



UNIVERSIDAD NACIONAL
AUTÓNOMA DE
MÉXICO

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

**PROGRAMA DE MAESTRÍA Y DOCTORADO EN
INGENIERÍA**

FACULTAD DE INGENIERÍA

SECADO SOLAR DE LODOS

T E S I S

PARA OBTENER EL GRADO DE:
MAESTRO EN INGENIERÍA
INGENIERÍA AMBIENTAL – AGUA

P R E S E N T A:

NATHALIA TERESA VALENCIA BONILLA

T U T O R:

M. en I. ESPERANZA RAMÍREZ CAMPEROS

2008



JURADO ASIGNADO:

Presidente: Dr. José Luis Fernández Zayas
Secretario: M. Adm.Ind Landy Irene Ramírez Burgos
Vocal: M. I. Esperanza Ramírez Camperos
1er. Suplente: Dr. Antonio Valiente Balderas
2do. Suplente: Dr. José Antonio Barrios Pérez

Lugar donde se realizó la tesis:

IMTA/DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO DE LA FACULTAD DE
INGENIERIA DE LA UNAM, JIUTEPEC - MORELOS.

LABORATORIO DE INGENIERÍA QUÍMICA, UNAM, MÉXICO DF.

ESTA TESIS CORRESPONDE A LOS ESTUDIOS REALIZADOS CON UNA BECA
OTORGADA POR LA SECRETARÍA DE RELACIONES EXTERIORES DEL
GOBIERNO DE MÉXICO

TUTOR DE TESIS

M. en I. Esperanza Ramírez Camperos

RECONOCIMIENTOS:

Al Gobierno Mexicano que a través de la Secretaría de Relaciones Exteriores me otorgó la oportunidad de realizar estos estudios.

A la Escuela Politécnica Nacional por el apoyo brindado en todo este periodo de estudios, muy especialmente al Doctor Marco Castro Delgado, al Ingeniero Marcelo Muñoz y al Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental.

Al Departamento de Hidrometeorología del Instituto Mexicano de Tecnología del Agua, por las facilidades brindadas en la asesoría técnica y préstamo de los equipos utilizados en el presente trabajo.

Al Departamento de Hidráulica, en especial a quienes conforman el laboratorio Enzo Levi, quienes nos proporcionaron el material y espacio físico de los modelos empleados en la parte experimental de este proyecto de investigación.

Al Doctor Antonio Valiente por la gran guía brindada durante el desarrollo de esta tesis.

A todos mis sinodales, quienes aportaron su experiencia para la realización de este trabajo.

CONTENIDO

INTRODUCCIÓN	1
JUSTIFICACIÓN	3
OBJETIVOS	4
OBJETIVO GENERAL	4
OBJETIVOS ESPECÍFICOS	4
CAPÍTULO I	5
1 LODOS RESIDUALES	5
1.1 CARACTERÍSTICAS DE LOS LODOS RESIDUALES	6
1.1.1 <i>Características Físicas</i>	6
1.1.2 <i>Características Químicas</i>	7
1.1.3 <i>Características Biológicas</i>	8
1.1.3.1 <i>Salmonella</i>	8
1.1.3.2 <i>Coliformes Fecales</i>	9
1.1.3.3 <i>Huevos de Helmintos</i>	9
1.2 TRATAMIENTO DE LODOS RESIDUALES.....	10
1.2.1 <i>Estabilización</i>	11
1.2.2 <i>Espesamiento</i>	11
1.2.3 <i>Acondicionamiento</i>	11
1.2.4 <i>Deshidratación</i>	12
1.2.5 <i>Tratamiento Térmico</i>	12
1.3 NORMATIVIDAD MEXICANA PARA EL CONTROL DEL USO Y DISPOSICIÓN DE LODOS RESIDUALES.....	14
1.3.1 <i>NOM-052-SEMARNAT-2005</i>	14
1.3.2 <i>NOM-004-SEMARNAT-2002</i>	18

CAPÍTULO II	21
2 TEORÍA DE SECADO.....	21
2.1 MECANISMOS QUE INTERVIENEN EN EL PROCESO	22
2.1.1 <i>Transmisión de calor</i>	23
2.1.1.1 Conducción	23
2.1.1.2 Convección.....	24
2.1.1.3 Radiación	24
2.1.2 <i>Transmisión de la masa</i>	25
2.2 ETAPAS DEL PROCESO DE SECADO	26
2.2.1 <i>Periodo de secado a velocidad constante</i>	27
2.2.2 <i>Periodo de secado decreciente</i>	28
2.2.2.1 Secado por capilaridad.....	28
2.2.2.2 Secado por difusión.....	31
2.3 FACTORES QUE INFLUYEN EN EL SECADO	32
2.3.1 <i>Temperatura del aire</i>	32
2.3.2 <i>Humedad relativa del aire</i>	33
2.3.3 <i>Velocidad del aire</i>	33
2.4 TIPOS DE SECADORES.....	33
2.4.1 <i>Secadores de bandejas</i>	35
2.4.2 <i>Secadores de túnel</i>	35
2.4.3 <i>Secador de cinta transportadora perforada</i>	35
2.4.4 <i>Secadores de tornillo sinfín</i>	35
2.4.5 <i>Secadores rotatorios</i>	36
2.4.6 <i>Secadores Instantáneos (Flash Dryer)</i>	36
CAPÍTULO III	37
3 SECADO SOLAR.....	37
3.1 ENERGÍA SOLAR	38
3.1.1 <i>Ángulos Solares</i>	39
3.1.2 <i>Medición de la Radiación Solar</i>	41
3.2 DISEÑO SOLAR	42

3.2.1	<i>Subsistema de Captación</i>	43
3.2.2	<i>Subsistema de Acumulación</i>	45
3.2.3	<i>Subsistema de Consumo</i>	45
3.3	TIPOS DE SECADORES SOLARES	46
3.3.1	<i>Sistemas Solares Activos</i>	46
3.3.2	<i>Sistemas Solares Pasivos</i>	46
CAPÍTULO IV		48
4	METODOLOGÍA	48
4.1	DESCRIPCIÓN DEL SITIO EXPERIMENTAL	48
4.2	PARÁMETROS PARA EL CONTROL DEL PROCESO.....	49
4.3	DESCRIPCIÓN DE LOS EXPERIMENTOS	51
4.3.1	<i>Secado Solar con Cubierta</i>	53
4.3.2	<i>Secado Solar en Invernadero</i>	54
4.3.3	<i>Lodo Residual</i>	55
CAPÍTULO V		59
5	ANÁLISIS E INTERPRETACIÓN DE LOS RESULTADOS.....	59
5.1	PRUEBAS PRELIMINARES	59
5.1.1	<i>Descripción de las curvas características de secado</i>	59
5.2	MODELOS EXPERIMENTALES: PRIMERA FASE	64
5.2.1	<i>Secado Solar con Cubierta (SSC1)</i>	65
5.2.1.1	Cálculos y Resultados.....	72
5.2.2	<i>Secado Solar en Invernadero (SSI1)</i>	75
5.2.2.1	Cálculos y Resultados.....	80
5.3	MODELOS EXPERIMENTALES: SEGUNDA FASE	82
5.3.1	<i>Secado Solar con Cubierta (SSC2)</i>	84
5.3.1.1	Cálculos y Resultados.....	86
5.3.2	<i>Secado Solar en Invernadero (SSI2)</i>	89
5.3.2.1	Cálculos y Resultados.....	91
5.3.3	<i>Resumen de Resultados</i>	93

CAPÍTULO VI	96
6 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	96
BIBLIOGRAFÍA	100
ANEXO I: DATOS DE CURVAS DE SECADO: PRUEBAS PRELIMINARES	104
ANEXO II: DATOS DE CURVAS DE SECADO: PRIMERA FASE	120
ANEXO III: DATOS DE CURVAS DE SECADO: SEGUNDA FASE.....	124

RESUMEN

En el proceso de depuración de aguas residuales se remueven desechos que componen los lodos residuales. Estos lodos generan una problemática en cuanto a su estabilidad, su contenido de microorganismos patógenos, su manejo y su disposición final.

Los lodos residuales constituyen un problema, en cuanto a su manejo y disposición final, debido a la gran cantidad de contenido de agua que poseen y al volumen generado en el proceso de depuración de aguas residuales. Dado que las actuales tecnologías utilizadas para el tratamiento de estos lodos requieren elevadas cantidades de energía, la presente investigación ha tomado en consideración el utilizar como fuente alternativa de energía la radiación solar y analizar su beneficio en la operación de secado del lodo, tanto en velocidad de secado como en el proceso de desinfección del lodo residual. Para tal efecto se han montado dos modelos basados en estudios previos en el tema: Secado Solar con Cubierta y Secado Solar en Invernadero, los cuales fueron estudiados en dos fases experimentales (invierno y verano).

Las condiciones atmosféricas bajo las cuales trabajaron los modelos durante el proceso de secado fueron monitoreadas por una estación meteorológica automática, mientras que en laboratorio se determinó la variación diaria del contenido de sólidos y coliformes fecales en el lodo residual. Adicionalmente se determinó el contenido de Huevos de Helmintos y *Salmonella*.

Con los resultados obtenidos se determinó que el modelo de secado solar con cubierta presentó mejor desempeño, tanto en velocidad de secado solar como en la disminución de microorganismos patógenos.

Palabras claves: Secado solar, Lodos residuales, Desinfección.

ABSTRACT

In the wastewater treatment process contaminants are removed, which are essentially composed of sludge. The principal problems associated with sludge include instability, pathogens, management and final disposal.

The problem of management and final disposal of sludge results from its high water content and the large volume of material generate in the wastewater treatment process. Considering that current sludge treatment technologies require large amounts of energy, this research uses solar radiation as an alternative energy source and analyses its benefits in the sludge drying process with respect to drying rates and disinfection.

In this regard, two physical models were constructed based in previous studies conducted in this field: Covered Solar Dryer and Greenhouse Solar Dryer, which were studied in two experimental phases (winter and summer).

The atmospheric conditions under which the models operated were monitored by an automatic meteorological station, while, the daily solids and faecal coliforms content in the sludge were determinate in the laboratory. Additionally, the content of Helminth ova and *Salmonella* was determined.

Key words: Solar drying, wastewater sludge, disinfection.

INTRODUCCIÓN

El tratamiento del agua residual generada por el hombre es de vital importancia a nivel mundial una vez comprendido que el recurso hídrico no es infinito y que el requerimiento de agua para las diferentes actividades humanas no será abastecido por las fuentes de agua limpia todavía existentes, menos aún cuando estas están siendo contaminadas de forma alarmante.

Las plantas de tratamiento de agua residual se han venido desarrollando para tratar grandes caudales de descargas de procesos industriales y municipales, resolviendo así en gran medida, una infinidad de problemas en cuanto a la calidad del agua proveniente del drenaje, que por lo general es descargada a un cuerpo de agua. Sin embargo, si bien se recupera una buena cantidad de agua para reuso, paralelamente se genera una gran problemática: como resultado del tratamiento del agua se produce un volumen muy grande de lodos residuales constituidos principalmente por todos aquellos desechos de los sedimentadores de la planta.

Dado que la generación de lodos es importante, aproximadamente de 1,1 a 1,5 m³ de lodo por habitante al año en un sistema de lodos activados convencional (Andreoli, 1999), su manejo es costoso (gestión y transporte), llegando a ser preocupante en cuestiones de disposición final.

Para resolver en gran medida esta problemática se necesita reducir al mínimo el volumen de lodos, y puesto que estos contienen entre 80 y 95% de agua (Cota, 2006), existen diferentes metodologías para el efecto. Dependiendo del método aplicado y de la inversión realizada, se puede llegar a lodos con un contenido de agua de 65 a 75% luego de la deshidratación, y conseguir una reducción mayor del contenido de agua mediante el secado, disminuyendo así significativamente su volumen.

Actualmente se proponen diferentes tecnologías de secado: utilizando calefactores, secado por convección o por contacto, centrífugas, filtros prensa, entre otras, cuyo fundamento en todos los casos es la evaporación del agua de los lodos. Sin embargo, los altos costos generados por el requerimiento de energía eléctrica para su funcionamiento, los hacen poco viables en zonas de escasos recursos económicos.

Una de las alternativas para reemplazar la utilización de energía eléctrica, requerida para los métodos más comunes de secado, es el uso de energía solar.

El secado solar ha sido estudiado principalmente en países Europeos, empresas como Degrémont (Héliantis) y Thermo-System, esta última con la colaboración de la Universidad de Hohenheim en Alemania, han desarrollado tecnologías para secado solar de lodos residuales llegando a implantar un proceso de secado de lodo residual en estructuras tipo invernadero completamente mecanizadas, controladas por microprocesadores y monitoreadas las 24h con un sistema automatizado de control de temperatura y humedad, obteniendo como resultado, un producto final con las características esperadas por el cliente y su inversión, dentro de lo posible claro.

El secado solar implica un ahorro importante en costos energéticos comparado con un sistema de secado convencional (Horn, 2005), obviamente implementar una tecnología automatizada (como la descrita anteriormente) en nuestro medio, implica alto costo de inversión, operación y mantenimiento, traduciéndose en la no factibilidad de su uso. Sin embargo, si se pueden reducir los costos de esta tecnología ya puesta en marcha, el secado solar de lodos se convertiría en una alternativa competitiva a implementarse en las plantas de tratamiento de agua residual.

El presente trabajo de investigación propone el estudio de dos modelos experimentales de secado solar: Secado Solar con Cubierta y Secado Solar en Invernadero.

JUSTIFICACIÓN

En países en vías de desarrollo el aspecto económico cumple un papel fundamental en cuestiones de decisión de obras públicas, dentro de la aprobación o no de un proyecto y su posterior construcción y, por otro lado, las grandes empresas buscan preferentemente buenas soluciones a bajo costo para el tratamiento de sus aguas y lodos residuales.

Tecnologías basadas en energía renovable tienen actualmente una buena acogida, tanto en el sentido ecológico como pensando en reducir costos referentes a la energía requerida para el proceso, por lo que introducirlas y difundirlas no constituiría problemas en cuanto al aspecto económico ni social.

Teniendo en cuenta que la República Mexicana y un gran número de países Latinoamericanos tienen zonas con condiciones climáticas favorables para pensar en el secado solar, es preciso aprovechar este recurso, experimentar sobre él y establecer la posibilidad de tener una buena eficiencia sin recurrir a equipos sofisticados. Adicionalmente, la radiación solar es un desinfectante natural por lo que también se debe monitorear la inactivación de patógenos contenidos en los lodos residuales (White, 1985).

El presente trabajo propone una investigación en donde se determine cuán factible es utilizar la energía solar para secar lodo residual aplicando volteo manual del material, dando seguimiento a los tiempos de secado y estableciendo como parámetro adicional de monitoreo, el conteo de microorganismos patógenos: huevos de helmintos, coliformes fecales y *salmonella*.

OBJETIVOS

La problemática de los lodos residuales consiste principalmente en el volumen generado en el proceso de tratamiento de las aguas residuales, y su disposición final.

El lodo residual, al tener generalmente alrededor del 90% de contenido de humedad, puede someterse a un proceso de evaporación para lograr una reducción importante de su volumen, procurando que el tiempo utilizado para el efecto sea el menor posible, sin incrementar en demasía los costos de operación de la planta de tratamiento.

En México, el destino final de la mayor parte de los lodos residuales, son los rellenos sanitarios, un 78% es dispuesto en algún lugar cercano a la planta donde es generado (incluyendo el drenaje), mientras que, un 22% es utilizado como acondicionador del suelo o relleno superficial (Castrejón, 2002).

Los lodos residuales, debido a su composición orgánica, son considerados para uso benéfico en suelos de cultivo, sin embargo, debe cumplir con algunos requisitos establecidos por la normatividad correspondiente, donde se incluye la reducción de microorganismos patógenos. Considerando estos puntos, se plantea como objetivos del presente trabajo de investigación lo siguiente:

Objetivo General

Establecer la velocidad de secado de lodos residuales municipales en función de las condiciones ambientales de la zona.

Objetivos Específicos

- ✦ Evaluar la reducción de volumen del lodo sometido al proceso de secado solar.
- ✦ Evaluar la capacidad del proceso para obtener un material que cumpla con la norma mexicana vigente (NOM-004-SEMARNAT-2002) y que pueda ser utilizado sin riesgos para el ambiente y la salud humana.

CAPÍTULO I

1 LODOS RESIDUALES

Los lodos residuales son generados dentro del proceso de depuración del agua residual en una planta de tratamiento (Figura 1.1), y constituyen todos aquellos desechos removidos del agua residual en dicha acción. Pueden ser líquidos o semisólidos, con un contenido de sólidos variable de 0.25 a 12% en peso (Metcalf, 2006).

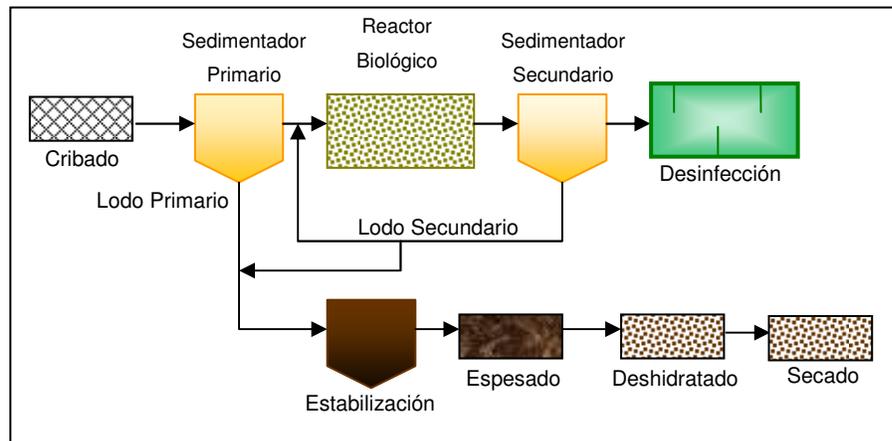


Figura 1.1.- Tren de tratamiento biológico para aguas residuales

De acuerdo con el tren de tratamiento utilizado los lodos generados se clasifican en:

- ✦ *Primarios.*- Aquellos que se extraen de los sedimentadores primarios. Sus principales componentes son: arena fina, material inorgánico y sólidos orgánicos.
- ✦ *Secundarios.*- Se refiere a los lodos en exceso generados en tratamiento secundario biológico, producto de la conversión de desechos solubles dentro del tratamiento y partículas que escaparon al tratamiento primario. Consisten en lodos biológicos, compuestos principalmente por materia orgánica.
- ✦ *Mixtos.*- Son la combinación de lodos primarios y secundarios, poseen propiedades aproximadamente proporcionales a la composición de cada tipo de lodo que lo conforma.

- ✦ *Químicos*.- Son el resultado de agregar compuestos químicos como parte del tratamiento del agua residual para mejorar la remoción de sólidos suspendidos o precipitar sustancias.

1.1 Características de los Lodos Residuales

Los lodos residuales de acuerdo con su naturaleza, presentan diversas características que determinan la capacidad de estos a ser reutilizados, así como también el éxito de los tratamientos a los cuales va a ser sometido antes de su disposición final.

1.1.1 Características Físicas

Un lodo residual es caracterizado físicamente considerando los siguientes factores:

- ✦ Olor
- ✦ Color
- ✦ Apariencia (grasiento, gelatinoso, floculento, etc.)
- ✦ Contenido de Humedad
- ✦ Contenido de Sólidos (totales, fijos, volátiles, suspendidos y sedimentables)
- ✦ Velocidad de sedimentación de los lodos
- ✦ Densidad
- ✦ Tamaño de la partícula
- ✦ Compresibilidad
- ✦ Temperatura

Una de las características físicas más importantes de los lodos residuales es el contenido de humedad, ya que mientras más alto sea este valor, mayor dificultad presenta el lodo en su manejo y almacenamiento, y por lo tanto se necesitará una mayor asignación de recursos para su tratamiento y disposición final.

El contenido de humedad usualmente se lo traduce a concentración de sólidos en el lodo, estas concentraciones son variables dependiendo del tipo de lodo, tal y como se muestra en la tabla 1.1.

Tabla 1.1.- Concentración de sólidos de acuerdo al tipo de lodo

Tipo de lodo	Concentración de sólidos % de sólidos (peso seco)	
	Intervalo	Concentración típica
Primario	4.0 – 10.0	5.0
Primario + purga de lodo activado.	3.0 – 8.0	4.0
Primario + purga de filtro percolador.	4.0 – 10.0	5.0
Primario avanzado (con cloruro férrico).	0.5 – 3.0	2.0
Primario avanzado (con cal en baja concentración).	2.0 – 8.0	4.0
Primario avanzado (con cal en alta concentración).	4.0 – 16.0	10.0
Lodo activado convencional (después del sedimentador primario).	0.5 – 1.5	0.8
Filtro percolador (después del sedimentador primario).	1.0 – 3.0	1.5
Disco biológico (Después de sedimentación primaria).	1.0 – 3.0	1.5

Fuente: Adaptación Metcalf & Eddy “Wastewater Engineering Treatment Disposal and Reuse”

1.1.2 Características Químicas

Las características químicas de los lodos residuales varían dependiendo de la calidad de las aguas domésticas y el tipo de industrias que estén conectadas a la red de alcantarillado, así como también de aquellas descargas clandestinas de aguas residuales provenientes de las actividades laborales de la comunidad, del tipo de tratamiento de estos efluentes y del acondicionamiento y posterior tratamiento de los lodos resultantes del proceso.

Un lodo residual es caracterizado químicamente de acuerdo a:

- ⊕ Parámetros inorgánicos (arena, arcilla, materia mineral en suspensión, etc.)
- ⊕ Parámetros orgánicos (carbono, aceites, grasas, etc.)
- ⊕ Metales pesados
- ⊕ Nutrientes
- ⊕ Contenido de materia orgánica (DBO, DQO, COT)
- ⊕ Contenido de tóxicos orgánicos.
- ⊕ Carga superficial de la partícula y su hidratación

✦ Conductividad eléctrica (concentración de sales)

✦ pH

1.1.3 Características Biológicas

Los lodos residuales, por su naturaleza, están constituidos de diversos tipos de microorganismos en altas concentraciones: bacterias, virus, y parásitos. Del mismo modo en que varían las características químicas del lodo residual, sus características biológicas también son afectadas por los factores anteriormente mencionados. En el aspecto biológico, adicionalmente se considera, como factor incidente en la variación de sus características, el estado de salud de la población y el tamaño de esta.

La caracterización biológica es importante ya que, si bien un lodo sometido a diferentes tipos de tratamiento presenta una disminución en la concentración de microorganismos patógenos, esto no implica necesariamente que no constituyan un riesgo para la salud pública.

El lodo residual se lo caracteriza en base a la identificación de microorganismos patógenos que éste posea. Al existir un alto número de especies distintas de microorganismos, se ha tomado patógenos representativos, ya sea por su resistencia, cantidad o grado de preocupación y afectación como en el caso de los virus.

Los patógenos representativos son: *Salmonella sp.* (especialmente *S. Typhi*), Coliformes Fecales, Huevos de Helmintos, y en el caso de los virus de mayor preocupación el de la hepatitis A y los calcivirus (Taller Iberoamericano-Campos, 2005).

1.1.3.1 Salmonella

La *Salmonella* pertenece a la familia Enterobacteriaceae, género *Salmonella*. Es un bacilo gramnegativo aerobio y anaerobio facultativo, puede producir ácido a partir de la glucosa.

Los microorganismos pertenecientes al grupo *Salmonella* son gérmenes patógenos causantes de enfermedades en humanos y animales. Existen distintos serotipos, igualmente patógenos para humanos y animales por lo que desde el punto de vista de salud pública es importante su identificación final. La infección causada por este patógeno lleva el nombre de Salmonellosis y puede producir síntomas tales como fiebre, náuseas, vómito, dolor abdominal y diarrea (Moller, 2004).

La determinación de presencia de *Salmonella sp.* es buena representación de la reducción de otros patógenos bacterianos por tener un comportamiento similar a la mayoría de microorganismos que son igual de resistentes (Campos, 2005).

1.1.3.2 Coliformes Fecales

En general, los coliformes son una familia de bacterias que se encuentran comúnmente en las plantas, el suelo y los animales, incluyendo a los humanos. Las bacterias coliformes, en su mayoría, se encuentran en abundancia en la capa superficial del agua o en los sedimentos del fondo, por lo que los lodos residuales presentan una gran cantidad de estas bacterias.

Debido a la amplia diversidad del grupo coliformes, este ha sido dividido en dos grupos: coliformes totales y coliformes fecales. Los coliformes fecales y *E. coli* en particular, se han seleccionado como indicadores de contaminación fecal debido a su relación con el grupo tifoide-paratifoide y a su alta concentración en diferentes tipos de muestras. Los coliformes fecales son un subgrupo de los coliformes totales, cuya característica es que son capaces de fermentar la lactosa a 44.5 °C. (Marín, 2005)

1.1.3.3 Huevos de Helmintos

Los helmintos representan un elevado riesgo a la salud humana debido a que son altamente persistentes en el agua contaminada (huevos embrionados o larvas) e incluso en los lodos crudos, por lo que al ser estos últimos utilizados como acondicionador del suelo representan una fuente directa de contaminación, dando lugar a enfermedades gastrointestinales.

Se toman los huevos de helmintos (su presencia y viabilidad) como parásitos representativos debido a su resistencia. (Campos, 2005).

1.2 Tratamiento de Lodos Residuales

Como se había mencionado en párrafos anteriores, los lodos residuales poseen un alto contenido de humedad y grandes concentraciones de microorganismos patógenos, por lo que las tecnologías de tratamiento de los lodos residuales van encaminadas a resolver esta problemática.

Básicamente, el tren de tratamiento de los lodos residuales comprende el control de olor y reducción de microorganismos patógenos mediante la estabilización y la remoción de agua a través de los procesos de espesamiento, acondicionado, deshidratación y secado, buscando como resultado la reducción del volumen de los lodos para su mejor manejo y disposición.

Una de las características importantes del lodo residual que incide en el proceso de su tratamiento es la forma en la que el agua se encuentra combinada o ligada con las partículas sólidas de éste. Clasificando el agua en este sentido, se puede hablar de:

- a) *Agua intermedia o intersticial.*- Representa alrededor de 70% del volumen del lodo y para eliminarla es suficiente la fuerza de gravedad.
- b) *Agua de adhesión y capilar.*- Representa aproximadamente el 22% del volumen del lodo y para eliminarla se necesita la aplicación de fuerzas físicas, campos de gravedad reforzados artificialmente en centrífugas, sobrepresión o vacío en filtros.
- c) *Agua interna y de adsorción.*- Se encuentra como en un 8% del volumen del lodo y para eliminarla se debe destruir previamente las paredes celulares, a través de degradación biológica y/o evaporación mediante calentamiento ligero, calentamiento intenso o congelamiento.

Actualmente existen un sinnúmero de tecnologías aplicables para el tratamiento de lodos residuales, las cuales se utilizan de acuerdo a la calidad de lodo final requerido y costos de implementación, operación y mantenimiento, principalmente.

1.2.1 Estabilización

Los lodos residuales debido a su composición resultan desagradables al olfato, generalmente contienen un alto contenido de patógenos y gran cantidad de materia orgánica. El proceso de estabilización del lodo se lleva a cabo para conseguir eliminar estos olores, reducir la presencia de patógenos e inhibir, reducir o eliminar su potencial de putrefacción (Metcalf, 2006).

Los métodos empleados para este fin contemplan:

- ✦ Digestión Aerobia
- ✦ Digestión Anaerobia
- ✦ Procesos Físico-Químicos
- ✦ Composteo
- ✦ Vermicomposteo

1.2.2 Espesamiento

Este proceso es también llamado concentración, cuyo objetivo es aumentar el contenido de sólidos en el lodo, eliminando el agua intersticial que éste contiene y reduciendo considerablemente su volumen. El espesado suele llevarse a cabo por medios físicos que incluyen:

- ✦ Espesado por gravedad
- ✦ Espesado con Flotación por Aire Disuelto
- ✦ Filtros Banda por Gravedad
- ✦ Centrifugación

1.2.3 Acondicionamiento

Dadas las características del agua combinada con las partículas sólidas del lodo residual mencionadas con anterioridad, muchas veces los procesos de espesado y desaguado no funcionan adecuadamente, por lo que es necesario brindar un acondicionamiento previo al lodo para mejorar sus características de deshidratación.

El acondicionamiento modifica la estructura de la relación agua-sólido para liberar el líquido e incrementar la velocidad de escape del agua desde la matriz del lodo (Fall, 2005).

Existen diversas formas de lograr este objetivo, entre las más comúnmente utilizadas están la adición de reactivos químicos: cloruro férrico, cal, alúmina y polímeros orgánicos; y el tratamiento térmico. Otros métodos menos utilizados son: congelación, radiación, uso de materiales de soporte: pulpa de papel y cenizas y elutriación (operación física de lavado), como ejemplos.

1.2.4 Deshidratación

En este proceso se procura reducir al máximo el agua de adhesión y capilar contenida en el lodo, con lo que se lograría que éste se transforme en una mezcla fácil de apilar, sin que pierda su forma; además de reducir sustancialmente su volumen. Existen dos métodos de deshidratación:

- ✦ Métodos Estáticos: lechos de secado, lagunas de lodo líquido
- ✦ Métodos Mecánicos: deshidratador centrífugo, filtración al vacío, filtro banda, filtro prensa.

1.2.5 Tratamiento Térmico

El tratamiento térmico, generalmente, va precedido de un sistema de deshidratación y se usa para reducir la humedad del lodo, generalmente cuando en su mayoría es agua interna y de adsorción.

Mediante la aportación de calor auxiliar, se calientan los lodos durante periodos cortos de tiempo bajo una determinada presión, con el fin de cambiar la estructura de su materia. En este proceso los lodos pueden ser llevados hasta la incineración. Algunas de las opciones de tratamiento térmico para lodos residuales son:

- ✦ Sistemas de secado instantáneo (flash dryers)
- ✦ Sistemas de secado por pulverización

- ✦ Sistemas de secado rotativos
- ✦ Sistemas de secado de pisos múltiples
- ✦ Evaporadores de efecto múltiple

Los resultados obtenidos referentes al contenido de agua final del lodo residual varían en porcentaje de acuerdo al tipo de agua, al sistema y tren utilizado. Así, en resumen, la tabla 1.2 muestra los valores esperados correspondientes a diversos procesos.

Tabla 1.2.- Procesos de eliminación de agua en lodos residuales

Proceso	Fuerzas Físicas a Aplicar	Contenido de Agua en el Lodo
Espesamiento	Gravedad, Flotación	85 – 95%
Deshidratación	Sobrepresión o vacío, campos de gravedad reforzados artificialmente	60 – 85%
Secado	Para lodo tratado biológicamente: evaporación natural, calentamiento ligero.	20 – 60 %
	Para lodo no tratado: calentamiento intenso o congelamiento	0 – 20 %

Fuente: Taller Iberoamericano “Tratamiento, disposición y aprovechamiento de lodos residuales”, 2005

En consecuencia, la elección del proceso al cual será sometido el lodo residual dependerá del contenido de humedad deseado en el producto y del recurso económico destinado para el efecto.

1.3 Normatividad Mexicana para el control del uso y disposición de lodos residuales

Los lodos residuales, de acuerdo a su procedencia, poseen características que pueden ser de gran afectación a la salud humana: generalmente un alto contenido de patógenos y metales pesados lo transforman en un residuo que debe ser manejado con sumo cuidado.

El tratamiento al que se someten los lodos residuales les brinda una determinada calidad de acuerdo a la tecnología empleada y, en base a esa calidad, se designa su mejor aprovechamiento y disposición.

En la República Mexicana, la Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales regula el manejo y disposición de estos residuos en dos normas principalmente:

- ✦ NOM-052-SEMARNAT-2005.
- ✦ NOM-004-SEMARNAT-2002

1.3.1 NOM-052-SEMARNAT-2005

La Nom-052-SEMARNAT-2005 establece las características, el procedimiento de identificación y los listados de residuos peligrosos.

Un residuo es considerado peligroso si presenta un riesgo para el equilibrio ecológico, el ambiente y la salud humana en general, debido a sus características corrosivas, reactivas, explosivas, inflamables, tóxicas y biológico infecciosas; y su forma de manejo.

De acuerdo a esta normativa un residuo es corrosivo cuando una muestra representativa presenta cualquiera de las siguientes propiedades:

- ✦ Un pH menor o igual a 2,0 o mayor o igual a 12,5, sea la muestra líquida o una sólida mezclada con agua destilada.

- ⊕ Si es un líquido no acuoso capaz de corroer el acero al carbón, tipo SAE 1020, a una velocidad de 6,35 milímetros o más por año a una temperatura de 328 K (55 °C).

Es reactivo si:

- ⊕ Es un líquido o sólido que después de ponerse en contacto con el aire se inflama en un tiempo menor a cinco minutos sin que exista una fuente externa de ignición.
- ⊕ Cuando se pone en contacto con agua reacciona espontáneamente y genera gases inflamables en una cantidad mayor de 1 litro por kilogramo del residuo por hora.
- ⊕ En contacto con el aire y sin una fuente de energía suplementaria genera calor.
- ⊕ Posee en su constitución cianuros o sulfuros liberables, que cuando se expone a condiciones ácidas genera gases en cantidades mayores a 250 mg. de ácido cianhídrico por kg. de residuo o 500 mg. de ácido sulfhídrico por kg. de residuo.

Es explosivo cuando es capaz de producir una reacción o descomposición detonante o explosiva. Esta característica debe estar basada en el conocimiento del origen o composición del residuo, la norma establece que la muestra no sea sometida a pruebas de laboratorio.

Si el extracto PECT (Procedimiento de Extracción de Constituyentes Tóxicos) contiene cualquiera de los constituyentes tóxicos listados en la tabla 2 de la Norm-052-SEMARNAT-2005 en una concentración mayor a los límites ahí señalados, se considera que el residuo es tóxico al ambiente.

De la misma forma la norma caracteriza a un residuo como inflamable si cumple con lo siguiente:

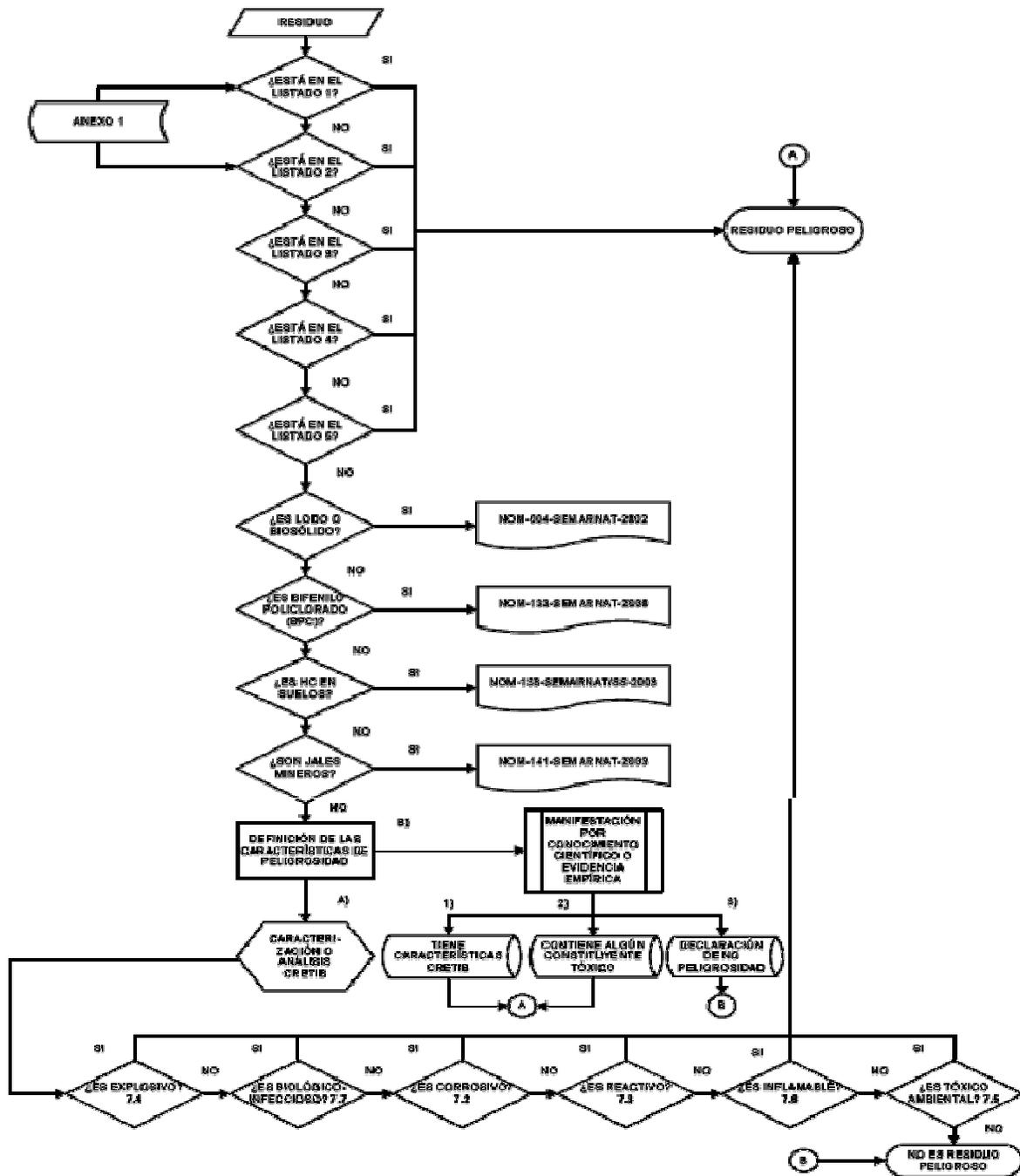
- ⊕ Contiene sólidos en solución o suspensión que tiene un punto de inflamación inferior a 60.5 °C, medido en copa cerrada (excluyendo a las soluciones acuosas que contengan un porcentaje de alcohol, en volumen, menor a 24%).
- ⊕ No es líquido y es capaz de provocar fuego por fricción, absorción de humedad o cambios químicos espontáneos a 25 °C.
- ⊕ Es un gas que, a 20 °C y una presión de 101,3 kPa., arde cuando se encuentra en una mezcla del 13% o menos por volumen de aire, o tiene un rango de inflamabilidad con aire de cuando menos 12% sin importar el límite inferior de inflamabilidad.
- ⊕ Es un gas oxidante que puede causar o contribuir más que el aire, a la combustión de otro material.

Y, por último, se considera un residuo biológico infeccioso a la sangre y sus componentes, a las cepas y cultivos de agentes biológico infecciosos, los tejidos, órganos u otras partes extraídas en intervenciones quirúrgicas, muestras biológicas (excluyendo orina y excremento), entre otros residuos enunciados en la Nom-087-ECOL-SSA1-2002 a la que hace referencia en este punto la Nom-052-SEMARNAT-2005.

Como parte de la Nom-052-SEMARNAT-2005 se presentan cinco listados de clasificación de los residuos peligrosos: por fuente específica, por fuente no específica, tóxicos agudos, tóxicos crónicos y por tipo de residuo (sujeto a condiciones particulares de manejo). Se determina la peligrosidad del residuo siguiendo el diagrama de flujo mostrado en la figura 1.2.

Revisando los listados de la norma y siguiendo la figura 1.2 se puede apreciar la existencia varios tipos de lodos residuales que se encuentran regulados según su procedencia. Sin embargo, para el caso que es de nuestro interés específico (lodos residuales municipales), la presente norma nos remite a revisar la Nom-004-SEMARNAT-2002.

Figura 1.2.- Diagrama de flujo del procedimiento para identificar la peligrosidad de un residuo peligroso.



Fuente: Nom-052-SEMARNAT-2005

1.3.2 NOM-004-SEMARNAT-2002

Para el caso de disposición final de biosólidos, la normatividad aplicada se detalla en la *Norma Oficial Mexicana NOM-004-SEMARNAT-2002, Protección Ambiental.- Lodos y biosólidos, especificaciones y límites máximos permisibles de contaminantes para su aprovechamiento y disposición final.*

Esta norma establece las especificaciones y los límites máximos permisibles de contaminantes en los lodos y biosólidos resultado del desazolve de los sistemas de alcantarillado municipal, de la operación de plantas potabilizadoras y plantas de tratamiento de aguas residuales, con el fin de minimizar la contaminación de la atmósfera, de las aguas nacionales y de los suelos.

La Nom-004-SEMARNAT-2002 clasifica a los biosólidos en: excelente y bueno en función de su contenido de metales pesados; y en clase: A, B y C en función de su contenido de patógenos y parásitos.

En las tablas 1.3 y 1.4 se presentan los límites máximos permisibles para metales pesados y para patógenos y parásitos, respectivamente.

Tabla 1.3.- Límites máximos permisibles para metales en biosólidos

Contaminantes (determinados en forma total)	Excelente mg/kg de lodo en base seca	Bueno mg/kg de lodo en base seca
Arsénico	41	75
Cadmio	39	85
Cromo	1,200	3,000
Cobre	1,500	4,300
Plomo	300	840
Mercurio	17	57
Níquel	420	420
Zinc	2,800	7,500

Tabla 1.4.- Límites máximos permisibles para patógenos y parásitos en lodos y biosólidos.

CLASE	PATÓGENOS		PARÁSITOS
	Coliformes Fecales NMP/g	<i>Salmonella</i> sp NMP/g	Huevos de Helmintos/g
A	Menor que 1,000	Menor que 3	Menor de 1 (a)
B	Menor que 1,000	Menor que 3	Menor de 10
C	Menor que 2,000,000	Menor que 300	Menor de 35

(a) Viables

El aprovechamiento que se pueden dar a los biosólidos que cumplen con los límites máximos permisibles establecidos, se establece en función del tipo (metales) y clase (patógenos-parásitos), como se describen en la tabla a continuación:

Tabla 1.5.- Aprovechamiento de biosólidos

TIPO	CLASE	APROVECHAMIENTO
EXCELENTE	A	<ul style="list-style-type: none"> • Usos urbanos con contacto público directo durante su aplicación. • Los establecidos para clase B y C
EXCELENTE O BUENO	B	<ul style="list-style-type: none"> • Usos urbanos sin contacto público directo durante su aplicación. • Los establecidos para clase C
EXCELENTE O BUENO	C	<ul style="list-style-type: none"> • Usos forestales. • Mejoramientos de suelos. • Usos agrícolas

Adicionalmente a los criterios biológicos y de metales pesados, la norma específica que para el aprovechamiento del lodo, éste debe tener un contenido de humedad hasta el 85% y que su masa de sólidos volátiles sea reducida por lo menos un 38%.

Esta norma también hace referencia al tiempo que pueden ser almacenados los lodos que cumplen con los límites establecidos; así como también su manejo y mezclado, junto con las condiciones que deben cumplir los espacios de almacén.

En lo correspondiente a los anexos de esta norma, se indican en ellos opciones para la reducción de vectores, métodos de muestreo y métodos de cuantificación de los parámetros requeridos para el cumplimiento de la norma, tales como:

- ✦ Coliformes Fecales
- ✦ *Salmonella sp.*
- ✦ Huevos de Helminetos
- ✦ Metales Pesados

En resumen, los lodos residuales por su origen, requieren una etapa de tratamiento para reducir su volumen y minimizar los impactos negativos que tienen en el medio.

Debido a su gran volumen es necesario establecer una forma de aprovecharlos, es decir, hacer uso de ellos o disponerlos de forma segura, de tal manera que no constituyan una amenaza para la salud de la población, ni fuente de contaminación de nuestros recursos naturales.

Las normas que rigen en la República Mexicana, establecen restricciones en cuanto al uso de los lodos residuales, por lo que la tecnología debe estar encaminada al cumplimiento de la normativa local, así como también a brindar una cierta valorización en el mercado a este residuo para que quienes estén a cargo de su manejo tengan como incentivo el aspecto económico.

Existen ya varias tecnologías instauradas en nuestro medio para este propósito, sin embargo, muchas de ellas necesitan altas inversiones para su instalación y mantenimiento, lo que lleva a que muchas de las instalaciones se abandonen o simplemente no se construyan. Mientras menores sean los costos y mejor el producto final, mayor acogida tendrá determinada tecnología.

CAPÍTULO II

2 TEORÍA DE SECADO

Desde tiempos remotos, el hombre ha recurrido a la utilización de diferentes tipos de energía para generar calor y poder utilizar éste para su beneficio. Uno de estos beneficios es el secado de diferentes productos: desde vestimenta hasta químicos industriales.

En general, el hombre busca secar sus productos debido a que (Montero, 2005):

- ✦ Facilita la manipulación del producto en un proceso posterior.
- ✦ Permite la utilización satisfactoria del producto final.
- ✦ Posibilita la conservación, almacenamiento y transporte de un material
- ✦ Reduce los costos de almacenamiento, transporte, conservación, etc.
- ✦ Aumenta la capacidad de las instalaciones del proceso.
- ✦ Obtiene mejoras medioambientales directas e indirectas

El secado es una operación unitaria en la que se remueve el líquido de un material a través de la aplicación de calor: la humedad contenida en el sólido se transfiere por evaporación hacia la fase gaseosa, trasladándola a un medio no saturado.

Para explicar un poco más a fondo este fenómeno, se ponen a consideración definiciones de algunos parámetros:

Humedad en base seca

Indica el contenido de humedad de un material como kilogramo de agua/kilogramo de sólido seco.

Humedad en base húmeda

Expresa la humedad de un sólido mojado como kilogramo de agua/kilogramo de sólido húmedo.

Humedad de Equilibrio

Es la mínima humedad que puede tener un sólido que está en contacto con aire húmedo.

Humedad Libre

Es aquella que resulta de la diferencia entre la humedad total y la humedad de equilibrio, y corresponde a la cantidad de líquido removible a una temperatura y humedad determinadas.

Humedad Crítica

Se presenta cuando el movimiento del líquido a la superficie del sólido a secarse es insuficiente para reemplazar el líquido que está siendo evaporado

Temperatura de bulbo seco

La temperatura de bulbo seco corresponde a la temperatura ambiente, es decir la temperatura del aire. Se la puede medir con un termómetro de mercurio.

Temperatura de bulbo húmedo

Es la temperatura de equilibrio dinámico obtenida por una superficie de agua cuando la velocidad de transferencia de calor es igual a la transferencia de masa que se aleja de la superficie (Perry, 1984).

Entalpía

Llamada también contenido de calor. Es la cantidad de energía de un sistema termodinámico que éste puede intercambiar con su entorno.

2.1 Mecanismos que intervienen en el proceso

Existen muchos mecanismos posibles de secado, pero aquellos que controlan el secado de una partícula dependen de su estructura y condiciones de secado.

El secado de un sólido consta de un fenómeno complejo que involucra el transporte de calor hacia dentro del material y el transporte de agua hacia el exterior, es decir la transferencia simultánea de calor y masa.

2.1.1 Transmisión de calor

En un principio la mayor parte de la energía que aporta el aire es usada para evaporar el agua contenida en el sólido, con lo que se supone que la temperatura de bulbo húmedo permanece constante durante el proceso (Valiente, 2002). En estas condiciones debe cumplirse que:

$$m_a(\Delta h^*_2 - \Delta h^*_1) \approx m_s \Delta W_s c_w(T_h) T_h \quad (2.1)$$

Donde:

$\Delta h^*_2 - \Delta h^*_1$ = variación de entalpía específica que sufre el aire

$m_s \Delta W_s$ = agua evaporada del sólido e incorporada al aire

$c_w(T_h)$ = calor específico del agua líquida a la temperatura del termómetro húmedo.

Esta transferencia de energía en forma de calor del ambiente al material depende de las condiciones externas de temperatura, humedad, flujo del aire, presión, área de exposición y tipo de secador empleado. Los mecanismos de transferencia conocidos son: por conducción, convección o mediante radiación.

2.1.1.1 Conducción

La transferencia de calor por conducción se efectúa a través de la interacción molecular. A medida que una partícula incrementa su nivel de energía por motivo de una elevación en su temperatura, esta imparte la energía adquirida a las partículas adyacentes que tienen un nivel de energía menor. Este mecanismo es característico de sistemas conformados por moléculas de líquido, sólido o gas.

De igual manera, la conducción presenta transmisión de calor por medio de electrones libres, este mecanismo es propio en sólidos metálicos. La capacidad que

tienen los sólidos de conducir calor varía en proporción a la cantidad de electrones libres, es por ello que los metales puros son mejores conductores de calor. (Welty, 1994)

2.1.1.2 Convección

Por convección, la transferencia de calor se produce debido al intercambio de energía que ocurre entre una superficie y un fluido adyacente. En este caso, la circulación de aire se produce por la diferente densidad que ocasiona la variación de temperatura en determinada región de éste. Cuando se utiliza un mecanismo externo para propiciar esta circulación, ventiladores por ejemplo, el mecanismo se denomina convección forzada. (Welty, 1994)

2.1.1.3 Radiación

La radiación es toda clase de proceso que transmite energía por medio de ondas electromagnéticas. La transferencia de energía se efectúa en forma de unidades de energía pequeñas (cuanta). (Kreith, 1965)

Cuando un haz de energía radiante incide sobre un cuerpo, una parte de la energía se absorbe, otra de refleja y el resto lo atraviesa. Un cuerpo absorbe tanta energía por radiación como puede emitir, siempre y cuando exista un equilibrio calorífico. La transferencia de calor por radiación no necesita de un medio para la propagación de calor. (Brown, 1965)

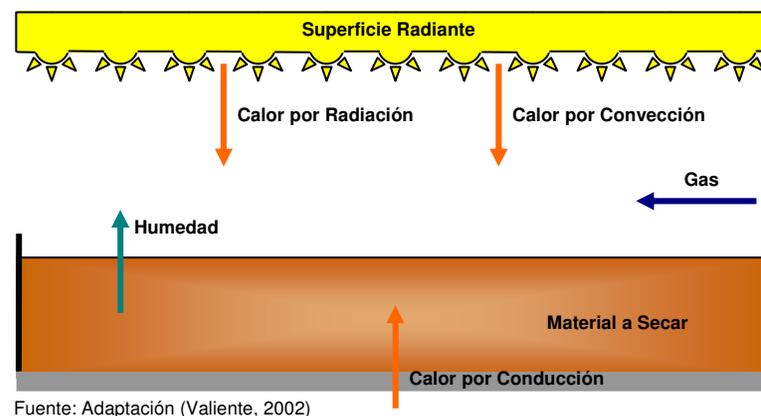


Figura 2.1.- Mecanismos de Transferencia de Calor

2.1.2 Transmisión de la masa

En el proceso de secado, se supone también que toda el agua que sale del producto pasa al aire, entonces debe cumplirse que:

Disminución de agua en el producto = Aumento de agua en el aire

$$m_w = m_s \Delta W_s = m_a \Delta X \quad (2.2)$$

Donde:

m_w = cantidad de agua

m_s = masa de producto seco

m_a = masa de aire seco

ΔW_s = humedad perdida por el producto en base seca

ΔX = humedad ganada por cada kilogramo de aire seco.

El movimiento de la humedad dentro del sólido es función de la estructura de éste, su temperatura y contenido de humedad. Durante el secado se elimina sólo el agua enlazada con el material de forma físico-química y mecánica. La más fácil de eliminar resulta la enlazada mecánicamente que a su vez se subdivide en:

- ✦ Humedad de los macrocapilares.- Aquella contenida en intersticios de radio medio mayor a 10^{-5} cm. Los macrocapilares se llenan de agua al simple contacto directo con líquido
- ✦ Humedad de los microcapilares.- Aquella contenida en intersticios de radio medio menor de 10^{-5} cm. En los microcapilares el agua penetra tanto por contacto directo como mediante la adsorción de la misma en el ambiente.

El enlace físico-químico, por otra parte, une dos tipos de humedad:

- ✦ Humedad ligada osmóticamente.- Denominada también humedad de hinchamiento, y se refiere a la humedad que se encuentra dentro de las células del material y se retiene por las fuerzas osmóticas
- ✦ Humedad por adsorción.- Esta humedad se retiene sólidamente sobre la superficie y en los poros del material, y requiere para su eliminación un gas con una energía considerablemente mayor que la utilizada para eliminar la humedad de hinchamiento. (Kasatkin, 1985).

Es así como, pese a los amplios beneficios que ofrece el secado en cuestión de reducción de volumen, existe una porción de agua que no se puede eliminar por secado sino únicamente por reacciones químicas o sometiendo al material a muy altas temperaturas.

2.2 Etapas del Proceso de Secado

El comportamiento del sólido en el secado, es medido como la pérdida de humedad en función del tiempo.

A temperatura y humedad fijas se obtienen dos curvas típicas de secado, una sobre la base de contenido de humedad en función del tiempo y la otra sobre la base de velocidad de secado en función del contenido de humedad (Figura 2.2). De la primera se obtienen datos de prueba de secado, mientras que la segunda es más descriptiva del proceso (Foust, 1990).

Durante el secado siempre aparece un patrón general de comportamiento en el que el sólido en contacto con el medio de secado, en un principio, ajusta su temperatura con éste hasta alcanzar un estado estable, este fenómeno está representado en el segmento A-B de las curvas típicas mostradas en la figura 2.2.

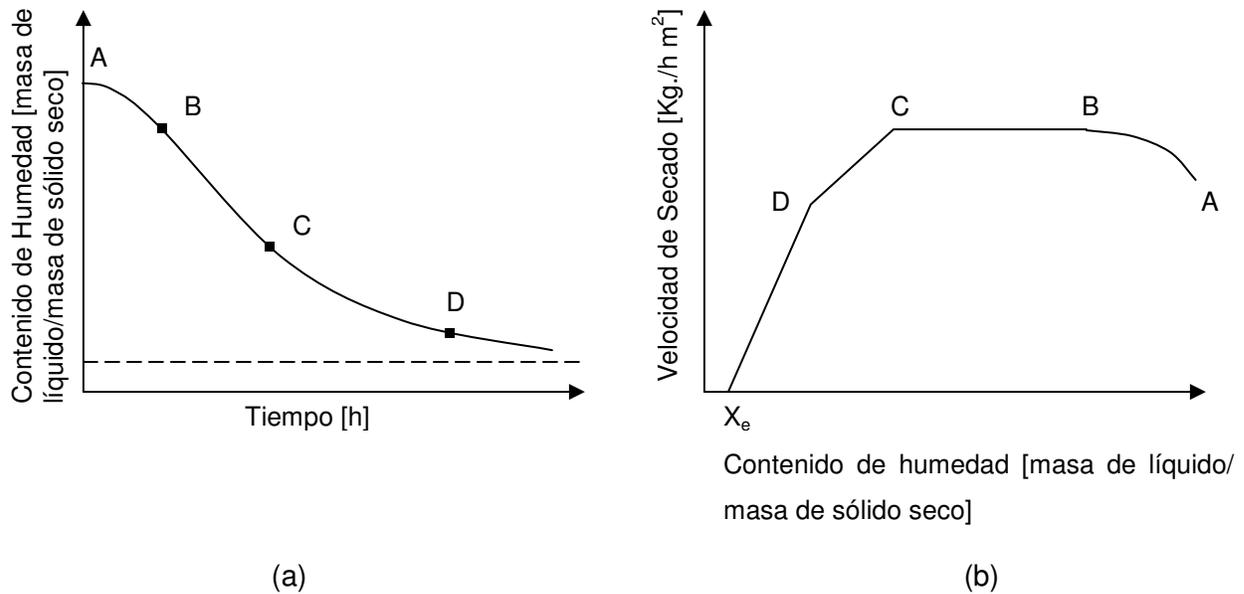


Figura 2.2.- Curvas típicas de secado para condiciones constantes: (a) Contenido de humedad en función del tiempo; (b) velocidad de secado en función del contenido de humedad.

Posteriormente se presentan dos periodos de secado dados por la velocidad de secado, cuya determinación se ha hecho en base a varias observaciones experimentales junto con el desarrollo teórico de los fenómenos de secado, estos son (Valiente 2002):

- ✦ Periodo de secado a velocidad constante
- ✦ Periodo de secado decreciente o postcrítico

2.2.1 *Periodo de secado a velocidad constante*

Durante este periodo se evapora la humedad libre o no ligada del material. El sólido no influye de forma directa sobre la velocidad de secado y la temperatura de superficie alcanzada es la de bulbo húmedo.

En la etapa de secado a velocidad constante, existe una transferencia de la humedad interna del sólido hacia la superficie formándose una capa de agua superior, por lo que en este caso, el mecanismo de secado equivale a la evaporación de agua desde

una superficie plana. En la figura 2.2 (b) el segmento B-C corresponde a este periodo.

2.2.2 Periodo de secado decreciente

Generalmente, este periodo es dividido en dos partes: la primera denominada primer periodo de velocidad decreciente y correspondiente al segmento C-D de las curvas típicas (Figura 2.2).

En este periodo la velocidad de movimiento del agua hacia la superficie es menor que la velocidad de evaporación, por lo que empieza a agotarse el agua en la superficie y esta no se reemplaza más. La velocidad de secado comienza a decaer, llegando a un valor de humedad correspondiente a D donde no existe un área significativa de superficie saturada de líquido. (Foust, 1990)

El segundo periodo de secado decreciente se presenta para valores de humedad menores al que corresponde al punto D y se caracteriza debido a que toda la evaporación se da desde el interior del material. La humedad mínima alcanzada al final de este periodo es llamada humedad de equilibrio, y una vez llegado a este valor, el material no puede ceder más humedad al ambiente.

El periodo de secado decreciente es variable y depende del mecanismo con el cual se lleve a cabo el secado (Valiente, 2002):

- ✦ Secado por capilaridad
- ✦ Secado por difusión

2.2.2.1 Secado por capilaridad

El secado por capilaridad se presenta en sólidos granulares que guardan humedad en los intersticios entre partículas, es decir, aquellos que poseen una estructura formada por poros y conectados entre sí por canales de diversos tamaños (Valiente, 2002).

La humedad contenida en el sólido se mueve a través de éste debido a una fuerza neta resultado de las diferencias de cargas hidrostáticas y de la tensión superficial. Al llegar a la superficie el líquido se evapora, con lo que en cada poro del sólido se forma un menisco que origina la creación de fuerzas capilares las cuales provocan el flujo de líquido a través de los poros. La curva típica de este mecanismo es similar a la presentada en la figura 2.3.

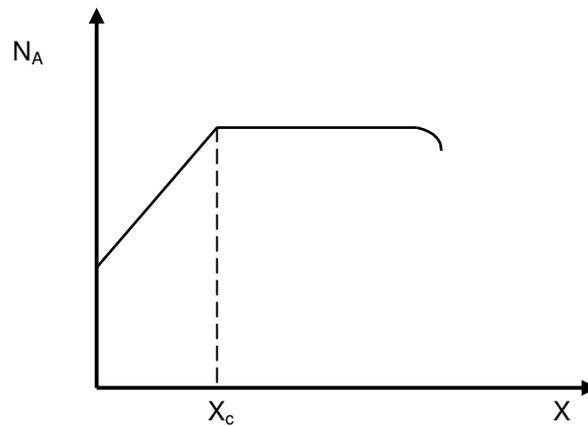


Figura 2.3.- Curva típica del mecanismo de capilaridad

Para el mecanismo de capilaridad, la ecuación de secado viene dada por la siguiente ecuación:

$$\left(\frac{dx}{d\theta}\right)_d = -K_1 (x - x_e) \tag{2.3}$$

$$K_1 = \frac{\left(\frac{dx}{d\theta}\right)_c}{x_c - x_e} \tag{2.4}$$

Donde:

$\left(\frac{dx}{d\theta}\right)_d$ = Velocidad de secado en el periodo decreciente

$\left(\frac{dx}{d\theta}\right)_c$ = Velocidad de secado constante

x_c = Humedad crítica

x_e = Humedad de equilibrio

x = Humedad total del sólido

En el periodo constante:

$$N_A = \frac{S}{A} \left(-\frac{dx}{d\theta} \right)_c = -\frac{h_c}{\lambda} (T - T_i) \quad (2.5)$$

$$\frac{S}{A} = \rho_s d \quad (2.6)$$

Donde:

N_A = Velocidad de Secado [kilogramos de agua secada por unidad de área y unidad de tiempo]

S = Peso del sólido seco

A = Área de transferencia de masa

h_c = Coeficiente de transferencia de calor

T_i = Temperatura de interfase

ρ_s = Densidad aparente del sólido

d = Profundidad del lecho

Entonces, reemplazando (2.4), (2.5) y (2.6) en (2.3):

$$\left(\frac{dx}{d\theta} \right)_d = -\frac{hc (T - T_i) (x - x_e)}{\lambda \rho_{sd} (x_c - x_e)} \quad (2.7)$$

Integrando:

$$\theta_d = \frac{\rho_s d (x_c - x_e)}{hc (T - T_i)} \ln \frac{(x_c - x_e)}{(x - x_e)} \quad (2.8)$$

Se puede observar que el tiempo de secado por capilaridad es directamente proporcional al espesor del sólido.

2.2.2.2 Secado por difusión

El secado por difusión se presenta generalmente en sólidos no porosos como gelatinas, pastas, pegamentos, etc. (Espinoza, 1985).

La difusión de la humedad se lleva a cabo cuando hay una diferencia de la concentración entre el fondo del sólido y la superficie, debido a este gradiente la humedad se difunde.

La curva típica del mecanismo de difusión es similar a:

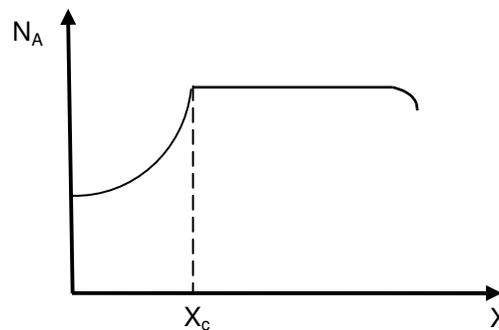


Figura 2.4.- Curva típica del mecanismo de difusión

En el mecanismo de difusión la velocidad de secado durante el periodo decreciente, puede calcularse usando la segunda ley de Fick, considerando que hubiera difusión solo en el eje x y manejando humedades en lugar de concentraciones (Foust,1990).

$$\frac{x}{\theta} = \frac{\delta x}{\delta x^2} \phi \quad (2.9)$$

Donde:

x = humedad al tiempo θ

ϕ = Difusividad del líquido en el sólido

Considerando que la difusividad es constante, que la humedad está distribuida uniformemente y que los periodos de secado son largos, integrando la ecuación se obtiene:

$$\theta = \frac{4 d^2}{\pi^2 \wp} \ln \frac{x_c - x_e}{x_f - x_e} \quad (2.10)$$

Donde:

d = espesor del sólido

x_c = humedad crítica

x_e = humedad de equilibrio

x_f = humedad al tiempo θ

\wp = Difusividad del líquido en el sólido

Se puede observar que el tiempo de secado por difusión varía con el cuadrado del espesor del sólido.

Es importante tener en cuenta el mecanismo de secado que gobierna el proceso para estimar los tiempos de secado y el grado de influencia que tiene el espesor del material a secar.

2.3 Factores que influyen en el secado

Los principales factores que afectan el proceso de secado son:

- ✦ Temperatura del aire
- ✦ Humedad relativa del aire
- ✦ Velocidad del aire

2.3.1 Temperatura del aire

A medida que se aumenta el valor de este factor se incrementa la eliminación de la humedad del lodo dentro de los límites posibles.

Durante el proceso de secado se origina un gradiente de temperatura a lo largo del espesor del material el cual tiende a disminuir a medida que se reduce el contenido de humedad.

2.3.2 Humedad relativa del aire

Definida como la razón entre la presión de vapor de agua presente en ese momento y la presión de saturación de vapor de agua a la misma temperatura (Perry, 1984).

La capacidad de absorción de humedad del aire es directamente proporcional a su temperatura. El aire se satura cuando es incapaz de absorber humedad adicional.

2.3.3 Velocidad del aire

La velocidad del aire es un factor importante ya que transmite la energía requerida para calentar el agua contenida en el material y evaporarla. Adicionalmente, se encarga de transportar la humedad saliente del material.

La tasa de evaporación es directamente proporcional a la velocidad del aire. Sin embargo, las ventajas de velocidades altas del aire disminuyen cuanto mayor es el espesor del material a secar y menor el contenido de humedad inicial.

2.4 Tipos de Secadores

Los secadores industriales están clasificados teniendo en cuenta aspectos de funcionamiento de los equipos (Montero, 2005), así:

- ⊕ Según el tipo de transferencia de calor: conducción, convección o radiación.
- ⊕ Según la presión utilizada en el proceso: vacío o atmosférica
- ⊕ Según el agente desecante: aire, vapor sobrecalentado o algún gas resultado de un proceso previo en alguna industria.
- ⊕ Según la disposición de corrientes: paralela, contracorriente o transversal.
- ⊕ Según la forma de aportación de calor: continua o discontinua
- ⊕ Según disposiciones especiales: bandejas, cilindros, tambores, túneles, etc.
- ⊕ Según el tiempo de residencia: corto (< 1 min.), medio (1 – 60 min.) o alto (> 60 min.).

Básicamente se consideran importantes dos factores: el tipo de funcionamiento (continuo o discontinuo) y forma de calefacción (sistema directo o indirecto).

El secado en continuo es más fácil de integrar con el resto de unidades del proceso industrial, pero por otra parte en cambio, el secador discontinuo es más versátil y puede utilizarse para distintos tipos de materiales.

En cuanto a la forma de calefacción, en el sistema directo el material es calentado por convección desde el aire que lo rodea por lo que es más fácil controlar la temperatura de calefacción y evitar un exceso de temperatura del sólido cuando la calidad del producto final sea un aspecto a cuidar durante del proceso de secado.

Tomando en cuenta los parámetros propuestos, en la tabla 2.1 se presentan algunos equipos usados en la operación de secado.

Tabla 2.1.- Tipos de Secadores

	De Calentamiento Directo	De Calentamiento Indirecto
Equipos Continuos	<ul style="list-style-type: none"> + Secadores de túnel. + Secadores neumáticos. + Secadores ciclónicos. + Secadores de cama vibratoria. + Secador de cama fluidizada. + Secadores sprays. + Secadores de tipo turbina. + Secadores rotatorios. 	<ul style="list-style-type: none"> + Secadores de tambor. + Secadores con circulación a través del lecho.
Equipos Discontinuos	<ul style="list-style-type: none"> + Secadores de bandejas con corriente de aire. + Secadores de cama fluidizada. + Secadores con circulación a través del lecho sólido. 	<ul style="list-style-type: none"> + Secadores de bandejas a vacío. + Secadores de bandejas a presión atmosférica. + Secadores por congelación.

Fuente: Treybal,2002

A continuación se describen algunos de los modelos de secadero industriales más importantes:

2.4.1 Secadores de bandejas

Los secadores de bandeja son equipos que funcionan en discontinuo y permiten la utilización de aire caliente para secar el sólido (calefacción directa) o también la opción de calentar las bandejas para lograr la evaporación del agua del material (calefacción indirecta).

Este tipo de secadero se emplea para secar material granular, éste se coloca sobre las bandejas y es secado en un proceso donde el aire circula a una velocidad entre 2 y 5 m/s.

2.4.2 Secadores de túnel

Estos equipos funcionan en continuo y mediante calefacción directa. Se compone de una serie de bandejas o banda continua que se desplaza lentamente a través de un túnel. El material a secar es expuesto a una corriente de aire caliente en el proceso, provocando la evaporación del agua.

Los secadores de túnel son utilizados cuando se necesita secar un gran volumen de producto puesto que ahorra la cantidad de mano de obra empleada.

2.4.3 Secador de cinta transportadora perforada

El funcionamiento de estos secadores es continuo y con circulación transversal del aire. El material a secar se coloca en capas de 3 a 15 cm. de espesor sobre una cinta metálica perforada que lo transporta a lo largo de la cámara de secado.

El funcionamiento de este equipo consiste en hacer circular aire hacia arriba en la entrada al secador, mientras que en el extremo de descarga el aire pasa en dirección contraria.

2.4.4 Secadores de tornillo sinfín

Es un secador continuo de calefacción indirecta. Posee un transportador horizontal de tornillo sinfín que rota a una velocidad de entre 2 a 30 rpm., montado dentro de una carcasa cilíndrica que permite una calefacción indirecta.

2.4.5 Secadores rotatorios

Son secadores continuos, con calefacción directa y con sistema de agitación continua de los sólidos. Este tipo de secador consiste en un tambor con palas mezcladoras. El calor se transfiere de mejor manera al existir amplio contacto entre el material y el medio secante debido a la rotación del tambor y la mezcla que realizan las palas incorporadas a éste. Trabajan a temperaturas que oscilan entre 200 °C y 1000 °C (temperatura del gas a la entrada).

Los secadores rotatorios se emplean para el secado de productos granulados como sal, azúcar y sales inorgánicas en general.

Estos equipos tienen bajos costos de mantenimiento y pueden secar grandes volúmenes de biosólidos, sin embargo, dadas sus características, requieren gran espacio para su implantación y gran inversión durante su operación en cuanto consumo energético. Otro de los inconvenientes es que la humedad del producto final es difícil controlar.

2.4.6 Secadores Instantáneos (Flash Dryer)

Su nombre hace referencia a lo rápido que se produce el secado del material en este tipo de secador. El sistema de funcionamiento de este secador consiste en mezclar el material a secar con una corriente de gases calientes a alta velocidad. Uno de los requisitos para su buena operación necesita que el tamaño de las partículas del material sea reducido.

Debido a la rapidez del secado, estos equipos resultan ser más compactos que los rotatorios pero debido a su sistema de funcionamiento consume más energía eléctrica.

Se puede utilizar cualquiera de estos equipos para secar lodos residuales, sin embargo, los costos de implantación, mantenimiento y operación de estos equipos son altos.

CAPÍTULO III

3 SECADO SOLAR

Una de las alternativas para el secado de lodos residuales es la utilización de energía solar para disminuir los costos energéticos que implica la evaporación del agua contenida en estos y reducir su volumen.

Actualmente, se han desarrollado diversas tecnologías de secado solar de lodos, como el caso de los ya mencionados estudios de la empresa Degrémont (Héliantis) y Thermo-System, las cuales tienen construidos alrededor del continente europeo una serie de estructuras en las que se tratan desde 500 t/año de lodo residual en 460m² (Austria), hasta más de 2000 t/año de lodo en áreas mayores a 1400 m², implementando en algunos casos circulación de aire caliente para favorecer el secado.

Un estudio del funcionamiento de uno de los diseños de Thermo-System es presentado por Horn (2003), en cuyos resultados se observa el incremento del contenido de sólidos desde un valor inicial de 15% a uno final de 82% alcanzado en 26 días. Sin embargo, el costo de implantación y operación de estas opciones automatizadas resultan no tan atractivas para el común de países en vías de desarrollo. El principio bajo el cual funcionan estas tecnologías es adaptable al medio en que se instaure el proyecto, y es posible reducir costos no dependiendo de elementos electromecánicos para su funcionamiento.

Con esta visión se han hecho estudios de secado de lodos residuales y se presentan propuestas de secado de biosólidos en un secador solar de bandejas (Montero, 2005) y el secado solar de lodos residuales en invernadero (Cota, 2006).

En el primero se utiliza captadores solares para el calentamiento del aire de la cámara de secado, sin embargo, el tipo de secador usado (secador en bandejas) es

poco práctico para la manipulación de grandes cantidades de lodo. El segundo propone un secado en invernadero ayudado por un ventilador para propiciar la circulación del aire, obteniéndose buenos resultados, pero lamentablemente el estudio se realiza con una mezcla de suelo-agua, lo que no representa un verdadero comportamiento del material durante el proceso de secado.

La teoría de secado solar nos permite conocer las ventajas y limitaciones que tiene el uso de energía solar como fuente alterna a la energía eléctrica, así como las bases para un buen aprovechamiento de esta. En este capítulo se presenta los fundamentos teóricos y bases de diseño solar.

“La energía solar es segura, está libre de contaminación, no requiere transporte, no tiene productos de desecho que deban eliminarse, y con ella han prosperado todos los seres vivientes desde su aparición en la Tierra” (Manrique, 1984).

3.1 Energía Solar

La energía solar es el resultado de un proceso de fusión nuclear que tiene lugar en el interior del sol, se propaga en línea recta y en todas direcciones con una velocidad igual a la de la luz. (Brown, 1965)

El Sol, con una masa aproximada de 334 000 veces mayor a la de la Tierra, está compuesto por un 70% H₂, constituyéndose así en un enorme reactor nuclear que irradia una potencia de 3.8×10^{23} kW. De esta potencia emitida llega a la Tierra, ubicada a una distancia media de 150 millones de kilómetros, menos de una millonésima parte. Sin embargo, dado la relación de tamaño de la Tierra respecto al sol es una cantidad enorme para abastecer los requerimientos de energía (Manrique, 1984).

La radiación solar antes de ingresar a la atmósfera terrestre se denomina radiación extraterrestre y varía entre 1322 W/m^2 y 1412 W/m^2 . Esta variación resulta debido a las diferentes distancias que adopta la Tierra con relación al sol en su diario caminar

por su órbita de traslación. Se introduce entonces una constante solar, definida como el valor medio de la radiación solar extraterrestre e igual a 1367 W/m^2 (Montero, 2005).

Por la composición de nuestra atmósfera el 30% de la radiación solar que llega a la Tierra se refleja al espacio, el 47% es absorbida para mantener la temperatura ambiente y el 23% restante es utilizado para mantener la convección atmosférica y el ciclo hidrológico.

La radiación solar que llega a la Tierra es conocida como radiación global y dependiendo de la latitud, la ubicación geográfica, la estación del año, el cubrimiento de nubes, la contaminación atmosférica y la altitud su intensidad varía.

La radiación global (H_G) que incide sobre una superficie inclinada en la Tierra es igual a la sumatoria de sus tres componentes:

- ✦ Radiación Directa (H_B).- Aquella que no experimenta cambios en su dirección
- ✦ Radiación Difusa (H_D).- Es la que sufre dispersión en la atmósfera y no tiene una dirección única.
- ✦ Radiación Reflejada (H_R).- Aquella que llega a una superficie inclinada procedente de la reflexión de la radiación solar en el suelo. Se le denomina también *Albedo*.

La energía solar que llega a la superficie de la Tierra puede ser transformada en calor útil y electricidad, pero para lograr un mejor aprovechamiento de esta energía, es necesario conocer de manera más precisa el movimiento del Sol y la dirección de radiación directa sobre un plano dado en cualquier instante.

3.1.1 Ángulos Solares

El sol, debido al movimiento de rotación de la Tierra sobre su propio eje, sigue una trayectoria circular, alcanzando al medio día el punto más alto en el firmamento. Dependiendo de la estación del año, existe adicionalmente un movimiento de esta trayectoria a puntos más altos del firmamento de invierno a verano. (Manrique, 1984)

La posición del Sol, entonces, se encuentra definida por dos ángulos: la altura solar (α) que define el ángulo entre la visual y el horizonte; y el azimut solar (γ) que muestra la desviación de los rayos solares respecto al sur verdadero.

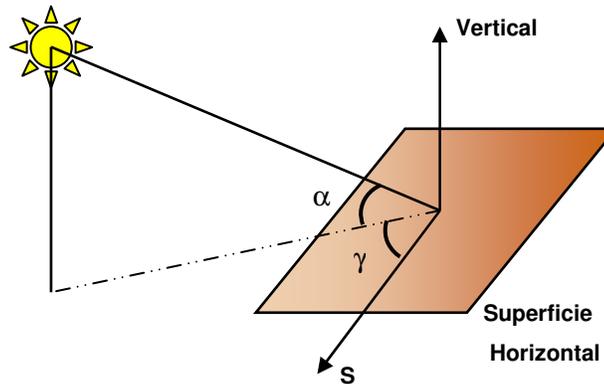


Figura 3.1.- Ángulos Solares

Estos ángulos, α y γ , dependen principalmente de:

- ✦ La latitud (ϕ).- Es el ángulo que determina una zona específica en la Tierra con respecto al plano del ecuador. Es positiva hacia el norte y negativa hacia el sur.
- ✦ La declinación (δ).- Es un índice de alejamiento del sol hacia el norte o sur de la línea equinoccial, efecto producido por el movimiento de traslación de la Tierra. Define la posición angular del Sol al medio día solar.

$$\delta = 23.45 \operatorname{Sen} \left(360 \frac{284 + n}{365} \right) \quad (3.1)$$

- ✦ El ángulo horario (ω).- Formado en el ecuador, comprendido entre el plano meridiano de la Tierra que contiene al Sol y el plano de un observador en la superficie. Toma un valor de 0 al medio día solar y se incrementa 15° de longitud por cada hora, siendo positivo en las mañanas y negativo en las tardes.

Entonces, de acuerdo a las definiciones matemáticas y relaciones trigonométricas la altura solar y el azimut solar quedan expresadas como:

$$\text{Sen } \alpha = \text{Cos } \phi \text{ Cos } \delta \text{ Cos } \omega + \text{Sen } \phi \text{ Sen } \delta \tag{3.2}$$

$$\text{Sen } \gamma = \frac{\text{Cos } \delta \text{ Sen } \omega}{\text{Cos } \alpha} \tag{3.3}$$

Para una superficie inclinada sobre la superficie terrestre, se incorpora a estas expresiones, el ángulo de incidencia de la radiación directa (θ) definido como el ángulo entre la normal a la superficie y el haz de radiación.

Siendo:

$$\begin{aligned} \text{Cos } \theta = & \text{Sen } \phi \text{ Sen } \delta \text{ Cos } s - \text{Cos } \phi \text{ Sen } \delta \text{ Sen } s \text{ Cos } \gamma_s + \text{Cos } \delta \text{ Cos } \phi \text{ Cos } s \text{ Cos } \omega \\ & + \text{Cos } \delta \text{ Sen } \phi \text{ Sen } s \text{ Cos } \gamma_s \text{ Cos } \omega + \text{Cos } \delta \text{ Sen } s \text{ Sen } \gamma_s \text{ Sen } \omega \end{aligned} \tag{3.4}$$

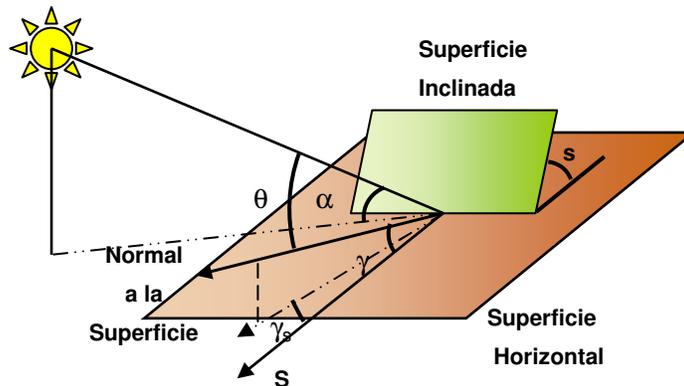


Figura 3.2.- Ángulo de Incidencia en una superficie inclinada

El ángulo de incidencia de la radiación directa sobre una superficie horizontal coincide con la altura solar.

3.1.2 Medición de la Radiación Solar

Para medir la radiación solar se utilizan radiómetros solares como los piranómetros o solarímetros y los pirheliómetros. En la tabla 3.1 se muestran diferentes tipos de instrumentos de medición de la radiación solar.

Tabla 3.1.- Instrumentos de medición de Radiación Solar

INSTRUMENTO	PARÁMETRO
Piranómetro	Radiación Global Radiación Directa Radiación Difusa
Pirheliómetro	Radiación Directa
Actinógrafo	Radiación Global
Heliógrafo	Brillo Solar (número de horas en las cuales el sol brilla en un período dado)

Fuente: IDEAM (Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales de Colombia)

Los piranómetros miden la radiación global sobre una superficie plana, horizontal generalmente y es uno de los más utilizados para el efecto. La medición se obtiene a través de la diferencia de calentamiento de dos sectores pintados alternativamente de blanco y negro en un pequeño disco plano. Posee también una cúpula de vidrio óptico transparente para filtrar la radiación entre las longitudes de onda que oscilan aproximadamente entre 280 y 2.800 nm.

La radiación directa puede ser medida mediante un pirheliómetro. Este equipo funciona mediante un sensor de voltaje y tiene instalado un sistema de seguimiento del Sol, para que en todo momento su superficie receptora sea normal a los rayos solares.

3.2 Diseño Solar

Un sistema térmico de energía solar está integrado por diferentes componentes que transforman la energía solar en calor útil. En general consta de tres partes básicas:

- ✦ Un subsistema de captación
- ✦ Un subsistema de acumulación
- ✦ Un subsistema de consumo

3.2.1 Subsistema de Captación

El subsistema de captación está conformado por baterías de captadores solares. Su principal objetivo es el de captar la energía solar incidente y transmitirla al fluido que circula por él; se componen de una cubierta transparente, una placa absorbente, una superficie aislante y una caja de soporte.

Generalmente, los captadores utilizados son los de placa plana, que a su vez se clasifican en dos grupos: con placa absorbente descubierta y con placa absorbente cubierta.

Los primeros están compuestos por un conducto de aire y un espesor de aislamiento que permiten una transferencia de calor al aire por debajo de la placa absorbente, mientras que los segundos incorporan una o dos cubiertas sobre la placa absorbente y paralela a esta. (Figuras 3.3 y 3.4)



Figura 3.3.- Captador solar de placa plana: (a) Descubierta; (b) Cubierta

Los captadores de placa plana con cubierta pueden tener distintas configuraciones dependiendo de la circulación del fluido respecto a la placa absorbente: superior o inferior. (Figura 3.4)



Figura 3.4.- Captador solar de placa plana con cubierta: (a) Con paso de aire superior; (b) Con paso de aire inferior

Otro tipo de captadores lo conforman los captadores de placa suspendida y los de capa perforada, mostrados en la Figura 3.5.



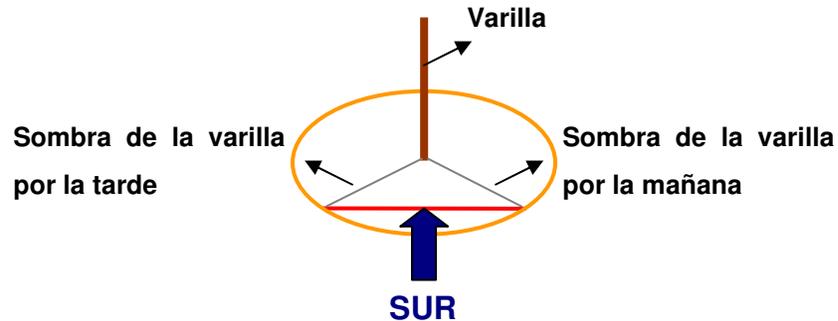
Figura 3.5.- (a) Captador solar de placa suspendida; (b) Captador solar de placa perforada

Para que los captadores solares aprovechen al máximo la radiación solar se deben orientar hacia el sur geográfico, con una inclinación respecto a la horizontal igual a la latitud del lugar $\pm 20^\circ$, esto último en aquellos captadores que serán utilizados regularmente durante todo el año. (Junta de Castilla y León, 2002)

El sur geográfico no coincide con el sur magnético por lo que se deberá localizar siguiendo el siguiente procedimiento:

- 1) Colocar una varilla vertical al suelo dos o tres horas antes del medio día solar, medir su sombra y señalar su extremo en el piso.
- 2) Hacer un círculo alrededor de la varilla con la medida de la sombra antes tomada.
- 3) Por la tarde, hacer otra señal en el círculo trazado cuando la sombra tenga nuevamente la medida tomada en la mañana.

- 4) Trazar una recta entre las dos señales realizadas. Esta recta, mirando hacia la varilla, muestra el sur geográfico. (Figura 3.6)



Fuente: Junta de Castilla y León, 2002

Figura 3.6.- Determinación práctica del sur geográfico

Estas consideraciones permiten un mejor aprovechamiento de la energía solar, sin embargo, no siempre es posible cumplirlas a cabalidad, ya sea por la ubicación del proyecto, dimensiones, área disponible, entre otras.

3.2.2 Subsistema de Acumulación

El subsistema de acumulación tiene como objetivo el de dotar de energía al sistema en momentos en los cuales la radiación solar sea escasa o nula. Los sistemas solares térmicos usan un depósito-acumulador donde se almacena energía en forma de agua caliente. (Junta de Castilla y León, 2002)

3.2.3 Subsistema de Consumo

Se refiere a todos los puntos de consumo de la energía. La energía solar como calor útil es empleada en un sin número de actividades como calefacción de viviendas, calefacción de agua de consumo, climatización de piscinas, refrigeración, cocinas solares, aplicaciones agrícolas como por ejemplo los sistemas invernaderos, y por supuesto el secado de materiales.

3.3 Tipos de Secadores Solares

El principal objetivo de una instalación solar es conseguir el máximo ahorro de energía y para esto se han desarrollado diversos sistemas de secado. Los principales son:

- ✦ Sistemas solares activos
- ✦ Sistemas solares pasivos

3.3.1 *Sistemas Solares Activos*

Llamados también sistemas de convección forzada, ya que cuentan con un sistema externo para propiciar la circulación del aire dentro del equipo. Pueden funcionar en su totalidad con aporte energético total de la radiación solar o, en combinación de esta, con una fuente de energía auxiliar (sistemas híbridos).

3.3.2 *Sistemas Solares Pasivos*

En este tipo de sistemas no se incorporan equipos externos para forzar la circulación del aire húmedo, por lo que son llamados también sistemas de convección natural. La circulación del aire se produce por la diferencia de densidad en el aire debido al gradiente de temperatura existente.

De acuerdo a la configuración de los componentes del sistema y el sistema de utilización de la energía solar, los sistemas anteriormente descritos pueden clasificarse a su vez en:

- ✦ Secadores solares directos
- ✦ Secadores solares indirectos
- ✦ Secadores solares mixtos

Los secadores solares directos tienen a la cámara de secado como unidad de recepción de la radiación solar. Pueden ser secadores de absorción directa sobre el material, con paredes o cubiertas colectoras o tipo invernadero.

Cuando se trata de un secador directo-pasivo se incluye una chimenea para favorecer la circulación y renovación del aire en la cámara de secado.

Los secadores indirectos se caracterizan por tener por separado el calentador solar y la cámara de secado, es decir, consta de un colector solar de pre-calentamiento de aire. Generalmente en este tipo de secaderos el material a secar se coloca en bandejas ubicadas en la cámara de secado.

El criterio para escoger el tipo de secador a emplearse para determinado proceso incluye tener en consideración el recurso económico disponible, la temperatura que requiere el proceso y los tiempos de secado del material, tal que, represente un ahorro en todo sentido.

En el caso de los lodos residuales, no interesa el aspecto final del lodo, como sí en el caso de secado de alimentos por ejemplo, por lo que un secador directo no tendría inconvenientes en ser utilizado; y, al pretender este estudio realizarse en un modelo sin equipos mecánicos automáticos, se pensó en un secador pasivo.

CAPÍTULO IV

4 METODOLOGÍA

4.1 Descripción del sitio experimental

La etapa experimental de este trabajo de investigación se realizó en las instalaciones del Instituto Mexicano de Tecnología del Agua, ubicado en la ciudad de Jiutepec en el estado de Morelos, en dos fases (invierno y verano).

El Estado de Morelos se localiza en la zona centro de la República Mexicana, colinda al norte con el Distrito Federal, al noreste y noroeste con el Estado de México, al sur con el Estado de Guerrero y al oriente con el Estado de Puebla. Se ubica entre los paralelos 19°08' y 18°20' de latitud norte, y los meridianos 98°38' y 99°30' de longitud oeste. (INEGI).

El Estado de Morelos está integrado por 33 municipios, entre los que figura el Municipio de Jiutepec, ubicado geográficamente a 18° 53' de latitud norte y 99° 10' de longitud oeste del Meridiano de Greenwich, a una altura de 1.350 msnm.

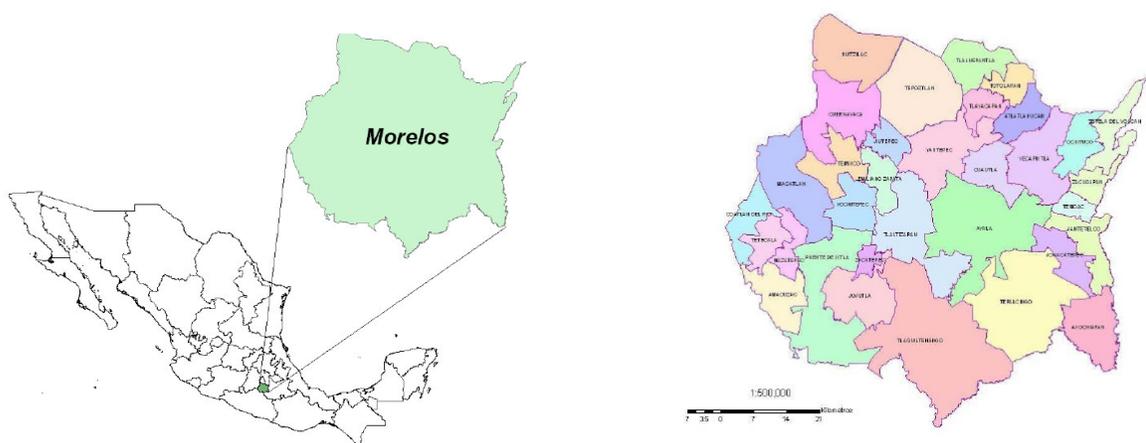


Figura 4.1.- Estado de Morelos (INEGI)

Su clima se caracteriza por ser, en la mayor parte de su territorio, cálido subhúmedo; encontrándose también zonas templadas y secas, como se muestra en la figura 4.2.



Figura 4.2.- Zonas climáticas del Estado de Morelos (INEGI)

Particularmente, la ciudad de Jiutepec tiene una temperatura ambiente media anual de 20.7 °C, registrando una temperatura máxima anual de 31.4 °C y una media mínima de 10.8 °C. Los meses más calurosos son abril y mayo, mientras que los más fríos son diciembre y enero.

La precipitación pluvial anual está entre 800 y 1100 mm, con una precipitación máxima de junio a septiembre, y una mínima de diciembre a mayo. La mayor cantidad de precipitación se registra en los meses de julio y agosto. La humedad promedio anual es aproximadamente 45 %.

4.2 Parámetros para el control del proceso

El proceso de secado se llevó a cabo en condiciones atmosféricas naturales, ningún parámetro estuvo controlado durante el tiempo de experimentación. El plan de monitoreo que contempló el presente trabajo de investigación se muestra en la siguiente tabla:

Tabla 4.1.- Monitoreo y control del experimento

Parámetro	Punto de Muestra	Periodicidad	Método
Sólidos totales	Muestra Compuesta	Diaria*	Método estándar
Temperatura Ambiente	Local	Diaria*	Estación Meteorológica
Radiación Solar (promedio 24h)	Bajo cada estructura	Diaria*	Estación Meteorológica
Velocidad del viento	Local	Diaria*	Estación Meteorológica
Coliformes Fecales	Muestra Compuesta	Diaria*	Procedimientos de la Norma Oficial Mexicana **
<i>Salmonella</i>	-----	Al inicio y final del periodo	
Huevos de Helmintos	Muestra Compuesta	2 veces por semana	

*Las mediciones diarias se realizaran todas a la misma hora cada día.

** NOM-004-SEMARNAT-2002

Las muestras compuestas para las pruebas de sólidos totales, coliformes fecales y huevos de helmintos, se extrajeron de cada uno de los modelos tomando muestras de aproximadamente 10 g en 5 diferentes puntos del área de secado, 4 de ellos ubicados a 0.40 m de cada esquina del modelo en sentido longitudinal y 0.20 m. transversal y una muestra central de igual peso, para realizar una muestra compuesta de 50 g. (Figura 4.3)

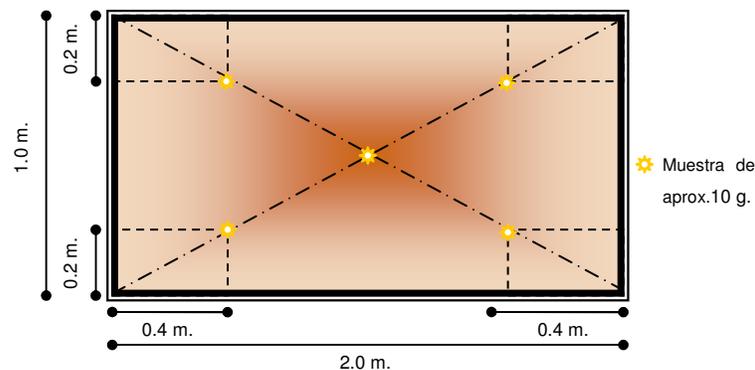
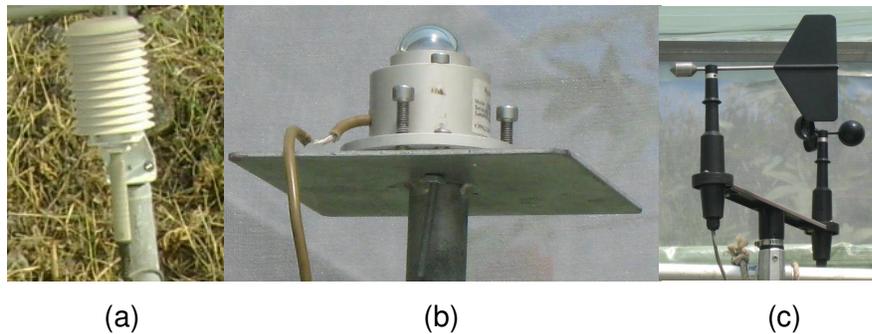


Figura 4.3.- Puntos considerados para la elaboración de las muestras compuestas

Para el monitoreo diario de las variables atmosféricas locales en cada uno de los modelos se instalaron estaciones meteorológicas automáticas (EMA) compuestas de un sensor de temperatura ambiente marca FENWAL ELECTRONICS, un sensor de humedad relativa marca VAISALA (HMP35C), un sensor de velocidad del viento marca R.M. (03001-5), un sensor de dirección del viento marca R.M. (03001-5), un sensor de radiación solar marca LI-COR (LS200SZ) y un sensor de temperatura de suelo marca FENWAL ELECTRONICS, los cuales están programados para registrar valores cada 30 minutos durante las 24h. (Fotografía 4.1)



Fotografía 4.1.- Instrumentos de Medición de la Estación Meteorológica Automática: (a) sensor de temperatura; (b) sensor de radiación solar; (c) sensor de dirección y velocidad del viento

4.3 Descripción de los experimentos

Para el diseño de los modelos experimentales se realizaron pruebas de secado de los lodos a utilizarse en el Laboratorio de Química de la Facultad de Ingeniería de la UNAM - Ciudad Universitaria, México DF, utilizando un Secador de Charolas Atmosférico (Fotografía 4.2), el cual se operó bajo condiciones controladas de temperatura y velocidad de viento, con el objetivo de identificar el mecanismo de secado de los lodos a utilizarse y conocer las curvas características de secado del material.



Fotografía 4.2.- Secador de charolas atmosférico

Se realizaron cuatro pruebas de secado, colocando cuatro charolas de lodo residual en cada una de las corridas. Se midió en cada caso la velocidad del viento en el túnel, la temperatura de bulbo seco y la temperatura de bulbo húmedo. Para el efecto se utilizó un anemómetro digital marca TurboMeter con una precisión de 0.1 m/s y un psicrómetro digital marca MANNIX modelo SAM990DW con una precisión de 0.1 °C.



(a)



(b)

Fotografía 4.3.- (a) Anemómetro digital; (b) Psicrómetro digital

Adicionalmente, se tomaron las dimensiones de las charolas: largo, ancho y profundidad y el peso inicial una vez que fueron llenadas con lodo residual. Durante la corrida se registró el peso de cada charola cada 15 minutos utilizando una balanza granataria marca OHAUS con una precisión de un gramo.



(a)



(b)

Fotografía 4.4.- (a) Balanza granataria; (b) Charolas con lodo residual

Los resultados obtenidos de esta etapa preliminar de la investigación se presentan, junto con los demás resultados, en el siguiente capítulo de este documento.

Una vez conocido y caracterizado el comportamiento de los lodos ante la operación de secado, se dió paso a la construcción de los modelos experimentales. La parte experimental de esta investigación cuenta con dos modelos a probar: Secado solar con cubierta y Secado solar en invernadero.

4.3.1 Secado Solar con Cubierta

La estructura que contiene el lodo residual en este modelo, está construida de paneles de tabla- roca, unidas con silicón y sostenidas por una estructura metálica base (fotografía 4.5). La cama que contiene el lodo residual tiene 1 m. x 2 m. x .20 m y está cubierta por un techo a dos aguas de fibra de vidrio, colocado a 2.20 m. del nivel del suelo medido a la parte más alta. Esto, con el objetivo de proporcionar protección al lecho, ya que la primera fase de la investigación se desarrolló en época de lluvia; adicionalmente se considero esta opción de secado para monitorear la cinética de desinfección bajo condiciones en las que la radiación solar se ve afectada por la cubierta en mayor proporción que en el caso del modelo en invernadero, pero cuya facilidad constructiva es mayor.



Fotografía 4.5.- Secado Solar con cubierta

4.3.2 Secado Solar en Invernadero

La estructura que alberga el lodo tiene las mismas dimensiones que en el modelo anterior, pero en este caso la cama de lodo fue construida con láminas de acrílico en lugar de tabla-roca (fotografía 4.6). En este modelo se procura aumentar la temperatura del lecho de lodos con la ayuda del diseño en invernadero.



Fotografía 4.6.- Secado Solar en Invernadero

El invernadero está construido con plástico de polietileno y tiene una altura total de 1.0 m en el frente y 1.50 m. en la parte posterior (fotografía 4.7). Se ha colocado malla de mosquitero en dos paredes opuestas del invernadero para procurar la

circulación del aire por efecto de la velocidad del viento, y así evitar usar extractores de aire, previniendo la saturación de éste. El mosquitero se encuentra colocado en la parte inferior del frente del invernadero y superior en la parte posterior a éste con una altura de 0.30 m en ambos casos.



(a)



(b)

Fotografía 4.7.- Vistas del Invernadero: (a) Lateral; (b) Frontal

Cabe mencionar que los dos modelos de secado descritos están orientados hacia el sur verdadero, como lo establece la literatura revisada.

4.3.3 Lodo Residual

El lodo utilizado en la experimentación es un lodo deshidratado y estabilizado, producto del tratamiento de aguas residuales municipales de la Planta de Tratamiento #1 del municipio de Tlalnepantla en el Estado de México (fotografía 4.8).

Se escogieron lodos de tratamiento de aguas municipales por la problemática existente en cuanto al volumen generado y la gran dificultad que se tiene con su manejo y disposición final.

Se decidió utilizar un lodo deshidratado y estabilizado, por la cantidad de material requerido para las diferentes pruebas de laboratorio y para evitar los malos olores y posibles vectores durante el tiempo de experimentación.



(a)



(b)

Fotografía 4.8.- Lodo Residual: (a) Planta de Tratamiento #1 del municipio de Tlanepantla; (b) Recolección del lodo residual municipal

El lodo de la Planta de Tratamiento #1 del municipio de Tlanepantla es tratado en un sistema de espesamiento aerobio para luego ser pasado a un filtro prensa. Al lodo, previo a este último tratamiento, se le incorpora polímero OPTIFLOC (C-1288) con las características siguientes:

- ✦ *Apariencia:* Polvo Granulado Blanco
- ✦ *Carga Catiónica [meq/g]:* 3.4 - 4
- ✦ *Finos[%]:* 4 max
- ✦ *Insolubles [%]:* 2 max
- ✦ *Acrilamina Residual [ppm]:* 999 max
- ✦ *Sólidos [%]:* 90 min.
- ✦ *Viscosidad Estándar [cps]:* 3.8 - 4.5

Una vez espesado y sometido a las presiones del filtro prensa, el lodo obtenido presenta las siguientes características:

- ✦ *Apariencia:* Pastosa
- ✦ *Estado Físico:* Sólido
- ✦ *Color :* Gris
- ✦ *Olor:* Humedad

- ✦ *Humedad*: 86.6%
- ✦ *pH (1:1pp)*: 7.12

Con relación al análisis CRIT realizado al lodo, éste no presenta características Corrosivas, Reactivas, Inflamables ni tóxicas al ambiente.

De acuerdo a los análisis microbiológicos realizados al lodo, se analizaron los parámetros establecidos en la NOM-004-SEMARNAT-2002 y se obtuvieron los siguientes resultados:

- ✦ *Coliformes Fecales*: 3.4×10^5 NMP/g
- ✦ *Huevos de Helminetos*: 0 HH/2g
- ✦ *Salmonella*: No detectada.

Adicionalmente, respecto a lo pedido en la misma normativa, se realizaron los análisis del contenido de metales pesados en el lodo. Se presentan los siguientes metales en las cantidades indicadas a continuación:

- ✦ *Cadmio Total*: 1,120 mg/kg
- ✦ *Mercurio total*: 0.1946 mg/Kg
- ✦ *Cromo total*: 111.311 mg/Kg
- ✦ *Cobre total*: 339.454 mg/Kg
- ✦ *Niquel total*: 72.758 mg/Kg
- ✦ *Zinc total*: 553.926 mg/Kg

Pese a que se registran cantidades de metales, comparando sus valores con los límites máximos permitidos por la norma, estos cumplen con dichas especificaciones.

Cada estructura aloja 0.15 m. de altura de lodo residual, lo que representa un volumen aproximado de 0.3 m^3 . Las fotografías 4.9, (a) y (b) muestran a los modelos en invernadero y con cubierta, respectivamente, el día en que fue vertido el lodo.



(a)



(b)

Fotografía 4.9.- Modelos en operación (primer día): (a) Secado solar en invernadero; (b) Secado solar con cubierta

El plan de monitoreo se llevó a cabo durante 30 días y durante este periodo se realizaron volteos manuales diarios al material para propiciar un secado homogéneo del lodo residual y propiciar la granulación del mismo. El volteo manual se efectuó una vez tomadas todas las mediciones y muestras necesarias para el monitoreo del experimento.

La segunda fase de este experimento se realizó en verano y, dado los resultados obtenidos en la primera fase (invierno), se modificó la periodicidad de monitoreo de los parámetros referidos en la tabla 4.1, respecto a los sólidos totales, coliformes fecales y huevos de helmintos, mismos que fueron determinados cada tercer día.

CAPÍTULO V

5 ANÁLISIS E INTERPRETACIÓN DE LOS RESULTADOS

5.1 Pruebas Preliminares

Las pruebas preliminares realizadas en el Laboratorio de la Facultad de Química de la UNAM en México DF., fueron ejecutadas bajo condiciones controladas de temperatura y velocidad de viento, en un secador de charolas atmosférico. Los valores de temperatura y velocidad de viento con los que trabajó el equipo fueron los que se muestran en la tabla 5.1.

Tabla 5.1.- Valores de temperatura y velocidad de viento de las pruebas preliminares

Prueba	Velocidad del Viento [m/s]		Temperatura			
			Bulbo Seco [°C]		Bulbo Húmedo [°C]	
	Entrada	Salida	Entrada	Salida	Entrada	Salida
01	2.50	12.50	21.90	57.80	12.50	25.20
02	3.00	12.20	20.30	56.70	12.80	30.60
03	2.50	12.20	19.80	54.60	9.90	24.40
04	2.00	12.70	19.90	49.50	10.50	23.70
05	2.50	3.50	22.60	22.60	14.90	14.80

Como resultado de estas pruebas se obtuvo, para cada una de ellas, las curvas características de secado. A continuación se hace una breve descripción de estas curvas.

5.1.1 Descripción de las curvas características de secado

Como se observa en la tabla 5.1, las primeras cuatro pruebas se realizaron bajo condiciones similares de temperatura y velocidad de viento, por lo que las curvas obtenidas para cada prueba son parecidas entre sí.

La figura 5.1 muestra las curvas características de la prueba 01, donde claramente se puede observar los periodos constante y decreciente del proceso de secado del lodo residual.

El periodo de secado constante corresponde a la evaporación de la humedad libre del material y está caracterizada por una velocidad de secado constante. El periodo decreciente empieza cuando el lodo residual llega a la humedad crítica, a partir de esta, la velocidad de secado no es constante.

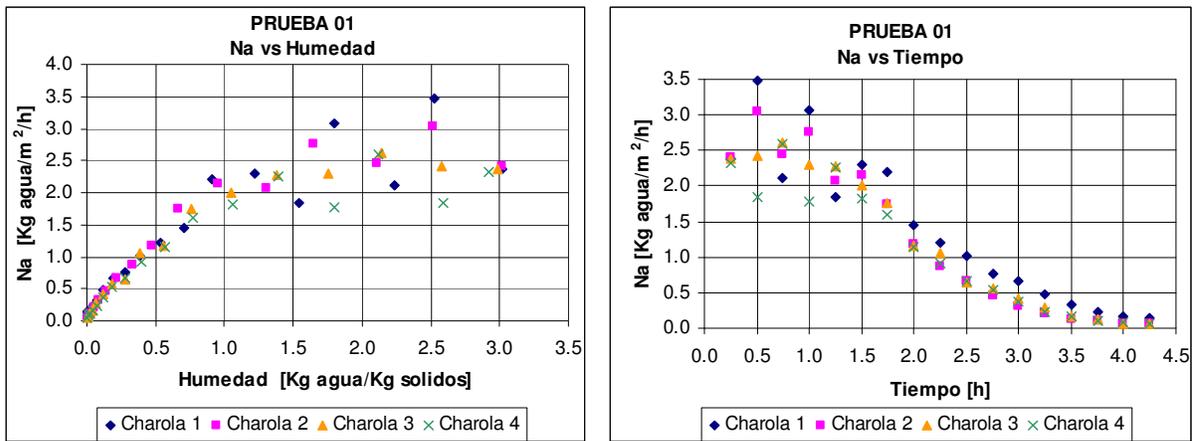


Figura 5.1.- Curvas Características de Secado de Lodo Residual (Prueba 01)

Del análisis de las curvas presentadas se puede establecer que la humedad crítica es 1.25 Kg_{agua}/Kg_{sólidos}, la velocidad en el periodo constante igual a 2.25 Kg_{agua}/m²/h y el tiempo crítico de 1.0 h.

Los datos de la prueba 02 nos muestran curvas características en donde se aprecia un periodo inicial en el que el lodo ajusta su temperatura con el medio, seguido de los periodos constante y decreciente. La figura 5.2 permite localizar los puntos correspondientes a la humedad crítica (2.0 Kg_{agua}/Kg_{sólidos}), la velocidad de secado en el periodo constante (2.2 Kg_{agua}/m²/h) y el tiempo crítico (1.0 h).

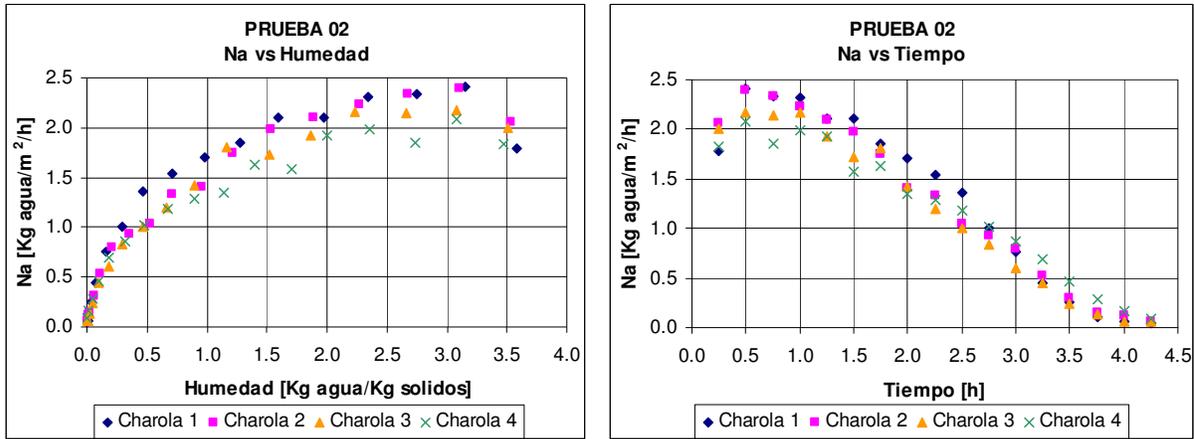


Figura 5.2.- Curvas Características de Secado de Lodo Residual (Prueba 02)

En la gráfica correspondiente a los datos de la prueba 03 se aprecia también el periodo inicial de ajuste, junto con el intervalo de secado constante y el decreciente. Los valores determinados de humedad crítica, velocidad del periodo constante y tiempo crítico son 1.3 Kg_{agua}/Kg_{sólidos}, 2.0 Kg_{agua}/m²/h y 1.5 h, respectivamente.

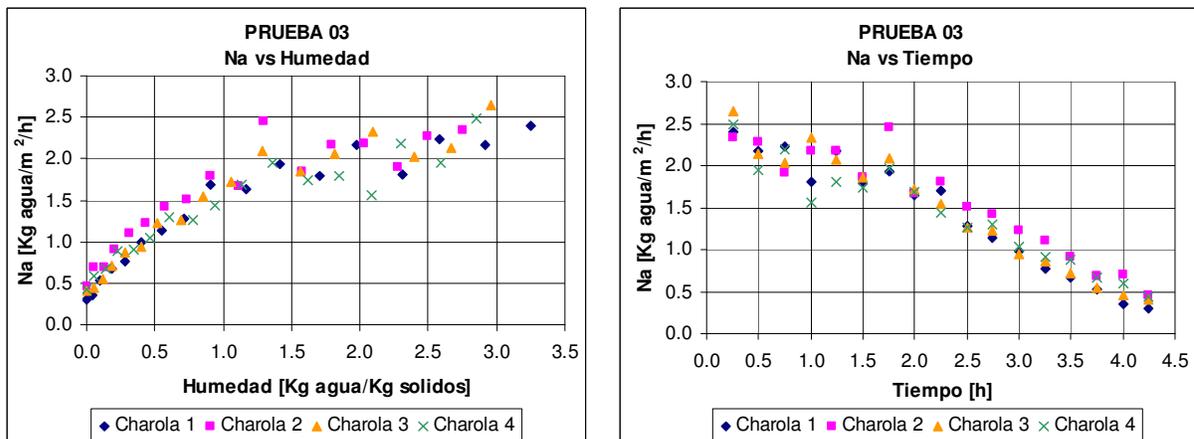


Figura 5.3.- Curvas Características de Secado de Lodo Residual (Prueba 03)

Cosa similar se presenta en la prueba 04, mas en este caso se logra observar una leve fluctuación de valores que se presenta desde el inicio del proceso hasta llegar a un 10% de humedad. Se determina que la humedad critica tiene un valor de 1.75 Kg_{agua}/Kg_{sólidos}, la velocidad del periodo constante igual a 1.40 Kg_{agua}/m²/h y el tiempo crítico de 1.35 h.

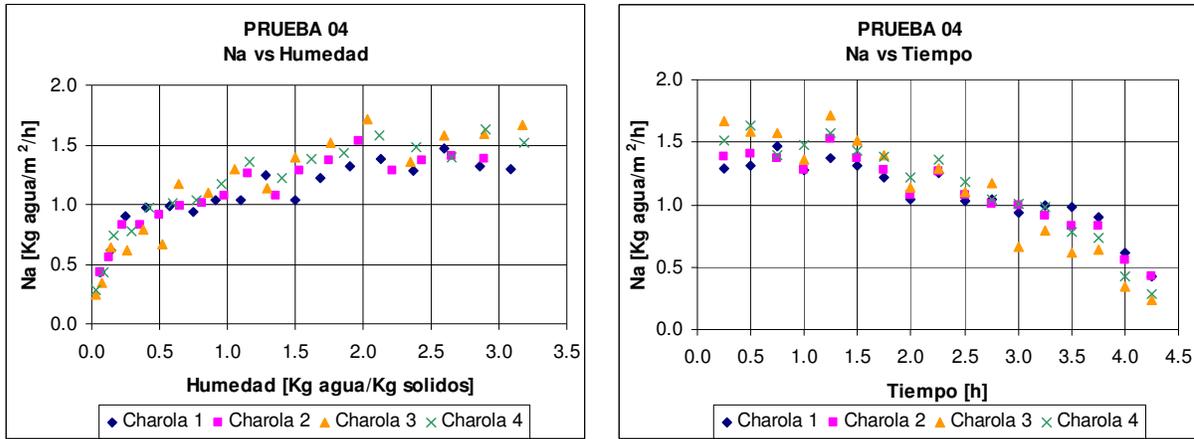


Figura 5.4.- Curvas Características de Secado de Lodo Residual (Prueba 04)

La prueba 05 difiere de las demás en las condiciones controladas de temperatura y velocidad de viento, habiéndose reducido estos dos parámetros de forma importante como se mostró en la tabla 5.1.

Debido a este motivo, y ya que la prueba se realizó en el mismo lapso de tiempo que las anteriores, no se alcanza a secar completamente el lodo y por ende no se logra formar la curva correspondiente al proceso total de secado. Sin embargo, es claro que durante el tiempo de monitoreo se presentó una velocidad de secado constante igual a 0.4 Kg_{agua}/m²/h

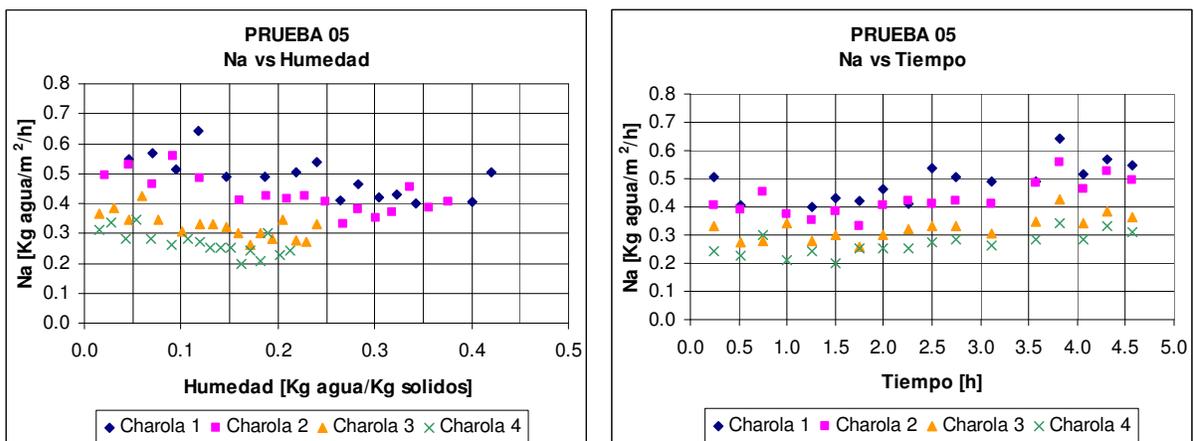


Figura 5.5.- Curvas Características de Secado de Lodo Residual (Prueba 05)

En la siguiente tabla se presenta un resumen de los datos obtenidos de las curvas características de secado y presentados en párrafos anteriores.

Tabla 5.2.- Resumen de datos

	PRUEBA				
	01	02	03	04	05
Tiempo critico [h]	1.00	1.00	1.50	1.35	-
Humedad Critica [Kg_{agua}/Kg_{solidos}]	1.25	2.00	1.30	1.75	-
Velocidad de Secado Constante	2.25	2.20	2.00	1.40	0.4

Relacionando la tabla 5.1 con la tabla 5.2 se puede observar que la velocidad de secado constante es mayor cuanto mayor sea la temperatura a la cual se realiza el proceso de secado. La velocidad del viento también es factor importante dentro del proceso puesto que, con ayuda de esta, se renueva el aire del secador.

Los valores medidos y tablas de datos de cada una de las pruebas preliminares de secado se las expone en el Anexo I del presente trabajo.

En cuanto a calidad del lodo obtenida, las fotografías 5.1 y 5.2 presentan una comparación del lodo antes del proceso de secado y luego del mismo, respectivamente. En las fotografías se puede apreciar la significativa reducción del volumen del lodo colocado en las charolas luego de las pruebas.



Fotografía 5.1.- Lodo residual antes del proceso de secado



Fotografía 5.2.- Lodo residual después del proceso de secado

Las pruebas preliminares dieron una idea del comportamiento de secado del lodo residual ante las condiciones del medio propuestas, tanto de temperatura como de velocidad del viento, con lo que de acuerdo a la forma y tendencia de las curvas se estableció que el mecanismo que gobierna el secado de los lodos residuales, bajo estas condiciones, es el de capilaridad.

5.2 Modelos Experimentales: Primera Fase

La experimentación consistió en el estudio de dos modelos: secado solar con cubierta y secado solar en invernadero, los cuales fueron puestos en marcha a partir del 10 de Octubre de 2007, temporada que corresponde al periodo invernal de la región.

Una vez colocado el lodo en los respectivos modelos y siguiendo la metodología expuesta en el capítulo anterior, se inició el monitoreo diario de los parámetros presentados en la tabla 4.1.

Los valores iniciales de humedad, coliformes fecales y huevos de helmintos del lodo residual utilizado en esta fase son: 86.24%, 3.90×10^6 NMP/g_(ST) y 1.0 HH/g_(ST), respectivamente. No se detectó *Salmonella* en las muestras recogidas al inicio y final del experimento.

Los parámetros medidos en esta primera fase experimental, se presentan en gráficas que contienen la relación de cada uno de los factores que inciden en el proceso de

secado con el incremento de la concentración de sólidos en el lodo residual. Los datos recopilados de las estaciones meteorológicas automáticas (EMA) fueron convertidos a promedios diarios de todos los parámetros medidos.

Adicionalmente, se relacionaron las condiciones del medio con el número más probable de coliformes fecales diarios encontrados en el lodo durante el periodo de secado, parámetro que fue tomado como único indicador del proceso de desinfección del material puesto que la concentración de huevos de helmintos en el lodo utilizado es mínima.

Las gráficas mencionadas se muestran para cada uno de los modelos experimentales estudiados: secado solar con cubierta y secado solar en invernadero en los siguientes numerales, mientras que los datos resultado del monitoreo de esta primera fase se presentan en el Anexo II del presente documento.

5.2.1 Secado Solar con Cubierta (SSC1)

Las condiciones medidas en el modelo de secado solar con cubierta en esta primera fase experimental, muestran individualmente escasa relación con el proceso de incremento de la concentración de sólidos en el lodo, es decir, la variación diaria de los valores de humedad ambiente, temperatura ambiente, radiación solar y velocidad del viento, cada uno visto de forma independiente no establece una relación directa con la variación diaria de la concentración de sólidos en el lodo residual.

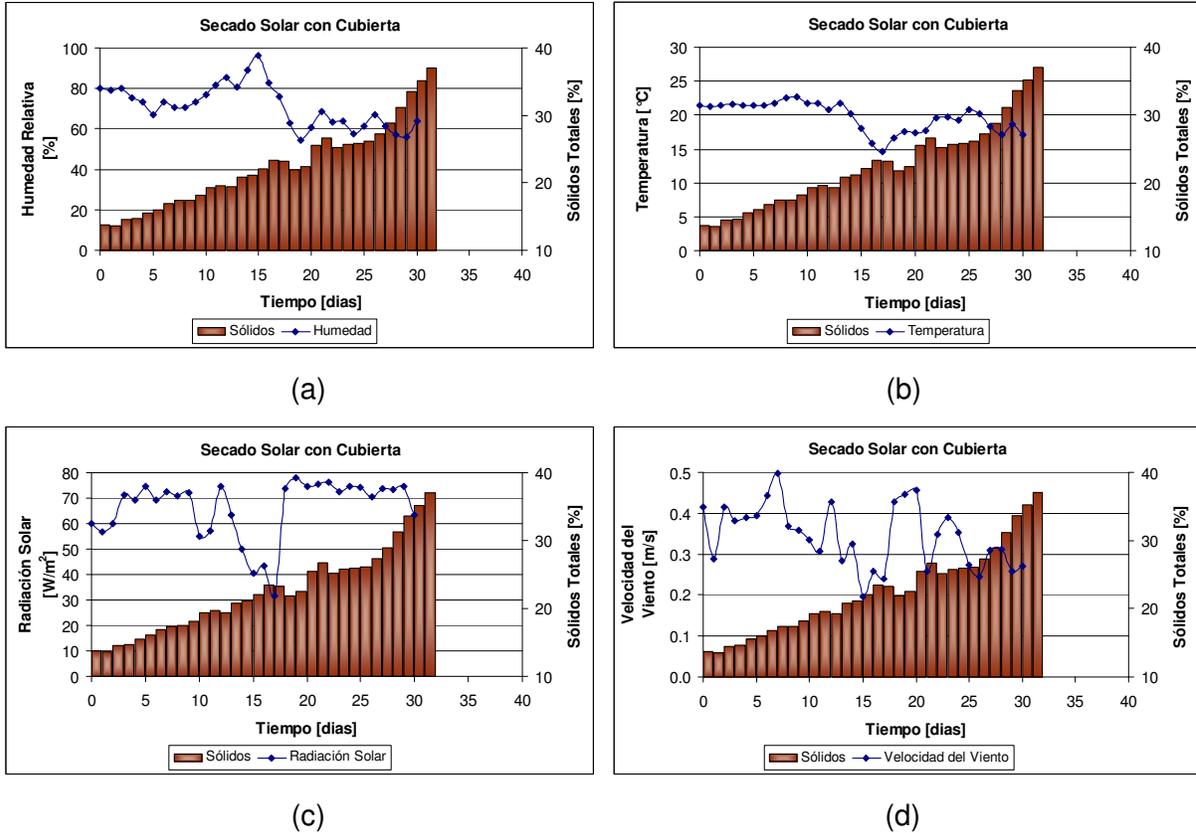


Figura 5.6.- Variación de la concentración de sólidos (SSC1) con los diferentes parámetros atmosféricos: (a) Humedad Ambiente; (b) Temperatura Ambiente; (c) Radiación Solar; (d) Velocidad del Viento.

Sin embargo, la operación de secado analizada como consecuencia de la interacción de los factores que intervienen en el proceso, resulta bastante lógica. La figura 5.7 reúne a todos los parámetros medidos referente a las condiciones atmosféricas, en ella se puede apreciar las variaciones diarias de los parámetros atmosféricos y su estrecha relación entre sí.

Al inicio del proceso de secado las condiciones atmosféricas no tienen cambios drásticos en sus valores, sin embargo, al llegar al día 14 y por un periodo de 6 días, se presenta una disminución de la temperatura ambiente, velocidad del viento, radiación solar y un incremento de la humedad.

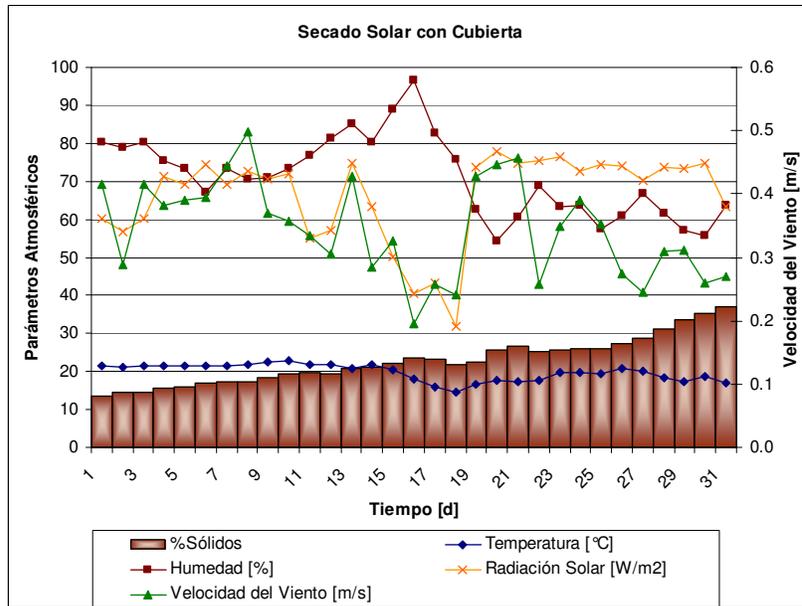


Figura 5.7.- Relación de parámetros atmosféricos con % de sólidos del lodo residual (SSC1)

Bajo estas condiciones, el secado se ve afectado ya que el agua contenida en el lodo residual no es evaporada con la misma facilidad que en un principio. El aire se encuentra saturado, baja la velocidad de la corriente de aire que desplaza esta nube saturada y al presentarse días nublados, la radiación solar se ve disminuida, aminorando así la dosis de energía de calentamiento del aire.

Una vez superada esta etapa de mal temporal hacia el día 20, se mantiene una relativa estabilidad del proceso de secado, comenzando a incrementarse el contenido de sólidos a partir del día 27. Al cumplir el tiempo de experimentación, 30 días, se obtiene un lodo con un 63.71% de humedad. Dado que la humedad obtenida es aún muy alta, se determinó la humedad del modelo nuevamente a los 40 días, registrándose un valor de 47.3%.

A los 40 días de monitoreo, se obtuvo un material de densidad de 0.79 g/cm³ ocupando un volumen de 0.1 m³.

Por otra parte, la cuantificación de coliformes fecales contenidos en el lodo muestra que efectivamente se consigue una disminución de estos durante el proceso de secado.

En la figura 5.8 se relaciona este proceso de desinfección con cada uno de los factores que intervienen en el secado y que pueden también ayudar en la destrucción de patógenos, esto es: temperatura humedad y radiación solar.

El comportamiento de los coliformes fecales durante el periodo de monitoreo mostrado en los diagramas de barras de la figura 5.8 presenta tres valores pico dentro de lo que sería la tendencia del proceso de desinfección particular de este modelo.

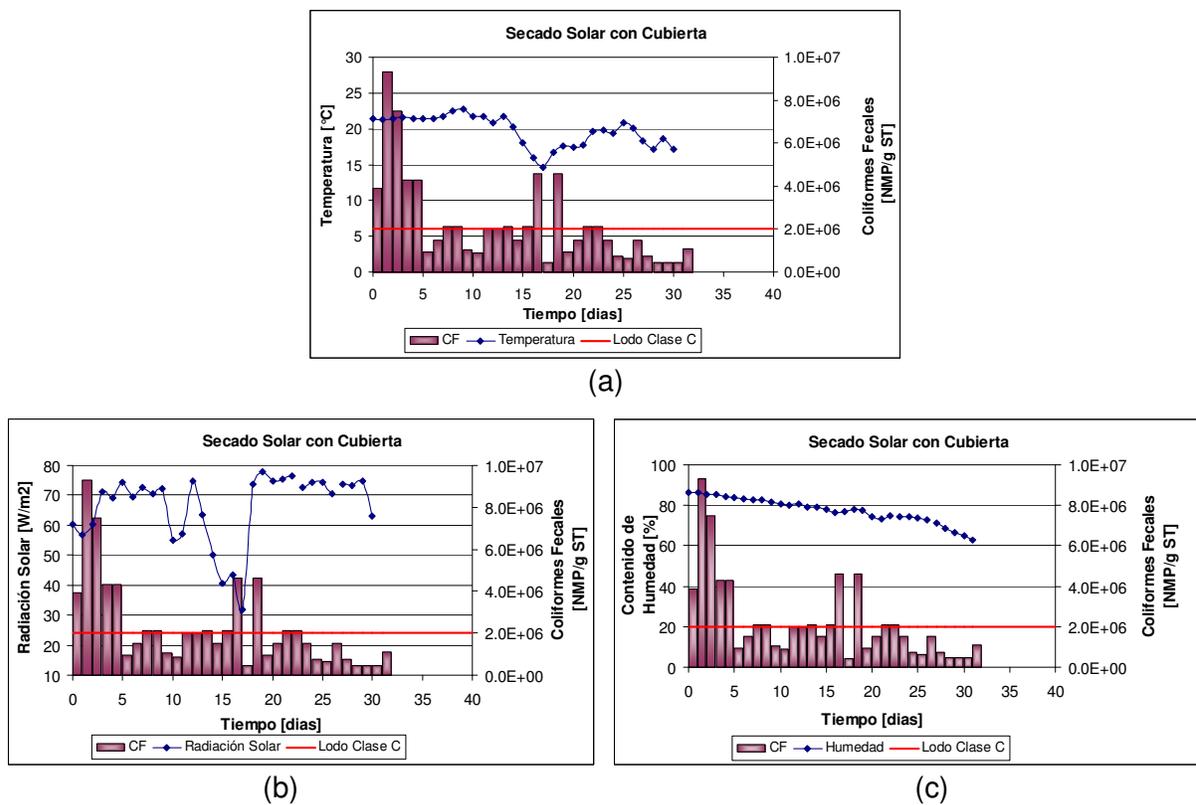


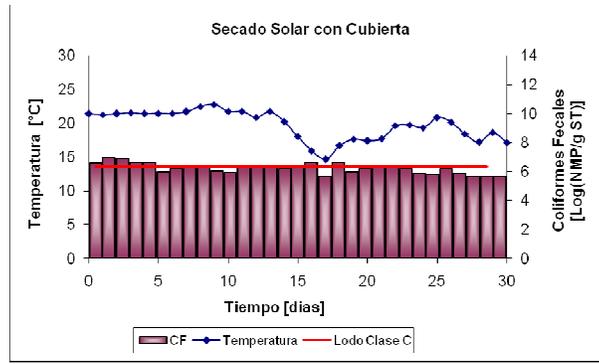
Figura 5.8.- Relación de coliformes fecales (SSC1) con: (a) Temperatura; (b) Radiación Solar; Contenido de Humedad del Lodo

El primer pico se observa al inicio del proceso, donde el valor inicial de coliformes se incrementa de un día a otro, para luego decaer hasta alcanzar, en el día 4, un NMP/g_(ST) de coliformes fecales similar al detectado al inicio, mientras que los otros dos se localizan a la mitad del proceso, volviendo la gráfica posteriormente a mantener la tendencia presentada entre el día 6 y el 15.

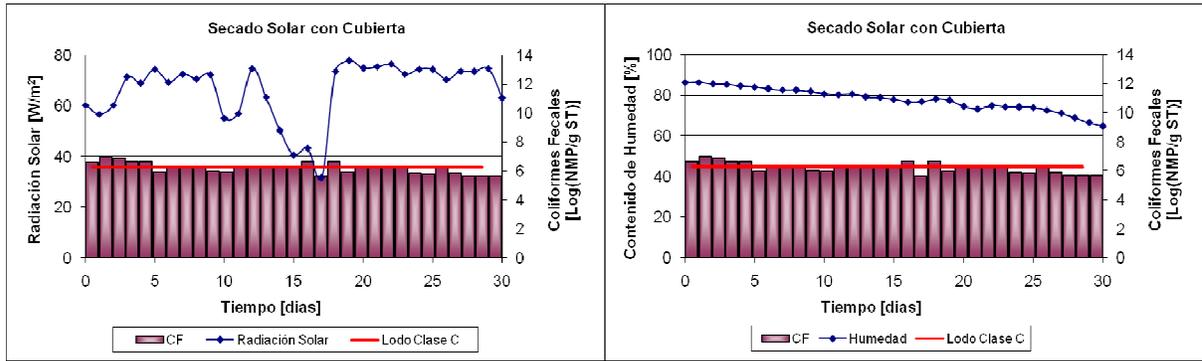
Si bien es cierto que en este lapso de tiempo también se produce una caída de los valores de radiación solar, no se considera como factor relevante en la justificación del incremento de los coliformes fecales, debido a que la radiación solar necesaria para eliminar coliformes fecales se encuentra sobre los 500 W/m² promedio en agua limpia (Martín, 2000), más aún se necesitaría para que, en el caso de lodo residuales, la radiación presente sea considerada en el proceso de desinfección.

También se puede observar en la figura 5.8 c que, a medida que pierde humedad el lodo residual, los coliformes fecales disminuyen, sin embargo, esta pérdida de humedad, no brinda una justificación a los picos encontrados a la mitad del proceso de secado.

Los picos encontrados se deben a la naturaleza heterogénea del lodo residual. A pesar de que las muestras analizadas son muestras compuestas, en la cuantificación de microorganismos pueden aparecer estos aparentes “recrecimientos”, que si se los representa en forma logarítmica se comprueba que en realidad no se trata de una sobrepoblación extrema en esos días, sino más bien de un fenómeno ajustado al desarrollo de los microorganismos del lodo residual. A continuación se presentan las gráficas mencionadas:



(a)



(b)

(c)

Figura 5.9.- Relación de coliformes fecales (log) (SSC1) con: (a) Temperatura; (b) Radiación Solar; Contenido de Humedad del Lodo

Las figuras anteriores muestran poca variación en la densidad de coliformes fecales durante el proceso de secado en función de la temperatura, humedad del lodo y radiación solar, sin embargo, al final de tiempo de experimentación se alcanza a obtener una densidad tal, que el lodo puede ser considerado, de acuerdo a la normatividad mexicana, como de clase C.

El NMP de coliformes fecales registrado al final de los 30 días de secado fue de 4.6×10^5 , y el valor registrado a los 40 días fue de 2.3×10^3 NMP/g_(ST).

Respecto a la cuantificación de huevos de helmintos en el lodo residual, se obtuvieron los valores representados en la figura 5.10, donde se observa, que la especie *Hymenolepis Diminuta* es la más común en este lodo en particular.

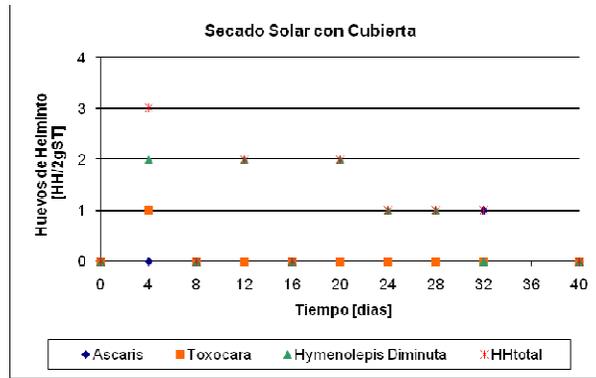


Figura 5.10.- Huevos de Helmintos en el Lodo Residual (SSC1)

Se puede notar en la gráfica 5.10 que la curva correspondiente a los valores totales de huevos de helmintos durante el tiempo de secado oscila entre 0 y 3, corroborando lo dicho en cuanto a la heterogeneidad del lodo residual y la densidad de microorganismos presentes.

Al realizar la relación entre el comportamiento de esta curva con los parámetros que pueden incidir en el crecimiento y mortandad de los huevos de helmintos (figura 5.11) se establece que la pérdida de humedad del lodo residual es el parámetro que tiene mayor afectación en el presente modelo.

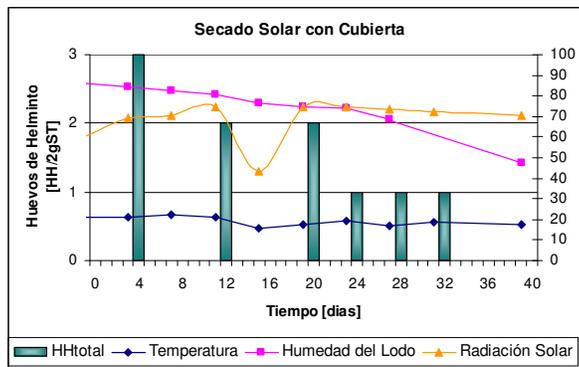


Figura 5.11.- Relación de Huevos de Helmintos en el Lodo Residual con factores de desinfección (SSC1)

5.2.1.1 Cálculos y Resultados

Con los datos obtenidos durante el proceso de secado, se procedió a efectuar los cálculos de velocidad de secado del lodo residual utilizando la ecuación 2.5, con lo que se establecieron las curvas características del proceso de secado para este modelo.

En la figura 5.12 se muestra la variación de la velocidad de secado en función del tiempo, de donde se observa que la velocidad al inicio del proceso de secado es inferior a la velocidad obtenida hacia el final del mismo, cosa que difiere, tanto con lo obtenido en las pruebas preliminares de laboratorio del presente trabajo, como en la literatura referente particularmente al secado solar de lodos (Cota, 2006).

Este fenómeno se le atribuye al diario volteo dado al material durante el proceso de secado, ya que mediante este procedimiento se logra una mayor área superficial de material expuesto a los factores de secado.

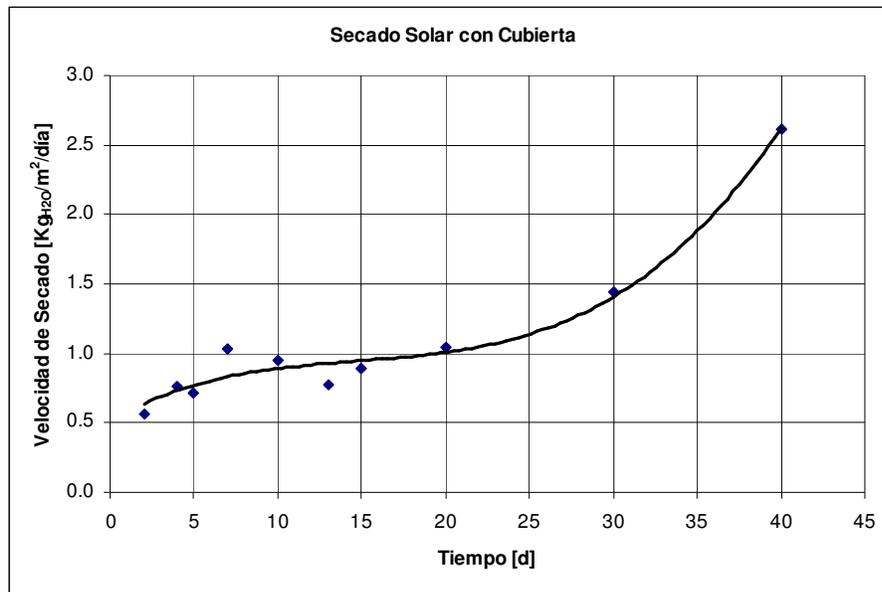


Figura 5.12.- Gráfica de la velocidad de secado en función del tiempo (SSC1)

La figura 5.13 muestra, por otra parte, la variación de la velocidad en función del contenido de humedad del lodo. Es también notorio el comportamiento opuesto a lo esperado: a medida que la humedad disminuye, la velocidad de secado aumenta.

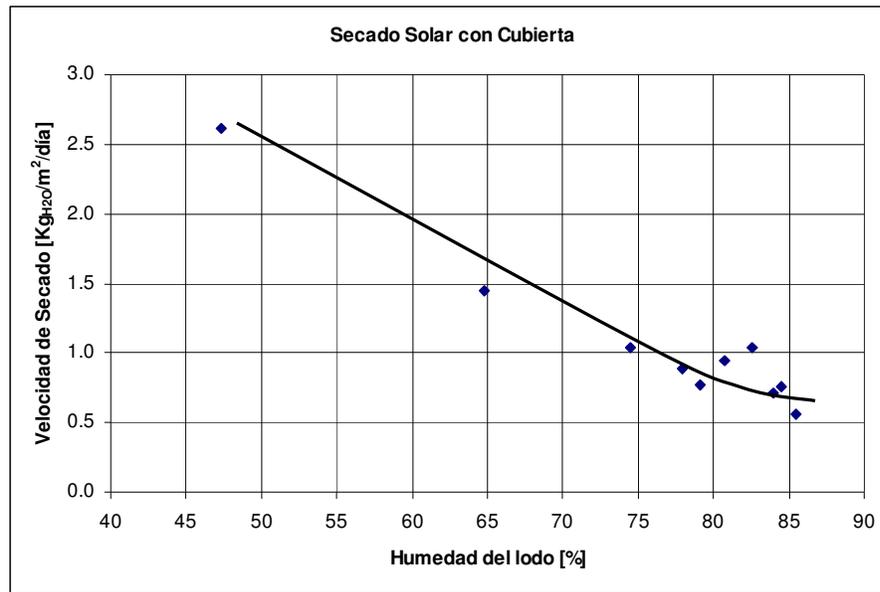


Figura 5.13.- Gráfica de la velocidad de secado en función de la humedad del lodo (SSC1)

En campo, el fenómeno representado en las gráficas anteriores es apreciable, puesto que se notó un decremento más rápido de la humedad del lodo en los días finales de la experimentación, junto con la mejor granulación del mismo.

Considerando condiciones promedio de humedad ambiente, temperatura ambiente, velocidad del viento y radiación solar en el periodo de secado, se presenta una curva relacionando la humedad del lodo en función del tiempo, para este lodo en particular (figura 5.14).

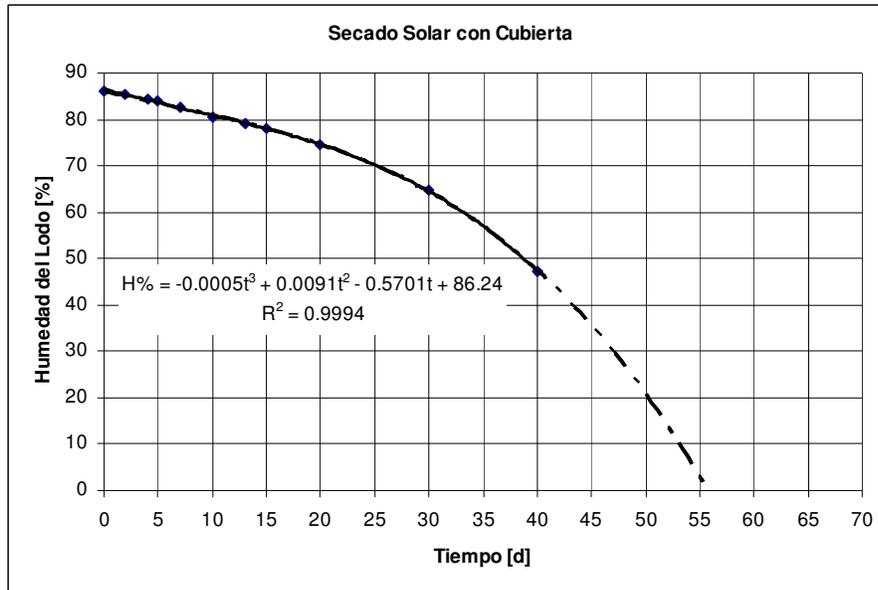


Figura 5.14.- Gráfica de la humedad del lodo en función del tiempo (SSC1)

Resultado de la gráfica correspondiente a la figura 5.14, se obtiene la ecuación 5.1, que representa el comportamiento del material durante el proceso de secado en este modelo y con las características de este lodo en particular:

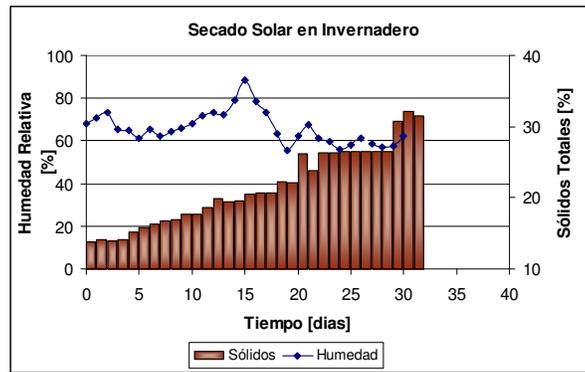
$$H\% = -0.0005t^3 + 0.0091t^2 - 0.5701t + H_o \tag{5.1}$$

Si seguimos la tendencia de la curva, se supone que el lodo residual utilizado alcanzaría a secarse completamente en un periodo de aproximadamente 56 días, pero cabe recordar que el material sometido a un proceso de secado no elimina toda el agua que contiene, es decir no puede alcanzar condiciones de humedad igual a cero. Adicionalmente, dadas las condiciones atmosféricas a cuyos valores se efectúe el secado, existirá una humedad de equilibrio tal que no pueda evaporarse más agua del lodo mediante este mecanismo. En este caso en particular al terminar el periodo de pruebas el lodo no llega a alcanzar su humedad de equilibrio.

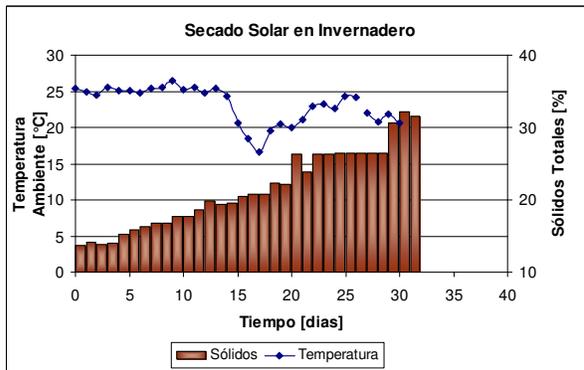
La velocidad promedio alcanzada en esta fase experimental por el modelo SSC1 es 1.08 Kg_{H2O}/m²/d, perdiendo el lodo residual un 38.94% de su humedad inicial durante 40 días de experimentación.

5.2.2 Secado Solar en Invernadero (SSI1)

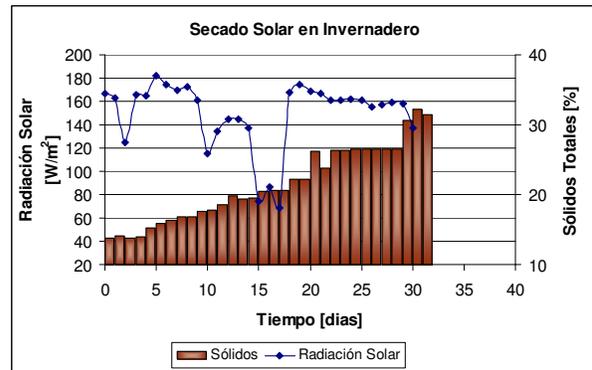
De la misma forma establecida para el modelo SSC1, las condiciones medidas en el modelo de secado en invernadero se presentan, en primera instancia, en gráficas que muestran de manera independiente el efecto de cada uno de los factores climáticos medidos en el proceso de secado. En este caso no se presentan curvas en función de la velocidad del viento puesto que el anemómetro instalado no registró valor alguno.



(a)



(b)



(c)

Figura 5.15.- Variación de la concentración de sólidos (SSI1) con los diferentes parámetros atmosféricos: (a) Humedad Ambiente; (b) Temperatura Ambiente; (c) Radiación Solar

Como en el caso del modelo con cubierta, las gráficas de la figura 5.15 no presenta una visualización de una relación directa individual de los parámetros medidos en el proceso de secado del lodo residual, por lo que se analiza una gráfica conjunta de

los parámetros atmosféricos versus el incremento de la concentración de sólidos totales, mostrados en la figura 5.16.

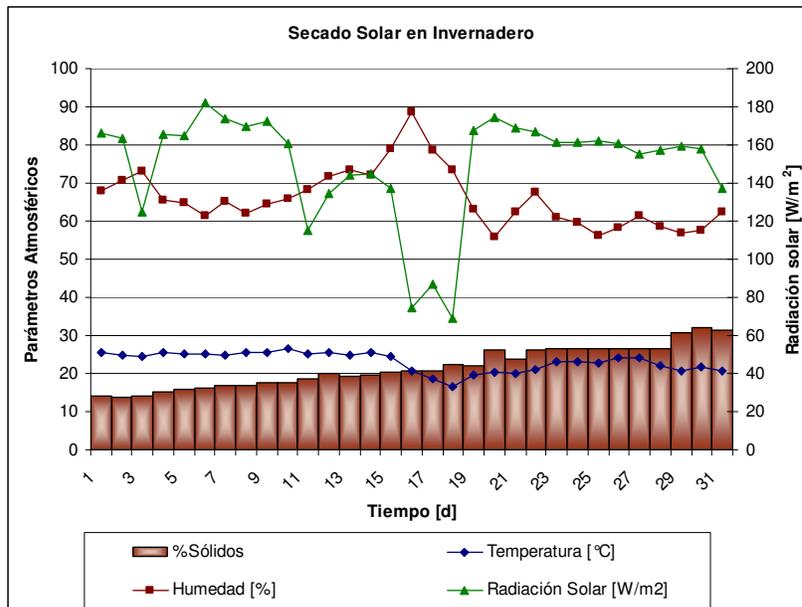


Figura 5.16.- Relación de parámetros atmosféricos con % de sólidos del lodo residual (SSI1)

De acuerdo a esta última gráfica, el modelo de secado solar en invernadero presenta menos fluctuación de los valores de temperatura que en el secado con cubierta. Adicionalmente, se aprecia que el modelo trabaja con valores muy superiores de radiación solar, esto debido a que se utilizaron materiales diferentes para cubrir cada uno de los modelos.

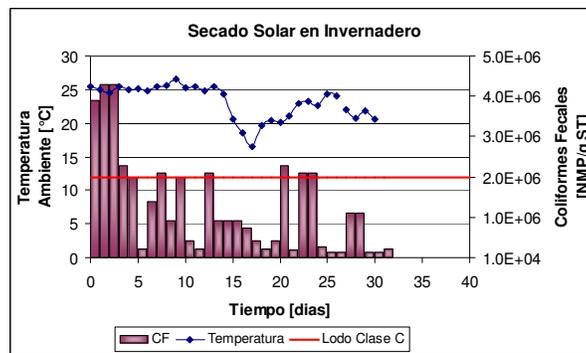
Los bajos valores de radiación solar entre los días 15 y 18, producen un decremento de la temperatura en el invernadero, sin embargo, el proceso de secado no se ve alterado en gran medida por este fenómeno.

Pese a que la velocidad del viento es nula dentro del invernadero, el secado mantiene su tendencia, pero cabe resaltar que se presentó en reiteradas ocasiones condensación del aire húmedo en el techo del invernadero lo que provocó la caída de gotas de agua al lodo residual humedeciéndolo nuevamente.

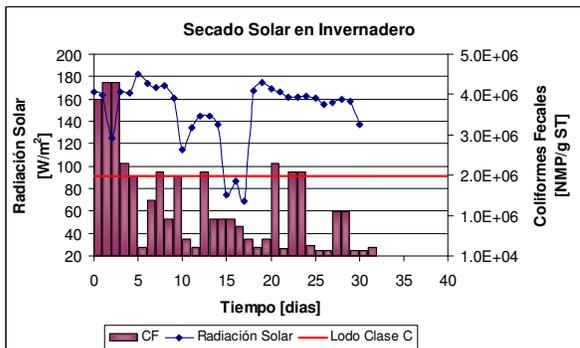
Al cumplir los 30 días de experimentación en el modelo SSI1, se obtiene un lodo con un 69.32% de humedad, mientras que a los 40 días su humedad es de 51.50%. Se obtuvo un material de densidad de 0.84 g/cm³, ocupando un volumen de 0.18 m³.

En lo que refiere a los coliformes fecales, se hace un análisis de los valores obtenidos durante el proceso de secado en función de los parámetros influyentes en la desinfección. Igual que en el modelo con cubierta se presenta disminución de estos patógenos.

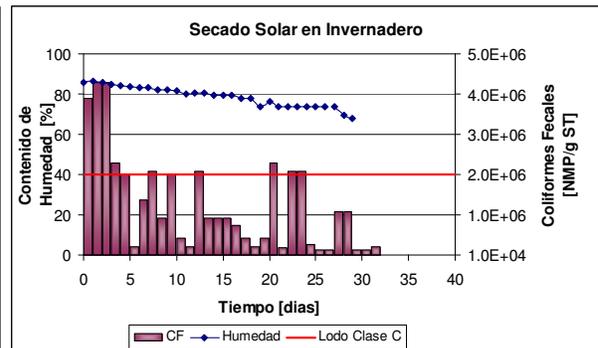
La figura 5.17 muestra el comportamiento de los coliformes fecales durante el periodo de monitoreo, donde se relaciona el NMP de coliformes fecales con la temperatura ambiente, la radiación solar y la humedad ambiente, respectivamente.



(a)



(b)

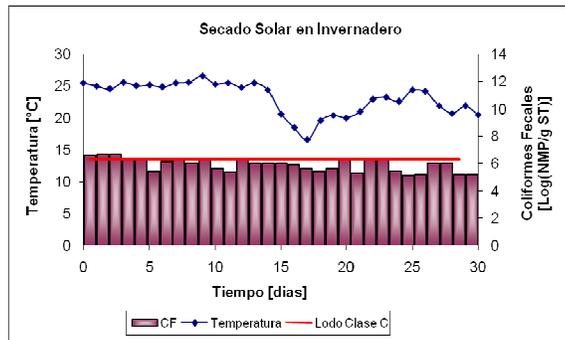


(c)

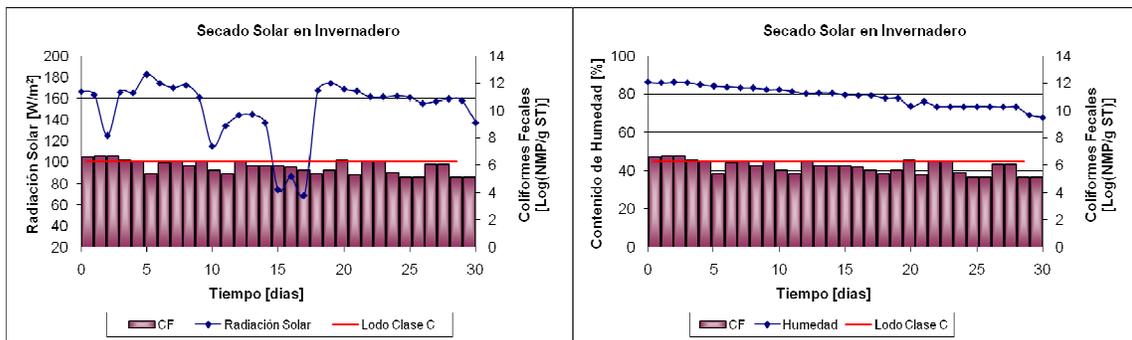
Figura 5.17.- Relación de coliformes fecales (SSI1) con: (a) Temperatura; (b) Radiación Solar; Contenido de Humedad del Lodo

Al inicio del proceso se aprecia un incremento del NMP de coliformes, esto se considera como parte del periodo de estabilización ante las nuevas condiciones atmosféricas. Posteriormente, se produce una mortandad de microorganismos hasta el día 5, a partir del cual vuelven a incrementarse sin sobrepasar el límite de lodo clase C. Del día 5 al 13 se observa una fluctuación en los coliformes fecales, sin embargo, en el periodo del 14 al 20 vuelve a estabilizarse el proceso de desinfección.

Algo curioso que se presenta en este modelo, es la fluctuación que existe en los valores registrados de estos microorganismos durante el proceso de secado y la poca relación existente de este comportamiento con los valores registrados de las condiciones atmosféricas del modelo. Sin embargo, al utilizar nuevamente valores logarítmicos de coliformes fecales se comprueba que la tendencia de desarrollo de microorganismos es similar a la observada en el modelo SSC1, como se muestra en la figura 5.18.



(a)



(b)

(c)

Figura 5.18.- Relación de coliformes fecales (log) (SSI1) con: (a) Temperatura; (b) Radiación Solar; Contenido de Humedad del Lodo

El NMP de coliformes fecales registrado en el modelo SSI1 al final de los 30 días de secado fue de 1.5×10^5 , y el valor registrado a los 40 días fue de 2.1×10^4 NMP/g_(ST).

Siguiendo con las pruebas microbiológicas, la identificación de huevos de helmintos muestra que, al igual que en el modelo SSI1, el tipo característico encontrado en este lodo residual es Hymenolepis Diminuta.

En cuanto a la cuantificación de los huevos de helmintos, la figura 5.19 muestra que en el periodo de 40 días se encontraron de 0 a 2 huevos.

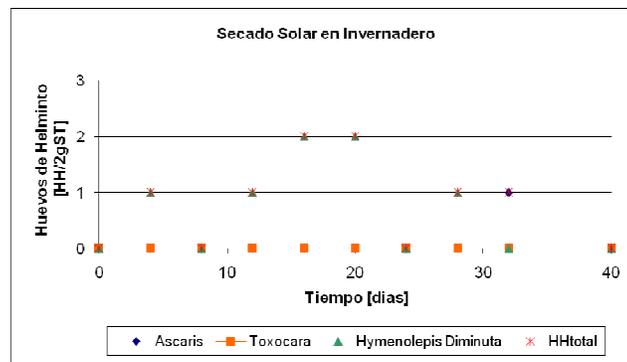


Figura 5.19.- Huevos de Helmintos en el Lodo Residual (SSI1)

El número de huevos de helmintos encontrados en los días de muestreo se representan en la gráfica correspondiente a la figura 5.20, en función de los parámetros: temperatura ambiente, humedad del lodo y radiación solar.

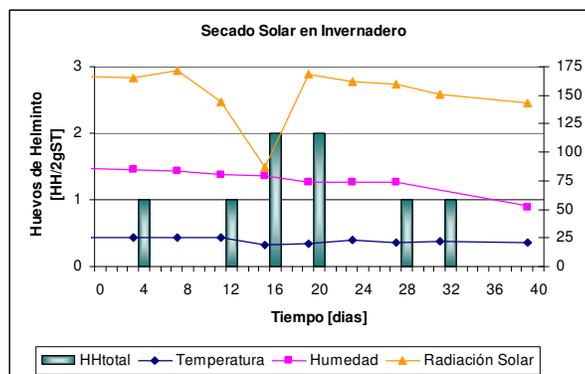


Figura 5.20.- Relación de Huevos de Helmintos en el Lodo Residual con factores de desinfección (SSI1)

Los huevos de helmintos contabilizados no dan una idea clara de su comportamiento en el proceso de secado por encontrarse en mínimas cantidades. Sin embargo, de acuerdo a lo mostrado en la figura 5.20, se establece que la pérdida de humedad del lodo residual es el parámetro que tiene mayor afectación en el presente modelo.

5.2.2.1 Cálculos y Resultados

Con los datos de humedad del lodo residual obtenidos, se realizaron los cálculos correspondientes a la velocidad de secado del lodo residual con la ecuación 2.5, y se elaboraron las correspondientes curvas características.

En la figura 5.21 se muestra la variación de la velocidad de secado en función del tiempo. Al igual que en el modelo SSC1, la velocidad al inicio del proceso de secado es inferior a la velocidad obtenida hacia el final del mismo. La curva presentada tiene la misma tendencia que el modelo anterior.

Adicionalmente, se observa que la velocidad de secado alcanzada a los 40 días de secado es menor a la alcanzada en el mismo tiempo en el modelo SSC1.

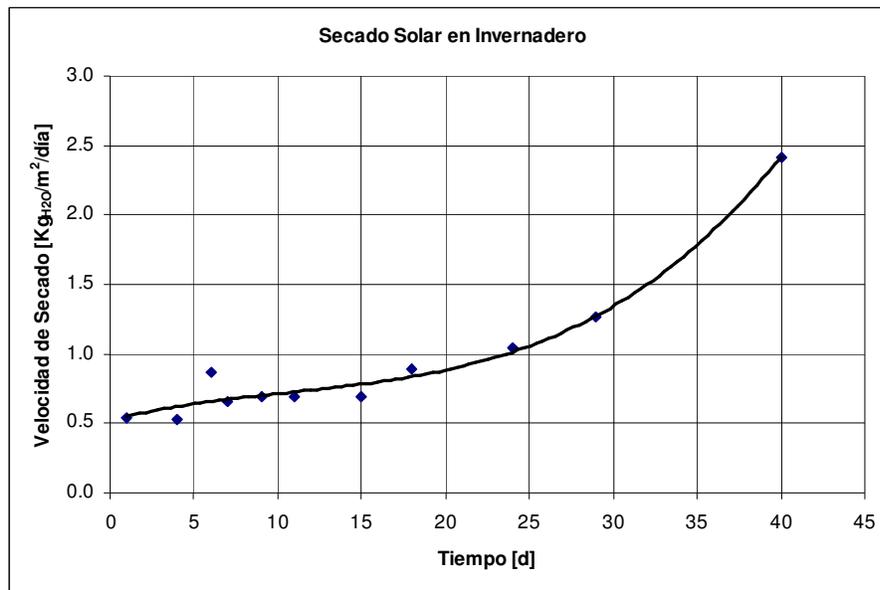


Figura 5.21.- Gráfica de la velocidad de secado en función del tiempo (SSI1)

Se puede observar en la gráfica anterior que en los primeros días de experimentación el agua contenida en el lodo residual es más difícil de evaporar que al final del periodo, esto se explica debido a que el material en un inicio presenta una consistencia pastosa, y a medida que transcurre el proceso de secado, gracias a la realización de volteo diario, poco a poco se va granulando y al tener una mayor área superficial expuesta, la velocidad de secado se incrementa más rápidamente en menor tiempo.

Este fenómeno también se puede observar en la figura 5.22 donde, a medida que se va perdiendo la humedad existe mayor velocidad de secado, aunque en esta gráfica es menor la variación de la pendiente de la curva.

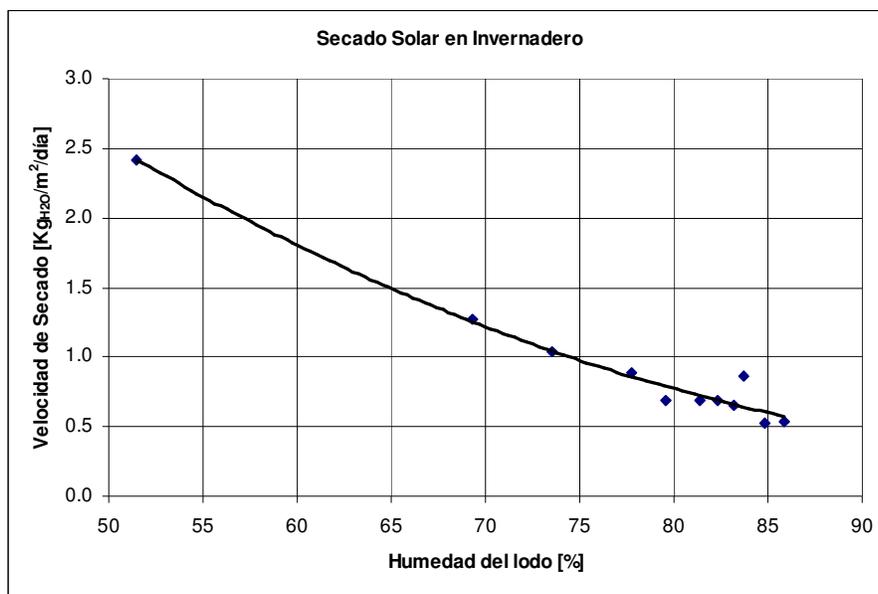


Figura 5.22.- Gráfica de la velocidad de secado en función de la humedad del lodo (SSI1)

Al igual que para el modelo de SSC1, se consideran condiciones promedio de humedad ambiente, temperatura ambiente, velocidad del viento y radiación solar en el periodo de secado y se presenta una curva relacionando la humedad del lodo en función del tiempo (figura 5.23).

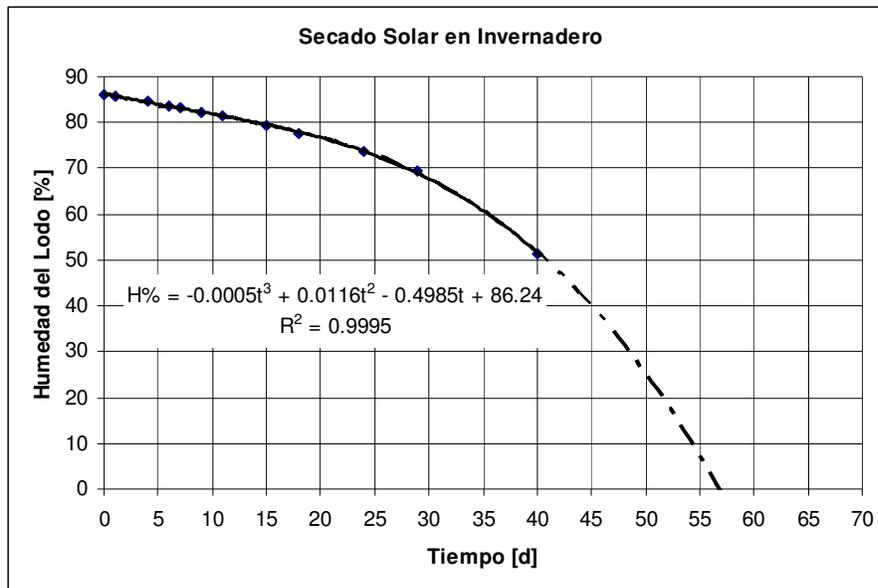


Figura 5.23.- Gráfica de la humedad del lodo en función del tiempo (SSI1)

Resultado de la gráfica correspondiente a la figura 5.23, se obtiene la siguiente ecuación:

$$H\% = -0.0005t^3 + 0.0116t^2 - 0.4985t + H_0 \tag{5.2}$$

Esta fórmula describe la pérdida de humedad del lodo en función del tiempo hasta llegar a una humedad de equilibrio, a partir de la cual el lodo residual no puede perder más humedad, pese a encontrarse bajo las mismas condiciones atmosféricas por un periodo más largo de tiempo.

La velocidad promedio alcanzada en esta fase experimental por el modelo SSI1 es 0.93 Kg_{H2O}/m²/d, perdiendo el lodo residual un 34.74% de su humedad inicial durante los 40 días de experimentación.

5.3 Modelos Experimentales: Segunda Fase

La segunda parte de la investigación se la realizó en el periodo Febrero-Marzo de 2008. Consistió en el monitoreo de los dos modelos ya descritos: secado solar con cubierta y secado solar en invernadero.

Se efectuaron los mismos análisis y se midieron los mismos parámetros que en la fase uno del presente trabajo, pero ahora con una periodicidad de tres días, ampliando a 41 días el tiempo experimental. Los datos recopilados de las estaciones meteorológicas automáticas (EMA) fueron convertidos nuevamente a promedios diarios de todos los parámetros medidos.

Las tablas de los datos de monitoreo y cálculos referentes a esta segunda fase experimental se presentan en el Anexo III del presente trabajo.

Los valores iniciales de humedad, coliformes fecales y huevos de helmintos del lodo residual utilizado en esta fase son: 89.10%, 1.38×10^7 NMP/g_(ST) y 1.0 HH/g_(ST), respectivamente. Tampoco en esta fase se detectó la presencia de *Salmonella* en el lodo residual utilizado.

El análisis presentado en esta segunda fase experimental se lo hace en base al mismo tipo de gráficas presentadas en la primera fase, con algunas excepciones. Debido a que en la primera fase, las gráficas correspondientes a la relación entre la concentración de sólidos en el lodo y los parámetros ambientales individualmente expuestos, no presentan una adecuada interpretación, los resultados de la segunda fase se exponen en un gráfica conjunta de la concentración de sólidos en el lodo en función de todas las variables atmosféricas.

En el caso del análisis de huevos de helmintos en el lodo residual durante el proceso de secado en esta segunda fase no se presentan las gráficas correspondientes, debido a que, pese a tener un dato inicial de este parámetro (1 HH/2g_(ST)), las 5 pruebas siguientes, correspondientes a 15 días de secado, no registraron valor alguno.

Siguiendo la misma secuencia de análisis de la primera fase, a continuación se describen los resultados obtenidos de los modelos: secado solar con cubierta y secado solar en invernadero.

5.3.1 Secado Solar con Cubierta (SSC2)

La figura 5.24 muestra la variación del porcentaje de sólidos en el lodo residual a través del tiempo influenciada por la acción conjunta de temperatura ambiente, radiación solar, humedad ambiente y velocidad del viento.

Al inicio del proceso de secado, hasta el día 12, las condiciones atmosféricas no tienen cambios drásticos en sus valores, excepto la velocidad del viento. Durante este periodo la concentración de sólidos aumenta lentamente, sin embargo, a partir del día 15 al 30, la concentración de sólidos se incrementa mucho más rápido que al inicio. Durante este periodo se observa un aumento en la radiación solar, de 70 W/m² a 95 W/m², y una relativa estabilidad en cuanto a los valores de velocidad de viento registrados, entre 1.5 y 2 m/s.

A partir del día 33 hasta el final del proceso de secado, concentración de sólidos en el lodo residual se mantiene alrededor de 89%, pese a que las condiciones atmosféricas siguen siendo favorables, por lo que se determina que se ha llegado a la humedad de equilibrio del sistema.

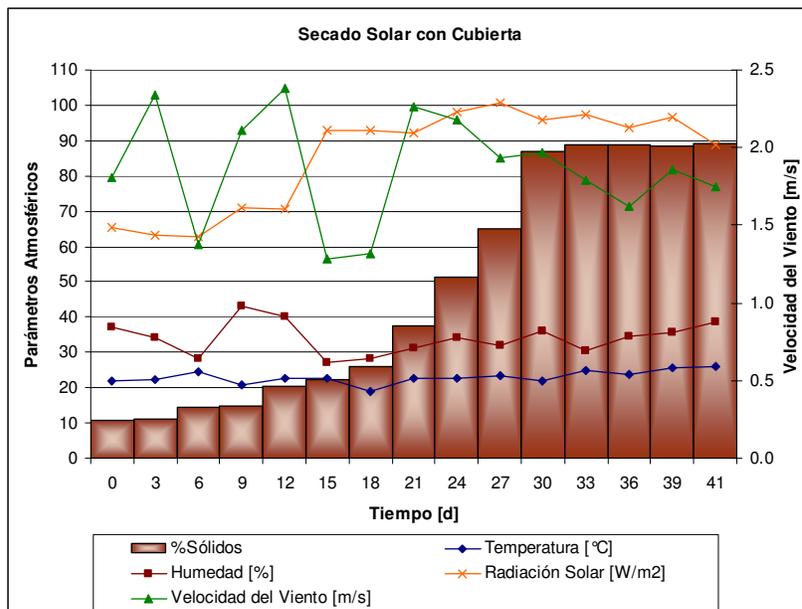
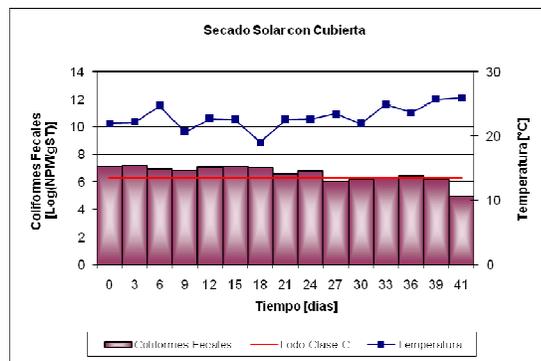


Figura 5.24.- Relación de parámetros atmosféricos con % de sólidos del lodo residual (SSC2)

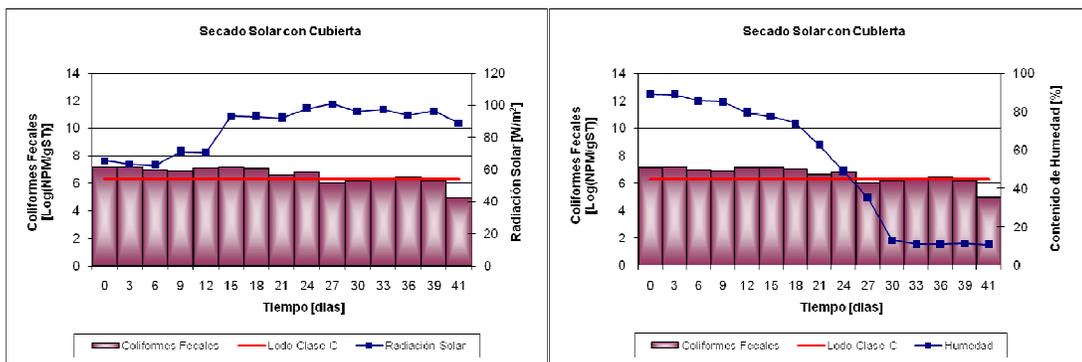
Cabe resaltar que en esta segunda fase experimental, la humedad relativa del aire es aproximadamente el 50% de la monitoreada en la primera. Algo similar ocurre con la velocidad del viento, que pasa de un promedio de 0.3 m/s registrado en la primera fase a 1.75 m/s.

Al cumplir los 41 días de experimentación en el modelo SSC2, se obtiene un lodo residual con 10.90% de humedad, con una densidad de 0.75 g/cm³ ocupando un volumen de 0.02 m³.

Con relación a la evaluación de coliformes fecales del lodo, la figura 5.25 muestra la evolución de estos microorganismos en unidades logarítmicas, en función de la temperatura, humedad del lodo y radiación solar, durante el proceso de secado.



(a)



(b)

(c)

Figura 5.25.- Relación de coliformes fecales (SSC2) con: (a) Temperatura; (b) Radiación Solar; Contenido de Humedad del Lodo

En un principio la pérdida de humedad del lodo es lenta, por lo que, hasta el día 18, se observa poca variación en el $\text{NMP/g}_{(\text{ST})}$ de coliformes fecales. A partir de este día hasta el día 30, existe un cambio de pendiente en la curva de humedad, traduciéndose a un incremento en la velocidad de secado, y por lo tanto un decremento rápido del contenido de agua en el lodo. Se debe notar, que adicionalmente durante este periodo, la radiación solar incrementa su valor, así como también la temperatura, esta última aumenta 5°C en promedio, por lo que se nota un decremento en la densidad de coliformes encontrados en el lodo, logrando alcanzar valores bajo los límites establecidos por la normatividad mexicana para ser catalogado como lodo clase C.

Del día 30 en adelante, las condiciones de secado se mantienen y al final del periodo de experimentación (41 días) se detectan $5.0 \log (\text{NMP/g}_{(\text{ST})})$ de coliformes fecales en el lodo residual.

5.3.1.1 Cálculos y Resultados

Utilizando los datos obtenidos durante los 41 días de secado se procedió a efectuar los cálculos de velocidad de secado del lodo residual utilizando la ecuación 2.5, y se elaboraron las curvas características para este modelo.

La figura 5.26 muestra la variación de la velocidad de secado en función del tiempo. La curva obtenida, en una primera etapa creciente, tiene tendencia similar a la presentada en modelos anteriores, sin embargo, posterior a esta etapa creciente, se presentan tres puntos que no se obtuvieron anteriormente debido a las condiciones bajo las cuales trabajaron los modelos SSC1 y SSI1.

Estos puntos muestran que una vez cumplidos los 30 días de monitoreo, la velocidad de secado se desploma en un periodo de 3 días, de un valor de $11.22 \text{ Kg}_{\text{H}_2\text{O}}/\text{m}^2/\text{día}$ a $1.08 \text{ Kg}_{\text{H}_2\text{O}}/\text{m}^2/\text{día}$, llegando a los 41 días con una velocidad de $0.03 \text{ Kg}_{\text{H}_2\text{O}}/\text{m}^2/\text{día}$. Este proceso se explica puesto que, en un inicio, el material presenta una velocidad de secado mayor a medida que transcurre el tiempo, esto debido al proceso de granulación explicado en los modelos anteriores, sin embargo, al llegar el lodo a la

humedad de equilibrio, el contenido de agua del material restante no corresponde a el porcentaje de agua que puede ser eliminada por medio del secado solar, decayendo bruscamente la velocidad de secado.

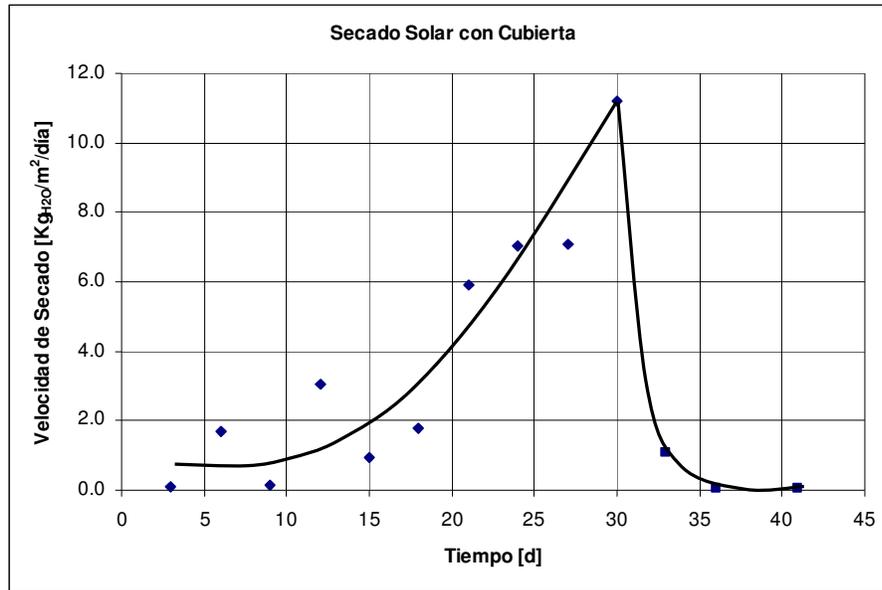


Figura 5.26.- Gráfica de la velocidad de secado en función del tiempo (SSC2)

Bajo las mismas características, la figura 5.27, muestra la variación de la velocidad en función del contenido de humedad del lodo. Se observa que la velocidad de secado aumenta a medida que el material va perdiendo humedad (fenómeno ya observado en los modelos analizados anteriormente) y una vez alcanzado 13.20% de humedad la velocidad decae hasta el valor ya mencionado de 0.03 Kg_{H2O}/m²/día, obteniéndose finalmente 10.90% de contenido de humedad en el lodo residual.

A partir de estos valores y considerando los factores que intervienen en el secado como valores constantes durante el periodo de experimentación, se presenta una curva en la que se representa la variación del contenido de humedad del lodo residual en función del tiempo (figura 5.28) y como resultado de esta gráfica se obtiene la siguiente ecuación:

$$H\% = -0.0038t^3 + 0.0528t^2 - 0.6893t + H_0 \tag{5.3}$$

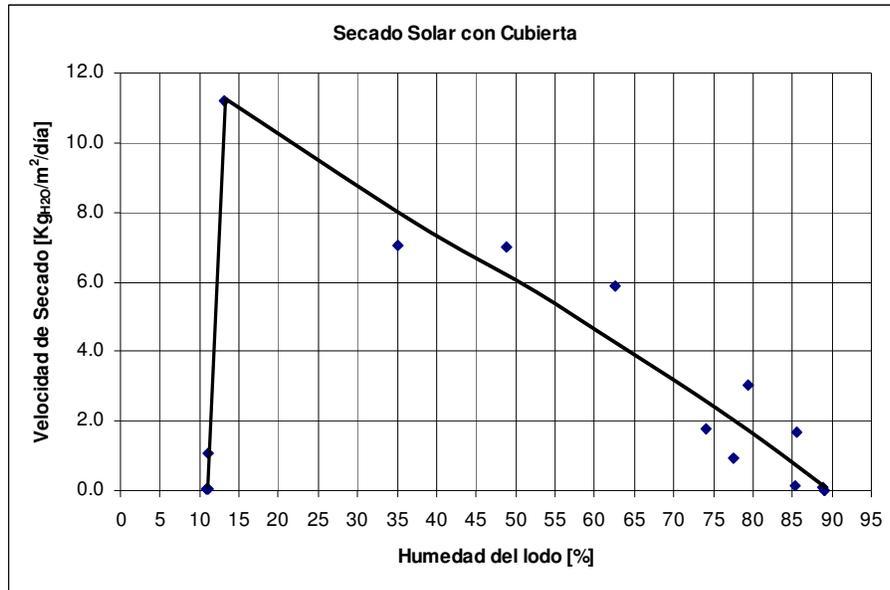


Figura 5.27.- Gráfica de la velocidad de secado en función de la humedad del lodo (SSC2)

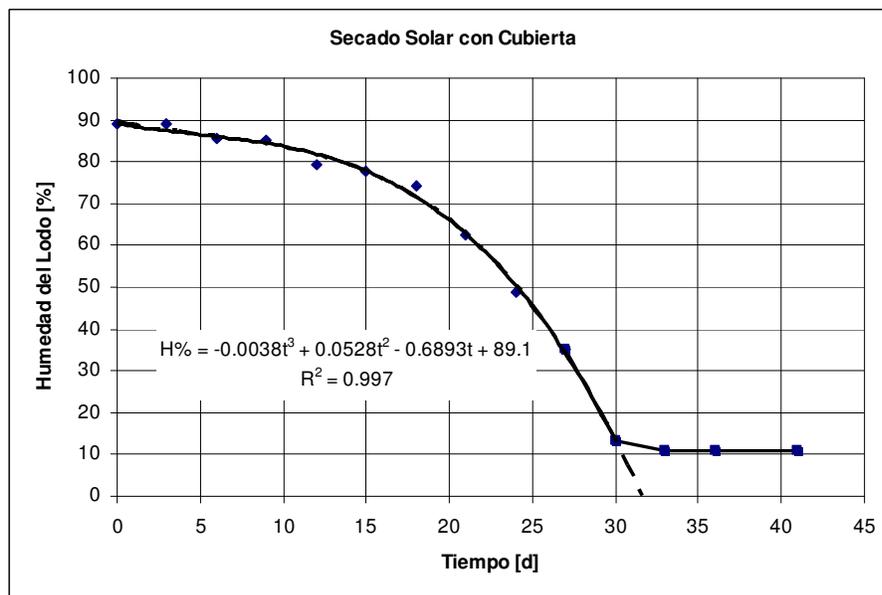


Figura 5.28.- Gráfica de la humedad del lodo en función del tiempo (SSC2)

La fórmula 5.3 describe la pérdida de humedad del lodo en función del tiempo hasta llegar a una humedad cercana a la humedad de equilibrio, a partir de la cual la ecuación no tiene validez alguna, sin embargo, la aproximación dada en casi la totalidad del proceso de secado es aceptable.

La velocidad promedio alcanzada en esta fase experimental por el modelo SSC2 es 3.89 Kg_{H2O}/m²/d, perdiendo el lodo residual un 78.20% de su humedad inicial durante los 41 días de experimentación.

5.3.2 Secado Solar en Invernadero (SSI2)

El proceso de secado en el caso del modelo en invernadero se expone en la figura 5.29, en donde se muestra la variación del porcentaje de sólidos en el lodo residual en función de la temperatura en el invernadero, radiación solar y humedad ambiente. Pese a que durante esta fase se registraron mayores valores de velocidad del viento, dentro del invernadero, el anemómetro instalado, no registro valor alguno.

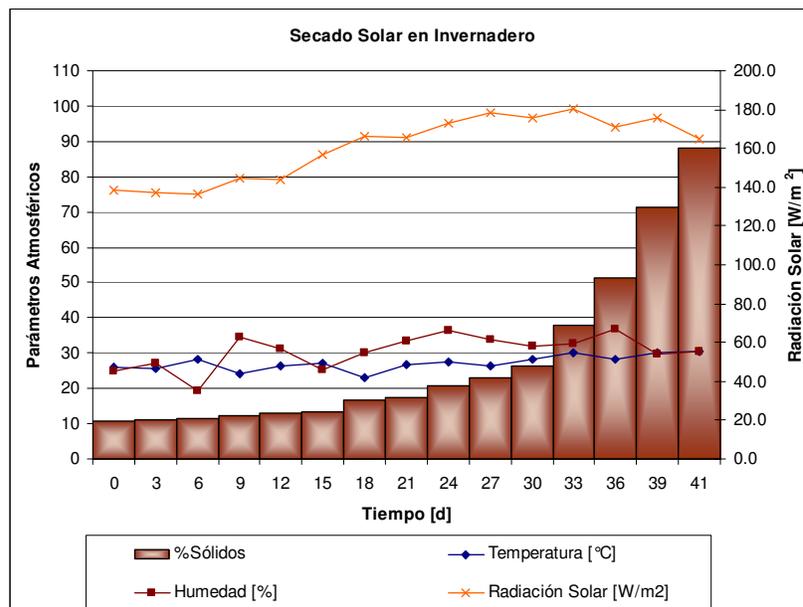
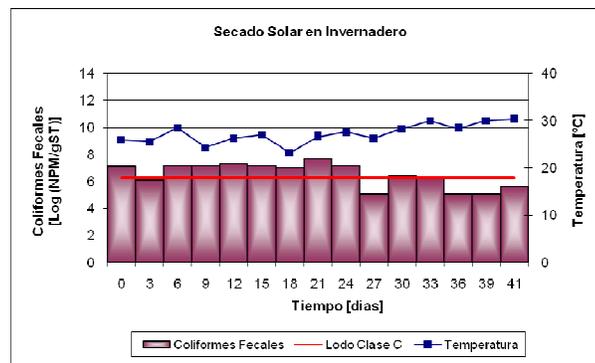


Figura 5.29.- Relación de parámetros atmosféricos con % de sólidos del lodo residual (SSI2)

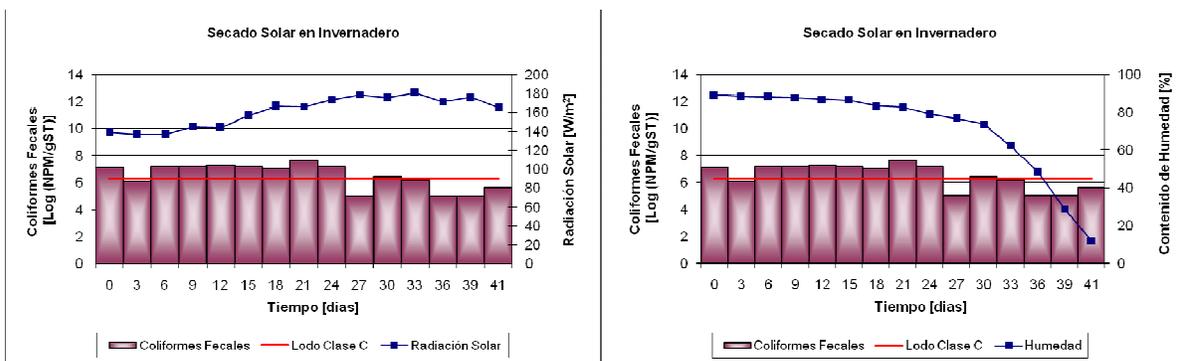
Se observa en la gráfica de la figura 5.29, que al inicio del proceso de secado, hasta el día 15, el secado del lodo residual se realiza lentamente, a partir del día 18 se nota una mayor pérdida de humedad, incrementándose a partir del día 33 hasta el final del proceso. Las condiciones atmosféricas del invernadero no tienen cambios drásticos en sus valores, pudiéndose observar, como cambio significativo, un incremento de la radiación solar hacia el día 15, de 123.78 W/m² a 146.58 W/m².

Al cumplir los 41 días de experimentación en el modelo SSI2, se obtiene un lodo residual con 11.90% de humedad, con una densidad de 0.79 g/cm³ y ocupando un volumen de 0.03 m³.

Respecto a la evaluación de coliformes fecales del lodo residual utilizado, la figura 5.30 muestra los valores logarítmicos calculados en base a las mediciones de cada tercer día del proceso de secado en función de la temperatura del invernadero, humedad del lodo y radiación solar.



(a)



(b)

(c)

Figura 5.30.- Relación de coliformes fecales (SSI2) con: (a) Temperatura; (b) Radiación Solar; Contenido de Humedad del Lodo

Al igual que lo registrado en el modelo SSC2 es notorio que en un inicio la pérdida de humedad del lodo es lenta, por lo que se observa también poca variación en la densidad de coliformes fecales. Sin embargo, hacia los últimos 10 días de experimentación el contenido de coliformes fecales disminuye logrando alcanzar

valores bajo los límites establecidos por la normatividad mexicana. Al final de los 41 días de experimentación se detectaron 5.6 log (NMP/g_(ST)) de coliformes fecales en el lodo residual.

5.3.2.1 Cálculos y Resultados

Con los datos recopilados durante los 41 días de monitoreo se realizó el cálculo de velocidad de secado del lodo residual utilizando la ecuación 2.5, y se elaboró las curvas características del proceso de secado para este modelo.

La figura 5.31 muestra la curva de velocidad de secado versus el tiempo. Se observa, al igual que en los casos anteriores, que la velocidad de secado aumenta en el tiempo, siendo aun más apreciable este evento a partir del día 24.

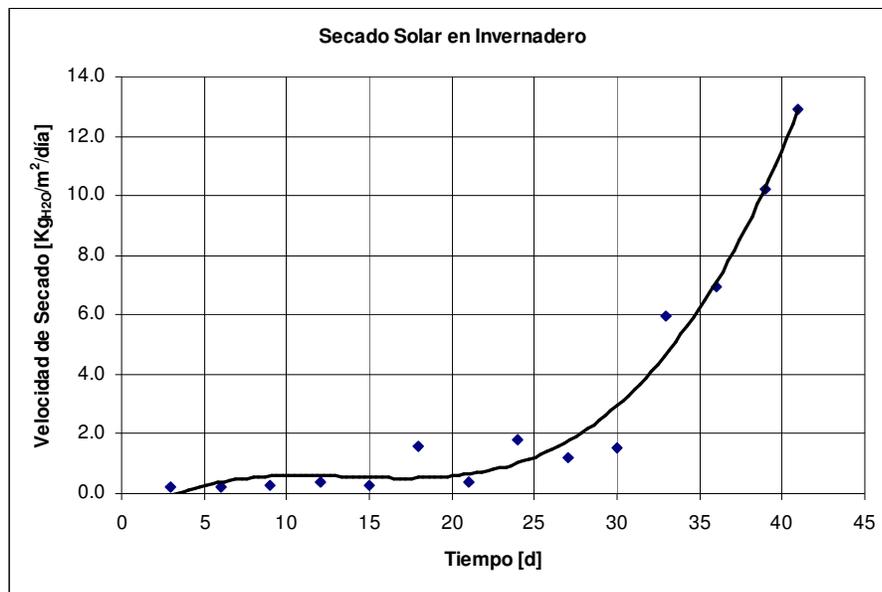


Figura 5.31.- Gráfica de la velocidad de secado en función del tiempo (SSI2)

De igual manera que en casos anteriores, se presenta también la curva que representa la variación de la velocidad en función del contenido de humedad del lodo (figura 5.32). Se observa que la velocidad de secado aumenta a medida que el material va perdiendo humedad casi linealmente, alcanzando al final del tiempo de experimentación una velocidad de 12.92 Kg_{H2O}/m²/día.

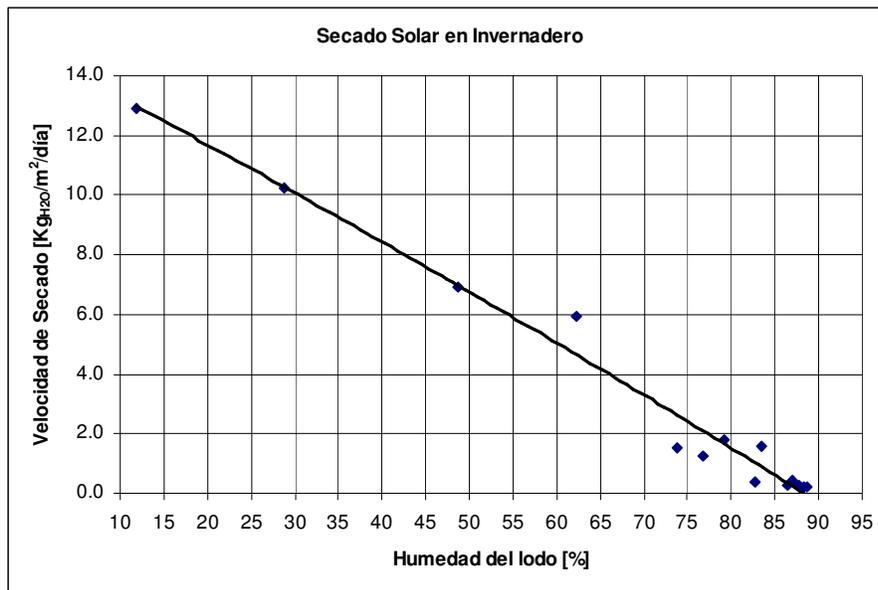


Figura 5.32.- Gráfica de la velocidad de secado en función de la humedad del lodo (SSI2)

Considerando una vez más que los factores que intervienen en el proceso de secado se mantienen constantes durante el periodo de experimentación, se presenta una curva de la variación del contenido de humedad del lodo residual en función del tiempo (figura 5.33).

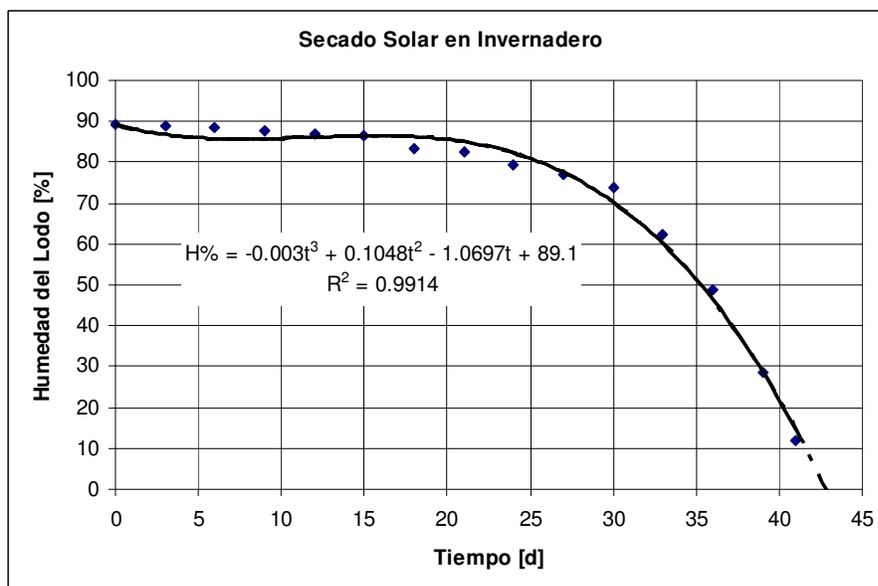


Figura 5.33.- Gráfica de la humedad del lodo en función del tiempo (SSI2)

Como resultado de la gráfica de la humedad del lodo versus el tiempo se obtiene la siguiente ecuación:

$$H\% = -0.003t^3 + 0.1048t^2 - 1.0697t + Ho \tag{5.3}$$

La velocidad promedio alcanzada durante los 41 días de experimentación por el modelo SSC2 es de 3.13 Kg_{H2O}/m²/d, perdiendo el lodo residual un 77.20% de su humedad inicial.

5.3.3 Resumen de Resultados

Una vez analizadas las gráficas correspondientes a cada modelo de secado solar, es necesario establecer un medio de comparación entre los resultados obtenidos, y determinar los beneficios y complicaciones de cada opción estudiada.

En la tabla 5.3 se presenta un resumen de los resultados obtenidos en cada modelo analizado, tanto de los parámetros físicos como de los microbiológicos.

Tabla 5.3.- Resumen de Resultados

PARÁMETRO \ MODELO	SSC1	SSI1	SSC2	SSI2
Tiempo de Experimentación [días]	40	40	41	41
Temperatura Ambiente Promedio [°C]	19.74	23.14	22.98	27.21
Humedad Ambiente Promedio [%]	71.23	66.04	34.04	30.49
Velocidad del Viento Promedio [m/s]	0.34	--	1.87	--
Radiación Solar Promedio [W/m ²]	66.05	149.69	85.47	160.59
Concentración de Sólidos Inicial [%]	13.76	13.76	10.90	10.90
Concentración de Sólidos Final [%]	52.70	48.50	89.10	88.10
Coliformes Fecales Inicial [NMP/g _(ST)] Log [NMP/g _(ST)]	3.9 x 10 ⁶ 6.6	3.9 x 10 ⁶ 6.6	1.4 x 10 ⁷ 7.1	1.4 x 10 ⁷ 7.1
Coliformes Fecales Final [NMP/g _(ST)] Log [NMP/g _(ST)]	2.3 x 10 ³ 3.4	2.1 x 10 ⁴ 4.3	9.3 x 10 ⁴ 5.0	4.3 x 10 ⁵ 5.6

Tabla 5.3 (continuación).- Resumen de Resultados

PARÁMETRO \ MODELO	SSC1	SSI1	SSC2	SSI2
Huevos de Helmintos Inicial [HH/2g _(ST)]	1	1	1	1
Huevos de Helmintos Final [HH/2g _(ST)]	0	0	0	0
<i>Salmonella</i>	ND	ND	ND	ND
Velocidad de Secado [Kg _{H2O} /m ² /d]	1.08	0.93	3.89	3.13
Volumen Inicial de Lodo [m ³]	0.30	0.30	0.30	0.30
Volumen Final de Lodo [m ³]	0.10	0.18	0.02	0.03

Como se puede apreciar en la tabla anterior, la eficacia obtenida en todos los modelos respecto a los parámetros microbiológicos a cumplir, según lo estipulado por la normatividad mexicana, es aceptable, tanto como para coliformes fecales como para huevos de helmintos se obtienen valores bajo 2.0×10^6 NMP/g y 35 HH/2g que fijan los límites para que el lodo residual sea considerado de clase C.

Una vez terminado el tiempo de experimentación en cada uno de los modelos se consiguió reducir en 3.2, 2.3, 2.1, 1.5 log (NMP/g) de coliformes fecales para SSC1, SSI1, SSC2 y SSI2, respectivamente. Lamentablemente, los valores alcanzados no califican para que el lodo residual sea considerado como un lodo clase A.

Respecto al proceso de secado del material, existe una notable diferencia entre los resultados obtenidos en la primera fase experimental y la segunda. Es indiscutible que en época de calor se obtienen mejores resultados tanto en velocidad de secado promedio alcanzada, como en el volumen de lodo final obtenido, lográndose reducciones del 93.33% y 90% en los modelos SSC2 y SSI2 respectivamente, en comparación con los 66.67% y 40% conseguidos en la primera fase con SSC1 y SSI1.

Otro factor importante para determinar si es conveniente o no la utilización de alguno de los modelos analizados, es la calidad del lodo obtenido producto del proceso de

secado bajo condiciones de volteo. Las fotografías 5.3 y 5.4 muestran un resultado cualitativo del lodo residual sometido al secado solar, antes y después del proceso, aclarando que en los dos modelos de secado propuestos para cada fase, con cubierta y en invernadero, coinciden en el aspecto final mostrado en las fotografías.



Fotografía 5.3.- Lodo residual antes del proceso de secado solar



(a)



(b)

Fotografía 5.4.- Lodo residual después del proceso de secado solar: (a) primera fase; (b) segunda fase

CAPÍTULO VI

6 Conclusiones y Recomendaciones

La producción de lodos residuales constituye una seria problemática, económica y de disposición, dado que los costos de su tratamiento se ven incrementados por los equipos utilizados para la reducción del mismo, tanto en la inversión inicial como en la de operación y mantenimiento.

El secado solar de lodos residuales con los modelos planteados, constituye una opción a implementarse en regiones de escasos recursos económicos, en donde las características climáticas permitan tener temperaturas similares o mayores a las medidas en este trabajo.

La velocidad de secado obtenida en la segunda fase por los dos modelos resulta competitiva respecto a las reportadas en la bibliografía (Horn, 2003), sin embargo, se debe prever la baja velocidad de secado en época de invierno.

El modelo de secado solar con cubierta alcanza una velocidad de secado de 1.08 $\text{Kg}_{\text{H}_2\text{O}}/\text{m}^2/\text{d}$ y 3.89 $\text{Kg}_{\text{H}_2\text{O}}/\text{m}^2/\text{d}$ en invierno y verano, respectivamente; mientras que el modelo de secado solar en invernadero registra velocidades de 0.93 $\text{Kg}_{\text{H}_2\text{O}}/\text{m}^2/\text{d}$ y 3.13 $\text{Kg}_{\text{H}_2\text{O}}/\text{m}^2/\text{d}$, logrando así el modelo con cubierta una reducción de volumen del lodo residual en menor tiempo respecto al modelo en invernadero.

La reducción de volumen del lodo obtenida en la segunda fase del experimento es satisfactoria, obteniéndose en la segunda fase experimental valores de 0.02 m^3 y 0.03 m^3 de lodo residual en el modelo de secado solar con cubierta y en el modelo de secado solar con invernadero, respectivamente. Sin embargo, en tiempo invernal se necesitaría más tiempo para lograr una mayor reducción del volumen del material. El tiempo adicional necesario se lo calcula mediante la ecuación 5.1 o 5.2 según el caso.

De los resultados obtenidos en las diferentes etapas, se concluye que el modelo de secado solar con cubierta es el más adecuado para secar lodos residuales bajo las condiciones atmosféricas de la zona.

El volteo manual diario realizado en el lodo, cumple un papel fundamental en el proceso de granulado y secado homogéneo del material, ya que mediante esta acción, se trasladan diariamente las capas inferiores del lecho (que contienen mayor humedad) a la superficie, logrando evaporar el agua de forma continua en todo el espesor del material; y, debido al movimiento realizado, no se permite que se forme una costra superficial de lodo, comúnmente encontrada en los tradicionales lechos de secado. Con el volteo diario y la granulación del lodo residual se logra aumentar el área superficial de contacto y como consecuencia lograr velocidades de secado mayores.

Respecto a la disminución de microorganismos patógenos dentro del proceso de secado, se concluye que, si bien es cierto se obtiene una reducción en la cuantificación de coliformes fecales en el lodo residual de hasta 3.2 log (NMP/g) y 2.1 log (NMP/g) de coliformes fecales en el modelo de secado solar con cubierta en la primera y segunda fase respectivamente, esta disminución no es lo suficientemente eficaz, como para lograr un lodo clase A, por lo que se debe pensar en aumentar la eficiencia de desinfección mediante otros procedimientos, como por ejemplo la adición de cal al lodo, y así obtener un material de mejor calidad y con mayor valor económico. La adición de cal se efectuaría al inicio del proceso de secado, tanto por la consistencia inicial del lodo residual (que favorecería a la mezcla) como por aprovechar el efecto térmico de la reacción de la cal con el material.

Se ha observado que la humedad atmosférica es uno de los factores más problemáticos en el proceso, tanto así que, cuando la humedad ambiente es alta, en lugar de ceder humedad el material al ambiente, ocurre lo contrario, humedeciéndose el lodo y frenando el proceso de secado. Debido a esto, en zonas cálidas-húmedas se recomienda la utilización de secado solar con cubierta, puesto que en este modelo

existe una circulación permanente del aire, lo que evita que se mantenga aire saturado sobre el lodo.

El modelo de secado en invernadero, permite una mayor incidencia de la radiación solar sobre el lodo: 149.69 W/m^2 y 160 W/m^2 promedio 24 horas en cada una de las fases respectivamente; y se consigue una mayor temperatura promedio que en el modelo de secado con cubierta: 23.1°C y 27.21°C en cada una de las fases respectivamente, frente a 19.74°C y 22.98°C del modelo con cubierta; pese a esto, no se consigue mejorar la velocidad de secado obtenida en el modelo con cubierta debido a la nula velocidad del aire registrada. En vista de este resultado se sugiere, siguiendo con la línea de no contar con equipos eléctricos, aumentar el área de mosquitero en la parte frontal y posterior del invernadero.

Es importante pensar en optimizar el secado en invernadero, experimentando en zonas frías. Se recomienda usar un diseño de secador tipo túnel, ya que presenta facilidades constructivas cuando se trata de estructuras de gran longitud, en donde el diseño en invernadero aquí propuesto no sería factible.

El lodo obtenido como resultado del proceso de secado solar en la segunda etapa es bastante duro pero frágil, lo que ocasiona que al realizarse el volteo manual en el periodo final de secado, los gránulos más grandes tiendan a romperse y los finos a convertirse en polvillo, observándose material muy fino en el fondo del lecho. Debido a esto, secar el lodo a tales valores de humedad (10% - 12%) no es recomendable, puesto que ocasiona un problema de polvo en el ambiente al cargar y descargar el material seco.

De la experiencia obtenida durante el tiempo de experimentación, se recomienda estudiar más ampliamente la frecuencia del volteo del lodo residual necesaria para optimizar los tiempos de secado, ya que mediante él se logra aumentar el área de secado y se obtiene un material homogéneo y granulado.

De acuerdo a la calidad de datos obtenidos, se sugiere que la determinación de contenido de sólidos, no se realice diariamente. Si bien mientras mayor sea la cantidad de datos se puede exponer una mejor caracterización del proceso de secado, en la determinación de las curvas características el intervalo de tiempo apropiado para definir el comportamiento de los modelos se ha considerado sea de 3 días. Esto debido a que la cantidad de agua evaporada en este intervalo de tiempo reúne tanto las pérdidas de agua por evaporación como la cantidad de agua que se gana en un día en que las condiciones ambientales son adversas.

Respecto al manejo de los lodos residuales en procesos de experimentación, se recomienda tener las debidas precauciones y considerar usar todas las protecciones necesarias, básicamente: gafas protectoras, guantes y mascarilla. Esto debido a que los lodos residuales tienen alto contenido de patógenos y sustancias desconocidas que pueden producir infecciones en la piel y ojos principalmente por el contacto diario que se tiene con él.

Es necesario planificar, previo al estudio, la forma de disponer la parte residual de lodo producto del muestreo, que pese a ser cantidades pequeñas constituyen una fuente de contaminación.

ANEXO I

DATOS DE CURVAS DE SECADO: PRUEBAS PRELIMINARES

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MEXICO				
Prueba	01			
Dimensiones de las Charolas				
Ancho [m]	0.195			
Largo [m]	0.195			
Alto [m]	0.010			
	Charola			
	1	2	3	4
Peso [gr]	222.50	222.50	222.10	223.10
Condiciones de Experimentación				
Velocidad del Viento	[m/s]	Entrada	2.50	
		Salida	12.50	
Temperatura Bulbo Seco	[°C]	Entrada	21.90	
		Salida	57.80	
Temperatura Bulbo Húmedo	[°C]	Entrada	12.50	
		Salida	25.20	
Datos Experimentales				
	Peso [gr]			
Tiempo [min]	1	2	3	4
0	516.5	476.2	472.1	451.3
15	493.9	453.3	449.5	429.3
30	460.8	424.4	426.5	411.8
45	440.7	401.1	401.6	387.2
60	411.5	374.9	379.7	370.3
75	394.0	355.2	358.1	348.9
90	372.1	334.8	339.0	331.6
105	351.2	318.2	322.3	316.4
120	337.5	307.0	311.2	305.5
135	326.0	298.8	301.1	296.8
150	316.3	292.5	295.0	290.5
165	309.0	288.1	289.6	285.4
180	302.7	285.1	285.7	281.8
195	298.1	283.1	283.0	279.6
210	295.0	281.9	281.5	278.0
225	292.9	281.0	280.3	277.0
240	291.3	280.5	279.7	276.2
255	290.0	280.0	279.2	275.7

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MEXICO				
Prueba	02			
Dimensiones de las Charolas				
Ancho [m]	0.195			
Largo [m]	0.195			
Alto [m]	0.010			
	Charola			
	1	2	3	4
Peso [gr]	222.60	222.60	222.20	223.40
Condiciones de Experimentación				
Velocidad del Viento	[m/s]	Entrada		3.00
		Salida		12.20
Temperatura Bulbo Seco	[°C]	Entrada		20.30
		Salida		56.70
Temperatura Bulbo Húmedo	[°C]	Entrada		12.80
		Salida		30.60
Datos Experimentales				
	Peso [gr]			
Tiempo [min]	1	2	3	4
0	487.4	479.1	460.5	466.8
15	470.4	459.5	441.5	449.4
30	447.5	436.7	420.8	429.6
45	425.3	414.5	400.4	412.0
60	403.3	393.3	379.8	393.1
75	383.3	373.4	361.5	374.8
90	363.3	354.6	345.1	359.8
105	345.7	338.0	327.9	344.3
120	329.5	324.6	314.4	331.5
135	314.9	312.0	303.0	319.2
150	302.0	302.1	293.4	308.0
165	292.4	293.3	285.5	298.3
180	285.2	285.7	279.8	290.1
195	281.0	280.7	275.6	283.5
210	278.6	277.8	273.3	279.1
225	277.6	276.4	272.0	276.4
240	277.1	275.3	271.4	274.8
255	276.7	274.8	270.9	273.9

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MEXICO				
Prueba	03			
Dimensiones de las Charolas				
Ancho [m]	0.195			
Largo [m]	0.195			
Alto [m]	0.010			
	Charola			
	1	2	3	4
Peso [gr]	222.20	222.00	221.90	223.10
Condiciones de Experimentación				
Velocidad del Viento	[m/s]	Entrada	2.50	
		Salida	12.20	
Temperatura Bulbo Seco	[°C]	Entrada	19.80	
		Salida	54.60	
Temperatura Bulbo Húmedo	[°C]	Entrada	9.90	
		Salida	24.40	
Datos Experimentales				
	Peso [gr]			
Tiempo [min]	1	2	3	4
0	511.8	559.2	529.1	521.4
15	489.0	537.0	504.0	497.8
30	468.4	515.4	483.7	479.3
45	447.2	497.3	464.4	458.5
60	430.0	476.6	442.3	443.7
75	409.4	456.0	422.7	426.6
90	392.4	438.4	405.1	410.1
105	374.0	415.1	385.2	391.5
120	358.4	399.2	368.9	375.5
135	342.3	382.1	354.2	361.8
150	330.1	367.7	342.2	349.8
165	319.3	354.2	330.5	337.5
180	309.9	342.5	321.5	327.6
195	302.6	332.0	313.3	319.0
210	296.2	323.4	306.5	310.6
225	291.2	316.9	301.3	304.2
240	287.8	310.3	297.0	298.6
255	285.0	305.9	293.2	294.5

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MEXICO				
Prueba	04			
Dimensiones de las Charolas				
Ancho [m]	0.195			
Largo [m]	0.195			
Alto [m]	0.010			
	Charola			
	1	2	3	4
Peso [gr]	222.50	222.50	222.20	223.40
Condiciones de Experimentación				
Velocidad del Viento	[m/s]	Entrada	2.00	
		Salida	12.70	
Temperatura Bulbo Seco	[°C]	Entrada	19.90	
		Salida	49.50	
Temperatura Bulbo Húmedo	[°C]	Entrada	10.50	
		Salida	23.70	
Datos Experimentales				
	Peso [gr]			
Tiempo [min]	1	2	3	4
0	455.7	460.8	455.0	464.2
15	443.4	447.6	439.1	449.8
30	430.9	434.2	424.0	434.3
45	416.9	421.2	409.0	421.0
60	404.7	409.0	396.1	406.9
75	391.6	394.5	379.8	391.9
90	379.1	381.5	365.4	378.3
105	367.5	369.3	352.1	365.1
120	357.6	359.1	341.3	353.5
135	345.7	347.1	329.0	340.6
150	335.9	336.9	318.5	329.4
165	326.0	327.3	307.4	319.5
180	317.1	317.9	301.1	309.9
195	307.7	309.2	293.6	300.6
210	298.4	301.3	287.7	293.2
225	289.8	293.4	281.6	286.2
240	283.9	288.1	278.3	282.1
255	279.8	284.0	276.0	279.4
270	276.5	280.4	274.1	277.5

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MEXICO				
Prueba	05			
Dimensiones de las Charolas				
Ancho [m]	0.195			
Largo [m]	0.195			
Alto [m]	0.010			
	Charola			
	1	2	3	4
Peso [gr]	222.50	222.50	222.20	223.40
Condiciones de Experimentación				
Velocidad del Viento	[m/s]	Entrada	2.50	
		Salida	3.50	
Temperatura Bulbo Seco	[°C]	Entrada	22.60	
		Salida	22.60	
Temperatura Bulbo Húmedo	[°C]	Entrada	14.90	
		Salida	14.80	
Datos Experimentales				
	Peso [gr]			
Tiempo [min]	1	2	3	4
0	529.3	506.4	523.3	498.6
15	524.5	502.5	520.1	496.3
31	520.4	498.5	517.3	494.0
45	513.8	494.4	514.8	491.3
60	511.7	490.8	511.5	489.3
75	507.9	487.4	508.8	487.0
90	503.8	483.7	505.9	485.1
105	499.8	480.5	503.4	482.7
120	495.4	476.6	500.5	480.3
135	491.5	472.5	497.4	477.9
150	486.4	468.5	494.2	475.3
165	481.6	464.4	491.0	472.6
187	474.8	458.6	486.7	468.9
214	466.4	450.2	480.7	464.0
229	460.3	444.8	476.6	460.7
244	455.4	440.3	473.3	458.0
259	450.0	435.2	469.6	454.8
274	444.8	430.4	466.1	451.8
289	439.3	426.0	462.3	448.5
304	435.2	422.3	459.9	446.6

Charola 1.1

S [Kg _{solidos}]		0.07			
Tiempo [hrs]	X [Kg _{agua} /Kg _{solidos}]	$\Delta\theta$ [hrs]	ΔX [Kg _{agua} /Kg _{solidos}]	$\Delta X/\Delta\theta$ [Kg _{agua} /Kg _{solidos} /h]	N_A [Kg _{agua} /m ² /h]
0.00	3.36				
0.25	3.02	0.25	0.33	1.34	2.38
0.50	2.53	0.25	0.49	1.96	3.48
0.75	2.23	0.25	0.30	1.19	2.11
1.00	1.80	0.25	0.43	1.73	3.07
1.25	1.54	0.25	0.26	1.04	1.84
1.50	1.22	0.25	0.32	1.30	2.30
1.75	0.91	0.25	0.31	1.24	2.20
2.00	0.70	0.25	0.20	0.81	1.44
2.25	0.53	0.25	0.17	0.68	1.21
2.50	0.39	0.25	0.14	0.57	1.02
2.75	0.28	0.25	0.11	0.43	0.77
3.00	0.19	0.25	0.09	0.37	0.66
3.25	0.12	0.25	0.07	0.27	0.48
3.50	0.07	0.25	0.05	0.18	0.33
3.75	0.04	0.25	0.03	0.12	0.22
4.00	0.02	0.25	0.02	0.09	0.17
4.25	0.00	0.25	0.02	0.08	0.14

Charola 1.2

S [Kg _{solidos}]		0.06			
Tiempo [hrs]	X [Kg _{agua} /Kg _{solidos}]	$\Delta\theta$ [hrs]	ΔX [Kg _{agua} /Kg _{solidos}]	$\Delta X/\Delta\theta$ [Kg _{agua} /Kg _{solidos} /h]	N_A [Kg _{agua} /m ² /h]
0.00	3.41				
0.25	3.01	0.25	0.40	1.59	2.41
0.50	2.51	0.25	0.50	2.01	3.04
0.75	2.11	0.25	0.41	1.62	2.45
1.00	1.65	0.25	0.46	1.82	2.76
1.25	1.31	0.25	0.34	1.37	2.07
1.50	0.95	0.25	0.35	1.42	2.15
1.75	0.66	0.25	0.29	1.15	1.75
2.00	0.47	0.25	0.19	0.78	1.18
2.25	0.33	0.25	0.14	0.57	0.86
2.50	0.22	0.25	0.11	0.44	0.66
2.75	0.14	0.25	0.08	0.31	0.46
3.00	0.09	0.25	0.05	0.21	0.32
3.25	0.05	0.25	0.03	0.14	0.21
3.50	0.03	0.25	0.02	0.08	0.13
3.75	0.02	0.25	0.02	0.06	0.09
4.00	0.01	0.25	0.01	0.03	0.05
4.25	0.00	0.25	0.01	0.03	0.05

Charola 1.3

S [Kg_{sólidos}]		0.06			
Tiempo	X	Δθ	ΔX	ΔX/Δθ	N_A
[hrs]	[Kg _{agua} /Kg _{sólidos}]	[hrs]	[Kg _{agua} /Kg _{sólidos}]	[Kg _{agua} /Kg _{sólidos} /h]	[Kg _{agua} /m ² /h]
0.00	3.38				
0.25	2.98	0.25	0.40	1.58	2.38
0.50	2.58	0.25	0.40	1.61	2.42
0.75	2.14	0.25	0.44	1.74	2.62
1.00	1.76	0.25	0.38	1.53	2.30
1.25	1.38	0.25	0.38	1.51	2.27
1.50	1.05	0.25	0.33	1.34	2.01
1.75	0.75	0.25	0.29	1.17	1.76
2.00	0.56	0.25	0.19	0.78	1.17
2.25	0.38	0.25	0.18	0.71	1.06
2.50	0.28	0.25	0.11	0.43	0.64
2.75	0.18	0.25	0.09	0.38	0.57
3.00	0.11	0.25	0.07	0.27	0.41
3.25	0.07	0.25	0.05	0.19	0.28
3.50	0.04	0.25	0.03	0.11	0.16
3.75	0.02	0.25	0.02	0.08	0.13
4.00	0.01	0.25	0.01	0.04	0.06
4.25	0.00	0.25	0.01	0.04	0.05

Charola 1.4

S [Kg_{sólidos}]		0.05			
Tiempo	X	Δθ	ΔX	ΔX/Δθ	N_A
[hrs]	[Kg _{agua} /Kg _{sólidos}]	[hrs]	[Kg _{agua} /Kg _{sólidos}]	[Kg _{agua} /Kg _{sólidos} /h]	[Kg _{agua} /m ² /h]
0.00	3.34				
0.25	2.92	0.25	0.42	1.67	2.31
0.50	2.59	0.25	0.33	1.33	1.84
0.75	2.12	0.25	0.47	1.87	2.59
1.00	1.80	0.25	0.32	1.29	1.78
1.25	1.39	0.25	0.41	1.63	2.25
1.50	1.06	0.25	0.33	1.32	1.82
1.75	0.77	0.25	0.29	1.16	1.60
2.00	0.57	0.25	0.21	0.83	1.15
2.25	0.40	0.25	0.17	0.66	0.92
2.50	0.28	0.25	0.12	0.48	0.66
2.75	0.18	0.25	0.10	0.39	0.54
3.00	0.12	0.25	0.07	0.27	0.38
3.25	0.07	0.25	0.04	0.17	0.23
3.50	0.04	0.25	0.03	0.12	0.17
3.75	0.02	0.25	0.02	0.08	0.11
4.00	0.01	0.25	0.02	0.06	0.08
4.25	0.00	0.25	0.01	0.04	0.05

Charola 2.1

S [Kg _{sólidos}]	0.05				
Tiempo [hrs]	X [Kg _{agua} /Kg _{sólidos}]	$\Delta\theta$ [hrs]	ΔX [Kg _{agua} /Kg _{sólidos}]	$\Delta X/\Delta\theta$ [Kg _{agua} /Kg _{sólidos} /h]	N _A [Kg _{agua} /m ² /h]
0.00	3.89				
0.25	3.58	0.25	0.31	1.26	1.79
0.50	3.16	0.25	0.42	1.69	2.41
0.75	2.75	0.25	0.41	1.64	2.34
1.00	2.34	0.25	0.41	1.63	2.31
1.25	1.97	0.25	0.37	1.48	2.10
1.50	1.60	0.25	0.37	1.48	2.10
1.75	1.28	0.25	0.33	1.30	1.85
2.00	0.98	0.25	0.30	1.20	1.70
2.25	0.71	0.25	0.27	1.08	1.54
2.50	0.47	0.25	0.24	0.95	1.36
2.75	0.29	0.25	0.18	0.71	1.01
3.00	0.16	0.25	0.13	0.53	0.76
3.25	0.08	0.25	0.08	0.31	0.44
3.50	0.04	0.25	0.04	0.18	0.25
3.75	0.02	0.25	0.02	0.07	0.11
4.00	0.01	0.25	0.01	0.04	0.05
4.25	0.00	0.25	0.01	0.03	0.04

Charola 2.2

S [Kg _{sólidos}]	0.05				
Tiempo [hrs]	X [Kg _{agua} /Kg _{sólidos}]	$\Delta\theta$ [hrs]	ΔX [Kg _{agua} /Kg _{sólidos}]	$\Delta X/\Delta\theta$ [Kg _{agua} /Kg _{sólidos} /h]	N _A [Kg _{agua} /m ² /h]
0.00	3.91				
0.25	3.54	0.25	0.38	1.50	2.06
0.50	3.10	0.25	0.44	1.75	2.40
0.75	2.68	0.25	0.43	1.70	2.34
1.00	2.27	0.25	0.41	1.62	2.23
1.25	1.89	0.25	0.38	1.52	2.09
1.50	1.53	0.25	0.36	1.44	1.98
1.75	1.21	0.25	0.32	1.27	1.75
2.00	0.95	0.25	0.26	1.03	1.41
2.25	0.71	0.25	0.24	0.97	1.33
2.50	0.52	0.25	0.19	0.76	1.04
2.75	0.35	0.25	0.17	0.67	0.93
3.00	0.21	0.25	0.15	0.58	0.80
3.25	0.11	0.25	0.10	0.38	0.53
3.50	0.06	0.25	0.06	0.22	0.31
3.75	0.03	0.25	0.03	0.11	0.15
4.00	0.01	0.25	0.02	0.08	0.12
4.25	0.00	0.25	0.01	0.04	0.05

Charola 2.3

S [Kg _{sólidos}]	0.05				
Tiempo [hrs]	X [Kg _{agua} /Kg _{sólidos}]	$\Delta\theta$ [hrs]	ΔX [Kg _{agua} /Kg _{sólidos}]	$\Delta X/\Delta\theta$ [Kg _{agua} /Kg _{sólidos} /h]	N _A [Kg _{agua} /m ² /h]
0.00	3.89				
0.25	3.50	0.25	0.39	1.56	2.00
0.50	3.08	0.25	0.43	1.70	2.18
0.75	2.66	0.25	0.42	1.68	2.15
1.00	2.24	0.25	0.42	1.69	2.17
1.25	1.86	0.25	0.38	1.50	1.93
1.50	1.52	0.25	0.34	1.35	1.73
1.75	1.17	0.25	0.35	1.41	1.81
2.00	0.89	0.25	0.28	1.11	1.42
2.25	0.66	0.25	0.23	0.94	1.20
2.50	0.46	0.25	0.20	0.79	1.01
2.75	0.30	0.25	0.16	0.65	0.83
3.00	0.18	0.25	0.12	0.47	0.60
3.25	0.10	0.25	0.09	0.34	0.44
3.50	0.05	0.25	0.05	0.19	0.24
3.75	0.02	0.25	0.03	0.11	0.14
4.00	0.01	0.25	0.01	0.05	0.06
4.25	0.00	0.25	0.01	0.04	0.05

Charola 2.4

S [Kg _{sólidos}]	0.05				
Tiempo [hrs]	X [Kg _{agua} /Kg _{sólidos}]	$\Delta\theta$ [hrs]	ΔX [Kg _{agua} /Kg _{sólidos}]	$\Delta X/\Delta\theta$ [Kg _{agua} /Kg _{sólidos} /h]	N _A [Kg _{agua} /m ² /h]
0.00	3.82				
0.25	3.48	0.25	0.34	1.38	1.83
0.50	3.08	0.25	0.39	1.57	2.08
0.75	2.73	0.25	0.35	1.39	1.85
1.00	2.36	0.25	0.37	1.50	1.99
1.25	2.00	0.25	0.36	1.45	1.93
1.50	1.70	0.25	0.30	1.19	1.58
1.75	1.39	0.25	0.31	1.23	1.63
2.00	1.14	0.25	0.25	1.01	1.35
2.25	0.90	0.25	0.24	0.97	1.29
2.50	0.68	0.25	0.22	0.89	1.18
2.75	0.48	0.25	0.19	0.77	1.02
3.00	0.32	0.25	0.16	0.65	0.86
3.25	0.19	0.25	0.13	0.52	0.69
3.50	0.10	0.25	0.09	0.35	0.46
3.75	0.05	0.25	0.05	0.21	0.28
4.00	0.02	0.25	0.03	0.13	0.17
4.25	0.00	0.25	0.02	0.07	0.09

Charola 3.1

S [Kg_{sólidos}]	0.06				
Tiempo [hrs]	X [Kg_{agua}/Kg_{sólidos}]	Δθ [hrs]	ΔX [Kg_{agua}/Kg_{sólidos}]	ΔX/Δθ [Kg_{agua}/Kg_{sólidos}/h]	N_A [Kg_{agua}/m²/h]
0.00	3.61				
0.25	3.25	0.25	0.36	1.45	2.40
0.50	2.92	0.25	0.33	1.31	2.17
0.75	2.58	0.25	0.34	1.35	2.23
1.00	2.31	0.25	0.27	1.10	1.81
1.25	1.98	0.25	0.33	1.31	2.17
1.50	1.71	0.25	0.27	1.08	1.79
1.75	1.42	0.25	0.29	1.17	1.94
2.00	1.17	0.25	0.25	0.99	1.64
2.25	0.91	0.25	0.26	1.03	1.69
2.50	0.72	0.25	0.19	0.78	1.28
2.75	0.55	0.25	0.17	0.69	1.14
3.00	0.40	0.25	0.15	0.60	0.99
3.25	0.28	0.25	0.12	0.46	0.77
3.50	0.18	0.25	0.10	0.41	0.67
3.75	0.10	0.25	0.08	0.32	0.53
4.00	0.04	0.25	0.05	0.22	0.36
4.25	0.00	0.25	0.04	0.18	0.29

Charola 3.2

S [Kg_{sólidos}]	0.08				
Tiempo [hrs]	X [Kg_{agua}/Kg_{sólidos}]	Δθ [hrs]	ΔX [Kg_{agua}/Kg_{sólidos}]	ΔX/Δθ [Kg_{agua}/Kg_{sólidos}/h]	N_A [Kg_{agua}/m²/h]
0.00	3.02				
0.25	2.75	0.25	0.26	1.06	2.34
0.50	2.50	0.25	0.26	1.03	2.27
0.75	2.28	0.25	0.22	0.86	1.90
1.00	2.03	0.25	0.25	0.99	2.18
1.25	1.79	0.25	0.25	0.98	2.17
1.50	1.58	0.25	0.21	0.84	1.85
1.75	1.30	0.25	0.28	1.11	2.45
2.00	1.11	0.25	0.19	0.76	1.67
2.25	0.91	0.25	0.20	0.82	1.80
2.50	0.74	0.25	0.17	0.69	1.51
2.75	0.58	0.25	0.16	0.64	1.42
3.00	0.44	0.25	0.14	0.56	1.23
3.25	0.31	0.25	0.13	0.50	1.10
3.50	0.21	0.25	0.10	0.41	0.90
3.75	0.13	0.25	0.08	0.31	0.68
4.00	0.05	0.25	0.08	0.31	0.69
4.25	0.00	0.25	0.05	0.21	0.46

Charola 3.3

S [Kg _{solidos}]	0.07				
Tiempo [hrs]	X [Kg _{agua} /Kg _{solidos}]	$\Delta\theta$ [hrs]	ΔX [Kg _{agua} /Kg _{solidos}]	$\Delta X/\Delta\theta$ [Kg _{agua} /Kg _{solidos} /h]	N_A [Kg _{agua} /m ² /h]
0.00	3.31				
0.25	2.96	0.25	0.35	1.41	2.64
0.50	2.67	0.25	0.28	1.14	2.14
0.75	2.40	0.25	0.27	1.08	2.03
1.00	2.09	0.25	0.31	1.24	2.32
1.25	1.82	0.25	0.27	1.10	2.06
1.50	1.57	0.25	0.25	0.99	1.85
1.75	1.29	0.25	0.28	1.12	2.09
2.00	1.06	0.25	0.23	0.91	1.71
2.25	0.86	0.25	0.21	0.82	1.55
2.50	0.69	0.25	0.17	0.67	1.26
2.75	0.52	0.25	0.16	0.66	1.23
3.00	0.40	0.25	0.13	0.50	0.95
3.25	0.28	0.25	0.12	0.46	0.86
3.50	0.19	0.25	0.10	0.38	0.72
3.75	0.11	0.25	0.07	0.29	0.55
4.00	0.05	0.25	0.06	0.24	0.45
4.25	0.00	0.25	0.05	0.21	0.40

Charola 3.4

S [Kg _{solidos}]	0.07				
Tiempo [hrs]	X [Kg _{agua} /Kg _{solidos}]	$\Delta\theta$ [hrs]	ΔX [Kg _{agua} /Kg _{solidos}]	$\Delta X/\Delta\theta$ [Kg _{agua} /Kg _{solidos} /h]	N_A [Kg _{agua} /m ² /h]
0.00	3.18				
0.25	2.85	0.25	0.33	1.32	2.48
0.50	2.59	0.25	0.26	1.04	1.95
0.75	2.30	0.25	0.29	1.17	2.19
1.00	2.09	0.25	0.21	0.83	1.56
1.25	1.85	0.25	0.24	0.96	1.80
1.50	1.62	0.25	0.23	0.92	1.74
1.75	1.36	0.25	0.26	1.04	1.96
2.00	1.13	0.25	0.22	0.90	1.68
2.25	0.94	0.25	0.19	0.77	1.44
2.50	0.77	0.25	0.17	0.67	1.26
2.75	0.60	0.25	0.17	0.69	1.29
3.00	0.46	0.25	0.14	0.55	1.04
3.25	0.34	0.25	0.12	0.48	0.90
3.50	0.23	0.25	0.12	0.47	0.88
3.75	0.14	0.25	0.09	0.36	0.67
4.00	0.06	0.25	0.08	0.31	0.59
4.25	0.00	0.25	0.06	0.23	0.43

Charola 4.1

S [Kg_{solidos}]	0.05				
Tiempo [hrs]	X [Kg_{agua}/Kg_{solidos}]	Δθ [hrs]	ΔX [Kg_{agua}/Kg_{solidos}]	ΔX/Δθ [Kg_{agua}/Kg_{solidos}/h]	N_A [Kg_{agua}/m²/h]
0.00	3.32				
0.25	3.09	0.25	0.23	0.91	1.29
0.50	2.86	0.25	0.23	0.93	1.31
0.75	2.60	0.25	0.26	1.04	1.47
1.00	2.37	0.25	0.23	0.90	1.28
1.25	2.13	0.25	0.24	0.97	1.38
1.50	1.90	0.25	0.23	0.93	1.31
1.75	1.69	0.25	0.21	0.86	1.22
2.00	1.50	0.25	0.18	0.73	1.04
2.25	1.28	0.25	0.22	0.88	1.25
2.50	1.10	0.25	0.18	0.73	1.03
2.75	0.92	0.25	0.18	0.73	1.04
3.00	0.75	0.25	0.16	0.66	0.94
3.25	0.58	0.25	0.17	0.70	0.99
3.50	0.41	0.25	0.17	0.69	0.98
3.75	0.25	0.25	0.16	0.64	0.90
4.00	0.14	0.25	0.11	0.44	0.62
4.25	0.06	0.25	0.08	0.30	0.43
4.50	0.00	0.25	0.06	0.24	0.35

Charola 4.2

S [Kg_{solidos}]	0.06				
Tiempo [hrs]	X [Kg_{agua}/Kg_{solidos}]	Δθ [hrs]	ΔX [Kg_{agua}/Kg_{solidos}]	ΔX/Δθ [Kg_{agua}/Kg_{solidos}/h]	N_A [Kg_{agua}/m²/h]
0.00	3.12				
0.25	2.89	0.25	0.23	0.91	1.39
0.50	2.66	0.25	0.23	0.93	1.41
0.75	2.43	0.25	0.22	0.90	1.37
1.00	2.22	0.25	0.21	0.84	1.28
1.25	1.97	0.25	0.25	1.00	1.53
1.50	1.75	0.25	0.22	0.90	1.37
1.75	1.54	0.25	0.21	0.84	1.28
2.00	1.36	0.25	0.18	0.70	1.07
2.25	1.15	0.25	0.21	0.83	1.26
2.50	0.98	0.25	0.18	0.70	1.07
2.75	0.81	0.25	0.17	0.66	1.01
3.00	0.65	0.25	0.16	0.65	0.99
3.25	0.50	0.25	0.15	0.60	0.92
3.50	0.36	0.25	0.14	0.55	0.83
3.75	0.22	0.25	0.14	0.55	0.83
4.00	0.13	0.25	0.09	0.37	0.56
4.25	0.06	0.25	0.07	0.28	0.43
4.50	0.00	0.25	0.06	0.25	0.38

Charola 4.3

S [Kg _{sólidos}]	0.05				
Tiempo [hrs]	X [Kg _{agua} /Kg _{sólidos}]	$\Delta\theta$ [hrs]	ΔX [Kg _{agua} /Kg _{sólidos}]	$\Delta X/\Delta\theta$ [Kg _{agua} /Kg _{sólidos} /h]	N_A [Kg _{agua} /m ² /h]
0.00	3.49				
0.25	3.18	0.25	0.31	1.23	1.67
0.50	2.89	0.25	0.29	1.16	1.59
0.75	2.60	0.25	0.29	1.16	1.58
1.00	2.35	0.25	0.25	0.99	1.36
1.25	2.04	0.25	0.31	1.26	1.71
1.50	1.76	0.25	0.28	1.11	1.51
1.75	1.50	0.25	0.26	1.03	1.40
2.00	1.29	0.25	0.21	0.83	1.14
2.25	1.06	0.25	0.24	0.95	1.29
2.50	0.86	0.25	0.20	0.81	1.10
2.75	0.64	0.25	0.21	0.86	1.17
3.00	0.52	0.25	0.12	0.49	0.66
3.25	0.38	0.25	0.14	0.58	0.79
3.50	0.26	0.25	0.11	0.45	0.62
3.75	0.14	0.25	0.12	0.47	0.64
4.00	0.08	0.25	0.06	0.25	0.35
4.25	0.04	0.25	0.04	0.18	0.24
4.50	0.00	0.25	0.04	0.15	0.20

Charola 4.4

S [Kg _{sólidos}]	0.05				
Tiempo [hrs]	X [Kg _{agua} /Kg _{sólidos}]	$\Delta\theta$ [hrs]	ΔX [Kg _{agua} /Kg _{sólidos}]	$\Delta X/\Delta\theta$ [Kg _{agua} /Kg _{sólidos} /h]	N_A [Kg _{agua} /m ² /h]
0.00	3.45				
0.25	3.18	0.25	0.27	1.06	1.51
0.50	2.90	0.25	0.29	1.15	1.63
0.75	2.65	0.25	0.25	0.98	1.40
1.00	2.39	0.25	0.26	1.04	1.48
1.25	2.11	0.25	0.28	1.11	1.58
1.50	1.86	0.25	0.25	1.01	1.43
1.75	1.62	0.25	0.24	0.98	1.39
2.00	1.40	0.25	0.21	0.86	1.22
2.25	1.17	0.25	0.24	0.95	1.36
2.50	0.96	0.25	0.21	0.83	1.18
2.75	0.78	0.25	0.18	0.73	1.04
3.00	0.60	0.25	0.18	0.71	1.01
3.25	0.43	0.25	0.17	0.69	0.98
3.50	0.29	0.25	0.14	0.55	0.78
3.75	0.16	0.25	0.13	0.52	0.74
4.00	0.09	0.25	0.08	0.30	0.43
4.25	0.04	0.25	0.05	0.20	0.28
4.50	0.00	0.25	0.04	0.14	0.20

Charola 5.1

S [Kg_{sólidos}]		0.20			
Tiempo [hrs]	X [Kg_{agua}/Kg_{sólidos}]	Δθ [hrs]	ΔX [Kg_{agua}/Kg_{sólidos}]	ΔX/Δθ [Kg_{agua}/Kg_{sólidos}/h]	N_A [Kg_{agua}/m²/h]
0.00	0.40				
0.25	0.38	0.25	0.02	0.08	0.40
0.52	0.36	0.27	0.02	0.07	0.39
0.75	0.34	0.23	0.02	0.09	0.45
1.00	0.32	0.25	0.02	0.07	0.37
1.25	0.30	0.25	0.02	0.07	0.35
1.50	0.28	0.25	0.02	0.07	0.38
1.75	0.27	0.25	0.02	0.06	0.33
2.00	0.25	0.25	0.02	0.08	0.40
2.25	0.23	0.25	0.02	0.08	0.42
2.50	0.21	0.25	0.02	0.08	0.41
2.75	0.19	0.25	0.02	0.08	0.42
3.12	0.16	0.37	0.03	0.08	0.41
3.57	0.12	0.45	0.04	0.09	0.48
3.82	0.09	0.25	0.03	0.11	0.56
4.07	0.07	0.25	0.02	0.09	0.46
4.32	0.05	0.25	0.03	0.10	0.53
4.57	0.02	0.25	0.02	0.09	0.50
4.82	0.00	0.25	0.02	0.09	0.45

Charola 5.2

S [Kg_{sólidos}]		0.20			
Tiempo [hrs]	X [Kg_{agua}/Kg_{sólidos}]	Δθ [hrs]	ΔX [Kg_{agua}/Kg_{sólidos}]	ΔX/Δθ [Kg_{agua}/Kg_{sólidos}/h]	N_A [Kg_{agua}/m²/h]
0.00	0.40				
0.25	0.38	0.25	0.02	0.08	0.40
0.52	0.36	0.27	0.02	0.07	0.39
0.75	0.34	0.23	0.02	0.09	0.45
1.00	0.32	0.25	0.02	0.07	0.37
1.25	0.30	0.25	0.02	0.07	0.35
1.50	0.28	0.25	0.02	0.07	0.38
1.75	0.27	0.25	0.02	0.06	0.33
2.00	0.25	0.25	0.02	0.08	0.40
2.25	0.23	0.25	0.02	0.08	0.42
2.50	0.21	0.25	0.02	0.08	0.41
2.75	0.19	0.25	0.02	0.08	0.42
3.12	0.16	0.37	0.03	0.08	0.41
3.57	0.12	0.45	0.04	0.09	0.48
3.82	0.09	0.25	0.03	0.11	0.56
4.07	0.07	0.25	0.02	0.09	0.46
4.32	0.05	0.25	0.03	0.10	0.53
4.57	0.02	0.25	0.02	0.09	0.50
4.82	0.00	0.25	0.02	0.09	0.45

Charola 5.3

S [Kg _{sólidos}]	0.24				
Tiempo [hrs]	X [Kg _{agua} /Kg _{sólidos}]	$\Delta\theta$ [hrs]	ΔX [Kg _{agua} /Kg _{sólidos}]	$\Delta X/\Delta\theta$ [Kg _{agua} /Kg _{sólidos} /h]	N_A [Kg _{agua} /m ² /h]
0.00	0.25				
0.25	0.24	0.25	0.01	0.05	0.33
0.52	0.23	0.27	0.01	0.04	0.27
0.75	0.22	0.23	0.01	0.04	0.28
1.00	0.20	0.25	0.01	0.05	0.34
1.25	0.19	0.25	0.01	0.04	0.28
1.50	0.18	0.25	0.01	0.05	0.30
1.75	0.17	0.25	0.01	0.04	0.26
2.00	0.16	0.25	0.01	0.05	0.30
2.25	0.15	0.25	0.01	0.05	0.32
2.50	0.13	0.25	0.01	0.05	0.33
2.75	0.12	0.25	0.01	0.05	0.33
3.12	0.10	0.37	0.02	0.05	0.31
3.57	0.08	0.45	0.02	0.06	0.35
3.82	0.06	0.25	0.02	0.07	0.43
4.07	0.05	0.25	0.01	0.05	0.34
4.32	0.03	0.25	0.02	0.06	0.39
4.57	0.02	0.25	0.01	0.06	0.36
4.82	0.00	0.25	0.02	0.06	0.40

Charola 5.4

S [Kg _{sólidos}]	0.22				
Tiempo [hrs]	X [Kg _{agua} /Kg _{sólidos}]	$\Delta\theta$ [hrs]	ΔX [Kg _{agua} /Kg _{sólidos}]	$\Delta X/\Delta\theta$ [Kg _{agua} /Kg _{sólidos} /h]	N_A [Kg _{agua} /m ² /h]
0.00	0.22				
0.25	0.21	0.25	0.01	0.04	0.24
0.52	0.20	0.27	0.01	0.04	0.22
0.75	0.19	0.23	0.01	0.05	0.30
1.00	0.18	0.25	0.01	0.04	0.21
1.25	0.17	0.25	0.01	0.04	0.24
1.50	0.16	0.25	0.01	0.03	0.20
1.75	0.15	0.25	0.01	0.04	0.25
2.00	0.14	0.25	0.01	0.04	0.25
2.25	0.13	0.25	0.01	0.04	0.25
2.50	0.12	0.25	0.01	0.05	0.27
2.75	0.11	0.25	0.01	0.05	0.28
3.12	0.09	0.37	0.02	0.04	0.26
3.57	0.07	0.45	0.02	0.05	0.28
3.82	0.05	0.25	0.01	0.06	0.34
4.07	0.04	0.25	0.01	0.05	0.28
4.32	0.03	0.25	0.01	0.06	0.33
4.57	0.01	0.25	0.01	0.05	0.31
4.82	0.00	0.25	0.01	0.06	0.34

ANEXO II

DATOS DE CURVAS DE SECADO: PRIMERA FASE

SECADO SOLAR CON CUBIERTA

Tiempo [días]	ST [%]	Coliformes Fecales [NMP/g _{ST}]	Humedad del Lodo [%]	Temperatura Ambiente [°C]	Humedad Relativa [%]	Velocidad del Viento [m/s]	Radiación Solar [W/m ²]
0	13.76	3.90E+06	86.24	21.38	80.14	0.42	60.20
1	13.61	9.30E+06	86.39	21.25	78.85	0.29	56.76
2	14.51	7.50E+06	85.49	21.38	80.14	0.42	60.20
3	14.67	4.30E+06	85.33	21.55	75.29	0.38	71.27
4	15.54	4.30E+06	84.46	21.38	73.36	0.39	69.05
5	16.02	9.30E+05	83.98	21.45	67.10	0.40	74.48
6	16.88	1.50E+06	83.12	21.44	73.47	0.44	69.33
7	17.41	2.10E+06	82.59	21.68	70.46	0.50	72.57
8	17.46	2.10E+06	82.54	22.46	70.93	0.37	70.66
9	18.19	1.04E+06	81.81	22.77	73.52	0.36	72.12
10	19.30	8.66E+05	80.70	21.74	76.95	0.33	55.19
11	19.65	2.00E+06	80.35	21.74	81.42	0.31	57.04
12	19.35	2.00E+06	80.65	20.83	85.23	0.43	74.71
13	20.85	2.10E+06	79.15	21.71	80.43	0.28	63.34
14	21.13	1.50E+06	78.87	20.25	89.02	0.32	50.20
15	22.05	2.10E+06	77.95	18.02	96.53	0.19	40.55
16	23.42	4.60E+06	76.58	15.93	82.70	0.26	43.31
17	23.26	4.30E+05	76.74	14.64	75.66	0.24	31.86
18	21.87	4.60E+06	78.13	16.66	62.70	0.43	73.63
19	22.46	9.30E+05	77.54	17.61	54.38	0.45	77.92
20	25.52	1.50E+06	74.48	17.39	60.48	0.46	74.79
21	26.70	2.10E+06	73.30	17.67	68.70	0.26	75.42
22	25.21	2.10E+06	74.79	19.61	63.46	0.35	76.42
23	25.76	1.50E+06	74.24	19.76	63.64	0.39	72.53
24	25.89	7.50E+05	74.11	19.35	57.50	0.35	74.40
25	26.11	6.40E+05	73.89	20.78	61.06	0.27	74.22
26	27.31	1.50E+06	72.69	20.16	66.88	0.25	70.35
27	28.87	7.50E+05	71.13	18.40	61.42	0.31	73.61
28	31.21	4.60E+05	68.79	17.15	57.21	0.31	73.44
29	33.62	4.60E+05	66.38	18.60	55.88	0.26	74.73
30	35.20	4.60E+05	64.80	17.11	63.71	0.27	63.18

SECADO SOLAR EN INVERNADERO

Tiempo [días]	ST [%]	Coliformes Fecales [NMP/g ST]	Humedad del Lodo [%]	Temperatura Ambiente [°C]	Humedad Relativa [%]	Radiación Solar [W/m ²]
0	13.76	3.90E+06	86.24	25.45	67.81	166.46
1	14.12	4.30E+06	85.88	24.95	70.77	163.19
2	13.86	4.30E+06	86.14	24.50	73.14	125.10
3	14.04	2.30E+06	85.96	25.52	65.45	165.83
4	15.17	2.00E+06	84.83	25.00	64.74	164.99
5	15.89	2.30E+05	84.11	25.11	61.32	182.35
6	16.34	1.39E+06	83.66	24.83	65.34	174.09
7	16.77	2.10E+06	83.23	25.42	62.14	169.90
8	16.83	9.30E+05	83.17	25.58	64.48	172.24
9	17.70	2.00E+06	82.30	26.52	66.01	160.68
10	17.72	4.30E+05	82.28	25.25	68.26	115.08
11	18.62	2.10E+05	81.38	25.48	71.65	134.49
12	19.85	2.10E+06	80.15	24.77	73.51	144.46
13	19.35	9.30E+05	80.65	25.42	72.21	144.78
14	19.59	9.30E+05	80.41	24.38	78.99	137.19
15	20.47	9.30E+05	79.53	20.65	88.70	74.37
16	20.69	7.50E+05	79.31	18.50	78.52	86.61
17	20.70	4.30E+05	79.30	16.56	73.47	68.84
18	22.25	2.30E+05	77.75	19.57	63.12	167.37
19	22.16	4.30E+05	77.84	20.43	55.73	174.26
20	26.25	2.30E+06	73.75	20.03	62.27	168.90
21	23.87	2.00E+05	76.13	21.02	67.72	166.66
22	26.34	2.10E+06	73.66	22.94	61.20	161.23
23	26.38	2.10E+06	73.62	23.23	59.71	161.15
24	26.43	2.80E+05	73.57	22.60	56.11	162.25
25	26.46	1.39E+05	73.54	24.30	58.29	160.76
26	26.49	1.50E+05	73.51	24.11	61.21	155.35
27	26.51	1.10E+06	73.49	21.98	58.57	157.30
28	26.53	1.10E+06	73.47	20.76	56.87	159.38
29	30.68	1.50E+05	69.32	21.90	57.56	158.00
30	32.19	1.50E+05	67.81	20.54	62.36	137.24

SECADO SOLAR CON CUBIERTA

Área: 2 m²

Densidad Inicial del Lodo: 994.44 Kg/m³

Peso Inicial del Lodo: 298.332 Kg

Tiempo [d]	Humedad del Lodo [%]	X [Kg _{H2O} /Kg _{lodo}]	Δt [d]	ΔX [Kg _{H2O} /Kg _{lodo}]	ΔX/Δt [Kg _{H2O} /Kg _{lodo} /d]	N _A [Kg _{H2O} /m ² /d]
0	86.24	0.86				0.000
2	85.49	0.85	2	0.007	0.0037	0.559
4	84.46	0.84	2	0.010	0.0051	0.764
5	83.98	0.84	1	0.005	0.0048	0.717
7	82.59	0.83	2	0.014	0.0069	1.036
10	80.70	0.81	3	0.019	0.0063	0.944
13	79.15	0.79	3	0.015	0.0052	0.770
15	77.95	0.78	2	0.012	0.0060	0.892
20	74.48	0.74	5	0.035	0.0070	1.037
30	64.80	0.65	10	0.097	0.0097	1.443
40	47.30	0.47	10	0.175	0.0175	2.611
Promedio						1.077

SECADO SOLAR EN INVERNADERO

Area: 2 m²

Densidad inicial del Lodo: 994.44 Kg/m³

Peso Inicial del Lodo: 298.332 Kg

Tiempo [d]	Humedad del Lodo [%]	X [Kg _{H2O} /Kg _{lodo}]	Δt [d]	ΔX [Kg _{H2O} /Kg _{lodo}]	ΔX/Δt [Kg _{H2O} /Kg _{lodo} /d]	N _A [Kg _{H2O} /m ² /d]
0	86.24	0.86				0.000
1	85.88	0.86	1	0.004	0.004	0.536
4	84.83	0.85	3	0.011	0.004	0.523
6	83.66	0.84	2	0.012	0.006	0.866
7	83.23	0.83	1	0.004	0.004	0.652
9	82.30	0.82	2	0.009	0.005	0.691
11	81.38	0.81	2	0.009	0.005	0.689
15	79.53	0.80	4	0.018	0.005	0.689
18	77.75	0.78	3	0.018	0.006	0.885
24	73.57	0.74	6	0.042	0.007	1.039
29	69.32	0.69	5	0.043	0.009	1.269
40	51.50	0.52	11	0.178	0.016	2.416
Promedio						0.932

ANEXO III

DATOS DE CURVAS DE SECADO: SEGUNDA FASE

SECADO SOLAR CON CUBIERTA

Tiempo [días]	ST [%]	Coliformes Fecales [NMP/g ST]	Humedad del Lodo [%]	Temperatura Ambiente [°C]	Humedad Relativa [%]	Velocidad del Viento [m/s]	Radiación Solar [W/m ²]
0	10.90	1.38E+07	89.10	21.98	37.06	1.81	65.36
3	11.10	1.50E+07	88.90	22.18	34.06	2.34	63.25
6	14.40	9.30E+06	85.60	24.68	28.06	1.38	62.75
9	14.70	7.50E+06	85.30	20.68	43.06	2.11	71.05
12	20.60	1.27E+07	79.40	22.68	40.06	2.38	70.45
15	22.40	1.39E+07	77.60	22.58	27.06	1.28	93.05
18	25.90	1.10E+07	74.10	19.08	28.06	1.32	92.95
21	37.40	4.10E+06	62.60	22.57	31.23	2.27	92.07
24	51.10	6.50E+06	48.90	22.63	34.35	2.18	98.00
27	64.90	1.04E+06	35.10	23.45	31.88	1.93	100.69
30	86.80	1.50E+06	13.20	21.94	36.02	1.97	95.95
33	88.90	2.00E+06	11.10	24.94	30.62	1.79	97.27
36	89.00	2.80E+06	11.00	23.69	34.54	1.62	93.80
39	88.50	1.50E+06	11.50	25.73	35.77	1.86	96.49
41	89.10	9.30E+04	10.90	25.98	38.70	1.75	88.88

SECADO SOLAR EN INVERNADERO

Tiempo [días]	ST [%]	Coliformes Fecales [NMP/g ST]	Humedad del Lodo [%]	Temperatura Ambiental [°C]	Humedad Relativa [%]	Radiación Solar [W/m ²]
0	10.90	1.38E+07	89.10	25.97	24.74	138.67
3	11.30	1.21E+06	88.70	25.57	27.07	136.88
6	11.70	1.50E+07	88.30	28.43	19.44	136.60
9	12.20	1.50E+07	87.80	24.32	34.74	144.48
12	13.00	2.00E+07	87.00	26.27	31.38	143.78
15	13.50	1.50E+07	86.50	27.03	25.23	156.58
18	16.60	1.10E+07	83.40	23.18	29.95	166.28
21	17.30	4.60E+07	82.70	26.67	33.32	165.86
24	20.80	1.50E+07	79.20	27.57	36.41	173.28
27	23.20	1.04E+05	76.80	26.32	33.89	178.58
30	26.20	2.80E+06	73.80	28.27	31.80	175.69
33	37.80	1.50E+06	62.20	29.95	32.64	180.58
36	51.30	1.04E+05	48.70	28.33	36.73	170.92
39	71.30	1.04E+05	28.70	29.99	29.59	175.81
41	88.10	4.30E+05	11.90	30.35	30.39	164.94

SECADO SOLAR CON CUBIERTA

Area: 2 m²

Densidad inicial del Lodo: 1025 Kg/m³

Peso Inicial del Lodo: 307.5 Kg

Tiempo [d]	Humedad [%]	X [Kg _{H2O} /Kg _{lodo}]	Δt [d]	ΔX [Kg _{H2O} /Kg _{lodo}]	ΔX/Δt [Kg _{H2O} /Kg _{lodo} /d]	N _A [Kg _{H2O} /m ² /d]
0	89.10	0.89				0.000
3	88.90	0.89	3	0.002	0.0007	0.102
6	85.60	0.86	3	0.033	0.0110	1.691
9	85.30	0.85	3	0.003	0.0010	0.154
12	79.40	0.79	3	0.059	0.0197	3.024
15	77.60	0.78	3	0.018	0.0060	0.923
18	74.10	0.74	3	0.035	0.0117	1.794
21	62.60	0.63	3	0.115	0.0383	5.894
24	48.90	0.49	3	0.137	0.0457	7.021
27	35.10	0.35	3	0.138	0.0460	7.073
30	13.20	0.13	3	0.219	0.0730	11.224
33	11.10	0.11	3	0.021	0.0070	1.076
36	11.00	0.11	3	0.001	0.0003	0.051
41	10.90	0.11	5	0.001	0.0002	0.031
Promedio						3.890

SECADO SOLAR EN INVERNADERO

Area: 2 m²

Densidad inicial del Lodo: 1025 Kg/m³

Peso Inicial del Lodo: 307.5 Kg

Tiempo [d]	Humedad [%]	X [Kg _{H2O} /Kg _{lodo}]	Δt [d]	ΔX [Kg _{H2O} /Kg _{lodo}]	ΔX/Δt [Kg _{H2O} /Kg _{lodo} /d]	N _A [Kg _{H2O} /m ² /d]
0	89.10	0.89				0.000
3	88.70	0.89	3	0.004	0.001	0.205
6	88.30	0.88	3	0.004	0.001	0.205
9	87.80	0.88	3	0.005	0.002	0.256
12	87.00	0.87	3	0.008	0.003	0.410
15	86.50	0.87	3	0.005	0.002	0.256
18	83.40	0.83	3	0.031	0.010	1.589
21	82.70	0.83	3	0.007	0.002	0.359
24	79.20	0.79	3	0.035	0.012	1.794
27	76.80	0.77	3	0.024	0.008	1.230
30	73.80	0.74	3	0.030	0.010	1.538
33	62.20	0.62	3	0.116	0.039	5.945
36	48.70	0.49	3	0.135	0.045	6.919
39	28.70	0.29	3	0.200	0.067	10.250
41	11.90	0.12	2	0.168	0.084	12.915
Promedio						3.134

BIBLIOGRAFÍA

1. Andreoli Cleverson Vitório et al. (1999), *Reciclagem de Biossólidos: Transformando problemas em Soluções*, SANEPAR, Brasil.
2. Almanza Rafael - Muñoz Felipe (1994), *Ingeniería de la Energía Solar*, El Colegio Nacional, México.
3. American Water Works Association (1989) *Sludge.- Handling and Disposal*. AWWA Research Foundation, Denver, Colo.
4. Amos W.A. (1998), *Report on Biomass Drying Technology*, National Renewable Energy Laboratory, vol NREL/TP-570-25885.
5. Barrios. J. A., Rodríguez. A., González. A., Jiménez. B. y Maya C. (2000). *Destrucción de coliformes fecales y huevos de helmintos en lodos fisicoquímicos por vía ácida*. Memorias XII Congreso Nacional 2000. FEMISCA. AIDIS. Morelia, Mich. México. Año 1. No. 1. Tomo 1.pp 913.
6. Brown George (1965), *Operaciones Básicas de la Ingeniería Química*, España.
7. Bux M., Baumann R., Quadt S., Pinnekamp J. and Mühlbauer W. (2002) Volume reduction and biological stabilization of sludge in small sewage plants by solar drying, *Drying Technology*, 20, (4-5), 829-837.
8. Campos Claudia (2005), *Muestreo, caracterización y análisis de lodos residuales: Caracterización microbiológica*, Taller Iberoamericano sobre lodos de plantas de tratamiento de aguas residuales, IMTA, Mexico, primera edición.
9. Castrejón Ana, et al (2002), *Evaluación de la Calidad de Lodos Residuales de Mexico*, Publicaciones Femisca, XIII congreso.
10. Cardoso Lina, et al (2004), *Serie Autodidáctica de Medición de la Calidad del Agua, Segunda Parte: Identificación de sistemas de tratamiento de lodos residuales*, Subdirección General de Administración del Agua (CNA), Coordinación de Tratamiento y Calidad del Agua (IMTA)

11. Cota Alma (2006), Diseño, Construcción y Operación de un secado solar de lodos generados en plantas tratadoras de aguas, Memorias XXX Semana Nacional de Energía Solar, Veracruz.
12. Environmental Protection Agency (1989). *Sludge treatment and disposal. Process Design Manual*. EPA 625/1-89-001. September
13. Escalante Violeta., Ramirez E., Pozo F., Cardoso L., Tomasini A., (2005) *Curso-Taller "Operación y Mantenimiento de plantas de Tratamiento de Lodos Activados"*, Instituto Mexicano de Tecnología del Agua, Pátzcuaro.
14. Espinoza Alejandra (1985), Tesis: Diseño y construcción de un secador para prácticas de laboratorio de la Universidad La Salle, Mexico.
15. Faldhil M. Salih, (2003), Formulation of a mathematical model to predict solar water disinfection, *Water Research*, 37.
16. Fall Cheikh (2005), Sistemas de tratamiento de lodos residuales, Taller Iberoamericano sobre lodos de plantas de tratamiento de aguas residuales, IMTA, Mexico, primera edición.
17. Foust Alan (1990), Principios de operaciones unitarias, Cecsa, Mexico.
18. Gibbs R.A., Hu C.J., Ho G.E. and Unkovich I. (1997) 'Regrowth of faecal coliforms and salmonellae in stored biosolids and soil amended with biosolids', *Water Science Technology*, 35, (11-12), 269-275.
19. Horn S, et al (2003), Accelerated Air-Drying Of Sewage Sludge Using a Climate-Controlled Solar Drying Hall.
http://www.lgp.qld.gov.au/Docs/local_govt/grants_subsidies/funding/awtt/solar_drying_hall_project_results_pt2.pdf
20. Instituto de hidrología, meteorología y estudios ambientales de Colombia (IDEAM), <http://www.ideam.gov.co/>.
21. Jiménez-Cisneros B.E., Maya-Rendon C. and Salgado-Velasquez G. (2001), The elimination of helminth ova, faecal coliforms, salmonella and protozoan cysts by various physicochemical processes in wastewater and sludge, *Water Science Technology*, 43, 179-182.
22. J. J. S Nascimento, et al, Transporte de Materia con Reducción de Volumen en el Interior de Sólidos Paralelepípedos.

23. Junta de Castilla y León (2002), Manual del Proyectista: Energía solar térmica, ISBN 84-9718-112-3.
24. Kasatkin A. (1985), Operaciones básicas y aparatos en la tecnología química. T-I./pág 262-366
25. Kreit Frank (1965), Transmisión del Calor por radiación, CECSA, México, primera edición.
26. Manrique José (1984), Energía Solar: Fundamentos y aplicaciones fototérmicas, Harla Harper&Row Latinoamericana, México.
27. Marín Rafael (2005), Fisicoquímica y Microbiología de los Medios Acuáticos: Tratamiento y control de Calidad de Aguas, Ediciones Díaz de Santos, España.
28. Martín Alejandra (2000), Desinfección del Agua por Radiación Solar, TLALOC 7 (18), abril-junio.
29. Metcalf and Eddy (2006). *Wastewater Engineering. "Treatment and Reuse"*. Mc Graw Hill. New York.
30. Moeller Gabriel., et al (2004), *Tratamiento de aguas residuales: criterios para su selección*, IMTA, México, primera edición.
31. Montero Irene (2005), Modelado y construcción de un secadero solar híbrido para residuos biomásicos, Universidad de Extremadura, España.
32. Müller J., *Secado Solar de Lodos de Depuración*, Universidad de Hohenheim, Instituto de técnica agraria, Alemania.
33. Norma Oficial Mexicana NOM-052-ECOL-1993, Que establece las características de los residuos peligrosos, el listado de los mismos y los límites que hacen a un residuo peligroso por su toxicidad al ambiente, publicada en el Diario Oficial de la Federación el 22 de octubre de 1993.
34. Norma Oficial Mexicana NOM-004-SEMARNAT-2002, Lodos y biosólidos, especificaciones y límites máximos permisibles de contaminantes para su aprovechamiento y disposición final. Diario Oficial de la Federación del viernes 15 de agosto de 2003.
35. Opazo Unda (2003), Ingeniería Sanitaria aplicada a saneamiento y salud pública, LIMUSA, Mexico, Sexta edición.

36. Perry D.H.,Chilton C.H. (1984), Manual del Ingeniero Químico, Ed. Mc Graw-Hill.
37. Ramirez Gama, et al (2006), Manual de Practicas de Microbiología General, Facultad de Quimica UNAM, Mexico.
38. Ratna Megha, (2001), *Solar dryer boosts faro incomes*, Appropriate Technology, Vol 28, No 1.
39. Renner Rebecca (2000), *sewage sludges: pros&cons*, Environment Science and Technology, octubre, 430A.
40. S. Horn., K. Barr, J. McLellan M. Bux. (2005) "*Accelerated Air drying of Sewage Sludge using a Climate-Controlled Solar Drying Hall*". Brisbane Water -University of Hohenheim, Stuttgart, Germany.
41. Sánchez Francisco (1986), Tesis: Diseño y construcción de un secador experimental para productos alimenticios, evaluado en Durazno, Mexico.
42. Topaç F. O.(2006), Efficiencies of the open-sun and the covered sludge drying beds for the microbial stabilization of municipal sludge, AIDIS, 639-646.
43. Treybal Robert (2002), Operaciones de Transferencia de Masa, segunda edición, Mc Graw-Hill, México.
44. Valiente Antonio (1980), Prácticas de laboratorio de transferencia de masa, Facultad de Química UNAM.
45. Valiente Antonio (2002), Secado, UNAM, México.
46. V. Cebolla., et al (2004), La desinfección del suelo por Energía Solar (Solarización). Una técnica no contaminante para la agricultura del futuro, Instituto Valenciano de Investigaciones Agrarias, Valencia.
47. Welty James (1994), Fundamentos de transferencia de momento, calor y masa, LIMUSA, México, sexta reimpresión.
48. White Clifford (1985), Handbook of chlorination and alternative disinfectants, Tercera Edición.