala de laboratorio para la recolección de datos por medio de diseños factoriales que permitan diseñar un proceso industrial que opere bajo condiciones de producción óptima siguiendo los lineamientos del desarrollo sostenible y procesos productivos limpios.

INTRODUCCION

Descubrir lo que ofrece la naturaleza sigue siendo uno de los pilares para encontrar mejores estructuras industriales. La búsqueda de nuevos productos ha sido siempre un área de gran interés científico y tecnológico, no solo desde el punto de vista de la investigación en ciencias básicas e ingeniería, sino para aplicaciones en la industria. En este sentido la industria manufacturera cumple un papel protagónico en la actividad económica, transformando mediante procesos artesanales o altamente tecnificados materias primas en bienes finales, destinados tanto para el consumo de los hogares como para su empleo en la elaboración de bienes más complejos. Al diseñar nuevos productos debe verificarse, desde el punto de vista ingenieril, que este cumpla con el aprovechamiento sostenible de recursos y el uso de métodos que minimicen el daño ambiental, de manera que los residuos de un proceso puedan ser utilizados como insumos para otros procesos.

La incorporación del Teberinto (*Moringa oleífera*) a la industria manufacturera salvadoreña como materia prima podría adquirir relevancia por los múltiples usos asociados a este árbol ya que tiene potencial alimenticio, farmacéutico, agroforestal, químico, entre otros; pudiéndose lograr un aprovechamiento integral del recurso si los procesos se plantean adecuadamente.

El aceite de semilla de *Moringa oleífera* puede tener varios usos a nivel industrial, entre estos se cuentan su potencialidad como biocombustible, aceite comestible de alta calidad y el uso cosmético, siendo este último el uso al que se busca orientar el aceite de Teberinto obtenido mediante recirculación de solventes en El Salvador, debido al amplio uso de los aceites vegetales en la industria cosmética, además de que posee un elevado valor económico.

El potencial coagulante de las semillas de *Moringa oleífera* se evalúa a partir de la torta residual obtenida tras la extracción de un aceite de alta calidad y de la semilla sin previa extracción de aceite en una prueba de jarras considerando variables de proceso que permitan obtener el menor valor posible de turbidez y comparándolo con el coagulante sintético utilizado por la Administración Nacional de Acueductos y Alcantarillados (ANDA) con la intención de conocer el tipo de coagulante que mejor se ajusta a las exigencias que establece la norma de agua potable en El Salvador. El desempeño del carbón activado elaborado a partir de la cascarilla y vaina del Teberinto se evalúa mediante ensayos de adsorción de azul de metileno con sus respectivos rendimientos de adsorción.

Dentro del diseño de plantas de procesamiento químico se contemplan los principios de la Producción más Limpia como una de las estrategias hacia el Desarrollo Sostenible, considerando la minimización de desechos y la reducción de emisiones al ambiente desde la concepción del proyecto. En esta investigación se plantea el diseño básico para la instalación de una planta de producción de aceite para uso cosmético utilizando como materia prima la semilla de Teberinto (*Moringa oleífera*) desde su capacidad de producción, distribución en planta y sugerencia de equipos; al igual que para los apartados de elaboración de carbón activado y acondicionamiento de la torta residual para su uso como coagulante natural en la purificación de agua.

OBJETIVOS.

OBJETIVO GENERAL

Realizar una evaluación de los usos potenciales del Teberinto (*Moringa oleífera*), enfocado a un aprovechamiento integral del recurso, que permita la generación de materia prima para la industria química.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS

1. Investigar sobre los usos potenciales que presenta la *Moringa oleífera* para ser utilizada como materia prima a nivel industrial.
2. Enfocar los usos potenciales de la semilla de Teberinto (*Moringa oleífera*) como materia prima en la industria cosmética y purificadora de agua.
3. Evaluar las variables que afectan al proceso de extracción del aceite para uso cosmético de alta calidad a partir de la semilla de Teberinto (*Moringa oleífera*).
4. Determinar la eficiencia del polvo de cotiledón de la semilla de Teberinto (*Moringa oleífera*) como coagulante en el proceso de purificación de aguas monitoreando la calidad del agua antes y después del tratamiento propuesto, comparando el funcionamiento con coagulantes de uso común para la clarificación de aguas.
5. Aprovechar integralmente el residuo de vaina y cascarilla de semilla de Teberinto (*Moringa oleífera*) después de extraído el aceite para la elaboración de carbón activado.

MARCO TEÓRICO

El desarrollo de la industria en El Salvador en la actualidad está dando la pauta para la creación de nuevos productos que puedan ser utilizados como materia prima en los diferentes sectores industriales. El nuevo enfoque con tendencia hacia lo natural permite el empleo materias primas de este tipo, orientadas hacia el desarrollo sostenible dando lugar a productos nuevos y a la sustitución de materias primas artificiales por naturales.

En los cuatro capítulos que se presentan a continuación se abarcará la temática de la industria química en El Salvador y como ésta se ha ido desarrollando a lo largo del tiempo, estableciendo un preámbulo para el desarrollo del contenido referente al Teberinto (*Moringa oleífera*). Se abordan las generalidades de la *Moringa oleífera*, sus aplicaciones y utilidades. Asimismo se describen algunos procesos importantes en los que el árbol de Teberinto desempeña un papel significativo para el desarrollo de materias primas para la industria cosmética, la industria de tratamiento de aguas y el tratamiento de emisiones de gases.

Todos los temas se abordan desde la perspectiva del desarrollo sostenible planteando el aprovechamiento de los residuos para obtener un valor agregado, describiendo los conceptos básicos sobre la industria química en el país y la implementación de las plantas en este rubro. Creando así, una base sólida que permita realizar un estudio empírico que ofrezca un panorama amplio para la toma de decisiones en el desarrollo del presente estudio.

CAPÍTULO 1.

HISTORIA Y EVOLUCION DE LA INDUSTRIA QUÍMICA EN EL SALVADOR

Con el propósito de conocer como se encuentra actualmente la industria química en El Salvador de tal forma que pueda estimarse si la *Moringa oleífera* puede ser utilizada como materia prima en la industria química se presenta a continuación la evolución que esta industria ha tenido con el paso de los años y la implementación de materias primas de origen vegetal para la fabricación de productos que permitan suplir las necesidades de la sociedad de tal forma que conserven el medio ambiente a través de nuevas tecnologías.

1.1 DEFINICIÓN DE INDUSTRIA QUÍMICA

La Industria Química se ocupa de cambiar la estructura de los materiales naturales con el fin de obtener productos útiles para otras industrias o para la vida cotidiana. Los productos químicos se obtienen a partir del procesamiento y se clasifican en tres grupos, que corresponden a las principales etapas de fabricación: productos químicos básicos (orgánicos e inorgánicos), producidos normalmente a gran escala y convertidos en otros productos químicos; productos intermedios, obtenidos a partir de los productos químicos básicos, en su mayoría requieren un tratamiento posterior en la industria química; y productos químicos terminados, que requieren tratamientos químicos ulteriores (McCann y Stellman, 1998).

1.2 LA INDUSTRIA QUÍMICA EN EL MUNDO

La historia de la industria química en el mundo es especial, pues a pesar de que sus bases científicas son anteriores a la Revolución Industrial, tomó su forma actual apenas a comienzos del siglo XX al establecer procesos de fabricación a gran escala de productos de bajo valor agregado. Con el paso de los años ha llegado a convertirse en un sector basado en la ciencia y con un grado de madurez que le permite desarrollar una dinámica innovadora particular (Díaz López, 2003).

La Revolución Industrial en Inglaterra en el siglo XVIII, surgió por múltiples causas y se caracteriza por un hecho de singular importancia: la aplicación de la máquina a la industria en una escala formidable. Se suelen citar como referencias la aparición del primer torno para hilar algodón en 1767 y el primer taller mecánico en 1785. Pero las características definidas de la Revolución Industrial fueron el perfeccionamiento de la máquina de vapor y la expansión de la industria del hierro (Sotelo Sancho, 2011).

En el marco del desarrollo industrial, la industria química no fue una excepción. Algo que resulta comprensible si se tienen en cuenta los siguientes factores: a) el desarrollo industrial general originó una gran demanda de materias primas, b) la influencia de la ciencia sobre la industria se notó fuertemente en aquella actividad industrial que es más dependiente del descubrimiento científico, c) el crecimiento de la población y la creciente necesidad de alimentos fueron un poderoso estímulo para la aparición de nuevas industrias. En la tabla 1.1 se muestra una cronología de la evolución de la industria química hasta principios del siglo XX (Díaz López, 2003).

Tabla 1.1 Síntesis cronológica sobre la evolución de la industria química hacia principios del siglo XX (Díaz López, 2003).

Año	Avance
1791	Carbonato de sodio, proceso Leblanc
1856	Primer colorante sintético, Perkin
1866	Carbonato de sodio, proceso Solvay
1891	Extracción de azufre subterráneo, Frasch
1891	Primera fibra artificial de nitrocelulosa, Chardonnet
1896	Licuefacción del aire en escala industrial, Linde
1900	Ácido sulfúrico por el método de contacto
1905	Cianamida cálcica
1910	Soda y cloro por electrólisis del cloruro de sodio
1910	Fibra artificial, rayón viscose
1913	Síntesis del amoníaco a partir de sus elementos, Oppau, Alemania

De acuerdo a la tabla 1.1, este es el modo en que nació y creció la industria química fabricante de productos relativamente simples en forma masiva. Se resolvieron problemas tan importantes como la fijación del nitrógeno atmosférico y se produjeron materias primas abundantes y baratas que contribuyeron al desarrollo de una variada gama de otras actividades industriales. Con la Primera Guerra Mundial, los contendientes se vieron forzados a autoabastecerse y esto ejerció una profunda influencia en el desarrollo industrial de la época. Rápidamente se multiplicaron los problemas de cantidad y calidad al mismo tiempo que el factor económico se hizo cada vez más crítico (Díaz López, 2003).

La industria química se ha desarrollado ampliamente a lo largo del siglo XX, basada sobre todo en el petróleo y el gas natural como materias primas, y ha proporcionado multitud de nuevos productos de consumo, aunque también ha sido

causa de algunos accidentes y problemas medioambientales (Sotelo Sancho, 2011).

1.2.1 ESTADO ACTUAL DE LA INDUSTRIA QUÍMICA A NIVEL MUNDIAL

En una economía global de rápido movimiento y cambio, el apoyo de tecnologías específicas puede resultar especialmente productivo para los países, aunque en los países en desarrollo, la construcción de procesos de aprendizaje y capacidades tecnológicas se dificulta un poco más en el sentido de concebir la innovación tecnológica y su difusión como un instrumento empresarial para disminuir la presión de los sistemas económicos sobre los ambientales (Díaz López, 2003).

La industria química, tal y como se le conoce hoy en día, nace en la segunda mitad del siglo XVIII desarrollándose desde entonces de una forma imparable, considerándose en la actualidad que el 97% de los productos que usamos en nuestra vida contienen materiales y sustancias producidos en alguna industria química. Un dato que respalda la importancia de la industria química es que en 2007, el volumen de negocio de esta industria en el mundo se situó por encima de los 3.14 billones de dólares, acumulando un incremento de casi 1.3 billón de dólares en la última década. En la tabla 1.2 se muestran los países que alcanzaron los porcentajes más altos de la facturación mundial en la industria química hasta el año 2007 (FEIQUE, 2009; UNIZAR, 2011).

Tabla 1.2 Países que presentaron la facturación más alta en la industria química a nivel mundial en el 2007 (FEIQUE, 2009).

PAÍS	PORCENTAJE DE FACTURACIÓN
Estados Unidos	21.7 %
China	13.7 %
Japón	7.5 %
Alemania	6.3 %

En la actualidad, el enfoque de la industria química a nivel mundial va cambiando radicalmente, basándose en procesos y tecnologías que permitan optimizar los recursos naturales y cuidar el medio ambiente. En años recientes ha surgido una nueva filosofía en torno a la eco-innovación y el desarrollo sostenible como generadores de valor, al sugerir que la población mundial crece de manera exponencial, existiendo la posibilidad de generar mercados (Díaz López, 2003).

1.2.2 LA INDUSTRIA QUÍMICA EN EL SALVADOR

La industria salvadoreña ha sufrido considerables cambios en las últimas décadas distinguiéndose varias etapas durante su evolución y desarrollo tecnológico. A principios del siglo XIX el desarrollo de la industria se basa fundamentalmente en la producción y exportación de bienes agrícolas, es decir en un modelo agroexportador, prevaleciendo el cacao, bálsamo y añil en primera instancia, los cuales requerían de ciertos procesos de transformación, sin embargo estos eran artesanales y rudimentarios. A mediados siglo XIX el apareamiento de los colorantes artificiales hace declinar al añil, hace su aparición el café, el algodón y el azúcar, tomando su lugar en la economía salvadoreña (Barrientos Salazar, 1989; Cañas y Chávez, 1999).

Posteriormente se pasa por una etapa basada en el modelo de sustitución de importaciones. Entre los años 1945 a 1952 el sector industrial experimenta un notable crecimiento e incluye productos como bebidas, alimentos, tabaco, textiles y calzado que pasan de ser pequeños talleres artesanales con tecnología doméstica a sistemas mecanizados. Siendo los productos textiles los que tuvieron un mayor auge y mecanización. Con la aparición de productos como el café tostado, café soluble, aceite de semilla de algodón, azúcar refinada, manteca vegetal, resinas, gomas, jabones y algunos fármacos se logra una expansión de la industria del proceso químico (Barrientos Salazar, 1989; Cañas y Chávez, 1999).

Para la década comprendida entre los años 1960 a 1970, la industrialización en El Salvador crece más con respecto a la década anterior fundamentalmente por la creación del Mercado Común Centroamericano (MERCOMUN). Al principio fue posible una relativa integración económica entre las distintas ramas industriales y una mayor integración económica entre la agricultura y la industria en el ámbito centroamericano. Se pretendía que la agricultura produjera las materias primas que serían demandadas por la industria y procesadas regionalmente y que unas industrias producirían materias primas para otras. Al final de esta década el MERCOMUN entra en crisis. Durante este período surgen ramas industriales como petróleo con la instalación de la Refinería Petrolera Acajutla Sociedad Anónima (RASA), maquinaria eléctrica con Texas Instrument, plástico y metales con Plásticos y Metales de El Salvador (PLASTIMET), entre otras (Cañas y Chávez, 1999).

La década de los 80's se caracteriza por ser una década de crisis económica, política y social provocada por factores como la confrontación bélica, el desplazamiento de recursos humanos al exterior, la emigración de la población rural y la subutilización de la capacidad instalada de las empresas. La importación de maquinaria y nuevas tecnologías cesa prácticamente en esta década debido a la crisis social. Luego de la firma de los acuerdos de paz, la industria química salvadoreña experimenta un sensible crecimiento con respecto a la década anterior, aumentando además la actividad del capital extranjero en el país (Barrientos Salazar, 1989; Cañas y Chávez, 1999).

A partir del año 2000 existe una apertura de mercados, una tendencia hacia la globalización y surge la necesidad de proteger al medio ambiente, creándose la ley del medio ambiente y se busca promover la producción más limpia y desarrollo sostenible. Asimismo, existe una mayor inversión de capital extranjero en El Salvador para promover la industria química: Industria cervecera, papel, textiles, panadería, pesca, etc. (Fuentes, 2009).

1.2.2.1 ESTADO ACTUAL DE LA INDUSTRIA QUÍMICA EN EL SALVADOR

En El Salvador, la industria ocupa el segundo lugar en importancia sectorial aportando un 22.6% a la generación del producto interno bruto total. Durante el periodo comprendido entre 1960 y 2007, creció a una tasa promedio positiva de 3.4%, revirtiendo la fuerte contracción que experimentó en la década de los ochentas. Al comparar el desempeño de la industria local, en términos de crecimiento, respecto a América Latina, presenta un resultado favorable ya que el crecimiento promedio de América Latina fue de 2.9%. Para el tercer trimestre de 2011, la industria salvadoreña experimentó un crecimiento del 2.2%, que es igual al reportado para el mismo trimestre en el 2010. En la tabla 1.3 se muestran los sectores de mayor peso dentro del sector industria de acuerdo al valor agregado¹ generado para los años 1995, 2000 y 2007 (BCR, 2011; Fuentes, 2009).

Tabla 1.3 Subsectores de mayor peso dentro del sector industria salvadoreño de acuerdo al valor agregado generado para los años 1995, 2000 y 2007 (Fuentes, 2009).

N°	1995		2000		2007	
	Subsector	%	Subsector	%	Subsector	%
1	Productos de Panadería	9.4	Servicios Industriales de Maquila	13.0	Servicios Industriales de Maquila	10.9
2	Productos Químicos	9.1	Bebidas	8.7	Productos de Molinería y Panadería	9.4
3	Bebidas	8.9	Productos de Molinería y Panadería	8.4	Productos Químicos	8.7

¹ Valor Agregado: Valor adicional que requieren los bienes y servicios al ser transformados durante el proceso productivo

Continuación Tabla 1.3 Subsectores de mayor peso dentro del sector industria salvadoreño de acuerdo al valor agregado generado para los años 1995, 2000 y 2007 (Fuentes, 2009).

N°	1995		2000		2007	
	Subsector	%	Subsector	%	Subsector	%
4	Servicios de Maquilas	7.0	Productos Químicos	8.4	Bebidas	8.0
5	Textiles	6.8	Azúcar	7.1	Azúcar	7.4
6	Otros productos alimenticios elaborados	6.1	Otros productos alimenticios elaborados	6.4	Otros productos Alimenticios Elaborados	7.1

Los retos que en la actualidad representa la industria química salvadoreña están fundamentados en elementos de carácter permanente como la competencia con países de Sudeste Asiático, particularmente China, la infraestructura de servicio es de energía, agua, transporte, puertos y aeropuertos eficientes, precios competitivos y mano de obra calificada. Los Tratados de Libre Comercio (TLC) o CAFTA² presentan un impulso a la industria salvadoreña y una apuesta por el comercio (BCR, 2011).

1.3 DIVERSIFICACIÓN EN EL USO DE PLANTAS COMO MATERIA PRIMA EN EL SALVADOR

El uso de materias primas de origen vegetal utilizadas en la industria química en el mundo es una tendencia que se ha venido desarrollando al lado de las tecnologías e innovación así como las tendencias ecológicas, es por eso que suelen tomarse como alternativas en el momento de dar soluciones reales debido a que representan un recurso natural que si se utiliza sustentablemente genera muchos

² CAFTA: siglas en inglés de “Tratado de Libre Comercio”, Central America Free Trade Agreement

beneficios. Los tipos de plantas que se emplean en las diversas industrias químicas salvadoreñas se muestran en la tabla 1.4.

Tabla 1.4 Tipos de plantas que se emplean en la industria (Cases y Hernández, 2007).

Tipo de Planta	Descripción	Ejemplos	Empresas Salvadoreñas que las utilizan en producción
Plantas Aromáticas	Contienen aceites esenciales, primordialmente en las hojas, de amplio cultivo en regiones subtropicales y tropicales.	Romero (<i>Rosmarinus officinalis</i>), citronella (<i>Cymbopogon nardus</i>), y patchouli (<i>Pogostemon cablin</i>)	Bayer S.A, Laboratorios López S.A. de C.V., Laboratorios Suizos S.A. De C.V.
Espicias	Presencia de sustancias con actividad antiséptica y para sazonar alimentos propias de regiones tropicales y de otras regiones biogeográficas.	Canela (<i>Cinnamomum verum</i>) y nuez moscada (<i>Myristica fragrans</i>)	Unilever de Centroamérica, McCormick de Centroamérica, Gumersal, ASEAL, CODIPA, MASPANPAL, Productos Alimenticios Diana
Colorantes	Poseen componentes químicos (carotenos, antocianos, etc.) capaces de teñir tejidos, alimentos y cosméticos; de amplio cultivo en regiones subtropicales y tropicales.	Cúrcuma (<i>Curcuma longa</i>) y bejuco fierro (<i>Arrabidaea chica</i>), Añil (<i>indigofera suffruticosa</i>), Achiotte (<i>bixa Orellana</i>).	Confitería Americana, Embotelladora la Cascada, Productos Alimenticios Bocadeli , SABESA, Sabores Cosco de Centroamérica S.A., Textufile

Continuación Tabla 1.4 Tipos de plantas que se emplean en la industria (Cases y Hernández, 2007).

Tipo de Planta	Descripción	Ejemplos	Empresas Salvadoreñas que las utilizan en producción
Plantas Amargas	plantas que cuentan con sustancias amargas, empleadas en la industria de licores	Quina (Cinchona spp), Cuasia (Quassia amara), Palo amargo (Picrasma sp) y Cedrón (Simaba cedron).	Industrias La Constancia
Resinas	Contienen exudados, principalmente en el tronco, se utilizan en la industria de inciensos y para otros fines.	Protium spp; Colofonia (del género Pinus).	VAPE, S.A. DE C.V., Empresas Adoc S.A.

Los sectores involucrados en el uso de plantas son el medicinal y herbolario, alimentario y perfumería cosmética. Entre ellos se hallan las industrias de farmacia, herboristería, alimentación, de acondicionamiento, de aceites esenciales e industrias extractoras y de formulación. En la tabla 1.5 se muestran los sectores industriales involucrados en el uso de plantas (Cases y Hernández, 2007).

Tabla 1.5 Sectores involucrados en el uso de plantas (Cases, 2003; Martín, 2005)

SECTOR MEDICINAL Y HERBOLARIO	
Industria Farmacéutica.	Las industrias de Farmacia y Fitoterapia, utilizan la planta seca, sus extractos o los principios activos aislados, para la fabricación de los medicamentos. A menudo, esta industria imita las estructuras químicas presentes en la naturaleza.
Aromaterapia.	La aromaterapia es una ciencia que ha generado un mercado con una demanda en aceites esenciales muy superior a lo que venía siendo tradicionalmente.

Continuación. Tabla 1.5 Sectores involucrados en el uso de plantas (Cases, 2003; Martín, 2005).

SECTOR MEDICINAL Y HERBOLARIO	
Fitoterapia veterinaria.	<p>Plantas medicinales para el tratamiento de enfermedades del ganado, ya sea tratamientos fitoterápicos o complementos alimenticios. Algunos ejemplos de plantas utilizadas para tratar enfermedades en animales son:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Plantas antiinflamatorias: Regaliz, Harpagofito • Plantas antimicrobianas: Equinácea, Salvia • Tónicos cardiovasculares: Espino blanco, Ginkgo biloba • Plantas para cólicos y dispepsias: Hinojo, Eneldo, Menta, Manzanilla • Plantas diuréticas: Diente de león, Bolsa de pastor • Inmunotónicos: Equinácea, Astrágalo • Plantas sedativas: Valeriana, Pasiflora, Hipérico. • Plantas nutritivas: Ortiga, Alfalfa, Lino, Diente de león
Cosmética y Parafarmacia	<p>La cosmética natural es el segmento de mayor crecimiento de la industria de la belleza, en ellos quedan incluidas todas aquellas aplicaciones en las que no participa la actividad farmacológica, por ejemplo las aplicaciones basadas en las propiedades organolépticas (aromatizantes, correctores del sabor) o propiedades fisicoquímicas que dan una presentación adecuada a medicamentos, alimentos y productos de perfumería y cosmética (disolventes, gelificantes, estabilizantes, etc.)</p>
SECTOR ALIMENTARIO	
Productos destinados directamente al consumidor.	<p>Por ejemplo, hojas de laurel, raíces de regaliz, tallo y hojas de menta, flores y hojas de tila, orégano, salvia y otras (frescas, secas, congeladas), con propiedades antioxidantes y bactericidas.</p>

Continuación. Tabla 1.5 Sectores involucrados en el uso de plantas (Cases, 2003; Martín, 2005).

SECTOR ALIMENTARIO	
Productos destinados a la industria.	En este sector destaca la comida precocinada que cada vez más sustituye progresivamente a la comida casera. En ella se emplean antioxidantes, conservantes, saborizantes y colorantes de origen natural, así como condimentos que hacen su olor y sabor más apetecible. También se emplean mucho este tipo de plantas en las industrias cárnicas y charcuteras, como condimento, aromatizantes y conservantes. Un ejemplo de ello sería el pimentón.
SECTOR PERFUMERÍA Y COSMÉTICA	
En este sector los productos se elaboran a partir de formulaciones que utilizan fundamentalmente extractos de base, aceites esenciales, otros aceites (germen de trigo, almendra, pepita de uva, soja, jojoba, etc.), alcoholes y pastas y cremas que serán preparadas en la misma empresa o adquiridas a terceros.	
Perfumería industrial.	El sector de la perfumería industrial demanda grandes cantidades de aceites esenciales que serán empleados en productos que contienen composiciones aromáticas ó aceites esenciales puros, como geles de baño, jabones, lociones, cremas, etc. Los perfumes de alta gama contienen una parte importante de aceites esenciales y otros extractos de origen vegetal.

CAPÍTULO 2.

GENERALIDADES DEL TEBERINTO (*Moringa oleífera*).

En el presente capítulo se detallan las características botánicas, morfológicas y agronómicas del árbol de *Moringa oleífera* que resultan de interés para determinar la viabilidad de siembra y cuidados que dicho árbol necesite para ser utilizado en la producción de materia prima para la industria química, tomando en cuenta las propiedades químicas y físicas.

2.1 ORIGEN DEL TEBERINTO.

En la actualidad se distribuye por todo el mundo, en los trópicos y subtrópicos. La *Moringa oleífera* se asocia morfológicamente con la *Moringa concanensis* y con la *Moringa peregrina*, y se denominan "árboles esbeltos", por su figura estilizada y alta. Son especies principalmente asiáticas, originaria de las faldas del sub Himalaya (valles sub Himalayos), en el norte de la India, aunque pueden encontrarse hoy día a lo largo de todo el planeta (Fuglie, 2001).

Se cultiva en las regiones tropicales de todo el mundo, la *Moringa oleífera* puede crecer en cotas de hasta 1,200 m sobre el nivel del mar, en colinas o laderas, aunque lo más normal es encontrarla en praderas y orillas de río. Puede llegar a alcanzar los seis o siete metros de altura en un año, con una recepción media anual de agua de 400 mm. En la figura 2.1 se puede apreciar la distribución de esta familia (Hernández, 1997).

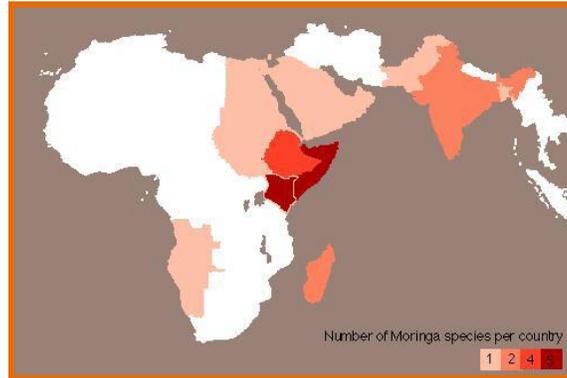


Figura 2.1 Área de distribución natural de *Moringa oleífera* (Cavallini, 2001).

La *Moringa oleífera* crece y se utiliza en muchas zonas áridas del mundo: desde África hasta Asia pasando para América Latina, como puede apreciarse en la figura 2.2 (Cavallini, 2001).



Figura 2.2 Zonas donde se utiliza la *Moringa oleífera* actualmente (Cavallini, 2001).

2.1.1 DESCRIPCIÓN BOTÁNICA DE LA ESPECIE

La *Moringa oleífera* es un árbol siempre verde o deciduo³ de tamaño pequeño y crecimiento acelerado que usualmente alcanza de 10 a 12 m de alto. Tiene una copa abierta y esparcida de ramas inclinadas y frágiles, un follaje plumoso de hojas pinadas en tres, y una corteza gruesa, blanquecina y de aspecto corchoso. Se valora principalmente por sus frutas, hojas, flores, raíces, todas comestibles, y por el aceite (también comestible) obtenido de las semillas. Este cultivo puede ser propagado por medio de semillas o por reproducción asexual (estacas), aún en suelos pobres; soporta largos períodos de sequía y crece bien en condiciones áridas y semiáridas. En la tabla 2.1 se presenta la clasificación taxonómica de la *Moringa oleífera* (Cáceres y Díaz, 2005).

Tabla 2.1. Clasificación taxonómica de la *Moringa oleífera* (Cáceres y Díaz, 2005).

FAMILIA	<i>Moringáceas</i>
ORIGEN	<i>Capparidales</i>
CLASE	<i>Magnoleopsida</i>
GENERO	<i>Moringa</i>
ESPECIES	<i>arbórea, concanensis, drocanesis, drouhardii, hildebrandtii, pygmeae, peregrina, ovalaifolia, rospoliana, stenopetala, riviae, oleífera y borziana.</i>

En la tabla 2.2 se exponen las características morfológicas que posee la *Moringa oleífera* con sus respectivas ilustraciones que permiten describir como se encuentra constituida la planta.

³ Deciduo (Agronomía): Término utilizado para las especies que pierden la hoja en invierno, que pierde la hoja estacionalmente.

Tabla 2.2 Características morfológicas del árbol *Moringa oleifera* (Alfaro y Martínez, 2008; Folkard y Sutherland, 1996; Parrotta, 1993).

CARACTERÍSTICA MORFOLÓGICA.	DESCRIPCIÓN.
<p data-bbox="386 422 464 453">Raíz.</p> 	<p data-bbox="636 422 1380 625">La raíz principal mide varios metros y es carnosa en forma de rábano. Es pivotante y globosa lo que le brinda a la planta cierta resistencia a la sequía en periodos prolongados. Cuando se le hacen cortes, produce una goma color rojizo parduzco.</p>
<p data-bbox="375 688 475 720">Hojas.</p> 	<p data-bbox="636 688 1380 1014">Las hojas son compuestas, de unos 20 cm de largo, con hojuelas delgadas, oblongas u ovaladas de 1 a 2 cm de largo y de color verde claro; tienen cualidades nutritivas sobresalientes, que están entre las mejores de todos los vegetales perennes. El contenido de proteína es del 27%; además tienen cantidades significativas de calcio, hierro y fósforo, así como vitamina A y C.</p>
<p data-bbox="386 1037 464 1068">Flor.</p> 	<p data-bbox="636 1037 1380 1283">Las flores son de color crema⁴, numerosas, fragantes y bisexuales. Miden de 1 a 1.5 cm de largo. Éstas se encuentran agrupadas y están compuestas por sépalos lineales a lineal-oblongo, de 9 a 13 mm de largo. Los pétalos son un poco más grandes que los sépalos.</p>
<p data-bbox="380 1299 470 1331">Tallo.</p> 	<p data-bbox="636 1341 1380 1499">La corteza es blanquecina, el tronco generalmente espeso e irregular en tamaño y forma y la corona pequeña y densa, rara vez sobrepasa los 10 metros de altura.</p>

⁴ Color crema: color blanco-amarillento.

Continuación. Tabla 2.2 Características morfológicas del árbol *Moringa oleífera* (Alfaro y Martínez, 2008; Folkard y Sutherland, 1996; Parrotta, 1993).

CARACTERÍSTICA MORFOLÓGICA.	DESCRIPCIÓN.
<p data-bbox="378 422 472 453">Fruto.</p> 	<p data-bbox="638 422 1380 789">Las frutas son unas cápsulas de color pardo, de tres lados, lineares y pendientes, con surcos longitudinales, usualmente de 20 a 45 cm de largo, aunque a veces hasta de 120 cm de largo, y de 2 a 2.5 cm de ancho que dan apariencia de vaina. Si se corta transversalmente se observa una sección triangular con varias semillas dispuestas a lo largo. Las frutas alcanzan la madurez aproximadamente 3 meses después del florecimiento.</p>
<p data-bbox="363 848 483 879">Semilla.</p> 	<p data-bbox="638 848 1380 1047">Las semillas son carnosas, cubiertas por una cascara fina de color café. Poseen tres alas, o semillas aladas de 2.5 a 3 mm de largo. Al quitar la cascara se obtiene el endospermo que es blanquecino y muy oleaginoso.</p>

2.2 ASPECTOS AGRONÓMICOS DEL TEBERINTO (*Moringa oleífera*).

Una investigación sobre los aspectos agronómicos de una especie perteneciente al reino vegetal, siempre se enfoca en la búsqueda de las prácticas óptimas que permitan cultivar o mejorar las plantaciones de dicha especie, en cualquier escalamiento posible. Por lo que un adecuado fundamento teórico sobre los métodos a emplearse para el cultivo y cuidados en las prácticas agrícolas es importante para el éxito en las plantaciones que se manejan con un fin industrial.

La descripción de los aspectos agronómicos del Teberinto recopila una serie de información básica, para lograr una adecuada implementación de la *Moringa oleífera* en las prácticas agrícolas, permitiendo combinar la teoría, práctica y

aplicaciones de diferentes tecnologías que ayuden en el aprovechamiento de esta planta en la industria química.

2.2.1 CONDICIONES CLIMÁTICAS

El clima de una región influye significativamente en el crecimiento, desarrollo y productividad de las plantas. Es por ello que es indispensable conocer la respuesta fisiológica de esta especie a las condiciones ambientales para poder formular un sistema racional de siembra y manejo (Reyes Sánchez, 2004).

La *Moringa oleífera* es una planta de origen tropical y se desarrolla en climas secos, semiáridos, semi-húmedos y húmedos. Crece bien en alturas que van desde el nivel del mar hasta los 1,200 m de altitud y prospera en temperaturas altas, considerándose óptimas para un buen comportamiento las que están entre 24 y 32°C (Reyes Sánchez, 2004).

En Centroamérica se encuentra en zonas con temperaturas de 6 a 38°C. Es resistente al frío por corto tiempo, pero no menos de 2 a 3°C. En las temperaturas menores de 14°C no florece y solamente se puede reproducir vegetativamente (por estacas) (Armengol, Pérez, Reyes y Sánchez, 2010).

El agua afecta el crecimiento y desarrollo de las plantas ya que actúa como constituyente, solvente, responsable de la turgencia celular y reguladora de su temperatura celular. La *Moringa oleífera* necesita al menos 700 mm anuales de lluvia aunque hay reporte de lugares del pacífico como Nicaragua donde con 300 mm crece muy bien, pero tolera una precipitación anual de 500 a 1,500 mm de lluvia anuales (Reyes Sánchez, 2004).

El crecimiento de las plantas jóvenes también se ve muy afectado por las condiciones de luz, sobre todo en los períodos más cálidos del año. Por lo que la

siembra en una época no adecuada combinado con un riego irregular puede provocar consecuencias desastrosas, causando la pérdida del 20 al 30%⁵ de las plantas jóvenes, por corte, produciendo pérdida de material productivo (Duarte y Flores, 2004).

2.2.2 SUELOS

El suelo es la parte de la corteza terrestre donde crecen las plantas. Está constituido por una mezcla dinámica de materiales inorgánicos, orgánicos, aire y agua, donde ocurren diferentes procesos que afectan la disponibilidad de los nutrientes necesarios para el crecimiento de las plantas. El establecimiento de una plantación óptima está asociado con las características físicas y químicas del suelo en la que está sembrada (Reyes Sánchez, 2004).

La *Moringa oleífera* puede crecer en todo tipo de suelos duros o pesados, suelos con poca capacidad de retención de humedad y hasta en aquellos que presentan poca actividad biológica, tolera suelos arcillosos, pero no encharcamientos prolongados. Puede crecer en suelos ácidos y alcalinos (pH 4.5-8)⁶ (Reyes Sánchez, 2004).

En sentido general se puede decir que es una especie de gran plasticidad ecológica, ya que se encuentra localizada en diferentes condiciones de suelo, precipitación y temperatura (Armengol, Pérez, Reyes y Sánchez, 2010).

La preparación del terreno para la siembra incluye el control de la vegetación original y de sus reservas de semillas, así como la mejora física y química del suelo para favorecer el desarrollo de las plántulas. El grado de preparación del suelo para lograr un buen establecimiento está influenciado por muchos factores

⁵ Foidl, N., Mayorga, L., Vásquez, W. (2003), Conferencia electrónica de la FAO sobre "Agroforestería para la producción animal en Latinoamérica".

⁶ Duke, J. A. (1983), Handbook of Energy Crops

entre los que se cuentan: factores edáficos, condiciones climáticas, disponibilidad de maquinaria y consideraciones de carácter económico (Reyes Sánchez, 2004).

La preparación debe iniciarse preferiblemente al final de la época seca y terminarse al comienzo de la época lluviosa. Se recomienda dejar el terreno suelto y la superficie ligeramente rugosa, no muy polvosa, para evitar que la semilla quede demasiado profunda o que sea lavada por la lluvia. La preparación del suelo puede hacerse de dos formas diferentes, una de ellas consiste en la preparación del suelo utilizando la tracción animal como se muestra en la figura 2.3 y la otra consiste en la preparación del suelo mediante el uso de maquinaria como se muestra en la figura 2.4, siendo la primera una práctica artesanal (Reyes Sánchez, 2004).



Figura 2.3. Preparación del suelo utilizando tracción animal.⁷

⁷ Fuente: <http://archivo.abc.com.py/suplementos/rural/articulos.php?pid=246695>



Figura 2.4 Preparación del suelo utilizando maquinaria⁸

2.2.3 SIEMBRA DEL TEBERINTO (*Moringa oleífera*)

La *Moringa oleífera* se establece fácilmente por material vegetativo o por semillas. Las semillas pueden ser plantadas directamente en el campo o en viveros y no requieren de un tratamiento anterior y las plantaciones mediante material vegetativo se utilizan para cosechar los rebrotes posteriormente. La propagación por semillas es la manera más común y apropiada de sembrar el Teberinto (*Moringa oleífera*). La viabilidad del surgimiento de la planta depende, en general, del grado de fertilidad de los árboles productores, para éstos árboles el poder germinativo es de 99.5% y la vigorosidad es de 90% (Duarte y Flores, 2004; Reyes Sánchez, 2004).

Las semillas se seleccionan tomando en cuenta tres variables importantes, según la experiencia de los agricultores en el campo: vainas de mayor tamaño, semilla proveniente de la parte central de la vaina, que generalmente son más grandes, y el brillo de la semilla. Durante el mes de agosto se empieza a identificar los mejores arboles productores de semilla, según el desarrollo y abundancia de

⁸ Fuente: http://www.pirecuasa.com/?page_id=60

flores. La época de producción de la semilla es a partir de octubre, prolongándose hasta el mes de abril del siguiente año (Alfaro y Martínez, 2008).



Figura 2.5 Semilla de *Moringa oleífera* en vaina⁹

En la tabla 2.3 se muestran los tipos de siembra por semilla, que pueden realizarse para iniciar plantaciones de *Moringa oleífera*.

Tabla 2.3 Tipos de Siembra de Teberinto por Semilla (Alfaro y Martínez, 2008; Reyes Sánchez, 2004).

TIPO DE SIEMBRA POR SEMILLA	DESCRIPCIÓN
<p style="text-align: center;">SIEMBRA DIRECTA</p> 	<p>Debe colocarse la semilla en el suelo preparado. Este debe ser plano, para que no haya impedimento en la colocación uniforme de la semilla. Lo adecuado es sembrar de 10 a 20 semillas por metro lineal para lograr una densidad de 250 a 500 mil plantas por hectárea. Este tipo de siembra se recomienda cuando existan condiciones para el control de insectos y disponibilidad de semilla abundante (50% más de lo que se necesita), para compensar las pérdidas en el transcurso de su germinación y desarrollo.</p>

⁹ http://comer-liquidamex.com/936329_MORINGA-Y-STEVIYA.html

Continuación. Tabla 2.3 Tipos de Siembra de Teberinto por Semilla (Alfaro y Martínez, 2008; Reyes Sánchez, 2004).

TIPO DE SIEMBRA POR SEMILLA	DESCRIPCIÓN
<p data-bbox="269 457 621 489">SIEMBRA EN VIVEROS</p> 	<p data-bbox="690 422 1401 955">La siembra de la <i>Moringa oleífera</i> por viveros resulta ser una estrategia con un alto costo y se recomienda en áreas pequeñas, en donde la siembra por semillas no pueda realizarse por alguna razón. Los viveros tienen la ventaja de permitir un cuidado minucioso de la planta y un aislamiento de condiciones a las que se expone en la siembra directa. Para el vivero se recomienda un substrato compuesto por 60% de arena y 40% de tierra negra, para lograr una textura franco arenosa. Se utilizan bolsas de polietileno de 8x12 pulgadas y la siembra de semillas se realiza directamente a la bolsa.</p>

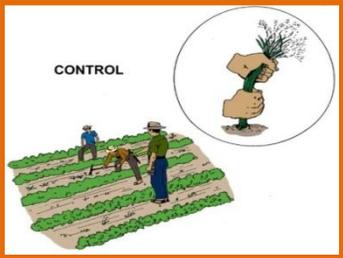
Las estacas de Teberinto (*Moringa oleífera*) cortadas a finales de la época seca presentan un rendimiento del 95% y un 90% de sobrevivencia. Para la obtención de estos altos porcentajes las estacas se dejan enraizar con sus propias reservas y posteriormente se trasplantan al terreno definitivo. Una vez cortadas las estacas, una buena práctica para el enraizamiento es colocarlas verticalmente bajo sombra y enterrarlas unos 10 cm bajo el suelo (Reyes Sánchez, 2004).

2.2.4 MANEJO DE LAS PLANTACIONES

El manejo de las plantaciones posterior a la siembra consiste en un conjunto de prácticas agronómicas con las cuales se hacen ajustes menores a las plantas en formación que ya se encuentran sembradas en el campo definitivo. Estas prácticas consisten en el control oportuno de malezas, insectos y plagas, la fertilización y el

uso estratégico de cortes y podas. En la tabla 2.4 se muestra un resumen de las prácticas de control más comunes (Reyes Sánchez, 2004).

Tabla 2.4 Prácticas de control en el manejo de las plantaciones de *Moringa oleífera* (Alfaro y Martínez, 2008; Duarte y Flores, 2004; Reyes Sánchez, 2004).

PRÁCTICA DE CONTROL EN EL MANEJO	DESCRIPCIÓN
<p>CONTROL DE MALEZAS</p> 	<p>Es importante evitar que las malezas que crezcan cerca de los cultivos de <i>Moringa oleífera</i> compitan con el desarrollo de la planta. Por ello es necesario efectuar una limpieza del área, ya sea manual o mediante la aplicación de productos químicos que impidan provocarle daños a las plantas. La recomendación básica, es realizar el control de malezas 25 días después de la emergencia de la planta de Teberinto.</p>
<p>PLAGAS Y ENFERMEDADES</p>  	<p>La <i>Moringa oleífera</i> es vulnerable al ataque de insectos, plagas y enfermedades, que perjudican diversas partes de la planta. Entre las plagas que la atacan se encuentra el zompopo (<i>Atta sp.</i>), la palomilla blanca (<i>Pieris sp.</i>) y coleópteros (<i>Dendroctonus sp.</i>). Durante el mes de agosto es muy común que presenten <i>Pieris monuste</i>, que en estado larvario se alimentan del follaje de la planta. En la india se han reportado ciertas plagas: gusanos cabelludos (<i>Noordia moringae</i>) que causa la defoliación¹⁰, daños por <i>Aphis aponecraccibora</i>, <i>Diaxenopsis cynoides</i> y Mosca de la fruta (<i>Gitonia sp.</i>). En condiciones de mucha humedad pueden ocurrir pudriciones de las raíces (<i>Diploidia sp.</i>) y el polvo de papaya (<i>Levellula taurica</i>). Las plagas pueden ser controladas por trampa, control biológico, mecánico, fumigación o aspersión.</p>

¹⁰ Defoliación: Caída de las hojas de los árboles y plantas, causadas por enfermedades y agentes químicos o atmosféricos. <http://www.wordreference.com/definicion/defoliaci%C3%B3n>

Continuación. Tabla 2.4 Prácticas de control en el manejo de las plantaciones de *Moringa oleífera* (Alfaro y Martínez, 2008; Duarte y Flores, 2004; Reyes Sánchez, 2004).

PRÁCTICA DE CONTROL EN EL MANEJO	DESCRIPCIÓN
<p data-bbox="305 457 545 489">FERTILIZACIÓN</p> 	<p data-bbox="651 464 1399 957">La fertilización puede ser de tipo orgánico o químico, ambas pueden ser utilizadas en las plantaciones de <i>Moringa oleífera</i>, aunque el Teberinto puede crecer sin necesidad de que se realice fertilización. La fertilización orgánica tiene como fin aprovechar las heces producidas por animales que se crían en fincas, incorporando estos elementos nutritivos (Nitrógeno, Fósforo y Potasio) al suelo mejorando su nivel de fertilidad. Ejerce también una acción estimulante sobre la vida microbiana del suelo y las raíces, como fuente y reserva para los mismos.</p>
<p data-bbox="282 1035 566 1066">CORTES Y PODAS</p> 	<p data-bbox="651 1035 1399 1570">Los árboles mayores de 3 años pueden podarse a una altura de 1 o 1.5 metros, recuperándose de dos a tres meses en época de lluvia y vuelve a producir vainas y flores en un año. Si el objetivo es regenerar plantaciones puede realizarse una poda severa a una altura de 30 a 50 cm. El crecimiento del Teberinto es vertical y se estimula la ramificación con las podas, permitiendo así que el árbol produzca vainas y hojas fáciles de cortar y manejar. Debe evitarse la cosecha de las primeras vainas, para lograr un aumento de tamaño y vigorosidad para los siguientes años, garantizando una buena producción de vainas.</p>

2.2.5 FLORACIÓN, FRUCTIFICACIÓN Y COSECHA DEL TEBERINTO.

El árbol de *Moringa oleífera* después de ese año de sembrado, comenzará a florear y fructificar, variando la producción de semillas entre 1,000 y 5,500 semillas por planta al año, siempre y cuando las condiciones de humedad disponible sean adecuadas. El Teberinto normalmente florea una vez al año, pero en algunas regiones lo hace dos veces. El período de floración inicia en agosto y se prolonga hasta enero. La mejor época de floración se observa de septiembre a noviembre. Si las lluvias son constantes a lo largo del invierno, el rendimiento será constante y la floración puede marcarse dos veces (Alfaro y Martínez, 2008).

Para evitar el desgaje de las ramas, en ocasiones, es necesario podar algunas ramas por exceso de producción de vainas. Cuando la semilla se produce con fines reproductivos, las vainas deben dejarse secar en el árbol de Teberinto hasta que se pongan café, la cosecha debe hacerse antes de que las vainas se abran y caigan las semillas, el período de cosecha de *Moringa oleífera* en El Salvador es de febrero a Abril, siendo mayor esta cosecha en Marzo¹¹. Los costales con semilla deben guardarse en un lugar ventilado y seco, bajo la sombra. Durante la cosecha debe evitarse el jaloneo de vainas y evitar subirse al árbol, ya que esto desgaja las ramas (Alfaro y Martínez, 2008).

2.3 PROPIEDADES FÍSICAS Y QUÍMICAS DEL TEBERINTO (*Moringa oleífera*).

Las sustancias tal y como lo conocemos en el entorno se caracterizan por sus propiedades físicas o químicas, es decir, cómo reaccionan a los cambios sobre ellas. Las propiedades físicas son aquellas que se pueden medir y observar sin que cambie la composición o identidad de la sustancia. Mientras que para observar una propiedad química se debe efectuar un cambio químico, es decir, en su estructura interna, transformándose en otra sustancia (Chang, 2002).

¹¹ Dato proporcionado por el Ingeniero Agrónomo de la Hacienda Los Nacimientos, Suchitoto, Departamento de Cuscatlán, El Salvador.

Dado que el proyecto trata de evaluar los usos potenciales de la *Moringa oleífera* que permita la generación de materia prima para la industria química, resulta importante numerar las propiedades físicas y químicas de diferentes componentes de la planta (vainas, semillas y hojas) conociendo así datos de interés en cuanto a contenido nutricional y contenido de ácidos grasos en la semilla de *Moringa oleífera* por lo que en la tabla 2.5 se presentan algunas de las propiedades físicas de la vaina y semilla de Teberinto y en la tabla 2.6 algunas características y composición fitoquímica de la semilla de *Moringa oleífera*.

Tabla 2.5 Propiedades Físicas de la Vaina y Semilla de *Moringa oleífera* (Alfaro, 2008).

Determinación	Valor
Peso promedio de la vaina (g)	7.95
Número promedio de semillas por vaina	16
Peso promedio de cada semilla (g)	0.3 - 0.4
Humedad en la cáscara (%)	12.9
Humedad en la semilla entera (%)	6.52-7.5
Humedad en las vainas (%)	86.9
Humedad en hojas frescas (%)	75
Gravedad específica de la semilla	0.898

Tabla 2.6 Características y Composición fitoquímica de la semilla de *Moringa oleífera* (Alfaro, 2008).

Parámetro	Valor
Valor ácido	3.5
Valor de saponificación	182.2
Valor iodado	64.2
Cenizas	3.16%
Proteína	46.58%
Grasa	32.60%
Carbohidratos	11.16%

Otros datos a tomar en cuenta dentro de las propiedades del Teberinto es la cantidad de ácidos grasos ya que las semillas tienen entre 30 y 42% de aceite y su

torta contiene un 60% de proteína. Los niveles de factores antinutricionales, como taninos y saponinas son mínimos, prácticamente despreciables y no se han encontrado inhibidores de tripsina ni lecitina. La materia seca contiene un 10% de azúcares y la energía metabolizable en las hojas es de 9.5 MJ/kg de materia seca. Los contenidos de aceite en la semilla de *Moringa oleífera* se muestran en la tabla 2.7 y en la tabla 2.8 se presentan datos relevantes respecto al contenido nutricional de las hojas frescas y vainas de *Moringa oleífera* (Alfaro, 2008).

Tabla 2.7 Contenido de ácidos grasos en la semilla de *Moringa oleífera* (Alfaro, 2008).

Parámetro	Valor
Acido oleico	68.9%
Acido linoléico	3.8%
Acido mirística	1.5%
Acido palmítico	3.6%
Acido esteárico	10.8%
Acido behénico	6.3%
Acido lignocérico	0.13%

Tabla 2.8 Análisis de vaina y hojas frescas de *Moringa oleífera*. Contenido en peso (gramos o miligramos) de una porción comestible de 100 gramos (Alfaro, 2008).

Determinación	Vainas	Hojas Frescas
Proteínas (g)	2.5	6.7
Grasa (g)	0.1	1.7
Hidratos de Carbono (g)	3.7	13.4
Fibra (g)	4.8	0.9
Minerales (g)	2.0	2.3
Calcio (mg)	30	440
Magnesio (mg)	24	24
Fósforo (mg)	110	70
Potasio (mg)	259	259
Cobre (mg)	3.1	1.1
Hierro (mg)	5.3	7
Azufre (mg)	137	137

Continuación. Tabla 2.8 Análisis de vaina y hojas frescas de *Moringa oleífera*. Contenido en peso (gramos o miligramos) de una porción comestible de 100 gramos (Alfaro, 2008).

Determinación	Vainas	Hojas Frescas
Acido oxálico (mg)	10	101
Vit. A β -carotenos (mg)	0.11	6.8
Vit B Colina (mg)	423	423
Vit. B1 Tiamina (mg)	0.05	0.21
Vit. B2 Riboflavina (mg)	0.07	0.05
Vit B3. Acido Nicotínico (mg)	0.2	0.8
Vit. C Acido Ascórbico (mg)	120	220

2.3.3 TOXICIDAD Y CONTENIDO QUÍMICO.

Los compuestos de *Moringa oleífera* tienen una toxicidad muy baja, contiene como principios tóxicos benzil, ácido moríngico y ácido cianhídrico. La corteza fresca contiene beta sistosterol y pequeñas trazas de alcaloides (Alfaro, 2008).

Las hojas frescas y machacadas aplicadas a la piel producen ampollas y quemaduras, el principio activo de las raíces es la espiroquina, y tiene una acción directa sobre el miocardio. Los cotiledones de la semilla presentan efectos tóxicos por inhibición de la enzima acetilcolinesterasa, el efecto tóxico probablemente debido a los constituyentes antimicrobianos; sin embargo, se considera que no constituye un riesgo para la salud humana a las concentraciones utilizadas con propósitos nutricionales, medicinales o de purificación de agua (Alfaro, 2008).

CAPITULO 3.

APLICACIÓN Y UTILIDADES DEL TEBERINTO (*Moringa oleífera*).

La *Moringa oleífera* puede ser utilizada como materia prima en diversas industrias tanto cosméticas, farmacológicas, sanitarias, agronómicas, alimenticias, entre otras; debido a que presenta beneficios que parecen ser innumerables desde el punto de vista industrial, por lo que se presentan a continuación algunos de sus usos potenciales que podrían ser aprovechados en su totalidad.

3.1 APLICACIONES PRÁCTICAS DEL TEBERINTO (*Moringa oleífera*).

El árbol de *Moringa oleífera* brinda una innumerable cantidad de productos valiosos que poseen utilidades extremadamente interesantes y que las comunidades han aprovechado por cientos o tal vez miles de años. Ya que desde la antigüedad de Grecia y Roma se conocían las propiedades cosméticas del aceite de esta planta y, durante el siglo XIX, se exportó desde las plantaciones intensivas de la India a Europa, como lubricante de maquinaria de precisión. El aceite de la semilla de *Moringa oleífera* puede utilizarse en la cocina, para producir jabones, cosméticos y combustible para lámparas (Sánchez Martín, 2004).

Los residuos de la extracción del aceite de las semillas pueden utilizarse como acondicionador del suelo o como fertilizante y tienen potencial para ser utilizados como suplemento alimenticio avícola y ganadero (Folkard y Sutherland, 1996).

Las vainas verdes, las hojas, las flores y las semillas tostadas son muy nutritivas y se consumen en muchas partes del mundo. Puede crecer como cercas vivas o cortinas rompevientos y es adecuado para áreas donde la combinación de fuertes

vientos y largos períodos de sequía causan seria erosión al suelo. Se adapta bien y es una buena fuente de leña (Folkard y Sutherland, 1996).

La *Moringa oleífera* puede ser usada, entre otras cosas, como proveedor de biogás, como agente doméstico de limpieza, como tinte, productor de goma natural, clarificador y productor de miel. También tiene usos medicinales y ornamentales, función como coagulante natural para clarificación de agua, entre otros. En la figura 3.1 se muestran los usos más importantes de la planta en diversas industrias cosméticas, farmacológicas, sanitaria entre otras (Sánchez Martín, 2004).

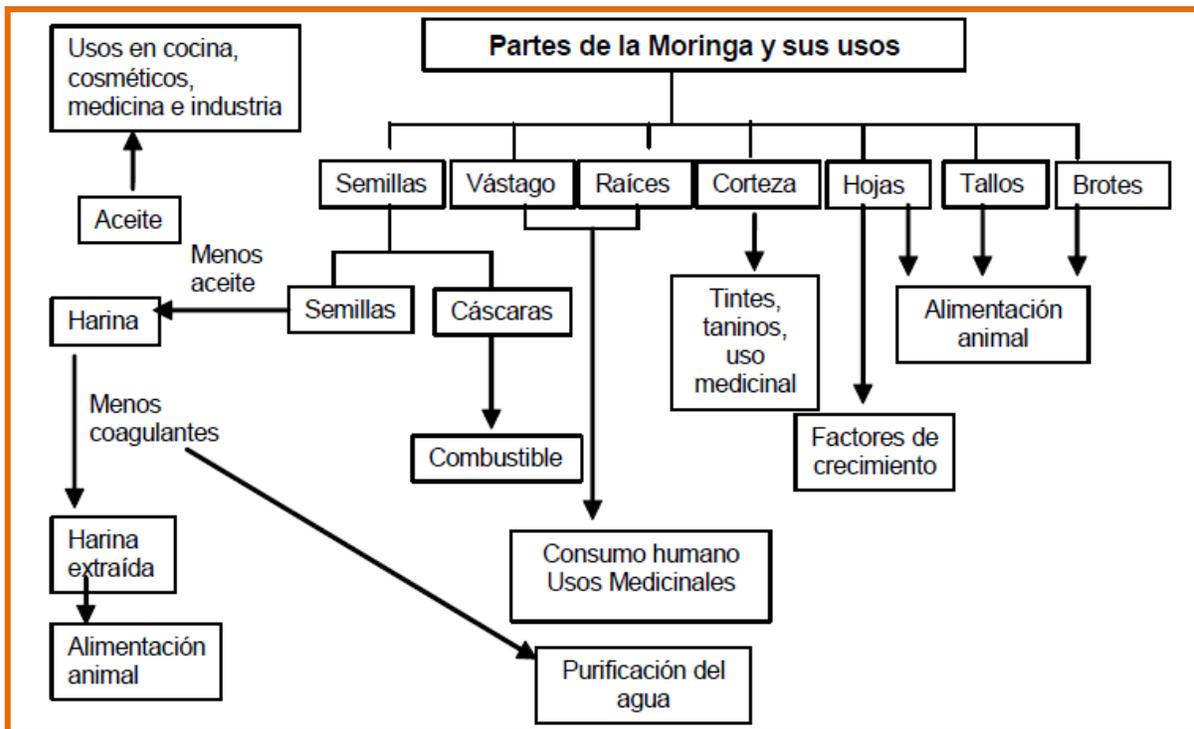


Figura 3.1 Usos potenciales de diferentes partes de la planta de *Moringa oleífera* en la industria y producción de alimentos (Alfaro, 2008).

3.2 USOS EN AGRICULTURA

Considerando la elevada importancia que presentan las especies arbóreas y arbustivas en cuanto a sus potencialidades como especies multipropósitos para sistemas con bajos insumos en la última década, *Moringa oleífera* se ha destacado dentro de un grupo de árboles no leguminosos, como una planta promisoría para los sistemas de corte, acarreo y pastoreo, así como en la formación de barreras rompevientos y cercas vivas, en general, ha adquirido una relevancia dentro de la agricultura por sus múltiples beneficios (Clavero, García, Iglesias y Medina, 2007).

3.2.1 SISTEMAS AGROFORESTALES

Los recursos forestales están disminuyendo mucho por la agricultura, cría de animales, y el consumo de leña, todos los cuales son actividades esenciales para el bienestar de muchas comunidades. Los agricultores se encuentran obligados a cultivar los mismos terrenos todos los años, agotándolos hasta que no sostienen más a las familias que dependen de ellos. Los animales pastan demasiado y destruyen la tierra, e inhiben la regeneración de los bosques (Trees for the Future, 2010).

La agroforestería es una solución potencial para tratar estos problemas relacionados con los árboles. Al sembrar los árboles correctos en sus tierras, los agricultores pueden incrementar sustancialmente los recursos forestales locales, mejorar la calidad de sus terrenos, explotar nuevas oportunidades de generar ingreso, y pueden establecer fuentes sostenibles de forraje alto en proteína, leña, frutas, alimentos, abono orgánico, etc. (Trees for the Future, 2010).

La definición de Sistemas Agroforestales, según la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO) es “todos aquellos sistemas

donde hay una combinación de especies arbóreas con especies arbustivas o herbáceas, generalmente cultivadas”. Este término es muy amplio, pues incluye desde la simple presencia de algunos árboles en combinación con cultivos de vegetales o cereales, hasta sistemas complejos con múltiples especies en varios estratos (Sánchez, FAO).

Los Sistemas Agroforestales ayudan con la sostenibilidad en dos maneras. La primera es que están diseñados para proveer productos que necesitan los productores. Segundo, protegen y mantienen la producción de sistemas reduciendo erosión de suelos por viento y agua y mejoran la infiltración de agua. En la figura 3.2 se presentan diferentes sistemas agroforestales (Trees for the Future, 2010).

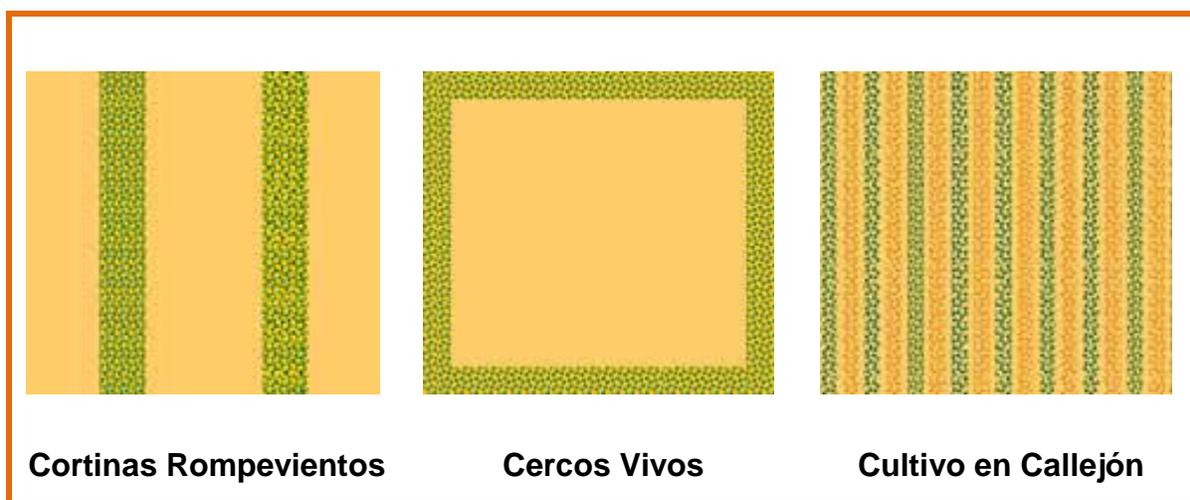


Figura 3.2. Esquematización de diferentes sistemas Agroforestales aplicados (Trees for the Future, 2010).

3.2.1.1 CORTINAS ROMPEVIENTOS

Las Cortinas Rompevientos hacen que el viento sea lento al nivel del cultivo y desvían la fuerza del viento a altitudes más elevadas. La composición de las especies de los árboles y arbustos usados en las cortinas rompevientos varía

grandemente alrededor del mundo, pero su diseño básico permanece igual, como se muestra en la figura 3.3 (Trees for the Future, 2010).

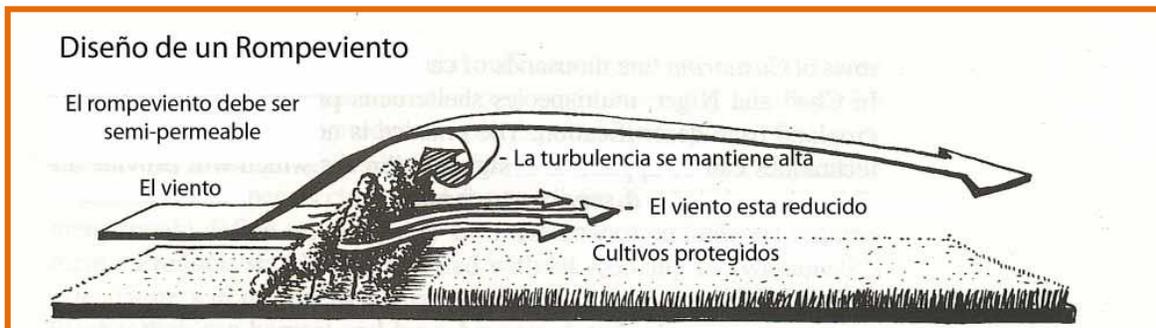


Figura 3.3. Diseño básico de una Cortina Rompevientos (Trees for the Future, 2010).

Es muy común encontrar como cortinas Rompevientos a la *Moringa oleífera* aunque en solitario sea débil al viento, cuando se encuentra agrupado con otros árboles de su especie resulta ser resistente. Ésta planta puede crecer y desarrollarse como Cortina Rompevientos debido a que es adecuado para áreas donde la combinación de fuertes vientos y largos períodos de sequía causan seria erosión al suelo (Duarte y Flores, 2004; Folkard y Sutherland, 1996).

3.2.1.2 CERCOS VIVOS

Un cerco vivo es el uso de árboles y arbustos para crear una barrera a prueba de animales como en la figura 3.4. Los cercos vivos no solamente reducen la necesidad de cercos tradicionales, sino que los árboles y arbustos utilizados en los cercos vivos pueden producir beneficios tangibles tales como comida, leña, y otras materias primas (Trees for the Future, 2010).

El uso más común del árbol de Teberinto es producir postes vivos para cercar terrenos y jardines. Las razones de esto se atribuyen a su desarrollo rápido y a que sus tallos soportan los diversos elementos de cercamientos: alambres, vallas,

etc. Además posee la ventaja de proveer sombra y sirve como soporte de enredaderas y otras especies trepadoras (Duarte y Flores, 2004).



Figura 3.4. Árboles de Teberinto usados como Cercos Vivos en la división de un terreno (Reyes Sánchez, 2004).

3.2.1.3 CULTIVO EN CALLEJÓN

El sistema llamado Cultivo en callejón siembra filas paralelas de árboles en un campo. Las cosechas están sembradas dentro de estas filas. Las especies de los árboles sembrados deben tener la habilidad de retoñar (crecer de nuevo después de haberse cortado). A través de la estación de crecimiento, las ramas y hojas de estos árboles se podan y dejan alrededor de los cultivos que están en crecimiento entre las filas de árboles. Se biodegradan rápidamente en el suelo agregando grandes cantidades de materia orgánica y nutrientes. (Trees for the Future, 2010). El árbol de *Moringa oleífera* es especialmente indicado para la modalidad de cultivo en callejones, conocida también como “Alley Cropping”, debido a ciertas características que se presentan en la figura 3.5 que lo hacen adecuado: crecimiento rápido, tallos rectos y largos, raíces verticales y profundas y pocas raíces laterales, escasa sombra y alta productividad de biomasa con alto contenido de nitrógeno (Duarte y Flores, 2004).

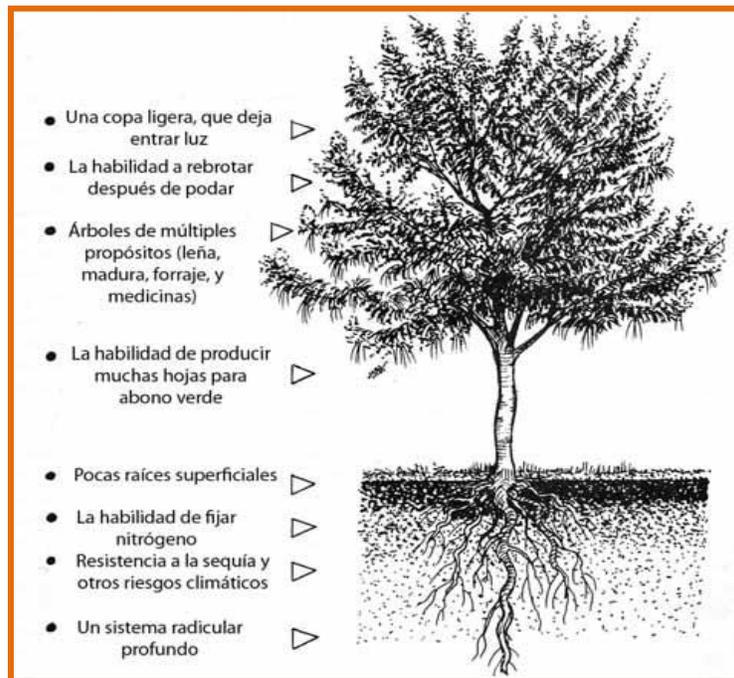


Figura 3.5 Características necesarias para que una especie vegetal sea adecuada para el cultivo en callejones (Trees for the Future, 2010).

3.2.2 CONTROL DE EROSIÓN Y MEJORA DE SUELOS.

La *Moringa oleífera* cumple un papel importante en el control de la erosión por causa del viento y del agua. Para el caso de erosión por el viento la técnica utilizada es la de Cortinas Rompivientos. Para el caso de la erosión por el agua, ya que posee una raíz tuberosa que sirve como reserva de agua en épocas de sequía, lo que también ayuda en la recuperación de suelos áridos y semiáridos.

Otra ventaja del Teberinto en cuanto a la recuperación del suelo, es la cantidad de nitrógeno que es capaz de aportar con el material vegetativo, sobre todo hojas, que se desprenden del árbol o cuando se realizan podas a las plantaciones, actuando como abono para el suelo y enriqueciéndolo (Trees for the Future, 2010)

3.2.3 FERTILIZANTES.

Los fertilizantes proveen los nutrientes que los cultivos necesitan. Con su uso se pueden producir más alimentos y cultivos comerciales, y de mejor calidad. Además, con el uso de fertilizantes se puede mejorar la baja fertilidad de los suelos que han sido sobreexplotados (Sánchez, FAO).

Al procesar la semilla de *Moringa oleífera*, queda una masa residual, la cual es altamente valorada como fertilizante natural, porque posee un gran contenido en nitrógeno. Además se puede obtener sin costo alguno por ser derivado de un proceso principal. También debe tomarse en cuenta que el uso de la *Moringa oleífera* como abono verde puede enriquecer significativamente los suelos agrícolas (Agrodesierto, 2008).

3.2.4 FUENTE DE HORMONAS

El jugo de las plantas de Teberinto puede utilizarse a fin de producir una hormona que es efectiva para el crecimiento de las plantas, aumentando el rendimiento en un 25-30% para casi todo cultivo: cebolla, pimiento verde, soya, maíz, sorgo, café, té, chile, melón. Una de las sustancias activas es la Zeatina, que es una hormona de las plantas del grupo de las citoquinonas. Este rocío foliar deberá usarse además de otros fertilizantes, riego y prácticas agrícolas razonables, para lograr la efectividad adecuada (Agrodesierto, 2008).

3.2.5 ORNAMENTALES

La *Moringa oleífera* puede ser utilizada como un árbol ornamental, ya que se trata de un árbol muy interesante y de forma atractiva. Además admite muy bien las podas y pueden ser utilizados como árboles de sombra y pantalla visual y auditiva. Muchas especies, sobre todo los "árboles botella" son muy interesantes como ejemplares aislados (Agrodesierto, 2008).

En muchos países los árboles de Teberinto se plantan en jardines de hogares, parques, áreas de recreación y a lo largo de avenidas. Además es conveniente para la reforestación de lugares de esparcimiento y terrenos en general, por su rápido crecimiento y desarrollo (Alfaro y Martínez, 2008; Duarte y Flores, 2004).

3.3 USOS ALIMENTICIOS.

La *Moringa oleífera* posee cualidades nutricionales sobresalientes y está considerada como uno de los mejores vegetales perennes, que difícilmente se pueda encontrar otro alimento más completo en el cual los frutos verdes, semillas y raíces también son comestibles (Rocha Roman, 2011).

3.3.1 ALIMENTACION ANIMAL.

Por el contenido de proteínas, vitaminas, aminoácidos, minerales y carotenos la *Moringa oleífera* se ubica como un suplemento de importancia (debidamente balanceado) en la dieta de ganadería de leche, así como en la dieta de aves, peces, cerdos etc.; así como también para la elaboración de harina proteica y materia prima para fabricas de alimentos balanceados para animales de alta

conversión y bajo costo. Mediante el proceso de deshidratación, molienda, acondicionamiento, extruido o peletizado¹² (Garavito, 2008).

3.3.1.1 *Moringa oleífera* COMO ÁRBOL FORRAJERO.

El Teberinto es superior a cualquier otro tipo de forraje con relación al rendimiento promedio en biomasa comestible en toneladas por hectárea por año. Las hojas contienen de 20-28% de proteína (base seca), son muy ricas en vitaminas y minerales con una palatabilidad excelente (Barrera y Bello, 2004).

A los 30 días de su germinación las plántulas¹³ pueden tener 0.80 metros de altura, cuando la plantación tiene como fin la producción de forraje para animales o para consumo humano, (en este caso se siembra 1, 000,000 semillas/hectárea). A esta edad, los análisis bromatológicos reportan 29.34% de proteína, 5.86% de grasa y 15% de fibra, en plantas sembradas en un sitio definitivo, mientras que plantas sembradas en vivero (en bolsas) a los 40 días solamente reportan el 18.94% de proteína y 3.84% de grasa, debido a que la bolsa plástica impidió que la raíz pivotante absorbiera los nutrientes del suelo (Garavito, 2008).

La productividad es aproximadamente de 8 a 10 toneladas de proteína/hectárea/año, cuando se siembra para producción de forraje en altas densidades de plantaciones y 4 a 6 cortes al año, siendo superior a cualquier otro tipo de forraje (Barrera y Bello, 2004).

¹² El peletizado es una operación de moldeado en el que partículas finamente divididas de una ración se integran en un pelet compacto y de fácil manejo, el cual incluye condiciones específicas de humedad, temperatura y presión.

¹³ Se denomina plántula a la planta en sus primeros estadios de desarrollo, desde que germina hasta que se desarrollan las primeras hojas verdaderas.

BIOMASA¹⁴, ha realizado numerosas pruebas utilizando hojas de *Moringa oleífera* como forraje para ganado (vacas de carne y leche), alimento para ganado porcino, y aves de corral. Con hojas de *Moringa oleífera* constituyendo el 40-50% del alimento, la producción de leche para el ganado lechero y el aumento diario de peso para el ganado de engorde aumentaron en un 30% (Foidl, 2000).

Cuando se utiliza la *Moringa oleífera* en alimentación animal hay que tomar en cuenta los siguientes aspectos:

- El alto contenido proteínico de las hojas de *Moringa oleífera* debe balancearse con otros alimentos energéticos. El alimento para ganado que consiste en un 40-50% de hojas debe mezclarse con melaza, caña de azúcar, pasto elefante, plantas de sorgo dulce (joven), o cualquier otra cosa que esté disponible en el ámbito local. El contenido máximo de proteína y fibra del alimento para ganado debe ser como se muestra en la tabla 3.1 (Foidl, 2000).

Tabla 3.1 Cantidad máxima (%) de proteína y fibra en el alimento para Ganado considerada segura para vacas y cerdos (Foidl, 2000).

	Proteína	Fibra.
Vaca Lactante:	18%	26-30%
Ganado/Vaca de engorde:	12-14%	36%
Cerda lactante:	16-18%	5-7%
Cerda para Carne:	12-14%	5.7%

- Debe tenerse cuidado de evitar la ingesta excesiva de proteínas. Demasiada proteína en alimento para cerdos aumentará el desarrollo muscular, a expensas de la producción de grasa. En el ganado de engorde,

¹⁴ BIOMASA es un programa de investigación agrícola localizado en Nicaragua que ha estudiado varios aspectos de la *Moringa oleífera*.

demasiada proteína puede ser fatal (por la alteración del ciclo del nitrógeno), (Foidl, 2000).

- El ordeño de las vacas debe hacerse al menos tres horas después de alimentar al animal a fin de evitar el sabor a hierbas de la *Moringa oleífera* en la leche. Obteniéndose con alimento a base de *Moringa oleífera* la producción de leche de 10 litros/día y sin alimento a base de *Moringa oleífera*, una reducción de 7 litros/día (Foidl, 2000).
- Con alimento a base de *Moringa oleífera* el aumento diario de peso en ganado de engorde es de 1,200 gramos/día. Sin alimento a base de *Moringa oleífera* el aumento diario de peso para ganado de engorde es de 900 gramos/día (Foidl, 2000).
- Con el alimento a base de *Moringa oleífera* el peso más alto al nacer (3-5 kg) puede ser problemático para el ganado pequeño. Podría ser recomendable inducir el parto 10 días antes a la fecha para evitar problemas (Foidl, 2000).
- Como todos los forrajes, es importante someter la *Moringa oleífera* a deshidratación en el mismo cultivo antes de suministrarla al ganado, con el fin de disminuir el nivel de agua en su organismo, y aumentar los niveles de proteína, grasa, fibra y cenizas. Es sabido que cuando el ganado consume forrajes con altos niveles de humedad, tiene excretas demasiado acuosas y retrocede del peso que hubiere podido ganar con pasturas de buena calidad (Garavito, 2008).
- En el caso de no rumiantes principalmente en aves y cerdos el valor nutritivo de las hojas frescas se puede incrementar con la adición de la enzima fitasa que rompe los fitatos, lo que incrementa la absorción del fósforo contenido en las hojas frescas de *Moringa oleífera* (Barrera y Bello, 2004).
- Los pollos, gallinas y pavos no suelen admitir el consumo directo de las hojas frescas o polvo de hojas de *Moringa oleífera* en forma voluntaria. Sin embargo, casi la mitad del contenido proteico puede extraerse de las hojas

en forma de un concentrado que luego puede agregarse al alimento de los pollos (o utilizarse en muchas otras formas). El contenido de proteína deseado en alimento para pollos es del 22%, de esta cantidad la mitad se puede obtener a bajo costo utilizando hojas de *Moringa oleífera* en el concentrado (Barrera y Bello, 2004).

3.3.2 ALIMENTACION HUMANA.

La *Moringa oleífera* se está revelando como un recurso de primer orden con bajo costo de producción para prevenir la desnutrición, prevenir la anemia y múltiples patologías como la ceguera infantil asociada a carencias de vitaminas y elementos esenciales en la dieta alimenticia. Teniendo un futuro prometedor en la industria dietética como alimento proteico para deportistas (Alfaro y Martínez, 2008).

Todas las partes de la planta son comestibles, proporcionando un excelente alimento. El sabor es agradable y las diversas partes se pueden consumir crudas (especialmente las hojas y flores) o cocinadas de diversas maneras las cuales tienen un ligero sabor a berro y espinaca. Las vainas son a menudo cocinadas y comidas como arvejas, la raíz tiene un sabor similar al rábano picante y es usada como condimento. Sus hojas verdes son utilizadas en ensaladas, para sazonar alimentos o consumidas como espinacas, también en algunos países se comen los frutos, semillas, hojas y flores como verduras nutritivas así por ejemplo la semilla seca molida es utilizada en algunos lugares como condimento en salsas o también las semillas maduras se consumen tostadas como el maní (Barrera y Bello, 2004).

En general esta planta en todas sus presentaciones sirve como alimento, como elemento preventivo de ciertas enfermedades y como reconstituyente. La zeatina es una enzima que acelera el crecimiento y el desarrollo no solo de los órganos humanos y animales, sino también de diversos vegetales. La zeatina proporciona

una exclusiva fuente de crecimiento, logrando normalizar con su consumo el organismo de personas en estado de desnutrición (Fonseca, 2011).

La International Eye Foundation con base en Estados Unidos, está usando la *Moringa oleífera* en Malawi por su alto contenido de Vitamina A, debido a que en este país, la deficiencia en su consumo es la causa de la ceguera en el 70% de los casos (Fonseca, 2011).

La hoja de *Moringa oleífera* posee un porcentaje superior al 25% de proteínas, esto es, tantas como el huevo, o el doble que la leche de vaca, cuatro veces la cantidad de vitamina “A” de las zanahorias, cuatro veces la cantidad de calcio de la leche, siete veces la cantidad de vitamina C de las naranjas, tres veces más potasio que los plátanos, cantidades significativas de hierro, fosforo y otros elementos según la tabla 3.2; sabiendo que el contenido nutritivo de la sustancia vegetal puede cambiar dependiendo de la variedad de la planta, la estación, el clima y la condición del suelo. Así que diferentes análisis producen diferentes números (Alfaro y Martínez, 2008).

Tabla 3.2 Comparación de la *Moringa oleífera* con otros alimentos. (Alfaro, 2008)

NUTRIENTE	MORINGA	OTROS ALIMENTOS
Vitamina “A” (mcg)	1,130	Zanahorias: 315
Vitamina “C” (mg)	220	Naranjas: 30
Calcio (mg)	440	Leche de vaca: 120
Potasio (mg)	259	Plátanos: 88
Proteína (mg)	6,700	Leche de vaca:3,200

3.4 USOS QUIMICOS

Entre los potenciales químicos que posee la *Moringa oleífera* se encuentra el aceite extraído de sus semillas permitiendo la producción de biodiesel; y el polvo de la semilla después de la extracción de aceite en el tratamiento de aguas, y su corteza y tronco como fuente de celulosa entre otros.

3.4.1 COSMÉTICOS

En la industria cosmética y farmacéutica el aceite es utilizado como materia prima que funciona como vehículo de los principios activos y además como emoliente, aromatizante o saborizante (Martínez, 2003).

La semilla de la *Moringa oleífera* contiene aceite, el cual ha sido usado en preparaciones y bálsamos para la piel desde la época de los egipcios. El aceite de color amarillo intenso poco viscoso, tiene un perfil de ácido graso que indica un 68.9% de ácido oleico. Esto significa que el aceite de *Moringa oleífera* tiene el mismo nivel de calidad que el aceite de oliva, por lo que podría tener el mismo valor de mercado y debido a la calidad del aceite este puede ser utilizado para consumo humano. Después de la extracción del aceite queda un subproducto del procesado de la semilla que forma una torta que puede utilizarse en purificación de aguas superficiales (Folkard y Sutherland, 1996).

El grano contiene un valor aproximado de 32.6% de su peso de aceite. Estudios realizados han demostrado que puede fabricarse jabón de muy buena calidad a partir de aceite de *Moringa oleífera*, con grandes propiedades antioxidantes muy potentes que se consideran un factor detrás de su extraordinaria estabilidad, y que a la vez posee una gran capacidad de absorber y retener incluso las fragancias más fugitivas (Folkard y Sutherland, 1996).

3.4.2 BIODIESEL

La definición de biodiesel propuesta por la American Society for Testing and Materials (ASTM), lo describe como ésteres monoalquílicos de ácidos grasos de cadena larga derivados de lípidos renovables tales como aceites vegetales o grasas de animales, y que pueden ser empleados en motores de ignición de compresión. (Contreras González, 2011)

Las especies de árboles perennes, como la *Moringa oleífera*, y que tienen el potencial de producción de semillas oleaginosas para la producción de biodiesel tienen tres ventajas principales: 1. La plantación de éstos árboles pueden aumentar potencialmente la cobertura verde, secuestrando más CO₂ que otros cultivos de aceite vegetal; 2. La producción de biodiesel a partir del aceite de semillas de árboles perennes, reduce la demanda de otros aceites vegetales para la producción de biodiesel, reduciendo la presión sobre plantas que poseen granos oleaginosos con demandas alimenticias elevadas, como el girasol y la canola; y, 3. Estas plantas perennes son muy tolerantes a altas salinidades, agua y sequías (Biswas, 2008).

Otras características destacables para usar el aceite obtenido de la *Moringa oleífera* en la obtención de biodiesel son que posee un índice de cetano elevado, asegurando de esta manera una ignición retrasada que permite una combustión de alta calidad y que posee un índice de yodo alto logrando una estabilidad en el combustible. Este conjunto de características, hacen que el Teberinto cumpla con los estándares necesarios para ser considerado como un árbol apto para la obtención de biodiesel (Biswas, 2008).



Figura 3.6 Biodiesel obtenido a partir de semillas de *Moringa oleífera*¹⁵

Estudios realizados en Brasil, habiendo extraído el aceite de la semilla seca (39%) con hexano arrojaron que contiene un 3.6% de ácido palmítico, 10.8% de esteárico, 68.9% de oleico, 3.8% de linoleico y 6.3% de behénico. Ese alto valor de ácido oleico significa que ese aceite es adecuado para obtención de biodiesel, con un bajo grado de insaturación. Ello indica su buena calidad por su estabilidad a la oxidación, facilitando el transporte y almacenamiento. El rendimiento de biodiesel para 500 plantas sembradas por hectárea es de 1500 litros, siendo el factor de conversión de aceite a biodiesel de 0.96 (Bernabé y Falasca, 2008; Contreras González, 2011).

3.4.3 BIOMASA

La biomasa se define como toda materia orgánica proveniente de seres vivos, que es utilizable como fuente de energía. En forestería, la biomasa se refiere a todas aquellas partes de una planta que pueden generar energía, ya sea por sus propiedades comestibles o por tratamientos posteriores. La Biomasa comestible, es toda aquella que se usa con fines de alimentación animal y puede abarcar varias partes de la planta: tallo, hojas, corteza, flores y frutos. La Biomasa energética es toda aquella que se utiliza con fines de producción de energía,

¹⁵ Fuente de imagen: <http://www.themoringa.com/moringa-information>

transformando diversas partes de una planta en combustibles (Moreno López, 2005).

El uso de la biomasa genera beneficios socioeconómicos y medio ambientales. El fomento de la producción de biomasa con fines energéticos y comestibles, permite el desarrollo de una nueva actividad en las áreas rurales. La *Moringa oleífera* puede utilizarse como biomasa comestible en la alimentación de ganado (producto forrajero) y como biomasa combustible en la producción de biocombustibles (Cultivos Energéticos S.R.L., 2011).

El Teberinto posee alto rendimiento en producción de biomasa fresca, el cual se utiliza como alimento para ganado. Las podas son necesarias para estimular la producción de hojas frescas. El material cortado, tallos, ramas y hojas se pican y se suministra a los animales (Bernabé y Falasca, 2008; Foidl, Mayorga y Vásquez, 2003).

Entre los usos como combustibles están involucradas diversas partes de la planta: las hojas se pueden emplear para obtener biogás, las semillas para la producción de biodiesel, además, el aceite es utilizado como combustible en lámparas ya que arde sin producir humo. Las ramas y el tronco del Teberinto proporcionan leña, que es utilizada como un combustible aceptable, ya que proporciona 4600 Kcal/kg, también se ocupa la madera blanda y frágil para elaborar carbón vegetal (Agrodesierto, 2008; Armengol, Pérez, Reyes y Sánchez, 2010; Bernabé y Falasca, 2008).

3.4.4 TRATAMIENTO DE AGUAS

En ingeniería ambiental el término tratamiento de aguas es el conjunto de operaciones unitarias de tipo físico, químico o biológico cuya finalidad es la eliminación o reducción de la contaminación o las características no deseables de las aguas, bien sean naturales, de abastecimiento, de proceso o residuales. La finalidad de estas operaciones es obtener unas aguas con las características adecuadas al uso que se les vaya a dar, por lo que la combinación y naturaleza exacta de los procesos varía en función tanto de las propiedades de las aguas de partida como de su destino final (Muñoz y Rodríguez, 2005).

La coagulación es un proceso común en el tratamiento de aguas aplicado para la desestabilización de impurezas coloidales y disueltas, produciendo agregados de flóculos grandes que pueden ser removidos por subsiguientes procesos de filtración/clarificación. De este modo la clarificación incluye la Coagulación-Floculación proceso mediante el cual las partículas se aglutinan en pequeñas masas, con un peso específico superior al del agua, provocándole a ésta una remoción de la turbiedad orgánica y/o inorgánica, una remoción del color verdadero o aparente, la eliminación de bacterias, virus y organismos patógenos, destrucción de algas y eliminación de sustancias productoras de sabor y olor en algunos casos y de precipitados químicos suspendidos entre otros (Muñoz y Rodríguez, 2005).

Este proceso se lleva a cabo agregando coagulantes, los cuales pueden ser clasificados como inorgánicos, polímeros orgánicos sintéticos y naturales. Del amplio rango de coagulantes que pueden ser usados para el tratamiento de las aguas, los más comunes son: sulfato férrico, sulfato de aluminio y cloruro férrico. Sin embargo, se ha reportado que el aluminio residual presente en las aguas, como resultado del tratamiento con alumbre, está relacionado con el mal de Alzheimer, producción de grandes volúmenes de lodo, reacción con la alcalinidad

natural presente en el agua y la baja eficiencia en la coagulación de aguas frías. Desventajas similares se han reportado para las sales de hierro y los polímeros sintéticos (Caldera y Mendoza, 2007).

Las semillas de *Moringa oleífera* son uno de los mejores floculantes naturales conocidos y se emplean en la depuración y purificación de aguas fluviales y aguas turbias, contienen un coagulante activo caracterizado como un péptido catiónico de peso molecular aproximado a 13 kDa y punto isoeléctrico a pH 10. Se considera que este péptido puede ser una alternativa viable para reemplazar parcial o completamente a los productos químicos utilizados en el tratamiento de aguas como el sulfato de aluminio y cloruro de hierro. Además, se ha reportado que disminuye la acumulación de aluminio en los lodos residuales y abarata los costos en el tratamiento de aguas (Aguilar y Rodríguez, 2007; Cornejo y Paredes, 2011).

La limpieza que la *Moringa oleífera* realiza en el agua es efecto de la diferencia de cargas eléctricas que se establece entre las partículas que se encuentran en suspensión y las partículas pulverizadas de la arcilla o de la semilla de la *Moringa oleífera*. Las corrientes eléctricas aglutinan las partículas en suspensión en torno a las partículas de las semillas y finalmente la fuerza de la gravedad las arrastra hacia el fondo (Caldera y Mendoza, 2007).

La *Moringa oleífera* no garantiza que el agua quede totalmente libre de gérmenes patógenos. El agua se limpia, pero no se convierte en agua totalmente purificada. Pero al reducir drásticamente la cantidad de partículas en suspensión, también se reduce la cantidad de microorganismos, pues éstos viven en torno a las partículas. Más aún, los microorganismos quedan apresados entre las gruesas macropartículas que caen al fondo del recipiente, de donde ya no pueden liberarse (Caldera y Mendoza, 2007).

3.4.5 ETANOL

El azúcar y el almidón contenido en la planta de *Moringa oleífera* son extraídos por procesos mecánicos de molienda, lavado, reconcentración y floculación y su uso potencial es la producción de alcohol industrial. Según datos reportados el azúcar y almidón se concentran en las hojas del Teberinto siendo sus valores de 10 y 8% respectivamente. La producción de 10 MW de energía eléctrica, 80 ton de material proteico y 16,000 l de alcohol por día, requiere una extensión de cultivo de 1,500 ha de *Moringa oleífera* bajo riego. En una ha de caña de azúcar se puede producir 630 l/año de alcohol a partir de la melaza que se obtiene en la producción de azúcar, la misma área sembrada con *Moringa oleífera* puede producir 8,400 l/año (Cornejo y Paredes, 2011; Foidl y Mayorga, 2000).

3.4.6 FUENTE DE CELULOSA

La madera, frágil y blanda es utilizada en la elaboración de carbón vegetal o pulpa de papel de excelente calidad en ambos casos. Teniendo en cuenta la elevada tasa de crecimiento del árbol de Teberinto y que la corteza corchosa produce una fibra tosca, que se utiliza para hacer esteras, papel y cordaje. La *Moringa oleífera* presenta una blancura interesante para el pulpado mecánico y la pulpada químicamente es utilizable en conjunto con otras pulpas para papel para ondular o para embalajes (cartones y cartulinas). La pulpa química posee un índice de grado de deslignificación (N° Kappa) de 57.07; el cual es un valor alto comparado con lo obtenido industrialmente para pulpas Kraft (Cobbas y Molina, 2004; Bernabé y Falasca, 2008).

3.4.7 TINTE Y GOMA

El tallo del árbol de *Moringa oleífera* exuda una goma mucilaginosa que se usa para curtir cuero y para el estampado de calicó o indiana. De la madera se puede

extraer un tinte azulado de interés industrial. También con las proteínas que posee es utilizado como un componente para los tintes de cabello, el cabello recobra flexibilidad y firmeza así como su fuerza, protege a diario la emisión UV y proporciona un brillo excepcional (Bernabé y Falasca, 2008).

3.4.8 CARBÓN ACTIVADO

Las cáscaras de semillas del árbol de *Moringa oleífera* son potencialmente un producto de desecho, y trabajos previos han demostrado que un carbón activado microporoso puede ser producido a partir de ellas. Demostrando la eficacia de un proceso de activación simple y más barato, de un solo paso de activación, con el fin de promover la producción de bajo costo de carbón activado en el mundo en desarrollo (McConnachie, Pollard y Warhurst, 1997).

El carbón activado elaborado en la Universidad de Edimburgo y la Universidad de Malawi se realizó mediante el calentamiento del precursor (material de cáscara o vainas) en un horno para eliminar los volátiles (carbonización) con la activación simultánea de vapor. Demostrando que un procedimiento de pirólisis de vapor simple puede formar alta calidad de microporos de carbón activado tanto de las cáscaras de los residuos de *Moringa oleífera* y las vainas (McConnachie, Pollard y Warhurst, 1996).

Las aplicaciones potenciales de carbón activado son la adsorción de concentraciones excesivas de hierro y manganeso a partir de compuestos de las aguas subterráneas, de sabor y olor, patógenos bacterianos y virales, el tratamiento terciario de las aguas residuales entre otros (McConnachie, Pollard y Warhurst, 1996).

3.5 ESTUDIOS DEL TEBERINTO (*Moringa oleífera*) EN EL SALVADOR.

La investigación de campo acerca del estado actual del cultivo de Terebinto en El Salvador demuestra que el árbol *Moringa oleífera* no ha sido un recurso explotado en la agricultura salvadoreña, siendo una especie con claro valor potencial a futuro que necesita de su estudio e investigación y que se encuentra en transición.

Existen algunas organizaciones no gubernamentales en El Salvador, como Visión Mundial, dedicadas a promover el cultivo de Teberinto con fines nutricionales para que las hojas producidas por el árbol sean incluidas en la dieta alimenticia como fuente de proteínas. Promoviendo así campañas a nivel nacional con énfasis en la zona oriental del país en los departamentos de Usulután, San Miguel y Morazán, y en las zonas costeras de Ahuachapán y Sonsonate con más de 30,000 árboles sembrados en dicho proyecto.

En la investigación también se conoció la existencia de algunos productores locales que cultivan la *Moringa oleífera* con fines de comercialización y el resto de árboles sembrados en el país se utilizan únicamente como cortinas rompevientos, cercos vivos, árboles forrajeros o plantas ornamentales.

CAPÍTULO 4

DESCRIPCIÓN DE PROCESOS EN LA INDUSTRIA QUÍMICA UTILIZANDO PLANTAS COMO MATERIA PRIMA

El uso de plantas como materia prima es una costumbre que la humanidad viene empleando desde tiempos remotos. Desde el antiguo Egipto, así como todas las religiones de Oriente, América y Europa han utilizado las plantas con fines médicos, terapéuticos y religiosos desde siempre. En la actualidad, los usos de las plantas se han ampliado hacia muchos campos, incluyendo la industria química. Los avances científicos permiten plantear procesos cada vez más eficientes para el aprovechamiento de los recursos naturales, tomando en cuenta el enfoque de sostenibilidad y las plantas no son la excepción para este aprovechamiento.

4.1 PROCESOS DE EXTRACCIÓN DE ACEITE A PARTIR DE SEMILLAS OLEAGINOSAS.

Los lípidos son componentes biológicos que son solubles en solventes no polares y son insolubles en agua, entre los lípidos se encuentran los aceites, dicha denominación hace referencia únicamente al estado físico líquido de los lípidos. Los aceites son ésteres formados por la condensación (unión) de ácidos grasos con glicerol, son los compuestos más estables y no son fácilmente degradables (Cisterna, 2010).

Este apartado es imprescindible dentro de este capítulo, puesto que aquí se estudian los diferentes métodos de extracción de aceite a partir de semillas oleaginosas. A nivel industrial los métodos de extracción más utilizados comprenden aquellos que se realizan por medios mecánicos y por medios

químicos que comprenden los métodos de extracción por solventes o a la vez puede utilizarse una combinación de ambos métodos.

4.1.1 EXTRACCION POR PRENSADO.

Se aplica a frutos y semillas oleaginosas, complementando generalmente el prensado con la extracción por solventes. Previamente, las semillas deben pasar por las etapas de preparación de limpieza y descascarillado, una vez que las semillas han sido molidas de tal forma de desgarrar las células para dejar en libertad el aceite contenido en ellas, se las somete al prensado (Cárdenas, Camacho y Mondragón, 2007).

El material vegetal es sometido a presión, bien sea en prensas tipo batch ó en forma continua, dentro de éstos se tienen los equipos: Tornillo sin fin de alta ó de baja presión, extractor expeller, extractor centrífugo, extractor decanter y rodillos de prensa. Antiguamente se empleó el método manual de la esponja, especialmente en Italia, que consiste en exprimir manualmente las cáscaras con una esponja hasta que se empapa de aceite, se exprime la esponja y se libera el aceite (Sánchez Castellanos, 2006).

4.1.1.1 PRENSADO DISCONTINUO.

El procedimiento más antiguo de extracción de aceite se basa en la aplicación de la presión sobre una masa de productos oleaginosos confinados en bolsas, mallas, telas u otros artificios adecuados. Los modelos de prensa más primitivos emplearon como medios para aplicar la presión palancas, cuñas, tornillos, etc., mientras que los tipos más modernos utilizan, casi siempre un sistema hidráulico; por esto el término hidráulico se suele emplear para designar el prensado discontinuo. El rendimiento de obtención de aceite, por prensado mecánico, dependerá de la cantidad de presión aplicada y de una serie de factores

relacionados con la afinidad del aceite por los sólidos de las semillas. Entre estos factores se encuentra el grado de humedad y la composición química de la misma (Bailey, 1961).

4.1.1.2 PRENSADO CONTINUO.

En el prensado continuo la presión necesaria se obtiene mediante un eje horizontal que gira dentro de una jaula y que está provista de tornillos sinfín ordenados en tal forma que junto con producir un avance del material, van ejerciendo una presión creciente sobre él. El orden de las presiones usadas para expulsar el aceite fuera de las semillas es de 700 a 3,000 kg/cm² (Cheftel & Cheftel, 1980).

Las prensas continuas empleadas en Estados Unidos son, en su mayor parte, máquinas de alta presión, diseñadas para efectuar la obtención de aceite en un solo paso y destinadas, generalmente, a una sola clase de semillas. Las prensas continuas ahorran mucha mano de obra respecto a las hidráulicas y eliminan por completo el uso de telas filtrantes. Se adaptan a una amplia gama de materias y, en la mayor parte de los casos, dan un rendimiento en aceite algo superior a las hidráulicas. Su mayor inconveniente estriba en el gasto de energía, relativamente alto, y en consecuencia los costos de puesta en marcha y parada son elevados, factor que afecta los costos de producción de los aceites vegetales, a la vez que requieren una buena práctica de operación y conservación y no se adaptan bien a procesos intermitentes (Bailey, 1961).

Otros métodos corresponden a raspado, como el del estilete ó “ ecuelle”, donde la fruta se pone a girar en un torno y con un estilete se raspa la corteza únicamente; permanentemente cae un rocío de agua que arrastra los detritos y el aceite liberado. Otro proceso emplea una máquina de abrasión similar a una peladora de papas, la “pellatrice” y también hace uso del rocío de agua. En estos procesos la

mezcla detritos-agua-aceite se centrifuga a 5000 rpm durante 40 minutos y el aceite esencial recuperado se coloca en una nevera a 3°C durante 4 horas, para solidificar gomas y ceras que se localizan en la superficie (Sánchez Castellanos, 2006).

4.1.2 EXTRACCIÓN CON SOLVENTES.

El material previamente debe de ser molido, macerado ó picado, para permitir mayor área de contacto entre el sólido y el solvente. El proceso ha de buscar que el sólido, ó el líquido, ó ambos, estén en movimiento continuo (agitación), para lograr mejor eficiencia en la operación. Se realiza preferiblemente a temperatura y presión ambientes. El proceso puede ejecutarse por batch (por lotes ó cochadas) ó en forma continua (percolación, lixiviación, extracción tipo soxhlet). Los solventes más empleados son: Etanol, metanol, isopropanol, hexano, ciclohexano, tolueno, xileno, ligroína, éter etílico, éter isopropílico, acetato de etilo, acetona, cloroformo; no se usan clorados ni benceno por su peligrosidad a la salud. Los solventes se recuperan por destilación y pueden ser reutilizados (Sánchez Castellanos, 2006).

El solvente adicionalmente extrae otros componentes como colorantes, gomas, mucílagos, ceras, grasas, proteínas y carbohidratos. En la etapa de recuperación de los solventes (atmosférica ó al vacío), después de los condensadores ha de disponerse de una unidad de enfriamiento, para la menor pérdida del solvente (Sánchez Castellanos, 2006).

Aunque se ha reportado que, el tricloetileno es el que tiene mayor poder disolvente, la realidad es que hoy en día el solvente más utilizado es el hexano, porque con él se obtiene mayor calidad de aceite y se disminuyen otros problemas, como la peligrosidad (explosión), toxicidad, así como la corrosión en las instalaciones (Camacho, Cárdenas y Mondragón, 2007).

4.1.2.1 EXTRACCIONES POR MEDIO DE LIXIVIACIÓN

Las extracciones por medio de lixiviación, utilizado para materias oleaginosas con un contenido de aceite superior al 40%, requieren además de un proceso de eliminación de los solventes y escamación intermedias. El solvente más usado en el mundo hasta hace algunos años para la extracción era el hexano industrial por su selectividad hacia los glicéridos y facilidad de recuperación. Para aumentar la eficiencia de éste proceso de extracción, actualmente se emplean extractores modernos que operan en proceso continuo, con lecho móvil a contracorriente, obteniéndose dos corrientes: la fase líquida de miscela (constituida por solvente y aceite) y la fase sólida que es la torta. De acuerdo con la eficiencia de operación en el proceso y con la composición del material oleaginoso, una fracción de aceite queda ligada a la torta (Convenio Interinstitucional De Cooperación UPME–INDUPALMA – CORPODIB, 2003).

4.1.2.2 EXTRACCIONES POR MEDIO DE PERCOLACIÓN.

La percolación se realiza mediante una lluvia de disolvente de manera que llegue a toda la masa, sin llenar todos los espacios vacíos que existen entre las semillas. La velocidad del disolvente en contacto con la superficie de semilla es grande ya que el líquido escurre velozmente por efecto de la gravedad (Centro de Documentación de Estudios y Oposiciones, 2009).

En el proceso de percolación al trabajar con alta velocidad de paso, el disolvente requiere de varios reciclados del mismo y se realizarán varias etapas de lavado, con el fin de poner en contacto la semilla pobre en aceite con el disolvente de menor contenido en dicho producto y viceversa. Se trata por tanto de una extracción en distintas etapas, aunque sea de modo continuo y nunca podrá realizarse un perfecto lavado en contracorriente (Centro de Documentación de Estudios y Oposiciones, 2009).

4.1.2.3 EXTRACCIONES TIPO SOXHLET.

El equipo de extracción tipo Soxhlet se utiliza para realizar procesos de extracción sólido-líquido. Soxhlet es una técnica antigua desarrollada en 1879. La extracción sólido-líquido, es una operación de la ingeniería química que se usa en numerosos procesos industriales. Técnicamente, es una operación de transferencia de masa, donde un disolvente o mezcla de éstos, extraen selectivamente uno o varios solutos que se hallan dentro de una matriz sólida (Rodríguez, 2008).

Lo que hace el extractor Soxhlet es realizar un sin fin de extracciones de manera automática, con el mismo solvente que se evapora y condensa llegando siempre de manera pura al material. La extracción Soxhlet se fundamenta en las siguientes etapas: 1) colocación del solvente en un balón. 2) ebullición del solvente que se evapora hasta un condensador a reflujo. 3) el condensado cae sobre un recipiente que contiene un cartucho poroso con la muestra en su interior. 4) ascenso del nivel del solvente cubriendo el cartucho hasta un punto en que se produce el reflujo que vuelve el solvente con el material extraído al balón. 5) Se vuelve a producir este proceso la cantidad de veces necesaria para que la muestra quede agotada. Lo extraído se va concentrando en el balón del Solvente (Núñez, 2008).

En la industria de los procesos naturales, ya con fines analíticos a escala de producción, se utiliza con frecuencia el extractor sólido-líquido tipo Soxhlet. La misma cuenta con una cámara de extracción, un depósito para el disolvente y un sistema de condensación de vapores (Benel, 2009).

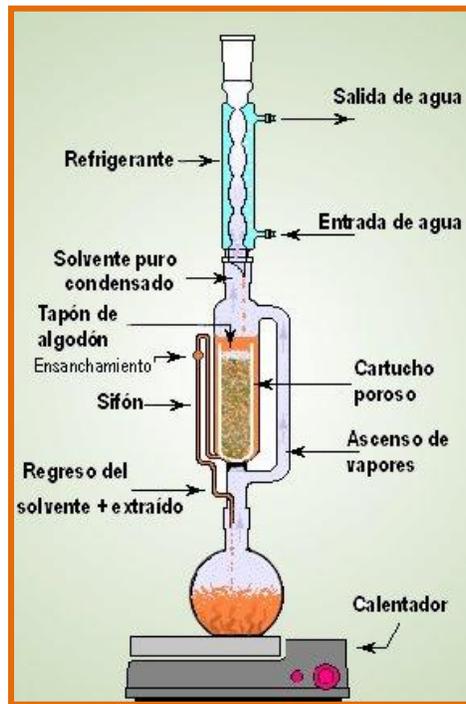


Figura 4.1 Equipo de extracción tipo Soxhlet (Núñez, 2008).

Algunos ejemplos de aplicación del uso de extractores son los siguientes (Benel, 2009):

- Extracción de oleorresinas como la pimienta, el jengibre, el apio, la cebolla, etc.
- Extracción de concretos y absolutos de plantas perfumíferas, como el concreto de jazmín, de acacia, el absoluto de musgos, de líquenes, etc.
- Extracción de aceite fijo de semillas oleaginosas, como el aceite de semillas de maní, de soja, de almendras, de lino, etc.

Ventajas y desventajas de extracción tipo Soxhlet (Benel, 2009):

- Gran capacidad de recuperación e instrumentación simple
- No se requiere filtración posterior.
- El disolvente orgánico se evapora quedando sólo analito.
- proceso extremadamente lento e imposible de acelerar.

4.1.2.4 FACTORES QUE INFLUYEN EN EL PROCESO DE EXTRACCIÓN.

Los factores que influyen en el proceso de extracción y que se refieren al disolvente son los siguientes (Centro de Documentación de Estudios y Oposiciones, 2009):

- Tiempo de extracción.
- Cantidad de disolvente.
- Temperatura del disolvente.
- Tipo de disolvente.

El tiempo de extracción tiene una importancia fundamental en la cantidad de aceite extraído, la mayor parte se extrae en las primeras etapas, no obstante cada semilla se comporta de manera diferente (Centro de Documentación de Estudios y Oposiciones, 2009).

4.1.3 EXTRACCIÓN CON FLUIDOS SUPERCRÍTICOS.

Es una técnica de separación de sustancias disueltas o incluidas dentro de una matriz, basada fundamentalmente en la capacidad que tienen determinados fluidos en estado supercrítico (FSC) de modificar su poder disolvente, el cual se encuentra entre el líquido y el gas, por lo que puede penetrar en los sólidos con mayor facilidad. Las ventajas de utilizar un fluido supercrítico en el proceso de extracción es que existe una alta velocidad de difusión, además de que es una reacción limpia para el medio ambiente ya que se caracteriza por la ausencia de solvente residual en el producto final (Camacho, Cárdenas y Mondragón, 2007).

El punto crítico corresponde a las condiciones de temperatura y presión, para un gas ó un vapor, por encima de las cuales la sustancia ya no puede ser “licuada” por incremento de presión. Adicionalmente las propiedades de la fase líquida y/o

vapor son las mismas, es decir no hay diferenciación visible ni medible entre gas y líquido (Sánchez Castellanos, 2006).

Se habla así de P_c , T_c , V_c , D_c . La sustancia mas empleada es el CO_2 , (por no ser toxico, explosivo, ni incendiario) que en estas condiciones presenta baja viscosidad, baja tensión superficial, alto coeficiente de difusión (10 veces más que un líquido normal), que conlleva a un alto contacto con la superficie del material y puede penetrar a pequeños poros y rendijas del mismo lo que asegura una buena eficiencia en la extracción en un corto tiempo. En la parte final del proceso hay una remoción total del solvente y se realiza a una temperatura baja, se disminuye la pérdida de sustancias volátiles y se evita la formación de sabores y olores extraños (Sánchez Castellanos, 2006).

La inversión inicial para estos procesos es alta, aún para equipos en pequeña escala, debido a la tecnología involucrada, a los costos de materiales y de construcción. Los equipos se construyen en acero inoxidable, deben soportar altas presiones en su operación y deben de ofrecer un manejo seguro. Por efecto mismo de la escala, para equipos más grandes, mayor debe de ser la capacidad de la bomba de compresión; mayor el espesor de las paredes, de las bridas en los mismos, de los cierres y tener sellamientos muy herméticos (Sánchez Castellanos, 2006).

4.1.4 EXTRACCIÓN POR ARRASTRE CON VAPOR.

Es llamada también: destilación por arrastre de vapor, extracción por arrastre, hidrodifusión o hidroextracción, steam distillation o hydrodistillation. Sin embargo, no existe un nombre claro y conciso para definirla, debido a que se desconoce exactamente lo que sucede en el interior del equipo principal y porque se usan diferentes condiciones del vapor de agua para la obtención. Es así que, cuando se usa vapor saturado o sobrecalentado fuera del equipo principal, es llamado

“destilación por arrastre de vapor”. Cuando se usa vapor saturado, pero la materia prima está en contacto íntimo con el agua que genera el vapor, se le llama “hidrodestilación” (Cerpa, 2007).

La hidrodestilación, se define como el proceso para obtener el aceite esencial de una planta aromática, mediante el uso del vapor saturado a presión atmosférica. Por efecto de la temperatura del vapor (100 °C) en un cierto tiempo, el tejido vegetal se rompe liberando el aceite (Sánchez Castellanos, 2006).

4.1.4.1 DESCRIPCIÓN DEL PROCESO/ EQUIPO EMPLEADO.

La materia prima vegetal es cargada en un hidrodestilador, de manera que forme un lecho fijo compactado. Su estado puede ser molido, cortado, entero o la combinación de éstos. El vapor de agua es inyectado mediante un distribuidor interno, próximo a su base y con la presión suficiente para vencer la resistencia hidráulica del lecho. La generación del vapor puede ser local (autoclave, hidrodestilación húmeda), remota (caldera, hidrodestilación seca) o interna (base del recipiente, hidrodestilación directa). Conforme el vapor entra en contacto con el lecho, la materia prima se calienta y va liberando el aceite esencial contenido y éste, a su vez, debido a su alta volatilidad se va evaporando. Al ser soluble en el vapor circundante, es arrastrado corriente arriba hacia el tope del hidrodestilador. La mezcla, vapor saturado y aceite esencial, fluye hacia un condensador mediante un “cuello de cisne” o prolongación curvada del conducto de salida del hidrodestilador. En el condensador, la mezcla es condensada y enfriada, hasta la temperatura ambiental. A la salida del condensador, se obtiene una emulsión líquida inestable. La cual, es separada en un decantador dinámico o florentino. Este equipo está lleno de agua fría al inicio de la operación y el aceite esencial se va acumulando, debido a su casi inmiscibilidad en el agua y a la diferencia de densidad y viscosidad con el agua. Posee un ramal lateral, por el cual, el agua es desplazada para favorecer la acumulación del aceite. El vapor condensado

acompañante del aceite esencial y que también se obtiene en el florentino, es llamado “agua floral”. Posee una pequeña concentración de los compuestos químicos solubles del aceite esencial, lo cual le otorga un ligero aroma, semejante al aceite obtenido (Cerpa, 2007).

4.2 PROCESOS DE PRODUCCIÓN DE COAGULANTES PARA LA PURIFICACION/ LIMPIEZA DE AGUAS.

Un coagulante es una sustancia química que, añadida al agua, produce la unión de las partículas en suspensión presentes en ella y su agrupamiento en coágulos. El proceso de coagulación consiste en el aglutinamiento de éstas partículas en pequeñas masas, con un peso específico superior al del agua, provocándole a ésta una remoción de la turbiedad orgánica y/o inorgánica, una remoción del color verdadero o aparente, la eliminación de bacterias, virus y organismos patógenos, destrucción de algas y eliminación de sustancias productoras de sabor y olor en algunos casos y de precipitados químicos suspendidos entre otros (Muñoz y Rodríguez, 2005)

Por tal razón, la importancia de los coagulantes para la realización de todo tipo de proceso industrial es enorme, ya que permiten la purificación de las aguas de procesos, haciéndolas reutilizables o adecuadas para su vertido al ambiente.

4.2.1 TIPOS DE COAGULANTES.

Los coagulantes pueden clasificarse en dos tipos: los naturales y los artificiales y su elección se realizará tomando en cuenta los siguientes factores (UNC, 2012):

- La naturaleza y calidad del agua bruta
- La variación de la calidad del agua bruta (diarias o estacionales, influencia de la temperatura, etc.)
- Criterios de calidad y destino del agua tratada

- Tratamiento previsto después de la coagulación
- Grado de pureza del reactivo

4.2.1.1 COAGULANTES ARTIFICIALES.

Los coagulantes artificiales son de origen inorgánico y consisten en macromoléculas de cadenas largas obtenidas de la asociación de monómeros sintéticos. Los principales coagulantes artificiales utilizados son las sales de aluminio o de hierro (Fe^{+3}). También se pueden emplear polímeros inorgánicos como los de hierro (III) y aluminio como coagulantes: el policloruro de aluminio se recomienda para el tratamiento de aguas blandas y turbias. De las sales, se pensó inicialmente que formaban un hidróxido insoluble y con ello un ácido que reducía el pH de la solución; luego se admitió que cuando se añaden al agua, intervienen casi instantáneamente en una serie de reacciones de tipo hidróxido multivalentes (UNC, 2012).

En la tabla 4.1 se muestran los coagulantes artificiales usados en la práctica, la presentación en la que se dosifican y la frecuencia de empleo de cada uno.

Tabla 4.1 Coagulantes más utilizados en la práctica (UNC, 2012).

REACTIVO	PRESENTACIÓN	EMPLEO
Sulfato de Aluminio	Sólida o Líquida	Muy Frecuente
Aluminato Sódico	Sólida o Líquida	Poco Frecuente
Polímeros de Aluminio	Líquida	Poco Frecuente
Cloruro de Aluminio	Líquida	Muy raras veces
Cloruro Férrico	Sólida o Líquida	Frecuente
Sulfato Férrico	Sólida	Ocasional
Sulfato Ferroso	Sólida	Ocasional

Continuación. Tabla 4.1 Coagulantes más utilizados en la práctica (UNC, 2012).

REACTIVO	PRESENTACIÓN	EMPLEO
Cloruro Férrico + Aluminato Sódico	Líquida	Poco Frecuente
Sulfato Cúprico	Sólida o Líquida	Muy raras veces

4.2.1.2 COAGULANTES NATURALES

Los coagulantes naturales son de origen orgánico, en su mayoría plantas. Son de diversos tipos e incluyen polvos de semillas, flores, cortezas, algunos tipos de arcillas, etc. Estos coagulantes son poco utilizados, debido a la generalización de los coagulantes artificiales y a la poca materia prima disponible para su elaboración. En la tabla 4.2 se muestran los coagulantes vegetales más estudiados y utilizados en la purificación de agua (UNC, 2012).

Tabla 4.2 Coagulantes Vegetales utilizados en la purificación de agua (Herberger, Holm, Pancho y Plucknett 1979; Jahn 1995; Cabrera Oberto, 2009).

Vegetales usados en tratamientos de agua	Descripción
<p>Exudado gomoso de <i>Cedrela odorata</i> como coagulante</p> 	<p>En la clarificación de las aguas, se utiliza el exudado gomoso derivado del árbol <i>Cedrela odorata</i>, como agente coagulante durante la potabilización de las aguas sintéticas. La dosis óptima se determina con prueba de jarras y con parámetros físico-químicos como: turbiedad, color, pH, y alcalinidad total. El exudado gomoso de <i>C. odorata</i> puede remover niveles de turbiedad entre un 68 y 95 por ciento para el rango de concentración de 10 a 100 NTU.</p>

Continuación. Tabla 4.2 Coagulantes Vegetales utilizados en la purificación de agua
(Herberger, Holm, Pancho y Plucknett, 1979; Jahn 1995; Cabrera Oberto, 2009).

Vegetales usados en tratamientos de agua	Descripción
<p>Semilla de <i>Moringa peregrina</i></p> 	<p>Raro árbol indígena del Sudán Oriental; hace mas de 70 años se le encontró en Nubia y Kordofan, donde se le cultiva ocasionalmente. Utilizado en el proceso de clarificación.</p>
<p>Semilla de <i>Vicia faba</i></p> 	<p>Es una planta trepadora herbácea, anual, de tallos semi-erectos que se enredan; cultivada en todo el globo por sus semillas, las cuales son empleadas en gastronomía. Logran una clarificación cuando la calidad del agua cruda es de 3000 a 40000 UTF.</p>
<p>Semilla de <i>Trigonella foemun graecum</i></p> 	<p>Es una especie de planta con flor, anual de entre 20 y 50 cm de altura con hojas compuestas de tres hojuelas oblongas. Esta planta florece en primavera (posee una flor blanca) y puede encontrarse entre las mieses (campos de trigo) de la península Ibérica y en Baleares. Puede encontrarse además en otros países del sur de Europa pero su origen se establece en el sudoeste asiático, lugar donde existen plantaciones en la actualidad. Logran una clarificación cuando la calidad del agua cruda es de 3000 a 40000 UTF.</p>
<p>Semilla de <i>Hypoestes verticillaris</i></p> 	<p>Una hierba polimórfica, con bucles hasta alrededor de 1 m de altura, crece en lugares abiertos de sabana arbolada, secundaria y la selva baja caducifolia, que se producen en toda la Región, y difundida en otras partes de África tropical, y se extiende hasta la planta Arabia. Coagulante vegetal se utiliza esta semilla antes de finalizada la fase de turbiedad alta en los rangos de 800-1200 UTF, bajo estas condiciones las semillas fueron capaces de eliminar la turbiedad hasta 20-30 UTF después de una hora y se puede inferir que el efecto clarificador es todavía mejor en grados mayores de turbiedad.</p>

Continuación. Tabla 4.2 Coagulantes Vegetales utilizados en la purificación de agua
(Herberger, Holm, Pancho y Plucknett, 1979; Jahn 1995; Cabrera Oberto, 2009).

Vegetales usados en tratamientos de agua	Descripción
<p>Semilla de <i>Hypoestes verticillaris</i></p> 	<p>Una hierba polimórfica, con bucles hasta alrededor de 1 m de altura, crece en lugares abiertos de sabana arbolada, secundaria y la selva baja caducifolia, que se producen en toda la Región, y difundida en otras partes de África tropical, y se extiende hasta la planta Arabia. Coagulante vegetal se utiliza esta semilla antes de finalizada la fase de turbiedad alta en los rangos de 800-1200 UTF, bajo estas condiciones las semillas fueron capaces de eliminar la turbiedad hasta 20-30 UTF después de una hora y se puede inferir que el efecto clarificador es todavía mejor en grados mayores de turbiedad.</p>
<p>Corteza <i>Boscia senegalensis</i></p> 	<p><i>Boscia</i> es un género de plantas con flores con 87 especies pertenecientes a la familia <i>Cleomaceae</i>. Son árboles de pequeño a medio tamaño que alcanzan los 5-7 metros de altura con una copa densa. Las hojas son lanceoladas y de corto pedicelo. Las flores pequeñas y muy olorosas agrupadas en densos racimos de color verde amarillento. Posee propiedades floculantes en la corteza de este árbol es utilizada para tratar agua extrayendo la corteza con sumo cuidado.</p>
<p>Tallos y frutas secas <i>Blepharis persica</i></p> 	<p><i>Blepharis persica</i> es una pequeña hierba, perenne gris-pubescentes o glabras casi se encuentra en el desierto de Thar y en África. El tallo es rígido y hojas son cuatro en cada nodo. Las flores son de color azul, en inflorescencias Las cápsulas son de dos cabezas de serie. <i>Blepharis</i> se identificó a partir de las semillas. Las semillas se consideran afrodisíaco, y también son resolventes y diuréticas. Los tallos y frutas secas utilizadas como coagulante pero no es tan afectivo como la <i>Moringa oleífera</i> ya que tarda 24 horas para producir el mismo grado de reducción de turbiedad lograda por la <i>Moringa oleífera</i> en una hora.</p>

4.2.2 PRODUCCIÓN DE COAGULANTES.

4.2.2.1 COAGULANTES CONVENCIONALES.

Los coagulantes más comunes que se usan en el tratamiento de aguas son compuestos inorgánicos de aluminio o hierro como el sulfato de aluminio, aluminato de sodio, sulfato ferroso, sulfato férrico y cloruro férrico. Cada coagulante tiene un rango específico de pH donde tiene la mínima solubilidad y ocurre la máxima precipitación dependiendo, también, de las características químicas del agua cruda. Con excepción del aluminato de sodio, estos coagulantes son sales ácidas que disminuyen el pH del agua. Por esta razón y dependiendo del agua a tratar, es necesario agregar un álcali como cal o soda cáustica (Cogollo, 2010).

En El Salvador se utilizaba convencionalmente como coagulante el Sulfato de Aluminio. Debido a los avances tecnológicos y el desarrollo de nuevos productos el uso de coagulantes convencionales se han ido cambiando por coagulantes alternativos.

4.2.2.2 PRODUCCIÓN DE COAGULANTES ALTERNATIVOS (PAC'S).

Los PAC's son producidos adicionando una base al cloruro de aluminio hasta lograr la fórmula empírica $Al(OH)_nCl_{3-n}$, donde n toma valores que van de 1 a 2.5. Los diferentes PAC's se tipifican por su contenido de aluminio (porcentaje de Al_2O_3), contenido de sulfatos (porcentaje de SO_4) y contenido de hidróxido (porcentaje de basicidad). La basicidad se refiere al número de iones hidróxido promedio por átomos de aluminio en las moléculas del PAC, y es un índice del grado de polimerización (Cogollo, 2010).

El policloruro de aluminio ha sido implementado en las plantas potabilizadoras de Administración Nacional de Acueductos y Alcantarillados (ANDA) a nivel nacional, por las múltiples ventajas que estos polímeros presentan sobre los coagulantes convencionales.

4.2.2.3 PRODUCCIÓN DE COAGULANTES NATURALES.

La prevalencia de los productos naturales sobre los artificiales está abarcando más campos industriales incluida la industria de la purificación del agua. Los coagulantes naturales más empleados son los provenientes de semillas, tal como se describirá más adelante. La preparación de las semillas para obtener polvo coagulante consta de la eliminación de recubrimientos de la semilla, aplicación de calor para eliminar la humedad y molienda de la semilla para llevarla a polvo fino. Éste polvo se utiliza para hacer una solución con propiedades coagulantes y en algunas ocasiones, se puede utilizar directamente el polvo. Para el caso de la *Moringa oleífera*, se elabora la solución coagulante a partir del polvo fino.

4.3 PROCESOS DE PRODUCCIÓN DE CARBÓN ACTIVADO.

La necesidad de conservar el medio ambiente en condiciones habitables para las generaciones futuras es una motivación actual para el desarrollo de tecnologías limpias. La optimización de los recursos naturales con fines tecnológicos y la disminución de los efectos nocivos sobre el ambiente, ocasionados por emisiones y desechos de todo tipo, ocupan gran parte de la agenda actual de investigación y desarrollo en la tecnología. Dentro de ésta agenda, toma parte el carbón activado, contribuyendo en las labores de disminución de emisiones al permitir la limpieza y separación de componentes en flujos líquidos y gases (Gómez, Klose y Rincón, 2010).

4.3.1 HISTORIA DE LA INDUSTRIALIZACIÓN DEL CARBÓN ACTIVADO.

Los primeros usos de materiales a base de carbón fueron en aplicaciones médicas ya que utilizaban carbón vegetal como adsorbente preparado a partir de madera carbonizada. Posteriormente, los griegos amplían su uso para filtrar el agua, con el fin de eliminar malos olores y sabores y prevenir enfermedades. Sin embargo, la primera aplicación documentada del uso de carbón activo se da en 1793 por el Dr. D. M. Kehl quien usa carbón vegetal para eliminar olores emanados por la gangrena, también lo usaba para filtrar el agua para beber. La primera aplicación industrial del carbón activado tuvo lugar en Inglaterra, en 1794, donde se usó como decolorante en la industria del azúcar, aún cuando la patente se publica hasta 1812. En 1872 aparecen las primeras máscaras con filtros de carbón activado usadas en la industria química para evitar la inhalación de vapores de mercurio (González, Gordon, Luna y Martín, 2007).

Von Raphael Ostrejko, quien se considera como el inventor del carbón activado, desarrolló varios métodos para producirlo tal y como se conoce hoy en día. En 1901 patentó dos de sus métodos. Durante la Primera Guerra Mundial el uso de agentes químicos trajo como consecuencia la necesidad de desarrollar filtros de carbón activado para máscaras de gas. Este fue el punto de partida para el desarrollo de la industria de carbón activado que se expandió hacia otros usos. En los años 60's varias plantas de purificación de aguas empezaron a usar carbón activado en forma de polvo o granular. Actualmente, el carbón activado tiene cientos de aplicaciones diferentes, tanto en sistemas en fase gas, como en fase líquida. El mayor consumo a nivel mundial es para aplicaciones en fase líquida siendo éste de hasta un 80% (González, Gordon, Luna y Martín, 2007).

4.3.2 DEFINICIÓN DE CARBÓN ACTIVADO.

El Carbón Activado es una forma amorfa del carbón con una estructura microcristalina de tipo grafitico. Esta es una definición muy amplia que incluye una gran diversidad de productos con una amplia gama de propiedades y aplicaciones. Bajo la denominación de carbón activado se agrupan una serie de productos que difieren en propiedades físicas, composición, etc. Sin embargo todos ellos presentan características comunes (Marcilla Gómis, 1982).

El interés por este tipo de material se basa en algunas de las siguientes propiedades: estabilidad térmica, resistencia al ataque ácido, carácter esencialmente hidrófobo¹⁶, bajo costo relativo y principalmente, por su estructura porosa. Es precisamente ésta última característica lo que hace del carbón activado un adsorbente muy versátil, ya que el tamaño y la distribución de sus poros en la estructura carbonosa pueden ser controlados para satisfacer las necesidades de tecnología actual y futura (González, Gordon, Luna y Martín, 2007).

Los carbones activados comerciales son preparados a partir de materiales precursores con un alto contenido en carbono, especialmente, materiales orgánicos como, madera, huesos, cáscaras de semillas de frutos, como también, carbón mineral, breas, turba y coque. La elección del precursor es fundamentalmente una función de su disponibilidad, precio y pureza, pero primordialmente de su porosidad y niveles altos de dureza que permitan que éstos sean utilizados en procesos de abrasión. Otros factores importantes son el proceso de fabricación y la posible aplicación del producto final, que igualmente deben ser tomados en cuenta (González, Gordon, Luna y Martín, 2007; Gómez, Klose y Rincón, 2010).

¹⁶Hidrófobo: Repelente al agua.

4.3.3 PROCESOS DE PRODUCCIÓN DE CARBÓN ACTIVADO.

Los carbones activados comerciales son fabricados a partir de materiales orgánicos que son ricos en carbono. Los procesos de fabricación pueden dividirse en dos tipos: activación física, también llamada actividad térmica, y activación química. La diferencia de estos procesos radica básicamente en la porosidad del material obtenido, si son preparados por activación física la porosidad es el resultado de la gasificación del material carbonizado a temperaturas elevadas, mientras que la porosidad que se obtiene mediante activación química es generada por reacciones de deshidratación química, las cuales tienen lugar a temperaturas más bajas (Rodríguez Reinoso, 1997).

4.3.3.1 ACTIVACIÓN FÍSICA.

Normalmente se lleva a cabo en dos etapas: la gasificación del precursor y la gasificación controlada del carbonizado. En la carbonización se eliminan elementos como el hidrógeno y el oxígeno del precursor para dar lugar a un esqueleto carbonoso con una estructura porosa rudimentaria. Durante la gasificación el carbonizado se expone a una atmósfera oxidante que elimina los productos volátiles y átomos de carbono, aumentando el volumen de poros y la superficie específica. La carbonización y la activación se realizan en distintos tipos de horno, principalmente hornos rotatorios construidos en acero y materiales refractarios para soportar las altas temperaturas de activación, que son cercanas a los 1000 °C. Otro tipo de horno utilizado es el horno vertical de múltiples etapas (Rodríguez Reinoso, 1997).

La activación de los gases se realiza principalmente a través del uso de dióxido de carbono y vapor de agua, siendo este el más utilizado a nivel industrial por sus mejores condiciones de reactividad con los carbonizados. El carbón obtenido mediante la activación física es llamado también carbón primario (Gómez, Klose y Rincón, 2010; González, Gordon, Luna y Martín, 2007).

4.3.3.2 ACTIVACIÓN QUÍMICA.

Una diferencia importante del proceso de activación química con respecto para la activación física, es que la activación química requiere el uso de un solo horno. El precursor, se impregna con un agente químico, que de preferencia es ácido fosfórico, y este material se calienta en un horno entre 500 y 700 °C. Los agentes químicos utilizados reducen la formación de material volátil y alquitranes, aumentando el rendimiento en carbono. El carbón resultante se lava profundamente para eliminar el ácido remanente y este tipo de carbón es llamado también carbón secundario. En los últimos años se han desarrollado nuevos métodos químicos de preparación de carbón activado de muy altas superficies específicas utilizando hidróxido potásico (Rodríguez Reinoso, 1997).

Un factor importante en este proceso es el Coeficiente de Impregnación o Relación de Activante, definido como el cociente entre el peso del agente activante y materia prima, en base seca. Entre los agentes químicos activantes se encuentran ácido sulfúrico, cloruro de cinc, ácido fosfórico, hidróxido potásico, carbonato potásico y mezclas más o menos complejas de cloruro de cinc y otros cloruros o distintos compuestos (Marcilla Gómis, 1982).



Figura 4.2 Diagrama del proceso de Activación Química para la producción de Carbón Activado.¹⁷

4.3.3.3 PROCESO DE REGENERACIÓN DEL CARBÓN ACTIVADO

Una vez que el carbón activado ha sido saturado con los componentes que debe adsorber en una aplicación industrial, puede ser regenerado mediante una serie de procesos, para así recuperar su estado original. Las ventajas de la regeneración son, principalmente, el que se reduce el coste del usuario y que se reduce considerablemente el problema de la eliminación o almacenamiento del material gastado. La regeneración se puede realizar “*in situ*” o en los sistemas de regeneración de los propios fabricantes (Rodríguez Reinoso, 1997).

El método más simple de regeneración es la desorción de las sustancias adsorbidas por tratamiento térmico o desgasificación. Lo que se suele hacer es pasar una corriente de vapor de agua sobrecalentado o de gas inerte a alta temperatura a través del lecho de carbón; este procedimiento es la base del proceso de recuperación de disolventes y del sistema PSA (Pressure swing adsorption) utilizado en la separación de mezclas de gases. En algunos casos la

¹⁷ Fuente de imagen: <http://www.oviedocorreo.es/personales/carbon/cactivo/impqcatex.htm>

regeneración se ha de llevar a cabo en condiciones de activación para descomponer y desorber las sustancias adsorbidas y es en la práctica una reactivación (Rodríguez Reinoso, 1997).

4.3.3.4 OTROS TRATAMIENTOS DEL CARBÓN ACTIVADO.

Hay que tener en cuenta que en algunas ocasiones es necesario producir variedades de carbón especiales, por lo que una vez fabricados es necesario proceder a realizar tratamientos posteriores. Así es bastante común que se deban eliminar impurezas inorgánicas (cenizas), por lo que se vuelve necesario lavar el carbón con ácidos como el clorhídrico y un lavado exhaustivo con agua desnaturalizada posteriormente. Otro tratamiento necesario es debido a la naturaleza química de la superficie del carbón activado, puesto que las propiedades adsorbentes del carbón vienen condicionadas por la naturaleza química de su superficie, por lo cual se realiza un tratamiento adicional para modificarla. Si la modificación implica grupos superficiales de oxígeno las dos opciones principales son: oxidación con aire, ácido nítrico o peróxido de hidrógeno y el tratamiento en helio o hidrógeno a alta temperatura. Otra posible modificación al carbón activado puede ser la halogenación con bromo o cloro, la sulfuración con sulfuro de hidrógeno y la nitración con amoníaco (Rodríguez Reinoso, 1997).

4.3.4 APLICACIONES DEL CARBÓN ACTIVADO.

Las aplicaciones del carbón activado en la industria química son variadas y se clasifican de acuerdo al tipo de corriente en la que se realizará la adsorción, de esta forma, se tienen aplicaciones de carbón activado para adsorción en fase líquida y adsorción en fase gas. Es importante mencionar que de todo el carbón activado que se produce, aproximadamente un 20% está destinado a aplicaciones en fase gas y esto se debe a que su costo suele ser más elevado. La diferencia del carbón activado utilizado para líquidos y el carbón activado usado para gases,

radica en la distribución del tamaño del poro. En la tabla 4.3 se presentan las diferentes aplicaciones que tiene el carbón activado en la industria, para procesos con corrientes en fase gas y corrientes en fase líquida (Marcilla Gómis, 1982; Rodríguez Reinoso, 1997).

Tabla 4.3 Principales aplicaciones del Carbón Activado para adsorción en fase gas y fase líquida (Marcillo Gómis, 1982; Rodríguez Reinoso, 1997).

ADSORCIÓN EN FASE GAS	
PROCESO	APLICACIÓN
Recuperación de Disolventes	Petróleo, Benceno y Tricloroetano en la industria del lavado en seco; Alcohol, Acetona y Ésteres en la industria del plástico
Acondicionamiento de Aire	Desodorización de aire, Respiradores, Filtros Industriales, Máscaras de Gas
Separación de Mezclas gaseosas	Recuperación de benceno, propano y butano del gas natural
ADSORCIÓN EN FASE LÍQUIDA	
PROCESO	APLICACIÓN
Tratamiento de Agua	Filtración y Desinfección para Potabilización de Agua y Aguas Residuales
Purificación de productos químicos	Glicoles, colorantes, ácido clorhídrico, ácido fosfórico, hidróxido potásico, etc.
Decoloración de edulcorantes	Azúcar y Siropes
Extracción de minerales	Extracción de oro como complejo cianurado
Procesos Alimenticios	Aceites, Café descafeinado, bebidas alcohólicas.

ESTUDIO EMPIRICO

Para la elaboración de un producto es necesario realizar evaluaciones del proceso de obtención del mismo a escala de laboratorio con el fin de estudiar los efectos de los factores influyentes en su desarrollo y poder predecir el comportamiento del proceso a escala industrial. En la evaluación de los efectos de los factores deben tomarse en cuenta todas aquellas variables que puedan representar una influencia dentro del proceso productivo con el fin de determinar cuáles son los factores cuyos efectos causan la variabilidad de las respuestas en cada uno de los procesos. Para el estudio de los efectos de los factores se utilizan diseños factoriales, estos permiten una caracterización de los sistemas que conlleva a la determinación de los factores influyentes. En el presente estudio se utilizaron diseños unifactoriales, factoriales 2^k y diseño bifactorial.

Asimismo, para finalizar la evaluación de los efectos de los factores y determinar cuáles son los más influyentes dentro del proceso es necesario llevar a cabo un control. Este control se realiza mediante la obtención de una variable respuesta que es la encargada de proporcionar, posterior a un análisis estadístico, la información necesaria para conocer la interacción de los efectos de los factores con el sistema y entre sí y si estos son influyentes dentro del proceso. Las variables respuestas controladas fueron: rendimiento de extracción de aceite, rendimiento de remoción de turbidez del agua utilizando coagulante natural y el rendimiento de producción de carbón activado a partir de vaina y cascarilla de Teberinto.

Todos los estudios y parámetros medidos anteriormente son recopilados para realizar un diseño de un proceso productivo de aceite de Teberinto para uso cosmético, planteando un aprovechamiento integral y sostenible al incluir la transformación de residuos en materias primas para su uso en otras industrias.

CAPITULO 5.

METODOLOGÍA EXPERIMENTAL PARA EL USO DE LA SEMILLA DE TEBERINTO (*Moringa oleífera*) EN LA EXTRACCIÓN DE ACEITE Y EN LA PURIFICACION DE AGUAS SUPERFICIALES.

En este capítulo se presenta un estudio experimental a escala de laboratorio con el objetivo de determinar el rendimiento de extracción de aceite de semilla de Teberinto (*Moringa oleífera*), la eficiencia como coagulante en el proceso de purificación de aguas del polvo de cotiledón de la semilla de Teberinto y de la torta residual desgrasada obtenida del proceso de extracción de aceite y finalmente la evaluación de la capacidad de adsorción del carbón activado producido a partir de las vainas y cascarillas de la semilla de Teberinto. De tal forma que puedan determinarse condiciones y parámetros que permitan un diseño de proceso a escala industrial. Planificando un diseño unifactorial para la extracción de aceite de semilla de Teberinto, donde el factor a evaluar es el tipo de solvente a utilizar y de acuerdo a ello diseñar un experimento 2^k para establecer los efectos significativos sobre los factores que afectan el proceso de extracción química sólido-líquido que se realiza mediante el método soxhlet. Posterior a ello se proyecta el diseño experimental bifactorial para estudiar el rendimiento del material de las semillas del Teberinto como coagulante en el proceso de tratamiento de aguas, el cual se lleva a cabo en un equipo de prueba de jarras donde los factores a evaluar son el tipo de coagulante utilizado para tratar el agua turbia y la variación en la cantidad de coagulante a agregar a cada una de las cinco jarras. Finalmente, se estudia la capacidad de adsorción del carbón activado obtenido a partir de las vainas y cascarillas de las semillas del Teberinto mediante la elaboración de isothermas de adsorción, las cuales cuantifican la adsorción en función de la concentración del azul de metileno en el equilibrio y se representa gráficamente. La activación del carbón obtenido se desarrolla por el método químico.

Con el propósito de conocer la calidad del aceite de semilla de Teberinto y las condiciones del agua turbia tratada con el coagulante natural obtenido, se realizan mediciones de calidad dentro de las cuales se destacan el índice de rancidez y ácidos grasos libres para el aceite y color y turbidez para el agua tratada. Los parámetros de calidad medidos en el aceite extraído son comparados con parámetros para el aceite de oliva y con datos de aceite de Teberinto extraídos en la India.

5.1 DESARROLLO EXPERIMENTAL PARA LA EXTRACCIÓN DE ACEITE DE SEMILLA DE TEBERINTO (*Moringa oleífera*).

En el desarrollo experimental para la extracción de aceite se presenta la caracterización de la semilla que será utilizada en el procedimiento experimental con el correspondiente método de extracción de aceite y de acuerdo a ello el montaje del equipo empleado a nivel de laboratorio. La planificación del diseño experimental se desarrolla en dos partes, la primera consiste en la elección del tipo de solvente en la extracción de aceite y la segunda en el estudio del efecto de los factores que influyen en el procedimiento de extracción de aceite.

5.1.1 PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL PARA ELECCION DEL TIPO DE SOLVENTE EN EXTRACCION DE ACEITE.

5.1.1.1 CARACTERIZACIÓN DE LA MATERIA PRIMA PARA LA EXTRACCION DE ACEITE DE TEBERINTO (*Moringa oleífera*).

La materia prima que será procesada en la etapa experimental son semillas del árbol de Teberinto que fueron obtenidas de una plantación ubicada en el cantón San Lucas, caserío el Trapichito, del municipio de Suchitoto en el departamento de Cuscatlán. Las propiedades más importantes de ésta se detallan en la tabla 5.1.

Tabla 5.1. Caracterización de la materia prima para la extracción de aceite de Teberinto.
(Alfaro, 2008).

CARACTERÍSTICAS	PROPIEDADES
Humedad en la semilla entera (%)	6.52-7.5
Peso Promedio de cada semilla	0.3 - 0.4 g
Tamaño promedio de la semilla	2.5 a 3 mm de largo
Gravedad especifica de la semilla	0.8984
Aceite de la semilla	30-42%

5.1.1.2 PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL PARA LA EXTRACCIÓN DE ACEITE DE SEMILLA DE TEBERINTO (*Moringa oleífera*).

El procedimiento experimental para la extracción de aceite se dividirá en tres partes: a) Tratamiento previo de la Semilla de Teberinto; b) Elección de solventes orgánicos a utilizar y c) Procedimiento experimental para la extracción de aceite.

a) Tratamiento previo de la semilla de Teberinto (*Moringa oleífera*).

- **Separación de cascarillas**

La semilla se descascara de manera manual, utilizando un rodillo, ejerciendo una leve presión para evitar dañar la semilla. Luego se procederá a separar manualmente la semilla descascarada (Henríquez y Paredes, 1985).

- **Reducción de tamaños de la semilla**

La semilla descascarada debe de ser picada y macerada, para permitir mayor área de contacto entre el sólido y el solvente orgánico y de esta forma alcanzar mayores rendimientos en la extracción. La reducción de tamaño de la semilla de *Moringa oleífera* se realizará con la ayuda de un cuchillo, una tabla para picar y un mortero (Sánchez, 2006).

b) Elección de solventes orgánicos a utilizar.

La elección del solvente en la extracción de aceites tiene que poseer características dentro de las cuales pueden mencionarse: alto poder disolvente para lípidos pero no para proteínas, aminoácidos ni carbohidratos, deben evaporarse rápido y no dejar residuo, tener un bajo punto de ebullición, deben penetrar a las partículas de la muestra inmediatamente, evitar el fraccionamiento, ser baratos y no higroscópicos (López, 2011).

Los solventes más empleados en la extracción de aceites son el etanol, metanol, isopropanol, hexano, ciclohexano, tolueno, xileno, éter etílico, éter isopropílico, acetato de etilo, acetona, cloroformo; no se usan clorados ni benceno por su peligrosidad a la salud. El solvente utilizado se determina por los compuestos lípidos que contiene la semilla de Teberinto. De acuerdo a estudios realizados con anterioridad, se utilizarán el hexano y el etanol como solventes para realizar las pruebas de extracción Soxhlet, debido a los resultados satisfactorios presentados. El disolvente seleccionado para la extracción del aceite es etanol y Hexano ambos al 95% (Arnal, García, Saurí y Verdú, 2010; Folkard y Sutherland, 1996; López, 2011).

c) Procedimiento Experimental para la Extracción de Aceite.

El método *Soxhlet* resulta ser el más eficiente de extracción de aceite para cualquier material oleaginoso y el que más ventajas ofrece en el procesamiento de semillas porque permite un mejor contacto semilla-solvente a través de la recirculación, además, por medio de éste método se logra extraer la máxima cantidad de aceite posible (Arnal, García, Saurí y Verdú, 2010; Henríquez y Paredes, 1985).

El procedimiento experimental para la extracción de aceite con el equipo *Soxhlet* está basado en el método sugerido por Arnal, García, Saurí y Verdú (2010) y se muestra a continuación:

1. Descascarar la semilla con un rodillo y disminuir el tamaño de partícula de la semilla con un cuchillo y macerar luego con la ayuda del mortero.
2. Transferir una cantidad de muestra finamente picada y macerada al cartucho o dedal.
3. Colocar el cartucho dentro de un extractor soxhlet de 150 ml de capacidad y colocar en la parte inferior un balón de fondo plano de 500 ml o un matraz erlenmeyer de 250 ml.
4. Añadir el solvente orgánico (etanol al 95% o hexano al 95%) por el extremo superior del extractor. Acoplar el extractor a un refrigerante Allhin.
5. Hacer circular agua por el refrigerante y calentar el balón de fondo plano o matraz erlenmeyer esmerilado sobre un hotplate a una temperatura determinada tratando de obtener una frecuencia de 2 gotas de solvente por segundo. Procurar que el matraz erlenmeyer o balón de fondo plano nunca queden secos.
6. Efectuar la extracción durante 4 a 6 horas.
7. Al finalizar la extracción se retira el dedal del extractor con una pinza y se coloca en una estufa a 80°C por 6 horas aproximadamente. La mezcla aceite-solvente se coloca en un balón de 1 L para realizar el proceso de destilación y separar el aceite del solvente.
8. El aceite obtenido se pesa en una balanza analítica para calcular el rendimiento de extracción de aceite.

5.1.1.3 MONTAJE EXPERIMENTAL.

La operación de la separación del aceite contenido en la semilla de Teberinto (*Moringa oleífera*) se hizo mediante el montaje de un equipo Soxhlet, como se muestra en la figura 5.1. Éste método consiste en hacer circular un solvente

orgánico a través de la muestra a la que se le extraerá el contenido oleico. El equipo Soxhlet consta de un condensador Allihn combinado con un extractor con sifón, a este sistema se le conecta en la parte inferior, un balón que contiene una mezcla del solvente orgánico y el aceite extraído de la *Moringa oleífera*, el cual debe estar en calentamiento para evaporar el solvente y mantener la recirculación.



Figura 5.1 Montaje Experimental del equipo Soxhlet para la extracción de aceite de la Semilla de *Moringa oleífera*.

El proceso de obtención de aceite de semilla de *Moringa oleífera*, consiste en calentar un solvente orgánico hasta su punto de ebullición, el vapor asciende por un brazo del extractor hasta llegar al condensador, en donde el vapor de solvente orgánico condensa y cae hacia el extractor, empapando la muestra y extrayendo el aceite a su paso. Cuando la cámara del extractor se llena, la mezcla de solvente y aceite cae hacia el balón a través del sifón. Por medio del calentamiento al que está sometido el balón, se evapora el solvente, repitiendo así el proceso nuevamente.

Para separar el aceite de semilla de Teberinto (*Moringa oleífera*) del solvente orgánico, se monta un proceso de destilación, el cual se muestra en la figura 5.2.

En este sistema, la mezcla obtenida en la extracción Soxhlet se calienta hasta lograr la evaporación del solvente orgánico y su posterior condensación, con el fin de recuperarlo, quedando en el balón la sustancia de interés, el aceite de semilla de Teberinto (*Moringa oleífera*) libre de solvente orgánico.

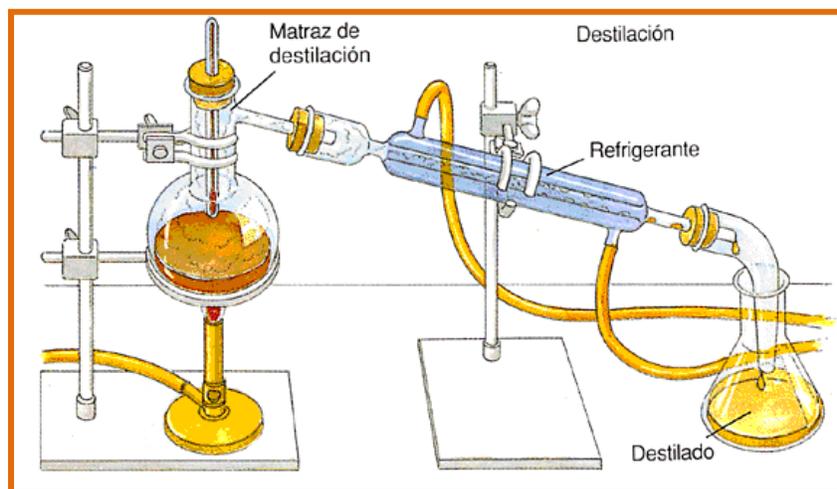


Figura 5.2 Esquema del Montaje de Destilación Simple.

5.1.1.4 PLANIFICACIÓN DE LOS EXPERIMENTOS. SELECCIÓN DE VARIABLES Y FACTORES.

La experimentación de laboratorio para determinar el solvente orgánico con mayor capacidad de extracción de aceite, se planificó como un diseño de experimentos unifactorial de efectos fijos. El factor a evaluar es el ***tipo de solvente a utilizar en la extracción***, para ello se manejan dos niveles (tipo de solvente): hexano y etanol, ambos al 95% de pureza. La variable respuesta a evaluar es el ***rendimiento en la extracción de aceite, calculado como la relación de gramos de aceite obtenido entre los gramos de semilla triturada***. Se realizaron cinco repeticiones por cada solvente. El resumen de resultados obtenidos experimentalmente se presenta en la tabla 5.2.

Tabla 5.2 Resultados obtenidos experimentalmente para el diseño unifactorial de efectos fijos en la extracción de aceite.

SOLVENTE	CANTIDAD DE SEMILLA (g)	CANTIDAD DE SOLVENTE (ml)	TEMPERATURA DE EXTRACCION (°C)	TIEMPO DE EXTRACCION (h)	ACEITE EXTRAIDO (g)	RENDIMIENTO (%)
Etanol	40.04	350	100	4	9.71	24.25
Etanol	40.07	350	100	4	9.59	23.94
Etanol	40.08	350	100	4	14.09	35.22
Etanol	40.07	350	100	4	12.10	30.25
Etanol	40.02	350	100	4	11.87	29.66
Hexano	40.05	350	100	4	15.77	39.38
Hexano	40.03	350	100	4	15.87	39.64
Hexano	40.08	350	100	4	16.23	40.49
Hexano	40.03	350	100	4	14.60	36.47
Hexano	40.05	350	100	4	16.14	40.30

La elección del solvente orgánico que permite obtener los mejores rendimientos en la extracción del aceite depende de los resultados obtenidos por el análisis estadístico del diseño unifactorial realizado. En la tabla 5.3 se presenta el análisis de varianza para un solo factor.

Tabla 5.3 Análisis de varianza de un factor.

Origen de las variaciones	Suma de cuadrados	Grados de Libertad	Promedio de los cuadrados	F	Probabilidad	Valor crítico para F
Entre grupos	280.47616	1	280.47616	22.7047	0.0014	5.3176
Dentro de los grupos	98.82544	8	12.35318			
Total	379.3016	9				

Los datos estadísticos de la tabla Anova que cobran interés son los valores de “F” y el de probabilidad, también llamado P-valor. Para el caso del valor de F de la prueba se tiene que:

$$F > F_{crítico} \rightarrow 22.7047 > 5.3176$$

Por lo que puede concluirse que los valores de las medias del rendimiento en la extracción de aceite para los dos grupos no son iguales. Asimismo, al comparar el valor de significancia (α), que es de 0.05 con el dato de probabilidad que se muestra en la tabla ANOVA (P_{valor}) 0.0014, se observa que este dato es menor a α , por lo que se comprueba estadísticamente que las medias de los grupos son diferentes. Debido a ello, la elección del solvente se realizará en función de la dispersión de los datos, observada cualitativamente mediante un diagrama de dispersión, y en función del promedio de rendimientos obtenidos experimentalmente. Concluyéndose, que el hexano es el solvente indicado para continuar las siguientes pruebas, ya que se observa una menor dispersión de los datos, tal como lo muestra el gráfico, y el promedio de rendimiento obtenido es de 39.26%, el cuál es mayor que para el etanol, que presenta un promedio de rendimiento de 28.66%.

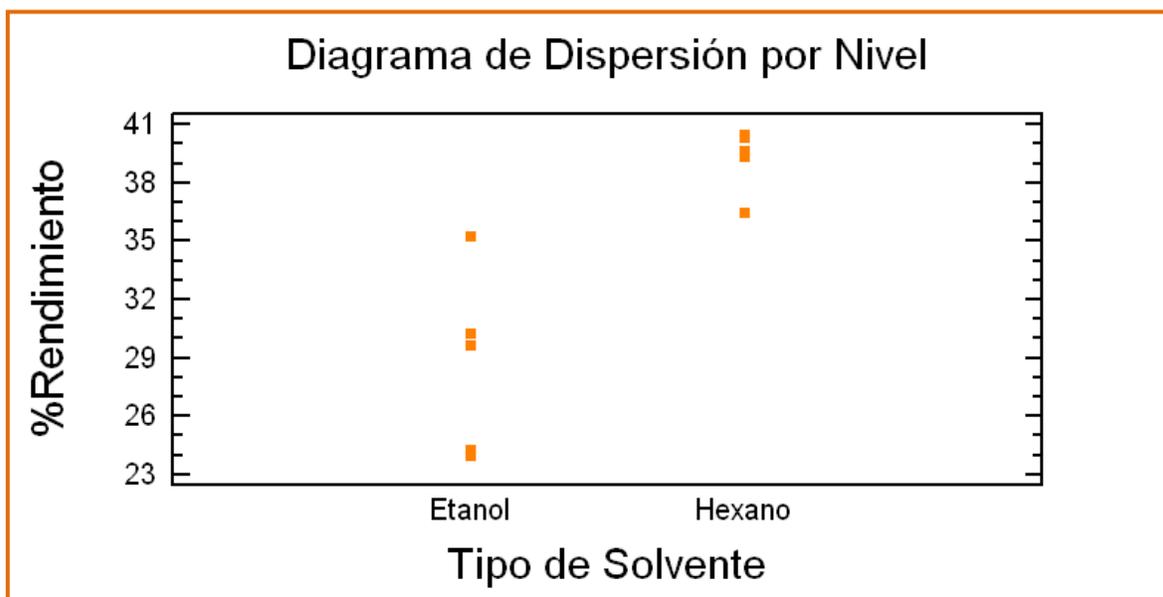


Figura 5.3 Diagrama de Dispersión por Nivel

5.1.2 ESTUDIO DEL EFECTO DE LOS FACTORES QUE INFLUYEN EN EL PROCEDIMIENTO DE EXTRACCION DE ACEITE.

Con los resultados de la sección 5.1.1 se procede a analizar los efectos de los factores sobre el rendimiento en la extracción de aceite ya que para el caso de la extracción de aceite de semilla de Teberinto los efectos causados por los factores involucrados, deben conducir hacia la obtención de un proceso de extracción de aceite con rendimientos favorables para una adecuada operación. Para poder detectar la presencia de efectos significativos en el proceso de extracción de forma eficaz se planifica la experimentación de laboratorio de acuerdo con las técnicas del diseño factorial 2^k .

5.1.2.1 PLANIFICACIÓN DE LOS EXPERIMENTOS. SELECCIÓN DE VARIABLES Y FACTORES.

Los factores que se van a evaluar en la extracción de aceite de semilla de Teberinto por medio del método soxhlet, son: cantidad de semilla, cantidad de solvente, temperatura y tiempo de extracción. El detalle de los factores para los niveles máximo (+) y mínimo (-) se presentan en la Tabla 5.4.

Tabla 5.4 Niveles de los Factores Experimentales Para Extracción de Aceite.

NIVEL	Cantidad De Semilla	Cantidad De Solvente	Temperatura	Tiempo De Extracción.
Mínimo (-)	40 g	175 mL	70 °C	4 h
Máximo (+)	60 g	350 mL	100 °C	6 h

Para poder determinar los factores que potencialmente puedan causar una variación en la obtención de aceite a partir de la semilla de Teberinto se desarrollan diferentes combinaciones de tratamientos para las pruebas a partir del diseño planteado las cuales se presentan en la tabla 5.5

Tabla 5.5 Combinaciones de los factores en estudio.

N°	Cantidad de Semilla (g)	Cantidad de Solvente (ml)	Temperatura (°C)	Tiempo de Extracción (h)
1	40.03	175	70	4
2	40.04	350	70	4
3	60.03	175	70	4
4	60.05	350	70	4
5	40.05	175	70	6
6	40.07	350	70	6
7	60.04	175	70	6
8	60.04	350	70	6
9	40.03	175	100	4
10	40.01	350	100	4
11	60.06	175	100	4
12	60.07	350	100	4
13	40.02	175	100	6
14	40.07	350	100	6
15	60.01	175	100	6
16	60.08	350	100	6

Las combinaciones anteriores se codifican o escriben a partir de los signos dependiendo del nivel ya sea máximo o mínimo como se presentan en la tabla 5.6.

Tabla 5.6 Codificación de variables y notación de Yates.

N°	Cantidad de Solvente	Cantidad de Semilla	Tiempo de Extracción	Temperatura	Notación de Yates
1	-	-	-	-	(1)
2	+	-	-	-	a
3	-	+	-	-	b
4	+	+	-	-	ab
5	-	-	+	-	c
6	+	-	+	-	ac
7	-	+	+	-	bc
8	+	+	+	-	abc
9	-	-	-	+	d

Continuación. Tabla 5.6 Codificación de variables y notación de Yates.

N°	Cantidad de Solvente	Cantidad de Semilla	Tiempo de Extracción	Temperatura	Notación de Yates
10	+	-	-	+	ad
11	-	+	-	+	bd
12	+	+	-	+	abd
13	-	-	+	+	cd
14	+	-	+	+	acd
15	-	+	+	+	bcd
16	+	+	+	+	abcd

La variable respuesta que se medirá es el rendimiento en la extracción del aceite de semilla de Teberinto, calculado como la relación de gramos de aceite obtenido entre los gramos de semilla triturada. Posterior a la extracción se pesa la masa de aceite obtenida y se calcula el rendimiento.

En la tabla 5.7 se detallan los resultados obtenidos en el rendimiento de extracción de aceite para las diferentes combinaciones de tratamiento.

Tabla 5.7 Resultados Experimentales.

N°	Cantidad de Semilla (g)	Cantidad de Solvente (ml)	Temperatura (°C)	Tiempo de Extracción (h)	Solvente recuperado (ml)	Masa de aceite obtenido (g)	Rendimiento de Aceite (%)
1	40.03	175	70	4	88	12.22	30.53
2	40.04	350	70	4	244	19.57	48.88
3	60.03	175	70	4	93	13.69	22.81
4	60.05	350	70	4	176	17.42	29.01
5	40.05	175	70	6	88	15.44	38.55
6	40.07	350	70	6	266	14.99	37.41
7	60.04	175	70	6	51	22.09	36.79
8	60.04	350	70	6	250	20.86	34.75
9	40.03	175	100	4	88	13.22	33.03
10	40.01	350	100	4	220	15.46	38.64
11	60.06	175	100	4	80	17.81	29.65

Continuación. Tabla 5.7 Resultados Experimentales.

N°	Cantidad de Semilla (g)	Cantidad de Solvente (ml)	Temperatura (°C)	Tiempo de Extracción (h)	Solvente recuperado (ml)	Masa de aceite obtenido (g)	Rendimiento de Aceite (%)
12	60.07	350	100	4	193	24.24	40.35
13	40.02	175	100	6	98	14.40	36.09
14	40.07	350	100	6	200	12.58	31.40
15	60.01	175	100	6	80	21.74	36.23
16	60.08	350	100	6	200	18.62	30.99

Las estimaciones de los efectos de los factores son mostradas en la tabla 5.8

Tabla 5.8 Estimación de efectos.

EFEECTO	ESTIMACIÓN
A: Cantidad de Semilla	-4.24375
B: Cantidad de Solvente	3.46875
C: Temperatura	-0.29375
D: Tiempo de Extracción	1.16375
AB	-1.06375
AC	3.75875
AD	3.07125
BC	-1.87375
BD	-6.74625
CD	-2.90375

A partir de la estimación de los efectos de cada factor o combinación de factores obtenidos en la tabla 5.8, se construyen las graficas de probabilidad normal para los efectos que se muestra en la figura 5.4, y el diagrama de Pareto de la figura 5.5, las cuales apoyan descriptivamente la discriminación entre efectos significativos y no significativos.

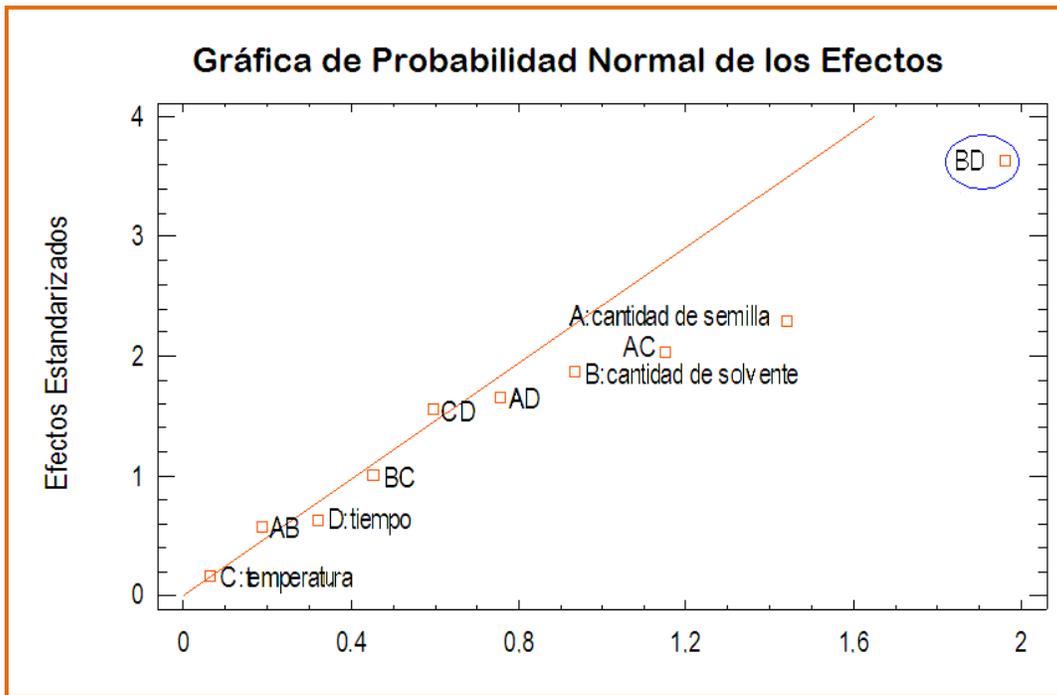


Figura 5.4 Grafico de Probabilidad Normal para Rendimiento.

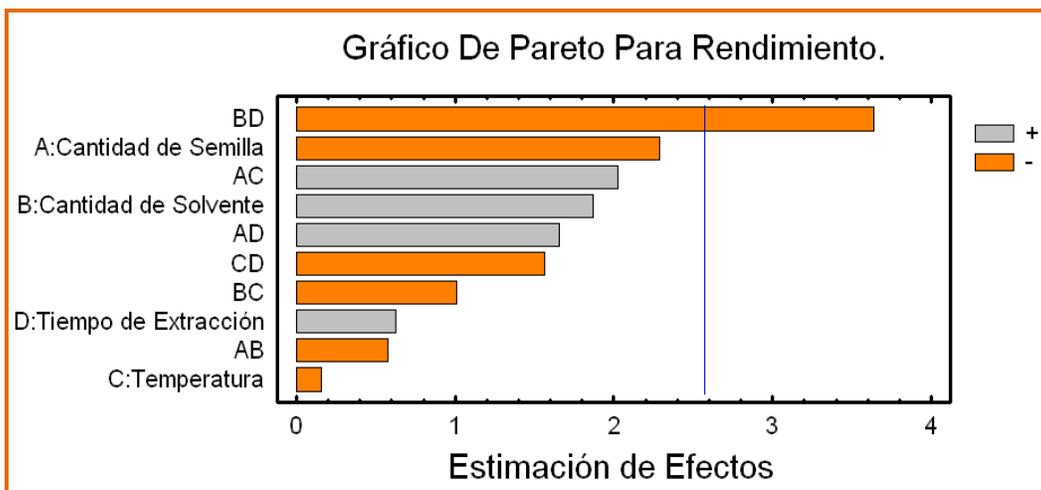


Figura 5.5 Grafico de Pareto para Rendimiento.

Como puede observarse cualitativamente de la tabla 5.8 y de los graficos 5.4 y 5.5 existe un unico efecto significativo al 5% de significancia, este es el efecto de

interacción entre los factores cantidad de solvente (B) y tiempo de extracción (D), interacción BD.

A partir del análisis de varianza para el rendimiento en la extracción de aceite presentado en la tabla 5.9, se puede corroborar cuantitativamente que el único factor significativo al 5% de significancia es el factor BD.

Tabla 5.9 Análisis de Varianza Para Rendimiento.

Fuente	Suma de Cuadrados	Cuadrado Medio	F-Ratio	P-Valor
A: Cantidad de Semilla	72,0377	72,0377	5,23	0,0710
B: Cantidad de Solvente	48,1289	48,1289	3,49	0,1206
C: Temperatura	0,345156	0,345156	0,03	0,8804
D: Tiempo de Extracción	5,41726	5,41726	0,39	0,5582
AB	4,52626	4,52626	0,33	0,5914
AC	56,5128	56,5128	4,10	0,0987
AD	37,7303	37,7303	2,74	0,1589
BC	14,0438	14,0438	1,02	0,3590
BD	182,048	182,048	13,21	0,0150
CD	33,7271	33,7271	2,45	0,1785
R-cuadrado= 86,8375 por ciento R-cuadrado (ajustado para g.l)= 60,5124 por ciento Error Estándar del estadístico=3,71198 Error absoluto de la media=1,75781 Estadístico Durbin-Watson=1,27957				

Dado que el análisis de resultados realizado en la etapa anterior indica que el factor significativo es la interacción entre la cantidad de solvente y el tiempo de extracción, es importante analizar el comportamiento de dicho efecto para lo cual se ha construido la grafica 5.6

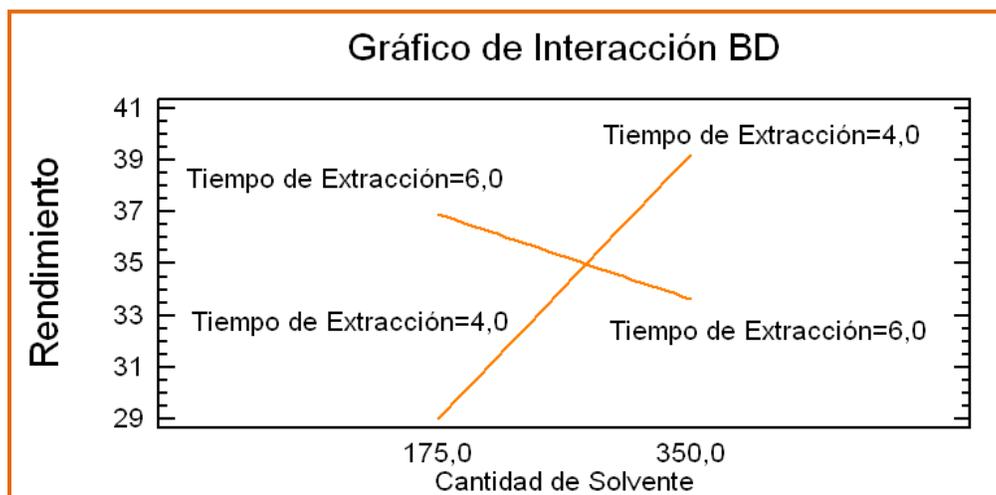


Figura 5.6 Grafico de Interacción Efecto BD

De la figura 5.6, se observa que el efecto de la cantidad de solvente es mayor a niveles bajos del tiempo de extracción (4 h) que a niveles altos del tiempo de extracción (6 h). Así como también puede observarse que a niveles bajos del tiempo de extracción el rendimiento en la extracción del aceite aumenta al aumentar la cantidad de solvente, por el contrario, a niveles altos del tiempo de extracción el rendimiento aumenta al disminuir la cantidad de solvente.

El rendimiento máximo en la extracción del aceite, obtenido en los experimentos realizados es del 48.88%, el cual se presenta a las condiciones de 350 ml de solvente, 70°C y 4 h de tiempo de extracción.

5.1.3 EVALUACIÓN DE PARÁMETROS DE CALIDAD PARA EL ACEITE OBTENIDO DE LA SEMILLA DE TEBERINTO (*Moringa oleífera*)

Existen varios parámetros de calidad que se pueden evaluar en un aceite, entre estos se encuentran: Índice de rancidez, Densidad, Ácidos Grasos Libres (AGL), entre otros. Para el caso del aceite de semilla de Teberinto (*Moringa oleífera*), los parámetros de calidad evaluados fueron la densidad, viscosidad, Índice de

Rancidez y Ácidos Grasos Libres. A continuación se describen brevemente aspectos relevantes para la determinación de cada uno de ellos:

- **Densidad**

Se realizó experimentalmente evaluando la relación masa-volumen. Se tomó un volumen de aceite de 10 ml y posteriormente se pesó la muestra. Se hizo el procedimiento por triplicado y se obtuvo el promedio de las mediciones. La temperatura a la que se determinó la densidad fue de 24 °C.

- **Viscosidad**

Este parámetro se evaluó utilizando un viscosímetro marca Thermo Haake Viscotester modelo VT01/02. La temperatura a la que se hizo la medición fue de 24 °C.

- **Índice de Rancidez**

Para la medición de este parámetro se realizaron pruebas de valor de peróxido. Esta prueba se hizo siguiendo el procedimiento de Egan, Kirk y Sawyer (2006). El procedimiento se realizó por triplicado cada semana en un período de tres semanas. En todos los casos, no se pudo detectar el valor de peróxido, debido a la fresquedad del aceite.

- **Ácidos Grasos Libres (AGL)**

El valor ácido de un aceite se define como el número de miligramos de hidróxido de sodio que se requieren para neutralizar la acidez libre de una muestra. El resultado se expresa como el porcentaje de Ácidos Grasos Libres (AGL). La acidez de la mayoría de aceites comienza a hacerse notable al paladar cuando los Ácidos Grasos Libres calculados como ácido oleico constituyen aproximadamente del 0.5 al 1.5%. El valor ácido del aceite de Teberinto se determinó de acuerdo al procedimiento planteado en la Norma ASTM D-5555 (Egan, Kirk y Sawyer, 2006).

Los resultados obtenidos en cada una de las pruebas realizadas, se muestran en la tabla 5.10, los cuales son comparados con valores de dichos parámetros reportados bibliográficamente para el aceite de Teberinto extraído en la India y para el aceite de oliva.

Tabla 5.10 Parámetros de calidad medidos para el aceite de Teberinto.

TIPO DE ACEITE PARAMETRO	Aceite de Teberinto Extraído	Aceite de Teberinto ¹⁸	Aceites de Oliva ¹⁹
Densidad	0.8894 g/ml	0.908 g/ml	0.910- 0.915 g/ml
Viscosidad	≈110 cP	92.6 cP	84 cP
Índice de Rancidez	No Detectable ²⁰	1.97 meq kg ⁻¹	≤ 15 meq kg ⁻¹
Ácidos Grasos Libres	0.19%	0.5%	≤1.0%

5.2 DESARROLLO EXPERIMENTAL PARA EVALUAR EL FUNCIONAMIENTO DEL POLVO DE COTILEDONES DE LA SEMILLA DE TEBERINTO (*Moringa oleífera*) COMO COAGULANTE.

El procedimiento experimental para caracterizar el funcionamiento de la semilla de Teberinto como coagulante alternativo requiere enfocar los siguientes aspectos: a) caracterización y acondicionamiento del material coagulante; b) caracterización de probetas controladas a las que se les aplicaran los tratamientos y c) diseño del

¹⁸ <http://moringaoleifera.wordpress.com/2010/10/24/aceite-de-moringa-oleifera-y-su-potencialidad-como-materia-prima-en-biocombustibles/>

¹⁹ Consejo Oleícola Internacional (2009), Normal Comercial Aplicable a los Aceites de Oliva y los Aceites de Orujo de Oliva.

²⁰ Para un período aproximado de 2 meses de almacenamiento después de su extracción

experimento para caracterizar el funcionamiento de la semilla de Teberinto como coagulante alternativo.

a) CARACTERIZACIÓN Y ACONDICIONAMIENTO DE LOS MATERIALES COAGULANTES A UTILIZAR EN LA EXPERIMENTACION.

Los materiales coagulantes a utilizar en el experimento son: polvo de cotiledones de la semilla de Teberinto virgen, torta residual pulverizada obtenida en el proceso de extracción del aceite de Teberinto y policloruro de aluminio.

La composición de la semilla de Teberinto virgen y del policloruro de aluminio se presenta en las secciones 2.3 y 4.2.2 de este documento respectivamente. La composición de la torta residual obtenida por el proceso de extracción de aceite se presenta En la tabla 5.11.

Tabla 5.11 Caracterización de la torta residual del proceso de extracción de aceite (Aguilar, Bueno, Campas, López, Rodríguez y Sánchez, 2009).

CARACTERÍSTICAS	COMPOSICIÓN (%)
Lípidos totales	1.03
Proteína	60.3
Humedad	7.7
Cenizas	6.05

Para utilizar los materiales de la semilla de Teberinto (semilla cruda y torta residual) como coagulantes es necesario preparar soluciones a 10,000 ppm de polvo de semilla de *Moringa oleífera* desgrasada o sin desgrasar (semilla cruda).

La solución de Semilla de *Moringa oleífera* (desgrasada o sin desgrasar) a 10,000 ppm se preparó de acuerdo a lo sugerido por Briceño, Caldera, García, Fuentes y Mendoza (2007). Este procedimiento se detalla a continuación:

1. Secar en estufa la semilla de Teberinto (desgrasada o sin desgrasar) por 6 horas a 80 °C.
2. Sacar la semilla de la estufa y colocar en un mortero, macerar la semilla y tamizar hasta obtener un polvo fino de color blanco amarillento.
3. Pesar 5 g del polvo fino de semilla de Teberinto en una balanza analítica y disolver en 500 ml de agua destilada.
4. Filtrar la solución para eliminar los sólidos no disueltos.
5. A partir de esta solución de 10,000 ppm, preparar la solución coagulante a 700 ppm.

b) CARACTERIZACIÓN DE PROBETAS CONTROLADAS A LAS QUE SE LE APLICARÁN LOS TRATAMIENTOS.

Las probetas controladas a las que se les aplicaran los tratamientos sugeridos por el diseño de experimentos planificado consisten en muestras de Agua Turbia Sintética cuya preparación se basa en el procedimiento sugerido por Briceño, Caldera, García, Fuentes y Mendoza (2007):

1. Pesar 100 g de tierra negra en una balanza semianalítica y disolver en 1 L de agua de la red pública.
2. Agregar 100 ml de solución de Caolín al 1%²¹ y homogenizar.

²¹ La solución de Caolín al 1% se prepara con la finalidad de aumentar la turbidez del agua turbia sintética. El procedimiento a seguir para la elaboración de la solución de Caolín al 1% fue el sugerido por García Fayos (2007): 1. Pesar 10 g de arcilla Caolín y disolver en 1 L de agua de la red pública; 2. Agitar la solución durante 30 minutos; 3. Guardar en un frasco y dejar reposar durante 24 horas para permitir la hidratación completa de las partículas de arcilla.

3. Dejar reposar la solución por 2 horas, para que los sólidos no disueltos sedimenten y decantar la solución.
4. Medir el valor de turbidez de la solución, debiendo ser un valor aproximado a 350 NTU.

c) PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL PARA EVALUAR EL FUNCIONAMIENTO DE LA SEMILLA DE *Moringa oleífera* COMO COAGULANTE.

El procedimiento experimental para evaluar el funcionamiento de la semilla de *Moringa oleífera* como coagulante en el proceso de purificación de aguas se planificó como un diseño de experimentos bifactorial en el que los factores a evaluar son el tipo de coagulante utilizado y la variación en la cantidad de coagulante a agregar. La variable respuesta fue el porcentaje de remoción de la turbidez en las muestras de agua turbia sintética.

c.1) MONTAJE EXPERIMENTAL PARA LA RECOLECCION DE DATOS.

El método a considerar para la evaluación del funcionamiento de la semilla de Teberinto como coagulante, es la Prueba de Jarras, en la que se simula a nivel de laboratorio el proceso de coagulación - floculación.

Para determinar las condiciones de operatividad en la simulación del proceso de coagulación-floculación se montó un equipo de prueba de jarras marca Phipps&Bird modelo PB-700, el cual permitió eliminar partículas en disolución que pueden producir turbidez, olor o cambio de color como se muestra en la figura 5.7.



Figura 5.7 Montaje Experimental del equipo de prueba de jarras.

Esta prueba consiste en un montaje de cinco vasos de precipitado con sus respectivos sistemas de agitación de paletas interconectadas para trabajar simultáneamente, en las cuales se tiene la misma velocidad de agitación que puede ser regulable durante un mismo tiempo para homogeneizar lo más posible el contenido de los vasos de precipitados en los que se varían las condiciones de operación. Los vasos de precipitados deben de ser de 2 L preferiblemente o de 1 L alternativamente, colocándose posteriormente igual cantidad de agua a tratar en cada vaso de precipitado y se coloca una dosificación de disolución de coagulante que aumenta gradualmente respecto a la jarra anterior. Mediante una agitación rápida se dispersa el coagulante en cada uno de los vasos de precipitado, y después de un minuto se reduce la agitación para promover la floculación y aumentar las probabilidades de colisiones entre partículas dando lugar así al crecimiento de los flóculos. Finalmente, se cesa la agitación para que la disolución permanezca en reposo y estos flóculos sedimenten y puedan pasar al proceso de filtración. Para el caso del experimento, el procedimiento para evaluar el funcionamiento del polvo de cotiledones de semillas de Teberinto desgrasado y sin desgrasar en el equipo de prueba de jarras que se realizó de acuerdo a la norma estandarizada ASTM D2035-80 es el siguiente:

1. Determinar los parámetros fisicoquímicos en las probetas de agua turbia sintética (Turbidez, pH y Color). Observar que esta se encuentre bien homogeneizada.

2. Agregar 1 L de la muestra de agua en cada uno de los vasos de precipitado de 2 L.
3. Agregar el coagulante de *Moringa oleífera* a 700 ppm en cada jarra, en las dosis siguientes: 30, 40, 50, 60 y 70 ml e iniciar inmediatamente el mezclado a 100 rpm por 1 minuto.
4. Flocular las muestras a una velocidad de 30 rpm durante 30 minutos exactos.
5. Al terminar el tiempo de floculación, sacar los agitadores de cada jarra y dejar sedimentar por 45 minutos.
6. Filtrar cada una de las muestras con papel Whatman N° 1, con la finalidad de simular el proceso de tratamiento de aguas y medir nuevamente los parámetros fisicoquímicos del numeral 1.

c.2) PLANIFICACIÓN DE LOS EXPERIMENTOS. SELECCIÓN DE VARIABLES Y FACTORES. RECOLECCION DE DATOS.

En la tabla 5.12 se detallan los niveles de los factores experimentales del diseño de experimentos bifactorial planificado, así como también la definición de la variable respuesta.

Tabla 5.12 Niveles de los Factores Experimentales y variables respuesta

Factores	Niveles	Variable Respuesta
Tipo de Coagulante a utilizar	Coagulante de Moringa oleífera desgrasada	Porcentaje de Remoción de turbidez $\frac{(Turbidez\ inicial) - (Turbidez\ final)}{(Turbidez\ inicial)} \times 100$
	Coagulante de Moringa oleífera sin desgrasar	
	Policloruro de Aluminio (PAC)	
Dosis de Coagulante utilizado	30 ml	
	40 ml	
	50 ml	
	60 ml	
	70 ml	

El resumen de resultados obtenidos experimentalmente por el diseño bifactorial se presenta en la tabla 5.13

Tabla 5.13 Resultados obtenidos experimentalmente para el diseño bifactorial.

COAGULANTE UTILIZADO	N°	DOSIS									
		30 ml	% Remoción. 30 ml	40 ml	% Remoción. 40 ml	50 ml	% Remoción. 50 ml	60 ml	% Remoción. 60 ml	70 ml	% Remoción. 70 ml
SEMILLA DE <i>Moringa oleífera</i> DESGRASADA	1	1.63	99.53	1.38	99.61	1.25	99.64	1.04	99.70	0.79	99.77
	2	1.68	99.52	1.43	99.59	1.33	99.62	1.11	99.68	0.71	99.78
	3	1.67	99.52	1.44	99.59	1.28	99.63	1.09	99.69	0.75	99.79
	4	1.71	99.51	1.42	99.59	1.21	99.65	1.05	99.70	0.67	99.81
	5	1.75	99.50	1.40	99.60	1.26	99.64	1.10	99.69	0.76	99.78
SEMILLA DE <i>Moringa oleífera</i> SIN DESGRASAR	6	2.32	99.34	1.97	99.44	1.46	99.58	1.16	99.67	1.08	99.69
	7	2.25	99.36	1.93	99.45	1.40	99.60	1.10	99.69	1.04	99.70
	8	2.23	99.36	1.99	99.43	1.48	99.58	1.20	99.66	1.05	99.70
	9	2.30	99.34	1.96	99.44	1.43	99.59	1.13	99.68	1.02	99.71
	10	2.25	99.36	1.90	99.46	1.50	99.57	1.17	99.67	1.04	99.70
POLICLORURO DE ALUMINIO (PAC)	11	1.04	99.70	0.85	99.76	0.43	99.88	0.35	99.90	0.33	99.90
	12	1.02	99.70	0.87	99.75	0.47	99.87	0.29	99.92	0.24	99.93
	13	0.99	99.72	0.79	99.77	0.46	99.87	0.32	99.91	0.21	99.94
	14	0.98	99.72	0.89	99.75	0.53	99.85	0.27	99.92	0.25	99.93
	15	1.06	99.70	0.87	99.75	0.51	99.85	0.29	99.92	0.23	99.93

En la tabla 5.14 se presenta el análisis de varianza del diseño bifactorial

Tabla 5.14 Análisis de varianza del diseño bifactorial.

EFFECTOS	SUMA DE CUAGRADOS	GRADOS DE LIBERTAD	PROMEDIO DE LOS CUADRADOS	F	P-VALOR
A: Dosis de solución de Coagulante	9.681	4	2.420	1711.610	0.000
B: Tratamiento con coagulante	12.738	2	6.369	4504.530	0.000
INTERACCION AB	0.667	8	0.083	58.970	0.000
TOTAL (CORREGIDO)	23.172	74			

Los P-valor obtenidos para el efecto de ambos factores y la interacción son de 0.000, por lo tanto puede concluirse que tanto el tipo de material coagulante como la dosis de coagulante afectan significativamente al porcentaje de remoción de la turbidez a un nivel de significancia del 5%.

En las figuras 5.8 y 5.9 se presentan la comparación de medias en función de la dosis (figura 5.8) y en función del tipo de material (figura 5.9). De la figura 5.8 puede observarse que los promedios del porcentaje de remoción de la turbidez aumentan en la medida que aumenta la cantidad de solución de coagulante a 700 ppm. Por otra parte, en la figura 5.9 se observa una diferencia para todos los promedios del porcentaje de remoción de la turbidez en función del tipo de material. El porcentaje de remoción de la turbidez promedio es de: 99.83% cuando se usa policloruro de aluminio, 99.64% cuando se usa la torta residual del proceso de extracción de aceite de la semilla de Teberinto y 99.55% cuando se usa semilla de Teberinto virgen.

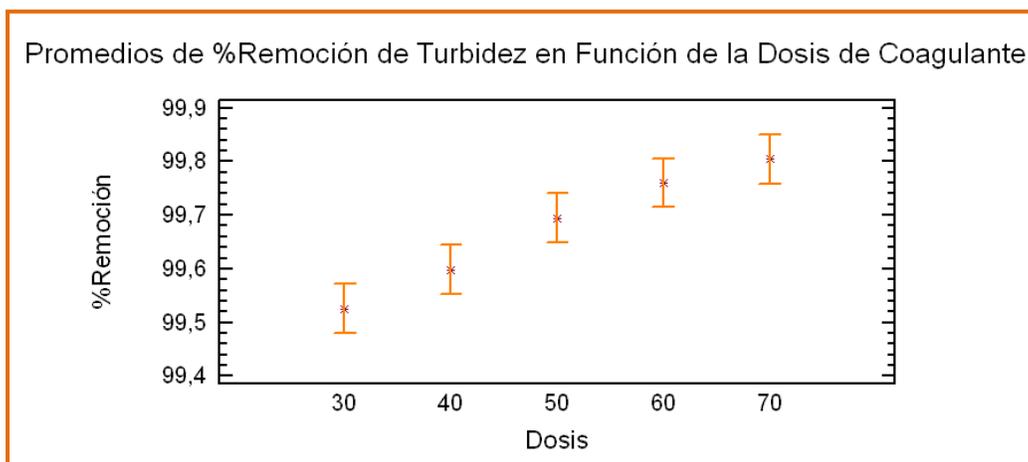


Figura 5.8 Comparación de promedios del porcentaje de remoción de la turbidez en función de la dosis de coagulante.

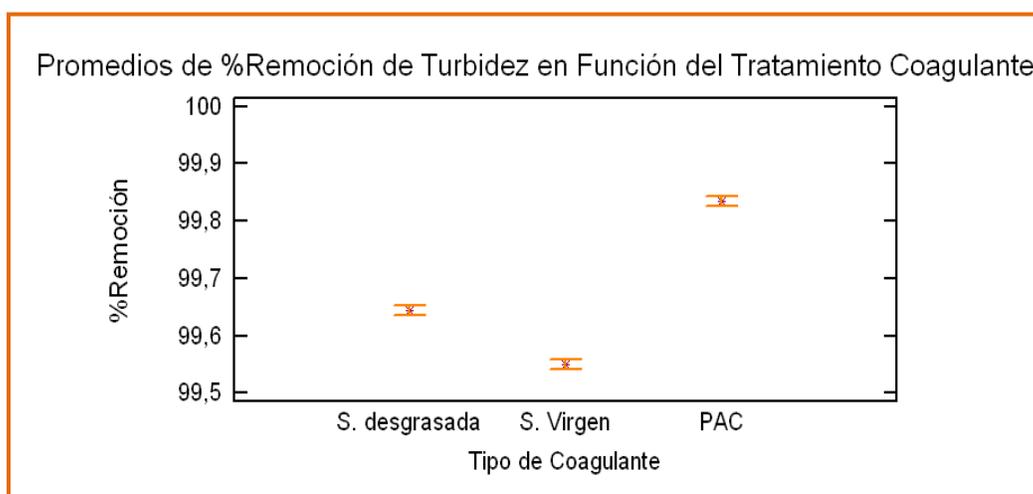


Figura 5.9 Comparación de promedios del porcentaje de remoción de la turbidez en función del tipo de material coagulante

Aunque sea muy probable que el efecto de la interacción resulte ser significativo por la alta significancia de los factores individuales, resulta interesante comprender el comportamiento del porcentaje de remoción de la turbidez en función de la variación integrada de los niveles de ambos factores. En la figura 5.10 se presenta

el comportamiento de la interacción entre los factores tipo de material coagulante y cantidad de dosis, en ella puede observarse que el porcentaje de remoción de la turbidez aumenta en función de la dosis para todos los tipos de material coagulante, siendo el aumento más significativo para el caso de la semilla de Teberinto virgen. Sin embargo, el porcentaje de remoción de la turbidez, en general, es mayor, más estable y comparable a la del PAC para el caso del uso del material de la torta residual obtenida del proceso de extracción del aceite de la semilla de Teberinto.

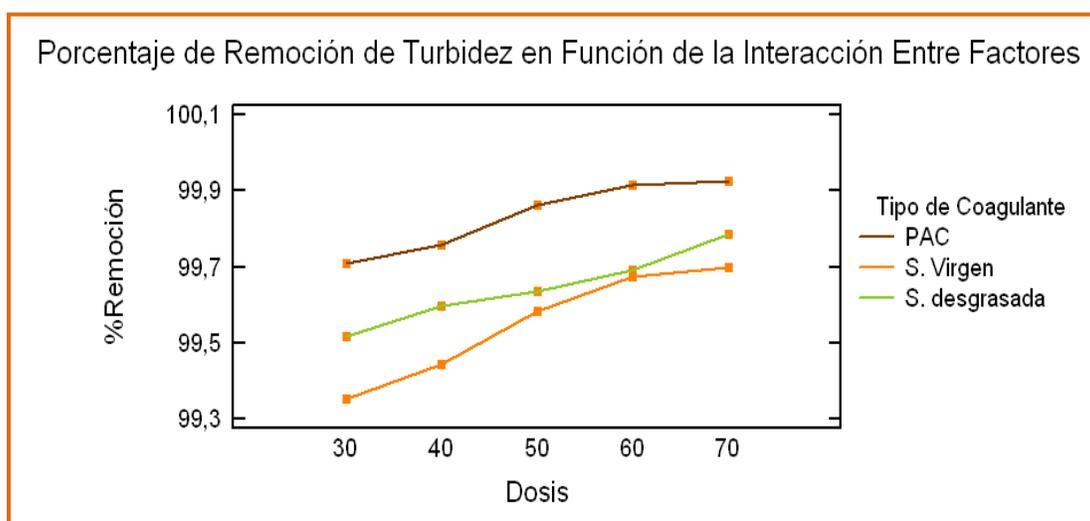
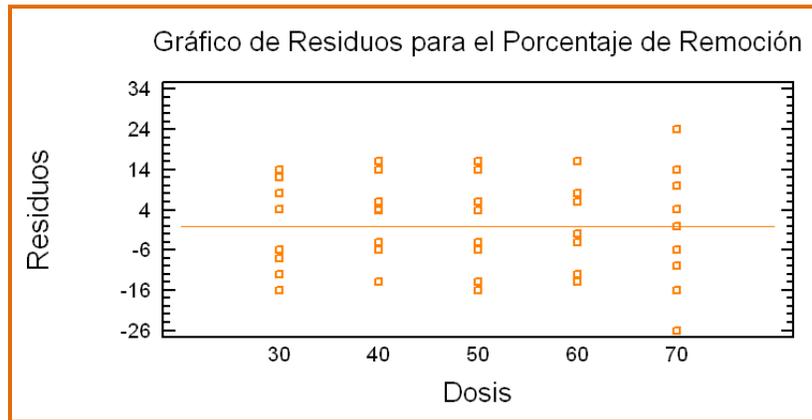
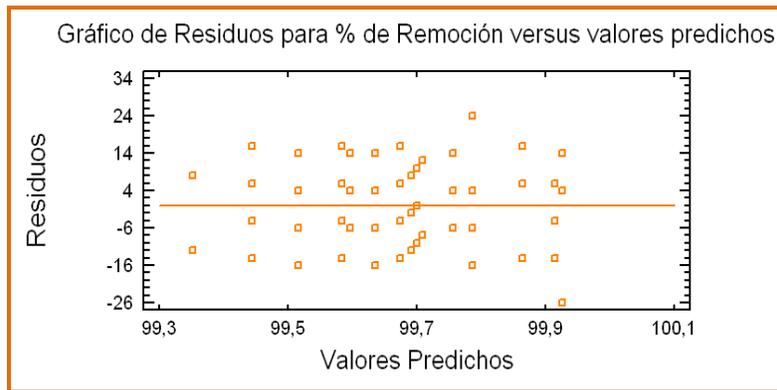


Figura 5.10 Comportamiento del porcentaje de remoción de la turbidez como función de la interacción entre los factores.

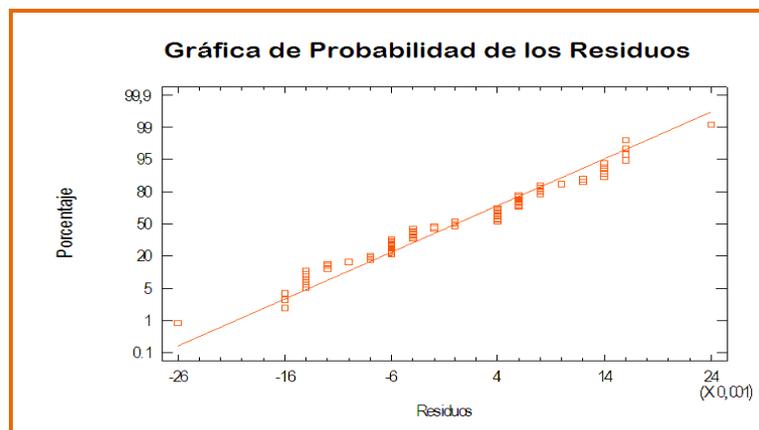
En la figura 5.11 puede observarse que existe un cumplimiento razonable de los supuestos en los que se basa el análisis estadístico del diseño bifactorial realizado, ya que existe una varianza constante (5.11a), independencia de los residuos (5.11b) y normalidad de los residuos (5.11c).



a)



b)



c)

Figura 5.11 Análisis de residuos para el diseño bifactorial

5.2.2 EVALUACION DE PARAMETROS DE CALIDAD PARA AGUA TRATADA UTILIZANDO COMO COAGULANTE TEBERINTO (*Moringa oleífera*).

Los parámetros de calidad de las aguas que serán utilizados para evaluar el funcionamiento del material de la torta residual obtenida del proceso de extracción del aceite de la semilla del Teberinto son los siguientes: turbidez, color, pH, bacterias coliformes, Escherichia Coli y conteo de bacterias heterótrofas y aerobias.

La evaluación de parámetros fisicoquímicos se ha efectuado en muestras de agua antes y después de ser tratada con el proceso de coagulación-floculación. La evaluación de parámetros microbiológicos se ha efectuado en muestras de agua tratada. Los valores de los parámetros de la calidad del agua se comparan con los valores establecidos en la Norma Salvadoreña Obligatoria para el Agua Potable, NSO 13.07.01:08. Los análisis de turbidez y pH se realizaron en la Planta Piloto de la Escuela de Ingeniería Química e Ingeniería de Alimentos de la Facultad de Ingeniería y Arquitectura de la Universidad de El Salvador, con equipo específico para cada una de las pruebas, que se describe en la tabla 5.15.

Tabla 5.15 Descripción de equipo utilizado para algunos análisis fisicoquímicos del agua.

DESCRIPCIÓN	EQUIPO
<p>a) pH Este parámetro se evaluó utilizando un pH-metro marca Thermo Scientific modelo ORION 3 STAR.</p>	 A digital pH meter with a white and blue body. The LCD screen displays '25.6' and '6.925'. The brand name 'ORION' is visible at the top of the device.

Continuación. Tabla 5.15 Descripción de equipo utilizado para algunos análisis fisicoquímicos del agua.

DESCRIPCIÓN	EQUIPO
<p>a) Turbidez Este parámetro se evaluó utilizando un turbidímetro marca La Motte modelo 2020 we.</p>	

Los análisis microbiológicos y el análisis del color del agua se realizaron en el Centro de Investigación y Desarrollo en Salud de la Universidad de El Salvador (CENSALUD) y en el laboratorio fisicoquímico de aguas de la Universidad de El Salvador respectivamente.

Los resultados obtenidos en cada una de las pruebas realizadas se muestran en el Anexo I y la comparación con los parámetros de la NSO 13.07.01:08 se muestran en las tablas 5.16 y 5.17.

Tabla 5.16 Propiedades Fisicoquímicas del agua.

DETERMINACION	VALOR ANTES DEL TRATAMIENTO	VALOR DESPUÉS DEL TRATAMIENTO	LÍMITE MÁXIMO PERMISIBLE NSO 13.07.01:08
Color	1,140 Pt-Co	3.4 Pt-Co	15 Pt-Co
pH	7.189	7.646	8.5
Turbidez final	350 NTU	0.67 NTU	1 NTU

Tabla 5.17 Características Microbiológicas del Agua.

DETERMINACION	VALOR DESPUÉS DEL TRATAMIENTO	LÍMITE MÁXIMO PERMISIBLE NSO 13.07.01:08
Bacterias Coliformes Totales	<1.1 NMP/ 100 mL	<1.1 NMP/ 100 mL
Bacterias Coliformes Fecales	<1.1 NMP/ 100 mL	<1.1 NMP/ 100 mL
Escherichia Coli	<1.1 NMP/ 100 mL	<1.1 NMP/ 100 mL
Conteo de bacterias heterótrofas aerobias y mesófilas.	<10 UFC/ mL	100 UFC/ mL
Organismos Patógenos	Ausencia de Pseudomona aeruginosa	Ausencia de organismos patógenos

5.3 DESARROLLO EXPERIMENTAL PARA PRODUCCION DE CARBON ACTIVADO A PARTIR DE VAINAS Y CASCARILLAS DE TEBERINTO.

El enfoque de desarrollo sostenible puede aplicarse a las materias primas, logrando su aprovechamiento integral en los procesos industriales. Este enfoque se encuentra muy difundido en la mayoría de las industrias, buscando con ello la creación de nuevos productos a partir de los residuos derivados de una línea principal de proceso. El proceso de producción de aceite a partir de la semilla de Teberinto (*Moringa oleífera*) genera residuos vegetales aprovechables industrialmente: la vaina y las cascarillas de las semillas, sus características se muestran en la sección 2.3. Estos residuos pueden ser utilizados como materia prima para la producción de carbón activado con la finalidad de que sean empleados en otros procesos industriales. Esta activación puede hacerse física o químicamente.

Para la elaboración de carbón activado a partir de vainas y cascarillas de Teberinto, se realizó una activación química, utilizando como agente activante ácido sulfúrico concentrado, que sometido a un proceso de carbonización posterior se transforma en un material de estructura porosa que permite la adsorción de sustancias disueltas en líquidos o gases. Para la evaluación de la capacidad de adsorción del carbón activado elaborado se realizan ensayos de adsorción con azul de metileno, los resultados obtenidos se presentan en la presente sección.

5.3.1 ACTIVACION DE CARBON OBTENIDO DE VAINA Y CASCARILLA DE TEBERINTO.

5.3.1.1 METODO DE ACTIVACION QUIMICA.

El procedimiento seguido para activar el carbón se llevo a cabo a partir de la marcha experimental propuesta por Othman (2008), que consiste en los siguientes pasos:

1. Las vainas y las cascarillas provenientes del proceso de limpieza antes de la extracción de aceite de Teberinto se preparan reduciéndolas de tamaño. Se pesan 12 g, posteriormente se colocan en la estufa a una temperatura de 110°C durante 30 minutos.
2. Se carboniza e impregna con 9 ml de ácido sulfúrico concentrado durante 4 horas a una temperatura de 25°C.
3. El carbón resultante se lava con agua destilada varias veces hasta que el agua de lavado sea neutro (pH = 7), para eliminar el ácido.
4. El carbón lavado se coloca en una estufa a 150°C durante una hora para eliminar la humedad y posteriormente se tamiza para reducir el tamaño de partícula.
5. El carbón se activa térmicamente en una mufla a una temperatura de 500°C durante una hora, se deja enfriar a una temperatura ambiente en un desecador para luego envasarlo.

En la figura 5.12 se muestra el carbón obtenido a partir de cascarilla de Teberinto finalizado el proceso.



Figura 5.12 Carbón activado obtenido a partir de cascarilla de Teberinto.

Se presenta en la tabla 5.18 el rendimiento de carbón activado obtenido de acuerdo a la cantidad de gramos de cascarilla y vainas utilizadas.

Tabla 5.18 Rendimiento de Carbón Activado.

Nº	Material Orgánico para obtención de carbón activado	Cantidad de material orgánico (g)	Carbón Activado obtenido (g)	Rendimiento de carbón Activado.
1	Cascarilla	12	3.15	26.25%
2	Cascarilla	12	3.20	26.67%
3	Cascarilla	12	3.5	29.17%
4	Cascarilla	12	3.35	27.92%
5	Vaina	12	1.15	9.58%
6	Vaina	12	1.20	10%
7	Vaina	12	1.24	10.33%
8	Vaina	12	1.13	9.42%

5.3.2 DETERMINACION DE LA CAPACIDAD DE ADSORCION DEL CARBON ACTIVADO OBTENIDO A PARTIR DE VAINAS Y CASCARILLAS DE SEMILLA DE TEBERINTO.

La determinación de la capacidad de adsorción de sustancias disueltas del carbón activado se realizó con soluciones a diferentes concentraciones de azul de metileno. Para las pruebas se prepararon soluciones de concentraciones de 10 ppm, 20 ppm, 30 ppm, 40 ppm, 50 ppm y 60 ppm, midiendo la absorbancia de todas las soluciones de Azul de Metileno, en un espectrofotómetro UV-VIS a una longitud de onda de 665 nm.

Las diferentes soluciones con un volumen de 25 ml se pusieron en contacto durante 30 minutos con 0.1 g de carbón activado (acondicionado previamente en una estufa a 150 °C por 4 horas y enfriado en un desecador por 1 hora) en matraces Erlenmeyer con agitación constante y a una temperatura ambiente. Posteriormente, el contenido de los matraces se filtró con ayuda de papel filtro. Las soluciones se leyeron en un espectrofotómetro marca Spectronic 21 a una longitud de onda de 665 nm; con los datos obtenidos se calcularon las concentraciones finales de las diferentes pruebas, a partir de las cuales se determinaron los gramos de azul de metileno adsorbido por gramo de carbón activado. El azul de metileno antes y después de estar en contacto con el carbón activado se muestra en la figura 5.13

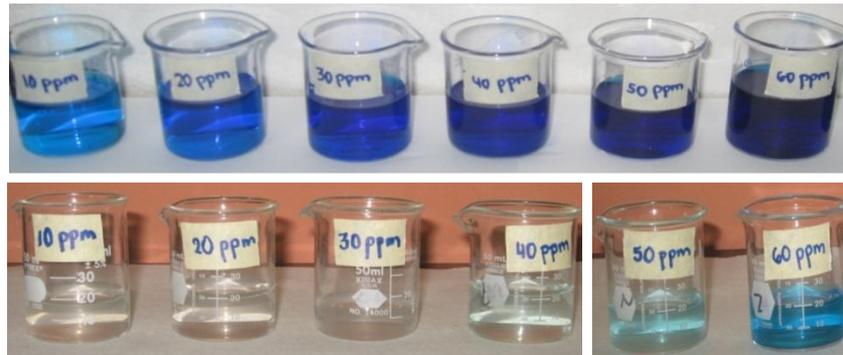


Figura 5.13 Azul de metileno antes y después del contacto directo con carbón activado.

Para determinar la relación de equilibrio entre la concentración del adsorbato en la fase líquida y la concentración en las partículas de adsorbente para el caso de la cascarilla a una temperatura determinada se obtuvieron los datos que se muestran en la tabla 5.20

Tabla 5.19 Adsorbancia de Azul De Metileno Tratado con Carbón Activado a Partir de Cascarilla.

SOLUCION	CONCENTRACION (ppm)	Adsorbancia Inicial	Adsorbancia Final	Adsorbente/g
1	0	0.161	0.167	0.1
2	10	1.867	0.209	0.1
3	20	3.049	0.191	0.1
4	30	3.679	0.218	0.1
5	40	3.708	0.207	0.1
6	50	3.728	0.302	0.1
7	60	3.743	1.068	0.1

Existen diferentes modelos matemáticos para describir las isothermas que se obtienen experimentalmente para este caso se utilizara el modelo de adsorción linealizado de Langmuir que puede representarse gráficamente como la cantidad de soluto adsorbido (g de adsorbato/g de adsorbente) frente a la concentración de adsorbato en ppm. Para determinar la cantidad en gramos de adsorbato se realizaron las siguientes operaciones:

$$\Delta \text{Adsorbancia} = \text{Adsorbancia Inicial} - \text{Adsorbancia Final}$$

$$\text{Concentración Adsorbida} = (\text{Concentración Inicial}) \left(\frac{\Delta \text{Adsorbancia}}{\text{Adsorbancia Inicial}} \right)$$

$$\text{Concentración No Adsorbida} = \text{Concentración inicial} - \text{Concentración Adsorbida}$$

$$\text{Masa de Solute Adsorbida (mg)} = (\text{Concentración Adsorbida})(\text{Volumen de Solución})$$

$$\text{Adsorbato (g)} = [\text{Masa de Solute Adsorbida (mg)}] \left[\frac{1g}{1,000 mg} \right]$$

$$y = \frac{\text{Adsorbato (g)}}{\text{Adsorbente (g)}}$$

Los datos determinados con las ecuaciones anteriores se muestran en la tabla 5.20 para cada una de las soluciones preparadas de azul de metileno utilizando 0.1 g de carbón activado.

Tabla 5.20 Datos Obtenidos para graficar Isoterma de Adsorción de Carbón Activado a partir de Cascarilla.

CONCENTRACION (ppm)	Adsorbancia Inicial	Adsorbancia Final	Adsorbente (g)	Δ Adsorbancia	Concentración Adsorbida.	Concentración no adsorbida	Masa de Solute Adsorbida (mg)	Adsorbato (g)	Y
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
10	1.867	0.209	0.1	1.658	8.8805	1.1195	0.2220	0.0002220	0.00222
20	3.049	0.191	0.1	2.858	18.7471	1.2529	0.4686	0.0004686	0.004686
30	3.679	0.218	0.1	3.461	28.2223	1.7777	0.7055	0.0007055	0.007055
40	3.708	0.207	0.1	3.501	37.7669	2.2331	0.9441	0.0009441	0.009441
50	3.728	0.302	0.1	3.426	45.9495	4.0505	1.1487	0.0011487	0.011487
60	3.743	1.068	0.1	2.675	42.8800	17.12	1.0720	0.0010720	0.01072

Con los datos anteriores es posible obtener la isoterma de adsorción de Langmuir, representada en la Figura 5.14.

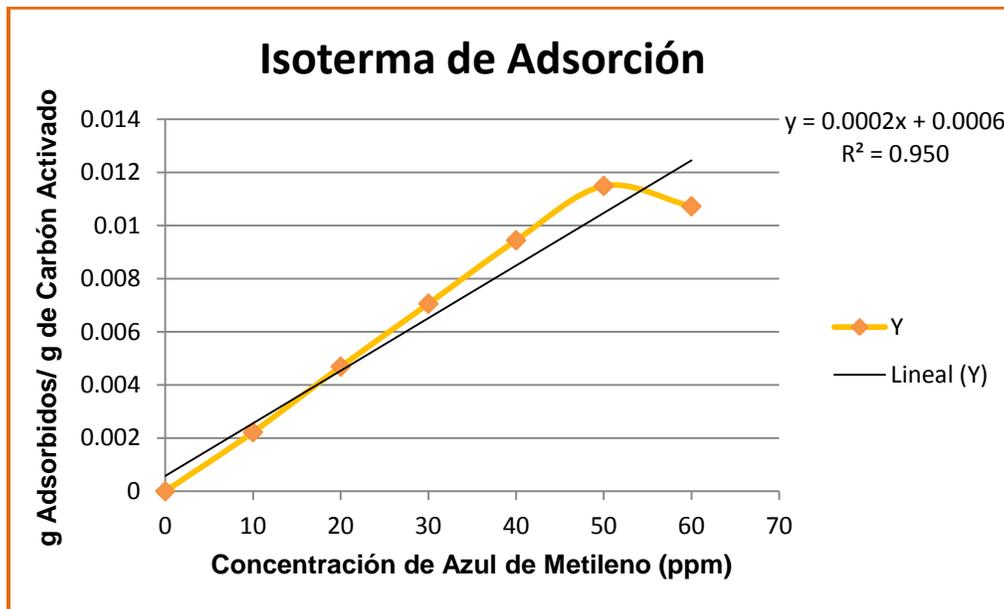


Figura 5.14 Isoterma de Adsorción Linealizada de Langmuir para Carbón Activado a Partir de Cascarilla.

La tendencia lineal y el coeficiente de correlación sugieren que el modelo de Langmuir describe de forma satisfactoria la adsorción de azul de metileno por el carbón activado de la cascarilla.

Del mismo modo que el análisis realizado para el carbón activado a partir de cascarilla se realiza el estudio para determinar si las vainas que protegen las semillas de *Moringa oleífera* tienen la capacidad adsorbtiva y los resultados obtenidos se presentan tabulados en la tabla 5.21 y graficados en la figura 5.15

Tabla 5.21 Datos Obtenidos para graficar Isoterma de Adsorción de Carbón Activado a partir de Vaina.

CONCENTRACION (ppm)	Adsorbancia Inicial	Adsorbancia Final	Adsorbente (g)	Δ Adsorbancia	Concentración Adsorbida.	Concentración no adsorbida	Masa de Solute Adsorbida (mg)	Adsorbato (g)	Y
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
10	1.867	0.189	0.1	1.678	8.9876	1.0124	0.2246	0.0002246	0.002246
20	3.049	0.202	0.1	2.847	18.6749	1.3251	0.4668	0.0004668	0.004668
30	3.679	0.173	0.1	3.506	28.5892	1.4108	0.7147	0.0007147	0.007147
40	3.708	0.186	0.1	3.522	37.9935	2.0065	0.9498	0.0009498	0.009498
50	3.728	0.221	0.1	3.507	47.0359	2.9641	1.1758	0.0011758	0.011758
60	3.743	0.191	0.1	3.552	56.9382	3.0618	1.4234	0.0014234	0.014234

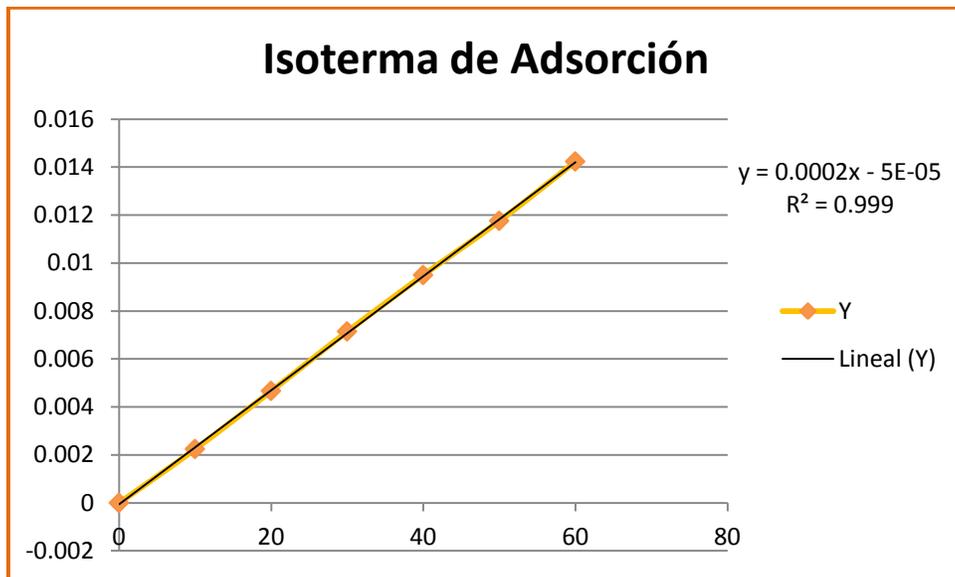


Figura 5.15 Isoterma de Adsorción Linealizada de Langmuir para Carbón Activado a Partir de Vaina.

La tendencia lineal y el coeficiente de correlación sugieren que el modelo de Langmuir describe de forma satisfactoria la adsorción de azul de metileno por el carbón activado de la vaina y esta adsorción es mayor para el carbón activado de la vaina de las semillas de Teberinto comparado con el carbón activado obtenido de la cascarilla.

CAPÍTULO 6.

PREDISEÑO PARA LA INSTALACIÓN DE UNA PLANTA DE EXTRACCIÓN DE ACEITE DE SEMILLA DE TEBERINTO (*Moringa oleífera*) BAJO EL ENFOQUE DE INGENIERÍA SOSTENIBLE

La industria química a nivel mundial se diversifica cada vez más con el fin de elaborar o sintetizar materias primas para su uso industrial posterior. Los ingredientes naturales utilizados en la elaboración de productos de uso diario en la actualidad representan cada vez un alza considerable. La industria cosmética no es la excepción a esta tendencia, ya que ha pasado del empleo de materias primas sintéticas al uso de productos 100% naturales.

Esta creciente demanda de ingredientes naturales es aproximadamente del 20% anual y con ganancias superiores a los 86.5 mil millones de dólares para la elaboración de productos cosméticos. Por este motivo los países productores de materias primas para dicha industria desarrollan procesos que permiten obtener estos insumos con el más alto grado de pureza posible, garantizando su colocación en el mercado y desarrollando a la vez la industria cosmética (UNC, 2010).

El crecimiento y desarrollo de la industria cosmética permite a los países en desarrollo el acceso a mercados que en otras circunstancias sería complicado, permitiendo a su vez el uso de tecnologías modernas y la ampliación de la industria y el crecimiento económico, basándose en la sustentabilidad de los productos desarrollados y reduciendo el uso de materia prima sintética, al mismo tiempo que se plantea el aprovechamiento de los residuos, reduciendo así la cantidad de desechos contaminantes y aumentando los beneficios en los aspectos económicos, sociales y ecológicos.

El aceite de semilla de *Moringa oleífera* puede tener varios usos a nivel industrial, entre estos se cuentan su potencialidad como biocombustible, aceite comestible de alta calidad y el uso cosmético, siendo este último el uso al que se busca orientar el aceite de Teberinto obtenido mediante recirculación de solventes en El Salvador, debido al amplio uso de los aceites vegetales en la industria cosmética, además de que posee un elevado valor económico. Por lo tanto, el enfoque de la planta de producción será la obtención de aceite como producto principal, y se diseñará para que su funcionamiento sea en base a los requerimientos necesarios para la obtención de aceite de semilla de Teberinto crudo con alto grado de pureza con la finalidad de ser utilizado como materia prima dentro de la industria cosmética.

6.1 ANÁLISIS DE MERCADO.

El uso de los aceites vegetales en productos cosméticos y productos de cuidado personal se ha expandido considerablemente a nivel mundial, gracias al impulso de la gran demanda que tienen los ingredientes naturales y por el creciente entendimiento de sus propiedades funcionales. El interés por encontrar nuevos ingredientes exóticos para dichos productos conlleva a buscar el desarrollo de nuevos aceites y grasas vegetales exóticas. (Hogervorst y Knipples, 2010)

El aceite de semilla de Teberinto (*Moringa oleífera*) está contemplado dentro de los aceites vegetales considerados exóticos²², por su alto contenido de vitaminas y su alta calidad, así como por extraerse de un árbol que crece únicamente en climas tropicales. Es por ello, que alcanza un enorme grado de apreciación y un costo elevado en el mercado internacional.

²² Catalogado como exótico según Hogervorst y Knipples en la revista OSEC, Bussiness Network Switzerland, Edición Septiembre 2010.

La Unión Europea es el mercado más grande de productos cosméticos en el mundo, ascendiendo a 87.4 mil millones de dólares en 2008. Este mercado todavía se encuentra en expansión, con un crecimiento promedio del 1,9% anual, entre 2006 y 2008. El mercado de los productos cosméticos está influenciado especialmente por el ritmo de vida más acelerado, el aumento del bienestar económico y el envejecimiento de la población. Se espera un crecimiento adicional garantizado en las ventas de productos cosméticos. En 2008, los cinco mayores mercados de la Unión Europea fueron: Alemania, Francia, el Reino Unido, Italia y España, representando el 72% del mercado total, y determinando las tendencias Europeas en su totalidad. (Hogervorst y Knipples, 2010)

Los aceites vegetales se importan cada vez más a la Unión Europea, con un crecimiento promedio en volumen del 5% anual entre 2005 y 2009. La mayoría de las importaciones provienen de los países en desarrollo, cuyas importaciones han venido creciendo rápido, y que representó cerca de 6,8 millones de toneladas en 2009. (Hogervorst y Knipples, 2010)

Por ser uno de los mercados líderes en el mundo, Europa tiene un papel importante en el comercio y distribución de productos cosméticos y sus ingredientes. La industria europea de procesamiento compra ingredientes crudos para transformarlos, antes de venderlos a los fabricantes de productos terminados. Como los productores de los países en desarrollo cada vez están en mejor capacidad de producir ingredientes únicos y de alta calidad que cumplen con la legislación correspondiente, la producción se está desplazando a estos países. En la figura 6.1 se muestran los canales de comercialización que existen en la actualidad para incursionar en el mercado de los insumos necesarios para la producción de cosméticos a base de ingredientes naturales en Europa. Estos productos pueden entrar al continente Europeo, crudo o refinado, esto depende del acceso tecnológico en el país de procedencia, siempre y cuando cumplan con

los requisitos establecidos por las normas de importaciones de productos de Europa.

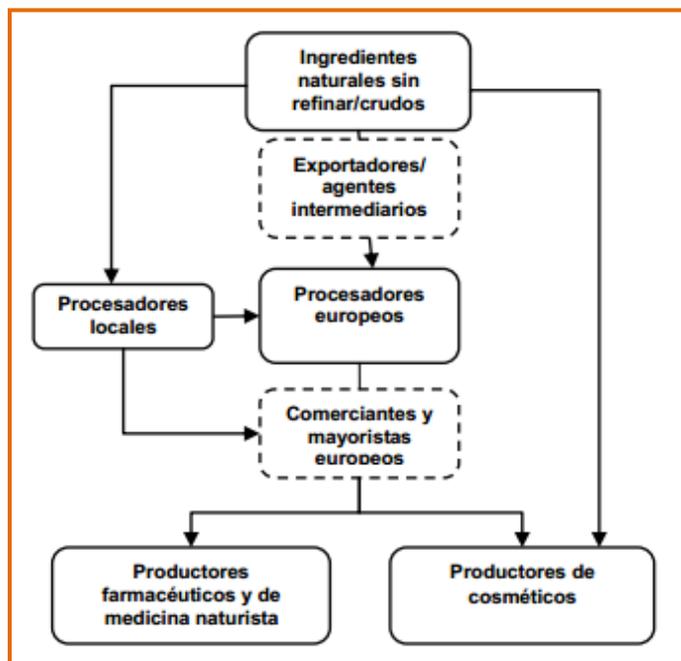


Figura 6.1 Canales de comercialización para ingredientes naturales en Europa (Hogervorst y Knipples, 2010).

6.1.1 CAPACIDAD DE PRODUCCIÓN.

El volumen de producción de aceite de semilla de Teberinto se fijará tomando en cuenta los siguientes factores: la cantidad de terreno sembrado, la cantidad de árboles sembrados en un área disponible, los valores promedios de vaina por árbol y semillas por vaina y, finalmente, el peso promedio de la semilla, datos contemplados en el capítulo dos. Se comparará este dato con los datos de producción de aceite de Tempate (*Jatropha Curcas*) en El Salvador, tomándolo como una base debido a su baja producción anual reportada, ya que son cultivos de nuevo auge. Se realizaron los cálculos respectivos con los datos recopilados para el Teberinto y así encontrar los rendimientos teóricos de aceite de *Moringa oleífera*, los cuáles se presentan a continuación en la tabla 6.1.

Tabla 6.1 Rendimiento de la semilla de Tempate²³ (*Jatropha Curcas*) comparada con la Semilla de Teberinto (*Moringa oleífera*) en El Salvador (Leiva Bautista, 2011).

	TEMPATE	TEBERINTO
Densidad Forestal	1,666 arbustos/Ha	7,150 árboles/Ha
Productividad por Planta	3.6 kg semilla/arbusto	2.24 kg semilla/árbol
Recolección de Semilla	5,998 kg semilla/Ha	16,016 kg semilla/Ha
Producción de aceite en peso	2,099.16 kg aceite/Ha-año	6,293.76 kg aceite/Ha-año

Comparando el rendimiento en la producción de aceite de Tempate en El Salvador, con el rendimiento esperado en la producción de aceite de Teberinto, se observa que para el Teberinto, la cantidad de aceite extraído difiere en un poco más del doble con el aceite extraído del Tempate. Sin embargo este volumen de producción de aceite de *Moringa oleífera* planteado se considera una producción viable, tomando en cuenta que el mercado al que está designado es el Europeo, su alta demanda en la industria cosmética, y que su producción se hará en un tiempo aproximado de 6 meses, para lograr un aprovechamiento máximo de la semilla sin que se alteren sus propiedades por el tiempo de almacenamiento.

La consideración en el tamaño de la planta de obtención de aceite de semilla de Teberinto, es para suplir una producción de 6,300 kg/año (7.083 m³/año) de aceite de semilla de Teberinto, con un rendimiento de producción aproximado de 33%. El abastecimiento que se espera es el proveniente de una hectárea de terreno sembrado de árboles de *Moringa oleífera*. La alimentación teórica diaria a la planta de aceite se maneja para un aproximado de 48 kg de semilla de Teberinto por día, tomando 22 días laborales al mes. El precio actual en el mercado para un litro de aceite de Teberinto es de \$300.00, por lo que se espera obtener un ingreso anual

²³ Datos reportados para el año 2007

de la producción de aceite de Teberinto de \$2,125,028.11 para una producción proyectada de 6,300 kg/año de aceite de Teberinto.

6.2 DISEÑO DE PLANTA DE PRODUCCIÓN DE ACEITE UTILIZANDO COMO MATERIA PRIMA SEMILLA DE TEBERINTO (*Moringa oleífera*).

Para modernizar la productividad y tener parte en los mercados del futuro, la planta de producción de aceite de Teberinto debe minimizar los residuos y emisiones al medio ambiente. Ofreciendo un producto con alta calidad, con condiciones sanitarias correctas, que son ecológicamente aceptadas y que han sido fabricadas en condiciones apropiadas desde el punto de vista medioambiental. Con la fabricación de aceite exótico y el aprovechamiento de residuos, la planta genera materias primas naturales que pueden ser utilizadas tanto como anticontaminantes (procesos no contaminantes) como descontaminantes (descontaminación en procesos existentes), buscándose con ellas sistemas más limpios, procesos y métodos que eviten o reduzcan la producción de contaminantes y a reducirlos en cantidad y peligrosidad.

6.2.1 DETALLES DE OPERACIÓN

Para el proceso de producción de aceite de semilla de Teberinto se utilizan vainas secas, cortadas de los árboles de Teberinto entre los meses de Febrero a Abril. Éstas se acumulan en patios de secado y almacenamiento, en donde las vainas reducen humedad. Las vainas tienen una coloración café y de aspecto rígido. Para ser procesadas, las vainas se transportan por medio de bandas hacia un tren de rodillos, en donde se hacen los procesos de desvainado y descascarado. En cada una de las etapas, los residuos (vainas y cáscarilla) se separan de la semilla, quedando así la materia prima lista para procesar.

El primer proceso que pasa la semilla es el de cortado, a través de una cortadora de cuchillas garantizando que éstas se reduzcan aproximadamente a 1/8 de su tamaño inicial. La semilla cortada se pasa inmediatamente después hacia un extractor de aceite tipo Smet, el cual realiza la extracción por medio de recirculación de solvente. La extracción de aceite dura 4 horas, con una alimentación de semilla de 24 kg por lote y una alimentación de 135 litros de solvente por lote, que para este caso es hexano. La temperatura a la cual se realiza el proceso de extracción de aceite se fija en 70°C. Los lotes diarios a trabajar serán dos, completando la alimentación total para la producción diaria estimada para seis meses de trabajo, que es de 48 kg de semilla. En esta extracción se obtiene una miscela (hexano+aceite) que se pasa a un proceso de evaporación-condensación, con el fin de separar el hexano del aceite de semilla de Teberinto extraído. La torta residual de la semilla de Teberinto se pasa a un horno para eliminar el remanente de solvente que pueda contener y luego se dispone como residuo, para un aprovechamiento posterior.

La evaporación-condensación se realiza en un destilador, el cual opera a una temperatura fija de 80°C, con el fin de garantizar la eliminación de la mayoría del solvente contenido en el aceite y obtener un aceite de semilla de Teberinto con un alto porcentaje de pureza. Ésta pureza debe garantizarse ya que el aceite estará destinado al uso cosmético. El rendimiento teórico del aceite de semilla de Teberinto obtenido es aproximadamente del 33%. Finalmente, el aceite se pasa por un filtro, con el fin de clarificarlo y eliminar cualquier impureza sólida que pueda existir en el aceite después de realizado todo el proceso, esta etapa es importante ya que en el proceso pueden colarse a la miscela partículas o polvos de la semilla de Teberinto y es necesario que sean eliminadas para garantizar la calidad del aceite. Después de la etapa de filtrado, el aceite de semilla de Teberinto está listo para ser envasado y distribuido para su comercialización en el exterior.

6.2.1.1 DIAGRAMA DEL PROCESO DE PRODUCCIÓN

En la figura 6.2 se muestra un diagrama detallado del proceso de producción en la planta de aceite de semilla de Teberinto.

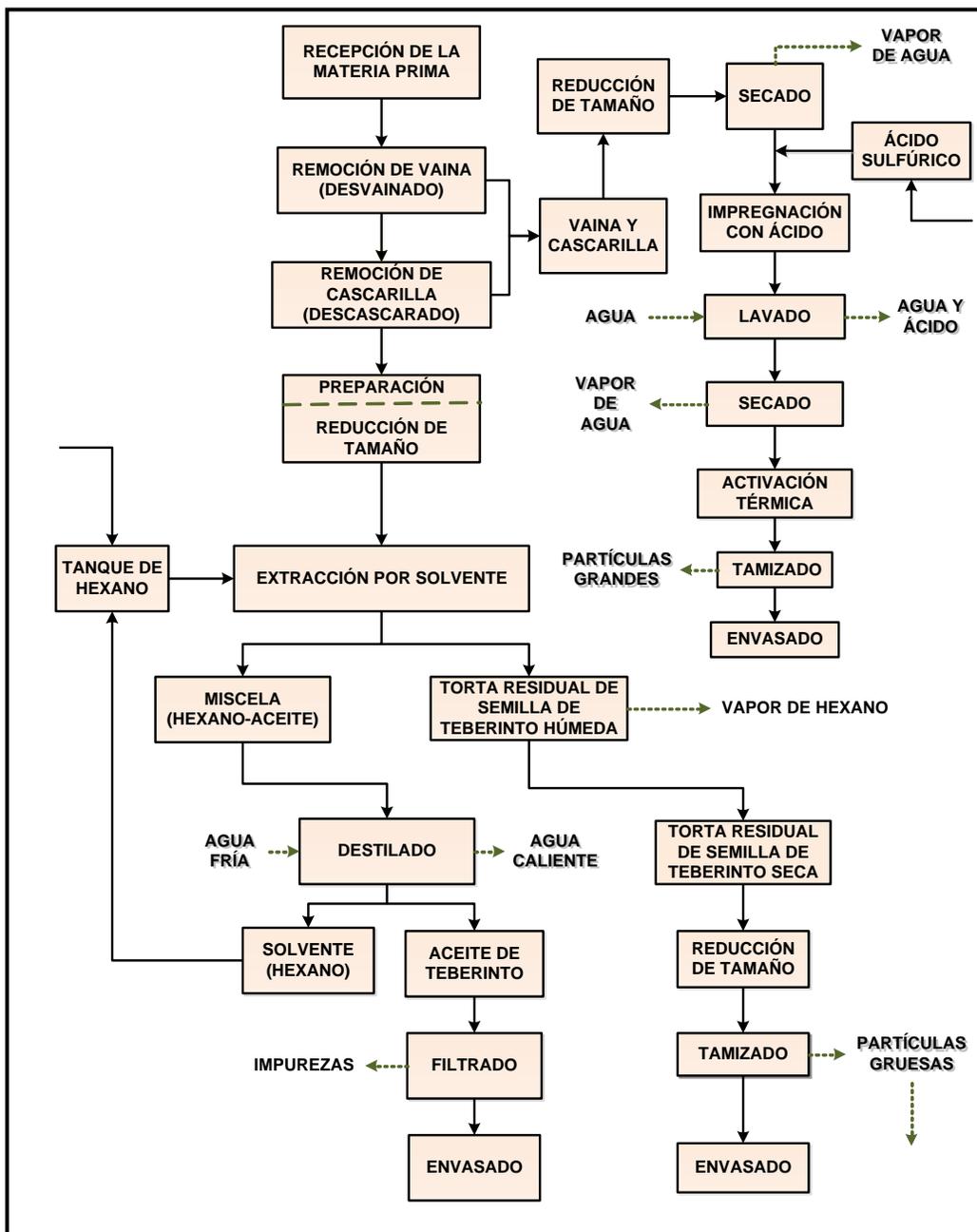


Figura 6.2 Diagrama de bloques del Proceso de Producción de Aceite de Teberinto (*Moringa oleífera*).

En la figura 6.3 se muestra un diagrama convencional del proceso a seguir para la producción de aceite de semilla de Teberinto (*Moringa oleífera*). Los significados de cada uno de los equipos y corrientes mostradas se describen en las tablas 6.2 y 6.3 respectivamente.

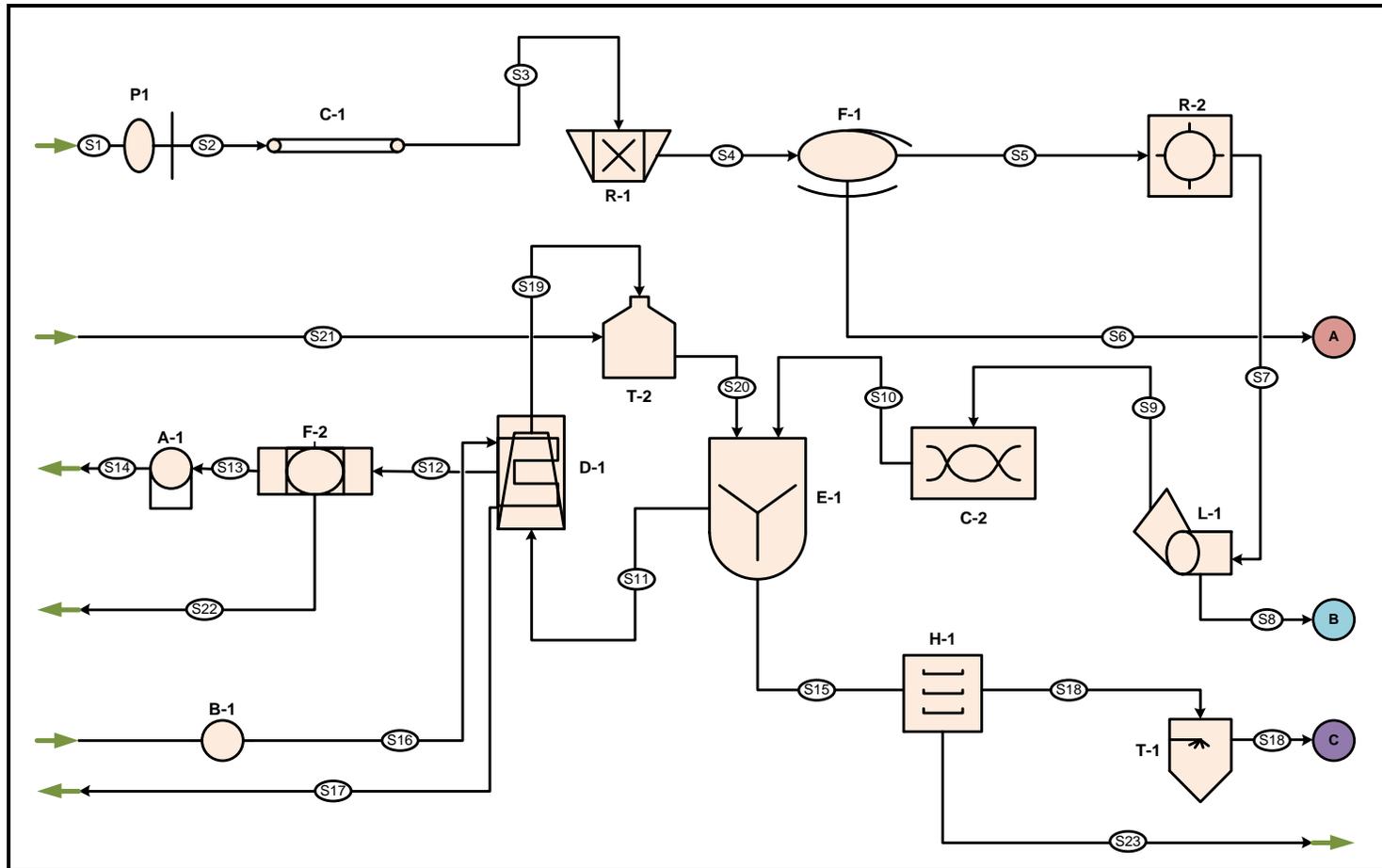


Figura 6.3 Diagrama convencional del proceso de producción de aceite de semilla de Teberinto (*Moringa oleífera*).

Tabla 6.2 Descripción de equipos para el proceso de producción de aceite de semilla de Teberinto.

DENOMINACIÓN	DESCRIPCIÓN- FUNCIÓN PRINCIPAL
P-1	Patio de secado y recepción de materia prima
C-1	Cinta transportadora
R-1	Rodillos de baja presión para quebrar las vainas
F-1	Filtro vibratorio
R-2	Rodillos con cilindros dentados para quebrar cascarilla
L-1	Maquina Limpiadora de semilla
C-2	Cortadora de cuchillas
E-1	Extractor tipo Smet
D-1	Destilador de micela
F-2	Filtro de aceite de Teberinto
A-1	Tanque Almacenador de Aceite de Teberinto
H-1	Horno tostador desecador de torta residual de semilla de Teberinto
T-1	Tanque almacenador de torta residual para ser pulverizada
B-1	Bomba en línea
T-2	Tanque almacenador de Hexano

Tabla 6.3 Denominación de corrientes del proceso de extracción de aceite de semilla de Teberinto.

DENOMINACIÓN	DESCRIPCIÓN- FUNCIÓN PRINCIPAL
S1	Almacenaje en patio de secado de vainas de Teberinto
S2	Alimentación de banda transportadora de vaina tostada
S3	Alimentación de rodillos de baja presión para quebrar la vaina
S4	Alimentación a filtro vibratorio de vainas
S5	Semilla con Cascara
S6	Vainas sin semillas con cascara
S7	Semillas y cascaras
S8	Cascarilla de la semilla y basuritas
S9	Semilla sin cascara
S10	Semilla cortada a un octavo
S11	Micela de aceite con solvente
S12	Aceite de Teberinto
S13	Aceite Filtrado

Continuación. Tabla 6.3 Denominación de corrientes del proceso de extracción de aceite de semilla de Teberinto.

DENOMINACIÓN	DESCRIPCIÓN- FUNCIÓN PRINCIPAL
S14	Aceite para ser empaquetado
S15	Torta residual de semilla con trazas de hexano
S16	Agua a 25°C para el destilador
S17	Agua caliente saliente del destilador
S18	Torta tostada y seca para ser pulverizada
S19	Hexano recuperados en el destilado
S20	Hexano alimentando al extractor
S21	Alimentación de Hexano al tanque de almacenamiento
S22	Impurezas sólidas en el aceite
S23	Vapor de Hexano

En la planta de producción de aceite de semilla de Teberinto deben tomarse en cuenta también los procesos para el aprovechamiento de los residuos generados, siendo estos la producción de carbón activado a partir de la cascarilla y vaina del Teberinto (*Moringa oleífera*) y la producción de polvo coagulante a partir de la torta residual obtenida en la producción de aceite. En la figura 6.4 se muestra el diagrama convencional del proceso de producción de carbón activado. Este proceso se acoplará seguidamente a las salidas de separación de vaina y cascarilla de las semillas (conectores A y B), sin mezclar las corrientes, produciendo dos lotes de carbón activado (uno de vaina y otro de cascarilla) por cada lote de producción de aceite. En las tablas 6.4 y 6.5 se muestran las descripciones de equipos y denominación de corrientes de dicho proceso respectivamente.

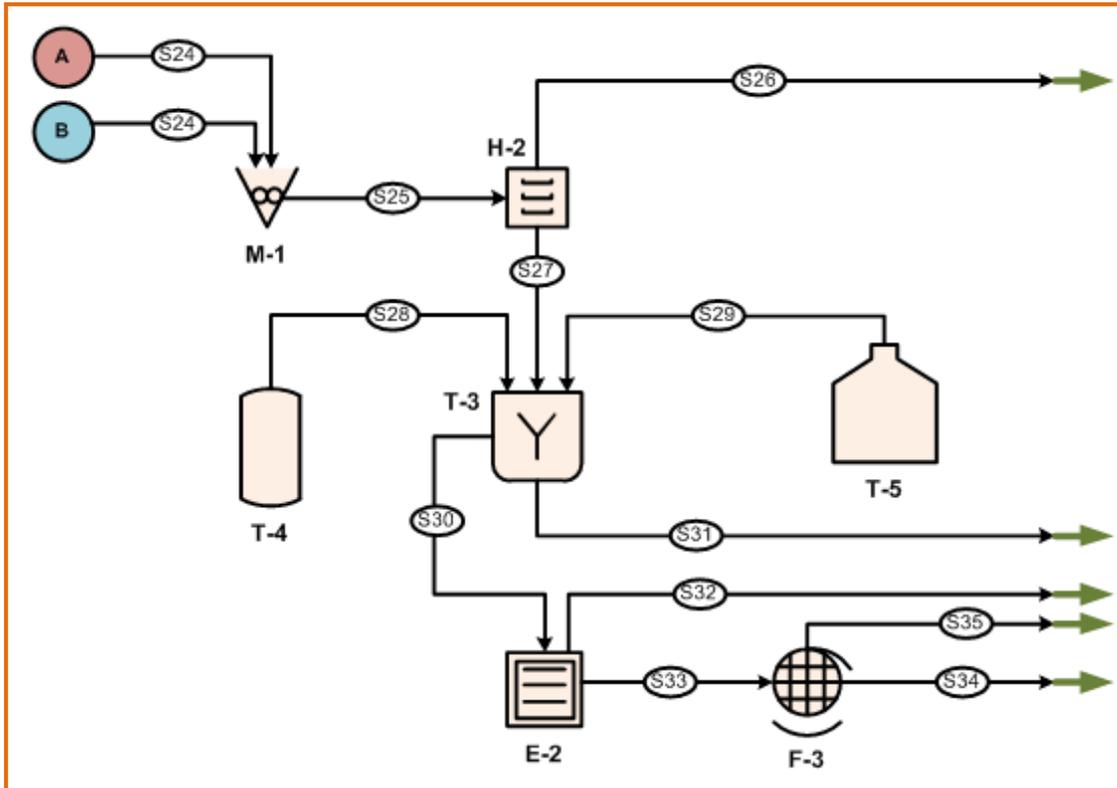


Figura 6.4 Diagrama convencional del proceso de producción de Carbón Activado.

Tabla 6.4 Descripción de equipos para el proceso de producción de Carbón Activado.

DENOMINACIÓN	DESCRIPCIÓN- FUNCIÓN PRINCIPAL
M-1	Molino de discos para reducción de tamaño de la vaina
H-2	Horno de secado
T-3	Tanque mezclador con agitador interno
T-4	Tanque cerrado conteniendo ácido sulfúrico
T-5	Tanque conteniendo agua desnaturalizada
E-2	Estufa
F-3	Filtro vibratorio

Tabla 6.5 Denominación de corrientes para el proceso de producción de Carbón Activado.

DENOMINACIÓN	DESCRIPCIÓN- FUNCIÓN PRINCIPAL
S24	Alimentación de vaina o cascarilla al molino de discos
S25	Vaina o cascarilla molida a estufa
S26	Salida de vapor de agua del horno
S27	Vaina o cascarilla seca al tanque mezclador
S28	Alimentación del ácido
S29	Alimentación de Agua Desnaturalizada
S30	Vaina o cascarilla activada y lavada a la estufa
S31	Salida de agua y ácido
S32	Salida de vapor de la estufa
S33	Vaina o cascarilla activada térmicamente a tamizado
S34	Carbón activado con tamaño de partícula superior a 0.35 mm (granular)
S35	Carbón activado con tamaño de partícula menor a 0.35 mm para ser envasado (polvo)

En la figura 6.5 se muestra el diagrama convencional del proceso de producción de polvo coagulante a partir de la torta residual obtenida en el proceso de extracción de aceite. En las tablas 6.6 y 6.7 se tienen la descripción de equipos y denominación de corrientes para dicho proceso respectivamente.

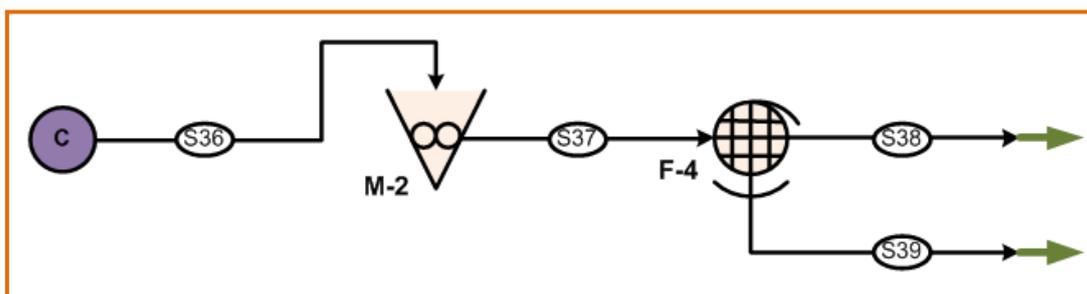


Figura 6.5 Diagrama convencional de proceso de producción de polvo coagulante.

Tabla 6.6 Descripción de equipos para el proceso de producción de polvo coagulante.

DENOMINACIÓN	DESCRIPCIÓN- FUNCIÓN PRINCIPAL
M-2	Molino de discos para reducción de tamaño de la torta residual
F-4	Filtro vibratorio para tamizar el polvo de torta residual

Tabla 6.7 Denominación de corrientes para el proceso de producción de polvo coagulante.

DENOMINACIÓN	DESCRIPCIÓN- FUNCIÓN PRINCIPAL
S36	Alimentación de torta residual de semilla de Teberinto seca a molino de discos
S37	Polvo de torta residual alimentando al filtro vibratorio con tamiz
S38	Polvo de torta residual con tamaño de partícula menor a 0.18 mm para ser empacado
S39	Torta residual granular con tamaño de partícula mayor a 0.18 mm para ser desechado.

6.2.1.2 BALANCE DE MASA GLOBAL DEL PROCESO

Un lote de producción como el descrito en este capítulo se puede caracterizar de la siguiente manera: Las vainas son cortadas de los árboles y transportadas a un patio de secado dentro de la planta, el peso promedio de las vainas con semillas es aproximadamente de 14.35 g, el peso promedio de la cáscara de cada semilla es de 0.05 g y se espera producir aproximadamente 7 L de aceite de Teberinto por lote.

La entrada se compone por:

- 61.5 kg de Vaina de Teberinto secas

Total: 61.5 kg de vaina

La porción líquida de entrada por lote es de 300 L de hexano equivalente a 196.44 kg con una densidad de 0.6548 kg/L, que alimentan la capacidad del tanque de almacenamiento, el cual se llenará constantemente agregando 4.5 kg de hexano después de cada lote debido a las pérdidas de hexano que son de aproximadamente 5%, que se van al ambiente o en las corrientes. La cantidad de hexano a utilizar por lote es de 88.4 kg. Las pérdidas de hexano en el proceso se muestran en la tabla 6.8.

Tabla 6.8 Pérdidas de Hexano en el Proceso de Producción de Aceite de Semilla de *Moringa oleífera*.

	PÉRDIDA DE HEXANO
Torta Residual	5%
Traza en Aceite extraído	0.1%

El rendimiento de extracción de aceite de la semilla de Teberinto es teóricamente el 33% y se considera un 5% de pérdidas de aceite en el proceso de extracción. Se estima que el aceite lleva aproximadamente un 1% de impurezas sólidas provenientes de la semilla de Teberinto (porciones de grano y polvo), por lo que se coloca un filtro para poder eliminarlas. Los datos²⁴ iniciales para realizar el balance son los siguientes:

- Peso promedio de vaina con semillas: 14.35 g
- Cantidad promedio de semillas por vaina: 16 semillas
- Peso promedio de semilla con cascara: 0.40 g
- Peso promedio de la cascarrilla que cubre la semilla: 0.05 g
- Peso promedio de semilla sin cáscara: 0.35 g

Para los procesos de aprovechamiento de recursos también deben hacerse consideraciones y definir parámetros importantes. En la producción de carbón activado se tiene la consideración que el proceso se debe llevar a cabo en dos lotes, uno destinado para la elaboración de carbón activado a partir de cascarrilla y el otro para la elaboración de carbón activado a partir de vaina de Teberinto. La alimentación de cascarrilla al proceso es de 3.43 kg y de vaina es de 34.07 kg.

La humedad aproximada en cáscara y vaina, según Alfaro (2008) es de 12.9% y 86.9% en peso, respectivamente. Para activar la biomasa se necesita una proporción de ácido sulfúrico 4:3 (p/v) con una densidad específica de 1.841 para ácido sulfúrico al 95%, obteniendo una cantidad de masa de ácido

²⁴ Datos extraídos de Alfaro (2008)

sulfúrico necesaria de 4.13 kg para la cascarilla y 6.16 kg para la vaina. Asimismo, la cantidad de agua necesaria para lavar la biomasa y eliminar el ácido sulfúrico totalmente (hasta $\text{pH} = 7$), está en una relación 15:1 en peso, siendo la cantidad necesaria para lavar el carbón activado de cascarilla y vaina de 61.95 kg y 92.4 kg de agua respectivamente.

Se estima que la humedad remanente en la biomasa después del lavado es del 70% sobre el peso inicial de la vaina o cascarilla seca. Se obtienen dos calidades de carbón activado, calidad A y B. La calidad A corresponde al carbón activado granular, con diámetro de partícula mayor a 0.35 mm y la calidad B corresponde al carbón activado en polvo, con diámetros de partícula menores a 0.35 mm. El rendimiento de carbón activado calidad A para la cascarilla es del 72.5% y para la vaina es de 90.17%, el porcentaje sobrante en cada caso, es carbón activado calidad B.

Para el proceso de obtención de polvo coagulante a partir de la torta residual obtenida en la extracción de aceite se tiene una entrada de materia prima al proceso de 15.84 kg de torta residual seca. Este residuo se transporta a un molino en donde se le reduce el tamaño de partícula y luego se hace pasar a un tamiz que separa las partículas menores a 0.18 mm de las mayores, siendo las primeras el polvo coagulante listo para envasar obtenido con un rendimiento del 95%.

Partiendo de los datos anteriores y todas las especificaciones descritas, se hacen los balances de masa respectivos para cada unidad del proceso. Los resultados de los balances de masa por unidad o equipo se muestran en la tabla 6.9.

Tabla 6.9 Balances de masa del proceso por lote de producción.

PROCESO PRINCIPAL: EXTRACCIÓN DE ACEITE	
UNIDAD O EQUIPO	BALANCES DE MASA
Corrientes iniciales	$S1 = S2 = S3 = S4 = 61.5 \text{ kg de vaina con semillas}$
Filtro Vibratorio (F-1)	$S5 + S6 = S4$ $S6 = 34.07 \text{ kg de residuo de vaina}$ $S5 = 27.43 \text{ kg de semilla con cascarilla}$
Limpiadora de Semillas (L-1)	$S7 = S5 = S8 + S9$ $S8 = 3.43 \text{ kg de cascarilla}$ $S9 = 24 \text{ kg de semilla descascarada}$
Extractor tipo Smet (E-1)	$S10 + S20 = S11 + S15$ $S10 = 24 \text{ kg semilla picada}$ $S20 = 88.4 \text{ kg hexano}$ $S11 = 24 \cdot 0.29 + 88.4 \cdot 0.95 = 90.94 \text{ kg}$ $S11 = 90.94 \text{ kg de miscela}$ $S15 = 24 + 88.4 - 90.94$ $S15 = 21.46 \text{ kg torta residual húmeda con aceite}$
Destilador (D-1)	$S19 + S12 = S11$ $S12 = 24 \cdot 0.29 + (88.4 \cdot 0.95) \cdot 0.001$ $S12 = 7.04 \text{ kg aceite con trazas de hexano e impureza}$ $S19 = 90.94 - 7.04 = 83.9 \text{ kg hexano recuperado.}$
Horno (H-1)	$S15 = S18 + S23$ $S18 = 21.46 - 88.4 \cdot 0.05 = 17.04 \text{ kg torta residual}$ $S18 = 17.04 \text{ kg torta residual seca}$ $S23 = 20.26 - 15.84 = 4.42 \text{ kg hexano al ambiente}$
Filtro (F-2)	$S12 = S13 + S22$ $S22 = 24 \cdot 0.01 = 0.24 \text{ kg de impureza en aceite}$ $S22 = 0.24 \text{ kg de impurezas del aceite}$ $S13 = S14 = S12 - S22 = 7.04 - 0.24 = 6.8 \text{ kg}$ $S14 = 6.8 \text{ kg de aceite para envasar}$

Continuación. Tabla 6.9 Balance de masa del proceso por lote de producción

APROVECHAMIENTO DE RESIDUOS: CARBÓN ACTIVADO CASCARILLA	
UNIDAD O EQUIPO	BALANCES DE MASA
Corrientes de entrada	S24 = 3.43 kg de cascarilla
Horno (H-2)	$S26 + S27 = S25$ S25 = 3.43 kg de cascarilla molida $S26 = 3.43 * 0.129 = 0.44$ kg S26 = 0.44 kg de vapor de agua $S27 = S25 - S26 = 3.43 - 0.44$ S27 = 2.99 kg de cascarilla seca
Tanque Mezclador (T-3)	$S27 + S28 + S29 = S30 + S31$ S28 = 4.13 kg de ácido sulfúrico necesario S29 = 61.95 kg de agua necesaria $S30 = 2.99 + 2.99 * 0.7 = 5.08$ kg carbón húmedo $S31 = 2.99 + 4.13 + 61.25 - 5.08 = 63.29$ kg S31 = 63.29 kg de agua ácida
Estufa (E2)	$S30 = S32 + S33$ $S32 = 5.08 - 2.99 = 2.09$ kg de vapor de agua S33 = 2.99 kg de carbón activado de cascarilla
Filtro Vibratorio (F-3)	$S33 = S34 + S35$ $S34 = 2.99 * 0.725 = 2.17$ kg S34 = 2.17 kg de carbón activado granular $S35 = S33 - S34$ $S35 = 2.99 - 2.17 = 0.82$ kg S35 = 0.82 kg de carbon activado polvo
APROVECHAMIENTO DE RESIDUOS: CARBÓN ACTIVADO VAINA	
UNIDAD O EQUIPO	BALANCES DE MASA
Corriente de entrada	S24 = 34.07 kg de vaina

Continuación. Tabla 6.9 Balance de masa del proceso por lote de producción

UNIDAD O EQUIPO	BALANCES DE MASA
Horno (H-2)	$S26 + S27 = S25$ $S25 = S24 = 34.07$ kg de vaina $S26 = 34.07 * 0.869 = 29.61$ kg de vapor de agua S26 = 29.61 kg de vapor de agua $S27 = S25 - S26 = 34.07 - 29.61 = 4.46$ kg $S27 = 4.46$ kg de vaina seca
Tanque Mezclador (T-3)	$S27 + S28 + S29 = S30 + S31$ S28 = 6.16 kg de ácido sulfúrico necesario S29 = 92.4 kg de agua necesaria $S30 = 4.46 + 4.46 * 0.7 = 7.58$ kg carbón húmedo $S31 = 4.46 + 6.16 + 92.4 - 7.58 = 95.44$ kg S31 = 95.44 kg de agua ácida
Estufa (E2)	$S30 = S32 + S33$ $S32 = 7.58 - 4.46 = 3.12$ kg de vapor de agua $S33 = 4.46$ kg de carbón activado de vaina
Filtro Vibratorio (F-3)	$S33 = S34 + S35$ $S34 = 4.46 * 0.9017 = 4.02$ kg S34 = 4.02 kg de carbón activado granular $S35 = S33 - S34$ $S35 = 4.46 - 4.02 = 0.44$ kg S35 = 0.44 kg de carbón activado polvo
APROVECHAMIENTO DE RESIDUOS: COAGULANTE NATURAL EN POLVO	
UNIDAD O EQUIPO	BALANCES DE MASA
Corriente de entrada	$S36 = S37 = 17.04$ kg de torta residual de semilla

Continuación. Tabla 6.9 Balance de masa del proceso por lote de producción

UNIDAD O EQUIPO	BALANCES DE MASA
Filtro Vibratorio (F-4)	$S37 = S38 + S39$ $S38 = 17.04 * 0.95 = 16.19 \text{ kg de polvo coagulante}$ $S39 = S37 - S38 = 17.04 - 16.19 = 0.79 \text{ kg}$ $S39 = 0.85 \text{ kg de residuos granulares}$

La tabla 6.10 muestra un resumen del balance global de corrientes de los procesos realizados en la planta productora de Aceite de Semilla de Teberinto.

Tabla 6.10 Resumen de Corrientes de Balance Global del Proceso por lote de producción.

CORRIENTES DE ENTRADA		CORRIENTES DE SALIDA	
S1	61.5 kg de vaina con semillas	S14	6.8 kg de aceite al 99.9% de pureza
		S22	0.24 kg de impurezas sólidas en el aceite
		S23	4.42 kg de vapor de hexano al ambiente
S21	4.5 kg hexano	S26	30.05 kg de vapor de agua de vaina o cascarilla
		S31	158.8 kg de agua acidificada con ácido sulfúrico
		S32	5.21 kg de vapor de agua de lavado
S28	10.29 kg ácido sulfúrico	S34	2.17 kg carbón activado calidad A cascarilla
		S34	4.02 kg carbón activado calidad A vaina
		S35	0.82 kg carbón activado calidad B cascarilla
S29	154.35 kg de agua para lavado	S35	0.44 kg carbón activado calidad B vaina
		S38	16.19 kg de polvo coagulante de Teberinto
		S39	0.85 kg de desechos granulares de coagulante
TOTAL	230 kg	TOTAL	230 kg

Con el balance de masa realizado se demuestra que las entradas de materia prima e insumos son iguales a todas las salidas de producto y residuos en el proceso. Siendo el dato de interés la cantidad de aceite de Teberinto producida por lote, que es igual a 8 kg de aceite de semilla de Teberinto al 99.9% de pureza, trabajando a un rendimiento de extracción aproximado del 33% con 5% de pérdidas en la extracción de aceite de semilla de Teberinto.

6.2.1.3 ESPECIFICACIONES DE EQUIPO

Es importante conocer el tipo de maquinaria y equipos que se utilizaran en la planta productora de aceite de semilla de Teberinto. Por tal razón se describen a continuación las maquinarias y equipos más importantes que intervienen en el proceso productivo.

Equipo: Rodillos de Baja Presión

Material: Acero al Carbono

Capacidad: 200 kg

Especificaciones: Tiene 3 metros en total, gabinete de apoyo con varillas roscadas. Rodillos en disposición horizontal.

Consideraciones: Es utilizada para el apoyo de los perfiles previa medición y corte.



Figura 6.6 Ilustración de Rodillos de baja Presión industriales

Equipo: Tamiz vibratorio

Material: Acero Inoxidable calidad 304

Capacidades: 200 kg, 100 kg y 50 kg

Especificaciones: Mallas metálicas de 50 mm, 0.35 mm y 0.18 mm

Consideraciones: Separa terrones, grumos e impurezas de la materia prima. El movimiento vibratorio se obtiene gracias a la acción del vibrador neumático a esfera rotante. El producto a tamizar ingresa a la cámara superior y cae sobre la malla metálica o tamiz. La vibración del tamiz fuerzan al producto a pasar a través de la malla metálica; el mismo cae a la cámara inferior y sigue su curso en el proceso, siendo retenidos en la cámara superior únicamente los terrones, grumos o impurezas que se deseaba separar del resto del producto.



Figura 6.7 Ilustración de Tamiz Vibratorio

Equipo: Cilindro dentados

Material: Acero Inoxidable calidad 304

Capacidad: 200 kg

Consideraciones: representa una solución ideal para la remoción de materiales que tienden a formar grumos sobre la materia prima. La rotación rápida de los cilindros especiales, dotados de pequeñas cuchillas, permiten que se realice un rasgado de la cascarilla de la semilla. La presencia de dos rotores

permite manejar cantidades de materia prima ideales para elevadas producciones.



Figura 6.8 Ilustración de Cilindros dentados para la remoción de cascarillas de las semillas de *Moringa oleifera*.

Equipo: Limpiadora de Semillas

Material: Acero Inoxidable

Capacidad: 100-200 kg por hora

Consideraciones: Separa la semillas limpias de las cascarillas, utilizando una corriente de aire que remueve las cascarillas y semillas débiles de las sanas y productivas. Facilidad de Operación y Mantenimiento.



Figura 6.9 Ilustración de la Limpiadora de Semillas

Equipo: Cortadora de Cuchillas

Material: Acero Inoxidable

Capacidad: 100 kg por hora

Especificaciones: 220 V, 2 cuchillas y 20 Martillos Móviles.



Figura 6.10 Ilustración Picadora de Semilla

Equipo: Extractor tipo Smet

Material: Acero Inoxidable

Capacidad: 100 kg de material sólido y 300 litros de solvente.

Especificaciones: Tiempo de extracción varía entre 4 y 12 horas, según requerimientos del proceso. Temperatura ajustable hasta los 200 °C.

Consideraciones: La expulsión mecánica con expulsores somete al aceite a oxidación, fijación del color e hidrólisis. No causa ninguna alteración a las características del aceite y la recuperación se hace con las mismas características que estaban presentes en la materia prima. La tolva de recepción de materia prima está provista de interruptores para las indicaciones de alto y bajo nivel. La indicación de bajo nivel detiene la faja transportadora mientras que la indicación de alto nivel, transmite una señal audio-visual para que el operador tome medidas correctivas. Una serie de rociadores situados

sobre la faja transportadora permiten que se esparza de modo homogéneo el solvente en la cama móvil.



Figura 6.11 Extractor tipo Smet industrial y su esquema interno

Equipo: Desolventizador

Material: acero inoxidable

Capacidad: 10-10,000 kg/h

Especificaciones: Medio de secado indirecto es vapor o fluido térmico. Directo es aire, nitrógeno o vapor súper secado. Evaporación: agua o solvente. Tiempo de residencia: 10-120 minutos

Consideraciones: se utiliza para separar el solvente de la materia prima procesada y mojada en la planta de extracción por solvente. La Metodología de inyección de vapor se asegura de que se escape menos vapor de agua, lo que reduce el consumo de energía



Figura 6.12 Ilustración de Desolventizador Industrial

Equipo: Destilador

Material: acero inoxidable de grado alimenticio

Capacidad: 30-100 L/h

Especificaciones: Dimensiones: 2.15*1.13*2.6 m (ancho*largo*altura). Peso: 900 kg. Volumen: 225 L. Tiempo de calentamiento aproximado: 0.25 h. Consumo de agua de refrigeración aprox: 0.6-1.5 m³/h. Temperatura de calentamiento aprox: 180°C (max)

Consideraciones: Funcionamiento automático, Alta tasa de destilación, Altos niveles de seguridad operativa con necesidades de espacio mínimas.



Figura 6.13 Destilador Industrial

Equipo: Filtro de Aceite

Material: Acero Inoxidable calidad 304

Capacidad: 75 L

Especificaciones: Precisión de filtrado: 1, 3, 5, 10, 20 µm. Peso: 280 kg. Flujo Nominal: 10-20 L/min

Consideraciones: filtrado de aceite de alta precisión y largo tiempo de servicio, elimina impurezas y olor. Adecuado para la fábrica de aceite vegetal



Figura 6.14 Carro de Filtro de Aceite de semillas de *Moringa oleífera*.

Equipo: Molino de Discos para granos

Material: Acero Inoxidable calidad 304

Capacidad: 120 kg/hr (Valor promedio, pueden variar según el tipo de molienda)

Especificaciones: dos discos de diámetro entre 102 y 1524 mm en posición horizontal. Motor 2Hp.

Consideraciones: El colector de polvo puede añadirse para reducir eficazmente la contaminación por polvo.



Figura 6.15 Molino de discos para la reducción de tamaño de la torta residual

6.2.2 PROPUESTA DE APROVECHAMIENTO DE RESIDUOS

En el proceso de extracción de aceite de *Moringa oleífera* se obtienen corrientes de subproductos que pueden ser aprovechados para la creación de carbón activado (en el caso de las vainas y cascarillas que protegen las semillas y son retirados después de pasar por el filtro vibratorio y la maquina limpiadora de semilla respectivamente) y polvo coagulante para tratamiento de agua que se obtiene a la salida del extractor de aceite como torta residual.

6.2.2.1 APROVECHAMIENTO DE VAINA Y CASCARILLA COMO CARBÓN ACTIVADO

El carbón activado se elabora a partir de la cascara que cubre la semilla y de la vaina provenientes del proceso de limpieza antes de la extracción de aceite de Teberinto, se preparan reduciéndolas de tamaño haciendo uso del mismo equipo para la elaboración de ambos tipos de carbón, posteriormente se colocan en la estufa a una temperatura de 110°C durante 30 minutos. Se carboniza e impregna con ácido sulfúrico concentrado durante 4 horas a una temperatura de 25°C en un tanque mezclador. El carbón resultante se lava con agua destilada en una proporción de 15:1 de kg de de carbón hasta que agua de lavado sea neutro (pH = 7), para eliminar el exceso de ácido, seguidamente se activa térmicamente en una mufla a una temperatura de 500°C durante una hora, se deja enfriar a una temperatura ambiente; se tamiza para reducir el tamaño de partícula. Luego se coloca en un desecador para luego envasarlo.

Las propiedades de adsorción del carbón activado elaborado a partir de la cascara de semilla y de la vaina de Teberinto fueron probados experimentalmente para la eliminación de azul de metileno presentando las curvas de adsorbancia en el apartado 5.3, también son muy útiles en la eliminación de contaminantes de flujos de agua implicados en procesos industriales:

- Limpieza de vertidos
- Recuperación de aguas superficiales
- Tratamiento de agua potable
- Purificación de aire

En el proceso de descontaminación el mecanismo de adsorción implicado es de tipo físico fundamentalmente, el cual permite desorber el contaminante una vez que se ha agotado la capacidad del adsorbente gracias al carácter reversible de este tipo de adsorción. La elección del tratamiento para agua contaminada depende de factores como la naturaleza de los contaminantes, su concentración, volumen a tratar y toxicidad. El modelo empleado para describir la absorbancia depende del tipo y carácter de la instalación empleada (tanque agitado, lecho fijo, adsorbente granular, adsorbente en forma de polvo, etc.)

6.2.2.2 APROVECHAMIENTO DE TORTA RESIDUAL OBTENIDA EN LA EXTRACCIÓN DE ACEITE COMO COAGULANTE NATURAL.

La torta residual es acondicionada para ser utilizada como coagulante en el tratamiento de aguas, aplicado para la desestabilización de impurezas coloidales y disueltas, produciendo agregados de flóculos grandes que pueden ser removidos por subsiguientes procesos de filtración/clarificación.

Para acondicionar la torta que proviene de la etapa de secado de la producción de aceite de Teberinto, se reduce de tamaño a polvo en un molino de discos que posteriormente es tamizado en una malla que permita el paso de un tamaño de partícula menor a 0.18 mm para ser empacado.

El procedimiento para purificar aguas con semilla de Teberinto es sencillo y consiste en preparar una suspensión con la harina de semilla, previamente descortezada, luego se filtra y se obtiene un extracto, el cual se mezcla durante 1 minuto con el agua que se quiere purificar a una agitación de 100 RPM y luego se deja con agitación lenta de 30 RPM por media hora y se deja reposar

por cuarenta y cinco minutos. Al cabo de ese tiempo, se filtra el agua. El procedimiento de preparación de la solución según Briceño, Caldera, Fuentes, García y Mendoza (2000) tomando como base el tratamiento de 10 L de agua con una turbidez de 350 NTU es el siguiente:

1. Se pesan 0.49 gramos de polvo de semilla de Teberinto desgrasada
2. Se disuelven los 0.49 gramos de polvo coagulante en 700 ml de agua destilada para obtener una solución de 700 ppm
3. Se filtra la solución para separar las partículas sólidas y obtener la solución coagulante a usar para purificar aguas.
4. De la solución obtenida se utilizan 70 ml por cada litro de agua turbia a 350 NTU a tratar.

El procedimiento para preparar la solución coagulante es básicamente el mismo, las cantidades de polvo coagulante y de agua destilada para disolverlo van a variar en función de las necesidades de tratamiento de cada tipo de agua en particular. Para determinar estas cantidades, así como la dosis necesaria para la purificación se deben realizar pruebas de jarras previamente.

6.3 POTENCIALES IMPACTOS AMBIENTALES

La instalación de la planta productora de aceite de Teberinto, en sistemas integrados en una operación industrial no solo genera beneficios económicos sino también beneficios potenciales en la reducción del impacto ambiental. Los sistemas de producción integrados consisten de procesos limpios sostenibles que utilizan los residuos de materia prima para producir otros, reduciendo así la emisión de contaminantes al ambiente.

Al producir aceite de semilla de Teberinto y realizar un aprovechamiento de residuos se garantizan procesos industriales sostenibles y limpios, ya que se aprovecha absolutamente toda la alimentación inicial de materia prima. Las emisiones de vapores de hexano son mínimas y corresponden a aproximadamente el 11% de las emisiones de vapor totales, el porcentaje sobrante corresponde a vapor de agua. Las corrientes de salida de agua

contienen menos del 7% de ácido y los desechos sólidos generados corresponden al 1.77% del total de materia prima alimentado a la planta de producción.

CONCLUSIONES

1. El estudio bibliográfico realizado con el fin de conocer los usos potenciales de la *Moringa oleífera*, indicó que diversas partes del árbol pueden ser utilizadas como generadores de materia prima para la industria química, a pesar de que este árbol es poco conocido en El Salvador y no posee una importancia socioeconómica en los sectores agrícola e industrial, el valor potencial de este recurso puede ser conocido y desarrollado gracias a las condiciones de cultivo favorables que El Salvador presenta y así generar materias primas para la industria cosmética y de tratamiento de aguas y gases.
2. La extracción de aceite de la semilla de Teberinto por el método Soxhlet resulta eficiente ya que siempre se está extrayendo con el disolvente puro en su punto de ebullición dando como resultado altos valores de rendimiento en donde el hexano es el solvente que presenta una menor dispersión de rendimientos obtenidos y un mayor rendimiento promedio en la extracción de aceite al ser comparado el tipo de solvente, donde el rendimiento promedio experimentalmente para etanol es de 28.66% y para el hexano un 39.26%. Estos valores experimentales son cercanos a los presentados por Arnal, García, Saurí y Verdú (2010) para la semilla de *Moringa oleífera* cultivada en una región de África, que son de 34.37% y 31.99% para hexano y etanol respectivamente.
3. En el proceso de extracción de aceite de *Moringa oleífera* se evaluaron los efectos de los factores temperatura, cantidad de solvente, cantidad de semilla y tiempo de extracción obteniendo como variable respuesta el rendimiento de extracción de aceite, siendo la interacción de la cantidad de solvente y el tiempo de extracción el único efecto significativo a un nivel de significancia del 5%. Al realizar el análisis de interacción de los

efectos se encuentra que el efecto de la cantidad de solvente es mayor a niveles bajos del tiempo de extracción que a niveles altos, y que a niveles altos del tiempo de extracción el rendimiento aumenta al disminuir la cantidad de solvente. El rendimiento máximo en la extracción del aceite, obtenido en los experimentos realizados es del 48.88%, el cual se presenta a las condiciones de 350 ml de solvente, 70°C y 4 h de tiempo de extracción.

4. A partir del diseño Bifactorial y realizado el análisis de múltiple comparación de tratamientos para la elección del coagulante natural y la dosis a utilizar se puede decir que tanto el tipo de material coagulante como la dosis de coagulante afectan significativamente al porcentaje de remoción de la turbidez a un nivel de significancia del 5%. El porcentaje de remoción de la turbidez promedio es de: 99.83% cuando se usa policloruro de aluminio, 99.64% cuando se usa la torta residual del proceso de extracción de aceite de la semilla de Teberinto y 99.55% cuando se usa semilla de Teberinto virgen. El PAC es el material que presenta una mayor efectividad en el rendimiento de remoción de turbidez por lo que se realiza una comparación del mismo con los coagulantes naturales provenientes del Teberinto. El porcentaje de remoción de la turbidez es mayor, más estable y comparable a la del PAC para el caso del uso del material de la torta residual obtenida del proceso de extracción del aceite de la semilla de Teberinto.
5. Los parámetros de operación que presentan la mayor eficiencia de remoción de turbidez pertenecen al PAC, pero debido a que el objetivo es comparar un coagulante sintético con un coagulante natural, se tiene que el coagulante natural proveniente del Teberinto que posee los mayores porcentajes de remoción de turbidez es el que se elabora a partir de la semilla desgrasada, el cual presenta valores de rendimiento de remoción de turbidez que varían de 99.77 a 99.81% para una turbidez de 350 NTU. Los cuales pueden ser comparados con el estudio

realizado por Caldera Y. y Mendoza I. (2007), para valores de turbidez inicial de 75 y 150 NTU, donde Los porcentajes de remoción para dichas concentraciones fueron de 80,1% y 94,3%, indicando que a mayor turbidez la eficiencia de remoción aumenta. Los valores de los parámetros para una turbidez de 350NTU son los siguientes:

- a. Concentración de coagulante: 700 ppm.
- b. Rpm de agitación rápida y lenta: 100 y 30 rpm respectivamente.
- c. Tiempo de sedimentación: 45 minutos.
- d. Dosis de coagulante: 70 ml de solución de coagulante por litro de agua.

6. El dato de remoción más alto reportado para el coagulante elaborado con semilla de *Moringa oleífera* desgrasada es el que logra llevar la turbidez en el agua al nivel más bajo, llevando el agua de 350 a 0.67 NTU.

7. El análisis de calidad del agua tratada con coagulante de *Moringa oleífera* comprueba la capacidad que tiene dicho coagulante natural en la remoción de turbidez y eliminación de color, disminuyendo sus valores por debajo de los límites permitidos por la Norma Salvadoreña Obligatoria para el Agua Potable (NSO 13.07.01:08), siendo estos:

- Turbidez: 350 NTU a 0.67 NTU (Límite permisible 1.0 NTU)
- Color: 140 Pt-Co a 3.4 1Pt-Co (Límite permisible 15 Pt-Co)

La reducción de microorganismos no pudo comprobarse ya que los resultados obtenidos fueron iguales para ambas muestras de agua (tratada y no tratada con coagulante natural) por lo que se puede decir que el uso de coagulante de semilla de *Moringa oleífera* desgrasada no altera las condiciones microbiológicas del agua.

8. La tendencia lineal y el coeficiente de correlación sugieren que el modelo de Langmuir describe de forma satisfactoria la adsorción de azul de metileno por el carbón activado de la vaina de Teberinto reportando

un valor de coeficiente de correlación 0.999 el cuál coincide con el valor reportado bibliográficamente para los carbones activados obtenidos a partir de cascarilla de café y cáscara de coco en el estudio de García, Giraldo y Moreno (2007) por el método de adsorción de azul de metileno, mientras que el valor para el carbón activado de la cascarilla de la semilla de Teberinto reporta un valor de coeficiente de correlación de 0.95, que se encuentra alejado del valor bibliográfico antes mencionado. La adsorción es mayor para el carbón activado de la vaina de Teberinto comparado con el carbón activado obtenido de la cascarilla de la semilla de Teberinto.

9. En la producción de aceite como materia prima para la industria química a partir de las semillas de *Moringa oleífera* se generó un 5% en pérdidas al realizar el proceso en el laboratorio mediante un equipo soxhlet pero en la práctica industrial este valor no es comparable con las pérdidas generadas por un extractor Smet por lo que se debe evaluar la capacidad del equipo en el momento de instalar una planta extractora. Asimismo la producción de aceite a partir de semilla de Teberinto (*Moringa oleífera*) permite realizar un aprovechamiento integral de los residuos ya que estos conforman el 87% de la alimentación inicial en peso, generando un mínimo impacto ambiental, siendo las emisiones de vapores de hexano aproximadamente el 11% de las emisiones de vapor totales, las corrientes de salida de agua contienen menos del 7% de ácido y los desechos sólidos generados corresponden al 1.77% del total de materia prima alimentado a la planta de producción. La torta residual de la extracción de aceite puede transformarse en un coagulante natural y las vainas y cascaras del Teberinto pueden utilizarse para la producción de carbón activado. Con este aprovechamiento integral de los residuos se logra obtener un valor agregado al proceso.

RECOMENDACIONES

1. Es importante integrar el sector público y privado en la promoción a nivel nacional de las múltiples oportunidades de aprovechamiento industrial que ofrece el árbol de Teberinto, así como para difundir información sobre el cultivo, cuidado y todos los aspectos agronómicos necesarios para un buen desarrollo del recurso.
2. Se deben revisar los tratados de libre comercio existentes con Europa y considerar el establecimiento de nuevos tratados de libre comercio en otras regiones con la finalidad de mantener beneficios compartidos entre los mercados destinados a la industria cosmética y de tratamiento de aguas, o que sean consumidores potenciales del aceite de semilla de *Moringa oleífera*, coagulante natural y carbón activado.
3. Fomentar las prácticas agrícolas en las áreas rurales a nivel nacional para el establecimiento de zonas productoras de Teberinto facilitando el acceso a la tecnología necesaria para modernizar dichas actividades y capacitando a las personas involucradas con el fin de generar productos competitivos a nivel nacional, regional y mundial.
4. Deben realizarse diseños experimentales de optimización que permitan identificar los parámetros óptimos de producción de cada uno de los productos obtenidos mediante un análisis estadístico amplio que contemple todos los factores que afectan el proceso industrial.
5. Es importante implementar sistemas de gestión de calidad al proceso productivo a escala industrial propuesto, planteando mejoras a la producción bajo el enfoque de calidad total, garantizando una mejora continua y facilitando la integración de los productos a mercados exigentes con la calidad de sus insumos y productos finales.

BIBLIOGRAFIA

1. Administración Nacional de Acueductos y Alcantarillados (ANDA) (2010), potabilización de agua, El Salvador, Centroamérica.
2. Agrodesierto (2008), **Programas Agroforestales *Moringa oleífera***, Islas Canarias. <http://www.agrodesierto.com/moringa.descripcion.html>
3. Aguilar, M., Bueno, C., Campas, O., López, J., Rodríguez, J. y Sánchez, D. (2009), **Efecto del Extracto de la Semilla de *Moringa oleífera* en la Clarificación de Aguas Superficiales**, Congreso Nacional de Biotecnología y Bioingeniería, Instituto Tecnológico de Sonora, México.
4. Aguilar M.G. y Rodríguez J.R. (2007), **Efecto de Extracto de Semillas de *Moringa Oleífera* en la Calificación de aguas Superficiales**, Congreso Nacional de Biotecnología y Bioingeniería, Instituto Tecnológico Sonora, VII Simposio Internacional de la Producción de Alcoholes y Levaduras, México.
5. Alfaro, N. C. (2008), **Rendimiento y Uso Potencial de Paraíso Blanco, *Moringa oleífera Lam* en la Producción de Alimentos de Alto Valor Nutritivo para su Utilización en Comunidades de Alta Vulnerabilidad Alimentario-nutricional de Guatemala**, Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONCYT), Secretaría Nacional de Ciencia y Tecnología (SENACYT), Fondo Nacional de Ciencia y Tecnología (FONACYT), Instituto de Nutrición de Centro América y Panamá (INCAP), Guatemala. <http://glifos.concyt.gob.gt/digital/fodecyt/fodecyt%202006.26.pdf>
6. Alfaro, N. C., Martínez, W. (2008), **Uso Potencial de la *Moringa (Moringa oleífera, Lam)* para la Producción de Alimentos Nutricionalmente Mejorados**, Consejo Nacional de Ciencia y

- Tecnología (CONCYT), Secretaría Nacional de Ciencia y Tecnología (SENACYT), Fondo Nacional de Ciencia y Tecnología (FONACYT), Instituto de Nutrición de Centro América y Panamá (INCAP), Guatemala.
7. Armengol, N., Pérez, A., Reyes, F., Sánchez, T. (2010), **Características y potencialidades de *Moringa oleífera*, Lamark. Una alternativa para la alimentación animal**, Revista Pastos y Forrajes, Scientific Electronic Library Online (SciELO), Central España Republicana, Matanzas, Cuba.
http://scielo.sld.cu/scielo.php?pid=S0864-03942010000400001&script=sci_arttext
 8. Arnal, J. M., García Fayos, B., Saurí, A. y Verdú, G. (2010), **Study of *Moringa oleífera* Oil Extraction and Its Influence in Primary Coagulant Activity for Drinking Water Treatment**, Institute for Industrial Radiophysical and Environmental Safety (ISIRYM), Universidad Politécnica de Valencia, Instituto de Biología Molecular y Celular de Plantas (IBMCP), Valencia, España.
 9. Bailey, A. (1984), **Aceites y Grasas Industriales**, Editorial Reverté, España.
 10. Barrera Romero, J., Bello Solorzano M. (2004), **Efecto de Diferentes Niveles de *Moringa oleífera* en la Alimentación de Vacas lecheras criollas sobre el consumo, producción y composición de la leche**, Universidad Nacional Agraria (UNA), Facultad de Ciencia Animal, Managua, Nicaragua.
 11. Barrientos Salazar, M. A. (1989), **Propuesta de un Nuevo Currículo para la Carrera de Ingeniería Química de la Universidad de El Salvador (Parte 1)**, Trabajo de Graduación para optar al título de Ingeniero Químico, Facultad de Ingeniería y Arquitectura, Universidad de El Salvador, El Salvador.

12. BCR (2011), **Informe de la Situación Económica de El Salvador**, IV Trimestre del 2011, Banco Central de Reserva de El Salvador. <http://www.bcr.gob.sv/uploaded/content/category/1600311364.pdf>
13. Bernabé, M. A., Falasca, S. (2008), **Potenciales Usos y Delimitación del área de Cultivo de *Moringa oleífera* en Argentina**, Revista Virtual REDESMA. <http://revistavirtual.redesma.org/vol3/pdf/investigacion/Moringa.pdf>
14. Biswas, W. K. (2008), **Life Cycle Assessment of Biodiesel Production of *Moringa oleífera* Oilseeds**, Department of Agriculture and Food, Center of Excellence in Cleaner Production, Curtin University of Technology, United States.
15. Briceño, L., Caldera, Y., García, J., Fuentes, L. y Mendoza, I. (2007), **Eficiencia de las Semillas de *Moringa oleífera* como coagulante Alternativo en la Potabilización del Agua**, Boletín del Centro de Investigaciones Biológicas, Volumen 41, N° 2, Laboratorio de Investigaciones Ambientales, Programa de Ingeniería, Universidad del Zulia, Maracaibo, Venezuela.
16. Cabrera Oberto, G. (2009), **Proponen utilizar coagulantes naturales para la potabilización del agua**, Universidad del Zulia, Venezuela.
17. Caldera Y. y Mendoza I. (2007), **Eficiencia de las Semillas de *Moringa Oleífera* como coagulante alternativo en la potabilización del agua**, Boletín del Centro d Investigaciones Bilógicas Volumen 41, No 2, Universidad de Zulia, Venezuela.
18. Cañas, C., Chávez, F. (1999), **Situación Ambiental de la Industria en El Salvador**, Resumen Ejecutivo, Gestión Ambiental en la Pequeña y

Mediana Industria de América Central (GESTA), Publicación N°01R/1999, Universidad Centroamericana José Simeón Cañas, El Salvador.

19. Cáceres Montes, C. M., Díaz Ayala, J. C. (2005), **Propuesta de Tratamiento de Aguas de Desecho de una Industria Química de Adhesivos utilizando Extracto Acuoso de la Semilla de *Moringa oleífera* (Teberinto)**, Trabajo de Grado, Universidad de El Salvador, Facultad de Química y Farmacia, San Salvador, El Salvador.
20. Cases Capdevila, M. A. y Hernández, M. T. (2007), **Memorias de las jornadas técnicas dedicadas a PAM**. Brihuega, Guadalajara, Enero.
21. Cavallini, R. (2001) **La *Moringa oleífera***, iL Materiali di ACRA coperiamo lo sviluppo, Lombardia, Italia.
22. Centro de Documentación de Estudios y Oposiciones (2009), **Tecnología de la Extracción de otros Aceites y Grasas. Procesos, diagramas, secuencia.**
23. Cerpa, M. (2007), **Hidrodestilación de Aceites Esenciales: Modelado y Caracterización**, Universidad de Valladolid, departamento de Ingeniería Química y Tecnología del Medio Ambiente, Valladolid.
24. Chang, R. (2002), **Química**, Séptima edición en español, McGraw Hill.
25. Cheftel & Cheftel (1980), **Introducción a la Bioquímica y Tecnología de los Alimentos**, Editorial ACRIBIA, España.
26. Chipofya, V., McConnachie, G. L., Pollard, S. J. y Warhurst, A. M. (1996), **Activated Carbon from Moringa Husks and Pods**, 22nd WEDC Conference, Reaching the Unriched: Challenges for the 21st Century, New Delhi, India.

27. Cisterna, P. (2010), **Eliminación de grasas y aceites por tratamiento biológico de fangos activos**, Departamento de Ingeniería Química y Tecnologías del Medio Ambiente, Universidad de Oviedo, España.
28. Clavero, T., García, D. E., Iglesias, J. M., Medina, M. G. (2007), **Estudio comparativo de *Moringa oleífera* y *Leucaena leucocephala* durante la germinación y la etapa inicial de crecimiento**, Revista Zootecnia Tropical, Scientific Electronic Library Online (SciELO), Maracay, Venezuela. http://www.scielo.org.ve/scielo.php?pid=S0798-72692007000200004&script=sci_arttext
29. Cobas, A.C. y Molina, L.B. (2004), **Aptitud papelera de *Moringa Oleífera***, Desarrollo e innovación Tecnológica, quinta jornada de desarrollo, Facultad de Ciencias Agrarias y Forestales, Universidad Nacional de la Plata, Argentina.
30. Cogollo J.M, (2010), **Clarificación de aguas usando coagulantes Polimerizados: Caso del Hidroxicloruro de Aluminio**, Ingeniería de Alimentos, Universidad Nacional de Colombia, Colombia.
31. Contreras González, J. S. (2011), **Producción de Biodiesel a partir de Especies Oleaginosas**, Seminario Materiales y Tecnologías en Ingeniería, Universidad Católica del Maule, Talca, Chile
32. Convenio Interinstitucional de Cooperación UPME (Unidad de Planeación Minero Energética), INDUPALMA (Industria Agraria la Palma), COPODIB (Corporación para el Desarrollo Industrial de la Biotecnología y Producción Limpia) (2003), **Programa Estratégico para la Producción de Biodiesel- Combustible Automotriz a Partir de Aceites Vegetales**, Bogotá.

33. Cornejo V.M. y Paredes S.E. (2011), **Evaluación de bloques multinutricionales con tres niveles de follaje de terebinto (*Moringa oleífera*) como fuente proteica, en el desempeño reproductivo de conejas de la raza neozelandés blanco**, trabajo de graduación de la Universidad de El Salvador para optar al título de licenciatura en Medicina Veterinaria y Zootecnia, El Salvador.
34. Cultivos Energéticos S.R.L. (2011), **Biomasa: *Moringa oleífera***, <http://plantiosenergeticos.com.ar/biomasa.html>
35. Díaz López, F. J. (2003), **Innovación Tecnológica y Ambiente: La Industria Química en México**, Universidad Autónoma Metropolitana, Iztapalapa, México.
36. Duarte, F. J., Flores Leiva, B. A. (2004), **Producción de Biomasa de *Moringa oleífera* sometida a diferentes densidades de siembra y frecuencia de corte, en el trópico seco de Managua, Nicaragua**, Universidad Nacional Agraria, Facultad de Ciencia Animal, Managua, Nicaragua.
37. Duke, J. A. (1983), **Handbook of Energy Crops**, Unpublished. http://www.hort.purdue.edu/newcrop/duke_energy/Moringa_oleifera.html
38. Egan, H. R., Kirk, S., Sawyer, R. (2006), **Composición y Análisis de Alimentos de Pearson**, Compañía Editorial Continental S.A., Octava Reimpresión, México.
39. FEIQUE (2009), **Radiografía del Sector Químico Español**, Federación Empresarial de la Industria Química Española, Madrid, España.
40. Foidl, N. (2000), **The Potential of *Moringa oleifera* for Agricultural and Industrial Uses**, Internal Report, UNI Managua.

41. Foidl N., Mayorga L. (2000), **Cultivo de marango para la producción de proteínas y energía**, El nuevo Diario, Managua, Nicaragua.
42. Foidl, N., Mayorga, L., Vásquez, W. (2003), **Utilización del Marango (Moringa oleífera) como Forraje Fresco para el Ganado**, Conferencia electrónica de la FAO sobre “Agroforestería para la producción animal en Latinoamérica”, Proyecto Biomasa, Managua, Nicaragua.
<http://www.moringanews.org/documents/foildspanish.pdf>
43. Folkard, G., Sutherland, J. (1996), **Moringa oleífera, un árbol con enormes potencialidades**, Agroforestry today, volumen 8, N° 3, pp. 5-8, Turrialba, Costa Rica.
44. Fonseca, J. (2011), **La moringa, el Árbol Milagroso**, El círculo, Periódico a.m.
<http://archivo.periodico.am/Columna.aspx?ID=15429>
45. Fowler, G. D., McConnachie, G. L., Pollard, S. J. y Warhurst, A. M. (1997), **Pore Structure and Adsorption Characteristics of Steam Pyrolysis Carbons from *Moringa oleifera***, Center of Environmental Control and Waste Management, Imperial College of Science, London, United Kingdom.
46. Fuentes, J. (2009), **El Rol de la Industria Manufacturera en los Países en Desarrollo: ¿Qué Rol debe Jugar la Industria Salvadoreña?**, Análisis e Investigaciones, Año 2, N° 29, Banco Central de Reserva de El Salvador (BCR), Departamento de Investigación Económica y Financiera, El Salvador.
47. Fuglie, L. J. (2001), **The Miracle Tree. The Multiple Attributes of *Moringa***. Technical Centre for Agricultural and Rural Cooperation.

48. Garavito, U. (2008), ***Moringa Oleífera*, Alimento Ecológico para Ganado Vacuno, Porcino, Equino, Aves y Peces, para Alimentación Humana, también para Producción de Etanol y Biodiesel**, Corporación Ecológica Agroganadera S.A., Colombia.
49. García Fayos, B. (2007), **Metodología de Extracción In Situ de Coagulante Naturales para la Clarificación de Agua Superficial. Aplicación en Países en Vías de Desarrollo**, Universidad Politécnica de Valencia, Valencia, España.
50. García, V., Giraldo, L., Moreno, J.C. (2007), **Caracterización Superficial en Fase Gas y Líquida de Carbones Activados**, Departamento de Química, Facultad de Ciencias, Universidad de Los Andes, Bogotá, Colombia.
51. Gómez, A., Klose, W., Rincón, S. (2010), **Carbón Activado de Cuesco de Palma**, Instituto de Ingeniería Térmica, Facultad de Ingeniería Mecánica, Universidad de Kassel, Alemania.
52. González, A., Gordon, M., Luna, D., Martín, N. (2007), **Obtención de Carbón Activado a partir de la Cáscara de Coco**, Departamento de Química, Universidad Autónoma Metropolitana, Iztapalapa, México
53. Herberger, J. P., Holm, L. G., Pancho, J. V. y Plucknett, D. L. (1979), **A Geographical Atlas of World Weeds**. John Wiley and Sons NewYork, USA.
54. Hernández Cienfuegos, C. R. (1997), **“Evaluación de las Características Antimicrobianas de Teberinto (*Moringa oleífera*) para el Tratamiento de Aguas de Ríos ”**, Trabajo de Graduación Facultad de Química y Farmacia, Universidad de El Salvador.

55. Hogervorst, R., Knipples, J. W. (2010), **Fortalecimiento de la Capacidad Comercial hacia los Países EFTA: Inteligencia de Mercados para Colombia- Ingredientes Naturales**, Revista OSEC, Bussiness Network Switzerland, Edición Septiembre, Holanda.
56. Informe de Vigilancia Tecnológica (2006), **Tratamientos avanzados de aguas residuales industriales**, Madrid.
57. Jahn, S. A. A. (1995), **Tratamiento de agua con coagulantes vegetales tradicionales y arcillas clarificadoras**, Capitulo 2, Sudán, 1995. <http://www.bvsde.paho.org/bvsacd/scan/003550/003550-02.pdf>
58. Leiva Bautista, C. (2011), **Subproductos Generados en el Proceso de Producción de Biodiesel a partir de aceite de Tempate (*Jatropha Curcas*)**, Editorial Universidad Francisco Gavidia, Primera Edición, El Salvador.
59. Marcilla Gómis, A. (1982), **Carbón Activado a partir de Cáscara de Almendra**, Trabajo Doctoral en Ciencias Químicas, Departamento de Química Técnica, Facultad de Ciencias, Universidad de Alicante, España.
60. McCann, M., Stellman, J. M. (1998), **Capítulo 77: Procesado Químico: Industrias Químicas**, Enciclopedia de Salud y Seguridad en el Trabajo, Organización Internacional del Trabajo (OIT).
<http://www.insht.es/InshtWeb/Contenidos/Documentacion/TextosOnline/EnciclopediaOIT/tomo3/77.pdf>
61. Moreno López, J.C. (2005), **Evaluación de la Producción de Forraje de *Moringa oleífera* (Lam), *Cnidocolus aconitifolium* (Mill) M.L. Johnst y *Leucaena leucocephala* (Lam) de wit para Banco Proteico en Pacora, San Francisco Libre, Managua**, Trabajo de Grado,

Universidad Nacional Agraria, Facultad de Recursos Naturales y del Ambiente, Nicaragua.

62. Muñoz R. y Rodríguez S. (2005), **Empleo de un Producto Coagulante Natural para Clarificar Agua**, Revista CENIC Ciencia Químicas, Vol. 36, No. Especial, Cuba.
63. Núñez, C. (2008), **Extracciones con Soxhlet**.
<http://www.cenunez.com.ar/archivos/39-ExtraccinconequipoSoxhlet.pdf>
64. Othman, A. M. (2008), **Preparation of Sulfurized Granular Activated Carbon From Beji Asphalt Using Concentrated H₂SO₄**, Tikrit Journal of Pure Science, Vol. 13 N° 3, Chemical Industries Department, Mosul Technical Institute, Mosul, Iraq.
65. Parrotta, J. A. (1993), **Moringa oleifera Lam. Resedá, horseradish tree**. SO-ITF-SM-61. New Orleans, LA: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Southern Forest Experiment Station.
66. Reyes Sánchez, N. (2004), **Marango: Cultivo y utilización en la alimentación animal**, Guía técnica N° 5, Universidad Nacional Agraria (UNA), Dirección de Investigación, Extensión y Posgrado (DIEP), Nicaragua.
67. Rocha Román, L. (2011), **Valoración de las Propiedades Nutricionales de Moringa oleífera en el Departamento de Bolívar**, Universidad del Valle, Chile.
http://revistaciencias.univalle.edu.co/volumenes/vol_15/JdelToro.pdf
68. Rodríguez Reinoso, F. (1997), **Carbón Activado: Estructura, Preparación y Aplicaciones**, Departamento de Química Inorgánica, Universidad de Alicante, España.

69. Rossi, M. (2010), **Oportunidades de Mejoras Ambientales por el Tratamiento de Aguas Residuales en el Perú**, Fondo Nacional del Ambiente- Perú.
70. Sánchez, M. D., **Sistemas Agroforestales para Intensificar de Manera Sostenible la Producción Animal en Latinoamérica Tropical**, Conferencia Electrónica de la FAO sobre “Agroforestería para la producción animal en Latinoamérica”.
<http://www.fao.org/ag/aga/agap/frg/agrofor1/Sanchez1.pdf>
71. Sánchez Castellanos, F.J. (2006), **Extracción de Aceites Esenciales: Experiencia Colombiana**, II congreso Internacional de Plantas Medicinales y Aromáticas, Universidad Nacional de Colombia Sede Palmira, Bogotá.
72. Sánchez Martín, J. (2004), **Aplicación de Floculantes Naturales a la Potabilización de Aguas**, Trabajo de Grado, Departamento de Ingeniería Química y Energética, Universidad de Extremadura, España.
73. Sotelo Sancho, J. L. (2011), **Química, Industria y Sociedad**, Real Academia de Ciencias, Encuentro “Química, Industria y Sociedad”, Madrid.
74. Trees for the Future (2010), **Programa de Entrenamiento en Agroforestería**, Tercera Edición, Maryland, Estados Unidos.
http://www.plant-trees.org/resources/training%20program/spanish/Tomando%20acciones,%20extendiendo%20la%20mano_small_noexam.pdf
75. Universidad Nacional de Colombia, UNC (2010), **Cosmética Natural, una Industria con mucha esencia**, Unidad de Medios de Comunicación, Agencia de Noticias, Boletín N°490, Palmira, Colombia.

<http://www.agenciadenoticias.unal.edu.co/nc/detalle/article/cosmetica-natural-una-industria-con-mucha-esencia/>

76. Universidad Nacional de Colombia, UNC (2012), **Acueductos y Alcantarillados: Coagulación**, Dirección Nacional de Servicios Académicos Virtuales, Vicerrectoría General, Sede Manizales.

77. UNIZAR (2011), **Industria Química y Sociedad: 250 años de Historia en Común**, Boletín Informativo diario, Universidad de Zaragoza, España.

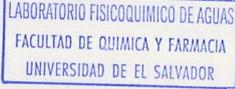
<http://www.unizar.es/actualidad/vernoticia.php?id=5534&idh=1874#>

ANEXOS

ANEXO I

ANÁLISIS FISCOQUÍMICOS REALIZADOS AL AGUA CON COAGULANTE NATURAL DE *Moringa oleífera*

ANALISIS FOTOMETRICO DEL AGUA TURBIA NO TRATADA ANTES DE
REALIZAR LA PRUEBA DE JARRAS REALIZADO EN EL LABORATORIO
FISCOQUIMICO DE AGUAS DE LA UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR

					
F - 09		UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR FACULTAD DE QUÍMICA Y FARMACIA LABORATORIO FISCOQUÍMICO DE AGUAS			
CODIGO Nº 35-12		INFORME DE RESULTADOS			
Nombre y dirección del cliente: ROCIO MARTINEZ CUBIAS. RESIDENCIAL LA GLORIA, PJE. 5ª, BLOCK A-9. MEJICANOS. SAN SALVADOR				Pág. 2 de 2	
Descripción de muestra: AGUA DE CHORRO.				Nº DE MUESTRAS: 2	
Lugar de toma de muestra: PLANTA PILOTO DE INGENIERIA QUIMICA. UES.					
Fecha de elaboración del informe: LUNES, 19 DE NOVIEMBRE DE 2012.					
Fecha de recepción de muestra: 12 DE NOVIEMBRE DE 2012			Fecha de Análisis: 16 DE NOVIEMBRE DE 2012.		
Método de Análisis: FOTOMETRICO.					
Parámetros	Identificación de la Muestra		Resultados	Norma CONACYT Agua Potable (2ª Actualización) NSO 13.07.01:08	
	CODIGO LABORATORIO	CODIGO CLIENTE			
COLOR	35-12-02	AGUA TURBIA (AT)	1,140 Pt - Co	15 Pt - Co	
Observaciones: 1. La toma de muestra estuvo a cargo del interesado.					
Advertencia: Los Resultados del informe solo se refieren a las muestras analizadas. NOTA: El informe de análisis sólo puede ser reproducido parcial o totalmente con la autorización escrita del laboratorio. Se especificara en observaciones, si la muestra fue tomada por el cliente o el laboratorio.					
FECHA DE ENTREGA: <u>23 NOV 2012</u>					
 Lidia Odette Rauda Acevedo Jefe del Laboratorio Fiscoquímico de Aguas y Analista			 Lidia Rosa Mirian Rivas Larín Analista		
					
<small>act*</small>					
<small>Final Avenida "Mártires Estudiantes del 30 de julio", Ciudad Universitaria, San Salvador, El Salvador, C.A. Teléfono Directo: 2531-2948. Correo electrónico: labfqa_ues@yahoo.com</small>					

ANALISIS FOTOMETRICO DEL AGUA TURBIA TRATADA ANTES DE REALIZAR LA PRUEBA DE JARRAS REALIZADO EN EL LABORATORIO FISICOQUIMICO DE AGUAS DE LA UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR



F - 09

**UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR
FACULTAD DE QUÍMICA Y FARMACIA
LABORATORIO FISICOQUÍMICO DE AGUAS**

CODIGO Nº 35-12		INFORME DE RESULTADOS		
Nombre y dirección del cliente: ROCIO MARTINEZ CUBIAS. RESIDENCIAL LA GLORIA, PJE. 5ª, BLOCK A-9. MEJICANOS. SAN SALVADOR				Pág. 1 de 2
Descripción de muestra: AGUA DE CHORRO.			Nº DE MUESTRAS: 2	
Lugar de toma de muestra: PLANTA PILOTO DE INGENIERIA QUIMICA. UES.				
Fecha de elaboración del informe: LUNES, 19 DE NOVIEMBRE DE 2012.				
Fecha de recepción de muestra: 12 DE NOVIEMBRE DE 2012			Fecha de Análisis: 16 DE NOVIEMBRE DE 2012.	
Método de Análisis: FOTOMETRICO.				
Parámetros	Identificación de la Muestra		Resultados	Norma CONACYT Agua Potable (2ª Actualización) NSO 13.07.01:08
	CODIGO LABORATORIO	CODIGO CLIENTE		
COLOR	35-12-01	AGUA TURBIA TRATADA (ATT)	3.4 Pt - Co	15 Pt - Co
Observaciones: 1. La toma de muestra estuvo a cargo del interesado.				

Advertencia: Los Resultados del informe solo se refieren a las muestras analizadas.

NOTA: El informe de análisis sólo puede ser reproducido parcial o totalmente con la autorización escrita del laboratorio. Se especificara en observaciones, si la muestra fue tomada por el cliente o el laboratorio.

FECHA DE ENTREGA: 23 NOV 2012

Licda. Odette Rauda Acevedo
Jefe del Laboratorio Físicoquímico de Aguas
y Analista

Licda. Rosa Mirian Rivas Larín
Analista

LABORATORIO FISICOQUIMICO DE AGUAS
FACULTAD DE QUIMICA Y FARMACIA
UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR

act*

Final Avenida "Mártires Estudiantes del 30 de julio", Ciudad Universitaria, San Salvador, El Salvador, C.A.
Teléfono Directo: 2531-2948. Correo electrónico: labfqa_ues@yahoo.com

**ANALISIS MICROBIOLÓGICO GENERAL DEL AGUA TRATADA CON
COAGULANTE DE SEMILLA DE TEBERINTO REALIZADO POR EL CENTRO DE
INVESTIGACION Y DESARROLLO EN SALUD DE LA UNIVERSIDAD DE EL
SALVADOR**



CENTRO DE INVESTIGACIÓN Y DESARROLLO EN SALUD
UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR



Ciudad Universitaria
Final 25 Avenida Norte
San Salvador, El Salvador

Telefax No: (503) 225-8826 y 225-8434
Correo: CEN_SALUD_UES@hotmail.com

INFORME DE ANÁLISIS

Nombre de la muestra: ACTPP Código: A-337
 Punto de Muestreo: Agua tratada de la Planta Piloto de Ingeniería
 Procedencia: Planta Piloto Ingeniería
 Solicitante: Rocío Kathy Martínez Cubías Fecha de emisión: 26-11-2012
 Determinación de Coliformes Totales y Fecales por el Método del Número más Probable
 Método: (NMP)
 Fecha de Muestreo: 13-11-2012 Hora de Muestreo: 4:00 p.m.
 Persona que tomó la muestra: Rocío Kathy Martínez Cubías
 Recepción de la muestra: 13-11-2012 Hora: 4:30 p.m.

Descripción: Líquido incoloro, transparente y sin olor.

DETERMINACIÓN	RESULTADOS	ESPECIFICACIONES
Bacterias coliformes totales	< 1.1 NMP / 100 mL	< 1.1 NMP / 100 mL
Bacterias coliformes fecales	< 1.1 NMP / 100 mL	< 1.1 NMP / 100 mL
<i>Escherichia coli</i>	< 1.1 NMP / 100 mL	< 1.1 NMP / 100 mL
Conteo de bacterias heterótrofas aerobias y mesófilas	< 10 UFC / mL	100 UFC / mL
Organismos patógenos	Ausencia de <i>Pseudomona aeruginosa</i>	Ausencia de organismos patógenos
NMP: Número más Probable; UFC: Unidades formadoras de Colonias		
OBSERVACIONES: Especificaciones basadas en la Norma NSO 13.07.01:08 Agua Potable. El informe corresponde a la muestra remitida el 13-11-2012		


 Lic. Amy Elieth Morán Rodríguez
 QUÍMICO-FARMACEUTICA

Fecha de análisis: 14-11-2012

ANEXO II

MODELOS MATEMATICOS PARA LA ELABORACION DE LA CURVA DE ADSORCION DEL CARBON ACTIVADO.

Descripción de la adsorción

En términos generales el proceso de adsorción consiste en la captación de sustancias solubles presentes en la interfase de una solución, pudiendo constituirse dicha interfase entre un líquido y un gas, un sólido o entre dos líquidos diferentes. El uso del término sorción se debe a la dificultad de diferenciar la adsorción física de la adsorción química, y se emplea para describir el mecanismo por el cual la materia orgánica se adhiere al CAG. El equilibrio se alcanza cuando se igualan las tasas de sorción y desorción, momento en el que se agota la capacidad de adsorción del carbón. La capacidad teórica de adsorción de un determinado contaminante por medio de carbón activo se puede determinar calculando su isoterma de adsorción.

La cantidad de adsorbato que puede retener un adsorbente es función de las características y de la concentración del adsorbato y de la temperatura. En general, la cantidad de materia adsorbida se determina como función de la concentración a temperatura constante, y la función resultante se conoce con el nombre de isoterma de adsorción.

Las moléculas en fase gas o de líquido serán unidas físicamente a una superficie, en este caso la superficie es de carbón activo. El proceso de la adsorción ocurre en tres pasos:

- **Macrotransporte:** Movimiento del material orgánico a través del sistema de macroporos del carbón activo.
- **Microtransporte:** Movimiento del material orgánico a través del sistema de microporos del carbón activo.
- **Adsorción:** Adhesión física del material orgánico a la superficie del carbón activo en los mesoporos y microporos del carbón activo

El nivel de actividad de la adsorción depende de la concentración de la sustancia en el agua, la temperatura y la polaridad de la sustancia. Una sustancia polar no puede ser eliminada o es mal eliminada por el carbón activo. Cada clase de carbón tiene su propia isoterma de adsorción.

Las fórmulas más frecuentemente empleadas para el tratamiento de los datos experimentales de las isotermas de adsorción fueron desarrolladas por Freundlich, por Langmuir, y por Brunauer, Emmet y Teller, las cuales se describen a continuación.

1. Isotherma de Freundlich

De todas las fórmulas empleadas para el tratamiento de datos experimentales de las isotermas, la más usual para describir las características de adsorción del carbón activado empleado en el tratamiento de aguas residuales es la Isotherma de Freundlich.

La isoterma de Freundlich es la siguiente:

$$\frac{X}{m} = K_f C_e^{1/n}$$

Donde:

X/m = cantidad adsorbida por peso unitario de adsorbente (carbón)

C_e = concentración de equilibrio del adsorbato en solución después de la adsorción.

K_f n = constantes empíricas.

Las constantes de la isoterma de Freundlich se determinan representando gráficamente la relación entre (x/m) y C, empleando la ecuación anterior reescrita de la siguiente forma:

$$\log \left(\frac{x}{m} \right) = \log K_f + \frac{1}{n} \log C_e$$

2. Isoterma de Langmuir

La isoterma de Langmuir se define de la siguiente manera:

$$\frac{x}{m} = ab \frac{C_e}{1 + bC_e}$$

donde:

X/m = cantidad adsorbida por peso unitario de adsorbente (carbón)

A, b = constantes empíricas

Ce = concentración de equilibrio de adsorbato en solución después de la adsorción.

La isoterma de adsorción de Langmuir se desarrolló adoptando las siguientes hipótesis:

- Existe un número fijo de puntos accesibles disponibles en la superficie adsorbente, todos los cuales poseen la misma energía
- La adsorción es reversible.

El equilibrio se alcanza cuando la velocidad de adsorción de las moléculas sobre la superficie es la misma que la velocidad de desorción de las mismas. Así pues, la velocidad a la que se lleva a cabo la adsorción es proporcional a la fuerza que la produce, que corresponde a la diferencia entre la cantidad adsorbida para una cierta concentración y la capacidad de adsorción a dicha concentración. A la concentración de equilibrio, esta fuerza es nula.

La correspondencia de los datos experimentales con la fórmula de Langmuir no significa que las hipótesis realizadas sean válidas para el sistema particular que se estudie, puesto que la no validez de la hipótesis puede traducirse en un efecto cancelatorio. Las constantes de la ecuación de Langmuir se pueden determinar dibujando $C_e/(x/m)$ frente a C_e empleando la ecuación anterior expresada de la siguiente forma:

$$\frac{C_e}{x/m} = \frac{1}{ab} + \frac{1}{a} C_e$$

3. Teoría BET

La teoría BET responde a sus autores, Brunauer, Emmett y Teller quienes desarrollaron las ideas de Langmuir para describir la adsorción multimolecular o en multicapas. El modelo para la formación de infinitas capas moleculares conduce a la bien conocida ecuación BET:

$$\frac{p}{n^2(p_o - p)} = \frac{1}{n_m^2 C} + \frac{C - 1}{n_m^2 C \left(\frac{p}{p_o}\right)}$$

donde:

n^a y n_m^a es la cantidad absorbida a la presión de equilibrio p/p_0 y la cantidad absorbida en la monocapa respectivamente.

C es una constante la que está relacionada proporcionalmente con la fortaleza de la interacción absorbente-adsorbato y puede usarse para caracterizar la forma de la isoterma BET.

La ecuación anterior da una adecuada descripción para carbones con micro, meso y macroporosos sobre un rango limitado de presión relativa, normalmente entre 0.05 y 0.3.

El área de superficie aparente BET (ABET), se calcula a través de la siguiente expresión:

$$A_{BET} = n_m^a \times N \times a_m \times 3$$

donde:

N es la constante de Avogadro.

A_m es la sección transversal de la molécula.

La aplicabilidad de la teoría BET a carbones con microporos estrechos puede tener fuertes limitaciones al asumir la adsorción en multicapa, por lo que puede ser inapropiada en poros muy estrechos. Lo que hizo que aparecieran nuevas

teorías sobre la adsorción en microporos como la ideada por Dubinin y col. Acerca del llenado del volumen de microporos, que constituye a priori una teoría más realista.

4. Teoría del llenado del volumen de microporos.

Dubinin y Radushkevich desarrollaron esta teoría basados en el concepto de curva característica y el potencial de absorción de Polanyi para describir la absorción en microporos estableciendo la relación fundamental de la teoría que es la ecuación de Dubinin-Radushkevich (DR):

$$W = W_0 \frac{A}{-(\beta E_0)^2}$$

donde:

W : el volumen de adsorbato líquido en los microporos a temperatura (T). y presión relativa (p/p_0).

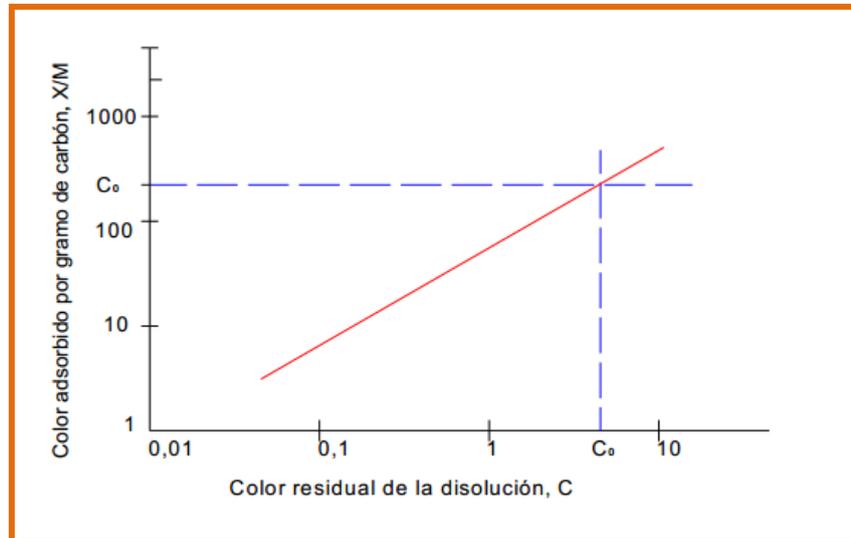
W_0 : el volumen de microporos o volumen límite de adsorción en unidad de volumen (cm^3/g) o cantidad de sustancia (mmol/g).

β : el coeficiente de similitud.

Al representar la ecuación logarítmica en un sistema de ejes coordenados, se obtiene el volumen de microporos a partir del intercepto y del volumen molar, así como la superficie de microporos partiendo del volumen de éstos, el factor de conversión a líquido del adsorbato y el área molecular del adsorbato.

Algunos autores como Lippens y de Boer, Sing K.S.W., entre otros, demostraron que la relación entre el volumen absorbido (V_a) y el volumen de la capa unimolecular o monocapa del gas (V_m) si se representa frente a la presión relativa, proporciona una curva llamada isoterma estándar. Los métodos de caracterización basados en las isotermas estándar, permiten un estudio más completo de la microporosidad del absorbente y de su área de

superficie, detectando la presencia de microporos y su volumen, así como la condensación capilar en mesoporos.



Isoterma típica de Disolución