



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE QUÍMICA

**SECADO Y ALTERNATIVAS DE USO DE LAS
HECES HUMANAS**

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE

INGENIERO QUÍMICO

PRESENTA

HÉCTOR ALBERTO GUZMÁN SANTAMARÍA



MÉXICO, D.F.

2010



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

JURADO ASIGNADO

PRESIDENTE: Antonio Valiente Barderas
VOCAL: Víctor Manuel Luna Pabello
SECRETARIO: José Luis Martínez Palacios
1er SUPLENTE: Alfonso Durán Moreno
2° SUPLENTE: Ignacio Monje Ramírez

SITIO DONDE SE DESARROLLÓ EL TEMA:

**Edificio 5, Instituto de Ingeniería, Ciudad Universitaria, UNAM, México D.F.
04510, México.**

M. en I. José Luis Martínez Palacios

ASESOR

Dr. Ignacio Monje Ramírez

SUPERVISOR TÉCNICO

Héctor Alberto Guzmán Santamaría

SUSTENTANTE



AGRADECIMIENTOS:

A la Dirección General de Asuntos del Personal Académico (DGAPA) por patrocinar el proyecto IN123009, interno 0327 del II, *Tratamiento, recuperación de nutrientes y aplicación de orina en suelo* que ha sido base para desarrollar esta tesis.



ÍNDICE

ABREVIATURAS.....	6
RESUMEN.....	7-8
INTRODUCCIÓN.....	9-11
OBJETIVOS E HIPÓTESIS.....	12
CAPÍTULO 1: ANTECEDENTES.....	13-38
1.1 El uso del agua como medio de transporte de excretas humanas.....	13
1.2 Disposición y aprovechamiento de las excretas humanas en la historia.....	14
1.3 Características y generación de heces en el ámbito internacional.....	15
1.4 Tratamiento y uso de las excretas en el ámbito nacional e internacional.....	17
1.5 Patógenos y enfermedades relacionadas con las heces humanas.....	25
1.6 Sanitarios ecológicos.....	29
CAPÍTULO 2: TEORÍA DE SECADO. SECADO SOLAR.....	39-62
2.1 Variables implícitas en el proceso de secado.....	40
2.2 Mecanismos que intervienen en el proceso.....	43
2.3 Clasificación de secadores.....	54
2.4 Secado solar.....	55
2.5 Captadores solares de aire para aplicaciones de secado.....	60
2.6 Descripción general del prototipo de secado solar.....	61

CAPÍTULO 3: METODOLOGÍA.....	63-76
3.1 Materiales.....	63
3.2 Caracterización fisicoquímica de heces en muestras controladas.....	63
3.3 Secadores experimentales.....	69
3.4 Pruebas experimentales de secado de heces.....	73
3.5 Variables de control durante las pruebas de secado.....	76
CAPÍTULO 4: RESULTADOS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS EXPERIMENTALES DEL SECADO DE HECES HUMANAS.....	77-119
4.1 Caracterización fisicoquímica.....	77
4.2 Resultados de secado.....	78
4.3 Alternativas de uso de las heces.....	114
CAPÍTULO 5: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	120-121
5.1 Conclusiones.....	120
5.2 Recomendaciones.....	121
REFERENCIAS.....	122-126
ANEXO 1.....	127-132
ANEXO 2.....	133-139
ANEXO 3.....	140-161





ABREVIATURAS

A	Área de transferencia
cm	Centímetros
CT	Carbono total
°C	Grados Celcius
DBO	Demanda bioquímica de oxígeno
d	Espesor del sólido
DQO	Demanda química de oxígeno
D _{SL}	Difusividad del líquido en el sólido
g	Gramos
h _c	Coeficiente de transferencia de calor
kg	Kilogramos
LASF	Letrina abonera seca familiar
L	Litros
N _A	Velocidad de secado
p	Persona
X	Humedad en base seca
x	Humedad en base húmeda
X*	Humedad de equilibrio
X _c	Humedad crítica
X _f	Humedad de las heces al tiempo θ
S	Peso del sólido
SF	Sólidos fijos
SV	Sólidos volátiles





RESUMEN

El saneamiento ecológico es un sistema cíclico cerrado, que considera a la excreta humana como un recurso; por tal razón es importante investigar alternativas de uso de dichos residuos para dar mayor sustentabilidad a su aprovechamiento, detener la contaminación de cuerpos de agua o complicar los procesos de tratamiento de las aguas residuales.

Las heces son un residuo que requiere especial atención por los 50 Kg/persona ·año que se producen, ya que éstas contaminan no solamente la orina, que es relativamente inocua, sino un volumen significativo de agua, del orden de 15,000 litros que se usan como medio de arrastre (Winblad, 2004).

En este trabajo se hace la colecta de heces de una familia de 4 personas, se homogeniza y conserva en refrigeración, se caracterizan parámetros tales como (humedad, SV, SF, DQO, DBO, CT, N-TOTAL, PO_4^{3-} , K^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} y Na^+), y se somete a secado solar en un dispositivo experimental diseñado para determinar en tiempo real dicho proceso.

Una vez construido el dispositivo de secado experimental, se realizaron diferentes corridas de secado de heces, se evaluaron las curvas características de éste proceso, dando como resultado la predominancia de la *difusión* para el secado de este producto, con una tasa de secado de 0.208Kg de heces/día a 0.344Kg de heces/día en $300cm^2$ para este dispositivo.





SECADO Y ALTERNATIVAS DE USO DE LAS HECES HUMANAS

Las heces humanas tienen un poder calorífico de $27.64 \pm \text{MJ/Kg}$, se distingue que éste último es semejante o superior al de algunas especies vegetales, lo cual las convierte en un combustible alternativo, para así reducir el consumo de combustibles comunes como la madera o el carbón.

De acuerdo con los resultados de la caracterización de las heces (5.3% de N-TOTAL, $<0.0000049\%$ de P, 2.2% de K, 1.3% de Ca, 0.28% de Mg y 0.22% de Na), éstas pueden ser reincorporadas al ciclo productivo para que las plantas aprovechen dichos nutrientes. Cabe destacar que se trata de una muestra puntual y que la humedad y sus características fisicoquímicas pueden ser muy variables, dependiendo de diversos factores como la dieta alimenticia y el estado físico del individuo.

Los agentes patógenos existentes en las heces pueden ser inactivados con una temperatura aproximada a los 60°C (Robertson, 1993), la cual se alcanzó con el dispositivo de secado.





INTRODUCCIÓN

Una persona desecha al año aproximadamente de 400 a 500 litros de orina y unos 50 kg de heces en base húmeda, y descarga en ese lapso del orden de 15,000 litros de agua para ese propósito. Utilizando el sistema convencional de drenaje, hay que agregar entre 15,000 y 30,000 L/persona·año de las llamadas aguas “grises” o “jabonosas”, provenientes del baño, la cocina y la lavadora (Winblad, 2004).

La mayoría de las ciudades en el mundo en desarrollo se enfrentarán a la extrema escasez de agua en el año 2010, algunas de las cuales son: El Cairo y Lagos en África, Dhaka, Beijing, Shangai, Bombay, Calcuta, Yakarta y Karachi en Asia, Sao Paulo y *Ciudad de México* en Latino América (Habitat, 1996).

La amenaza ya es una realidad en algunas ciudades, como la Ciudad de México, ubicada en una meseta árida. A la Ciudad de México, además de extraer agua para abastecimiento del acuífero, se bombea ese recurso hídrico desde aproximadamente 160 km por medio del sistema Cutzamala. Además, debido a la extracción de aguas subterráneas o explotación de los mantos acuíferos en el Valle, se reportan hundimientos del orden de 10.7 metros en los últimos 70 años (Habitat, 1996).

En la actualidad existe todavía la filosofía de continuar suministrando el agua como un recurso inagotable, el cual es utilizado, por comodidad, principalmente en la dilución y arrastre de los residuos generados por los





diferentes sectores de la sociedad. Y, como consecuencia de ese uso y descarga poco eficiente del preciado líquido, el problema ambiental se magnifica.

De este modo, en cada una de las etapas del proceso de flujo y descarga el problema se magnifica. Existen diversas explicaciones o excusas para continuar con este aprovechamiento de dilución y arrastre poco eficiente del agua, dentro de las cuales vale la pena mencionar el que todavía se considera un recurso renovable, la comodidad y la argumentación de que el final del proceso el agua es tratada o que el medio ambiente puede absorber la descarga de la planta de tratamiento, aunque la realidad sea otra. Se tiene que considerar que la disposición de heces y orina humana son realmente el problema y no el agua residual, que su escasez es ó será un problema mayor en el mundo (Winblad, 2004).

Un residuo que requiere especial atención son los 50 kg/persona·año de heces que desecha un humano, ya que éstas tienden a contaminar no solamente la orina, que es relativamente inocua, sino un volumen significativo de agua que se usa como medio de arrastre y de manera similar o mayor al agua jabonosa (Winblad, 2004).

Es por eso que es importante investigar alternativas de uso de dichos residuos para dar mayor sustentabilidad al aprovechamiento de los recursos. Este enfoque llamado también “saneamiento ecológico” es un sistema cíclico cerrado, considera a la excreta humana como un recurso. El objeto es que la excreta se procese en otros sitios distintos a donde se produce hasta que se convierta en un material seguro, libre de patógenos. Así, el residuo podría ser incorporado al ciclo productivo por las características físicas y químicas que lo identifican. En la





naturaleza, la excreta humana y la de otros animales juegan un papel esencial para la conformación de saneamiento, estos nutrientes se desechan y se ubican mal, lo que rompe el ciclo natural. (Esrey et al., 1998)

Como consecuencia de lo expuesto, en esta tesis se propone investigar el secado de las heces por medio de radiación solar y determinar algunas de sus características físicas y químicas para proponer alternativas de aprovechamiento de un residuo como materia prima de algún proceso productivo. Con base en la teoría y en las referencias bibliográficas se evalúan las curvas de secado para proponer como alternativa de ahorro de agua y aprovechamiento de las heces en lugar de disponerlas contaminando cuerpos de agua o complicando los procesos de tratamiento.

Durante el desarrollo de la investigación se colectaron los residuos, se caracterizaron y se llevaron a cabo pruebas de secado en un dispositivo experimental con objeto de evaluar las curvas de secado y corroborar la hipótesis de que es posible secarlas por medio de radiación solar y darles un uso para reincorporarlas al ciclo productivo.





OBJETIVO GENERAL

Evaluar el secado de las heces mediante energía solar en un dispositivo experimental como alternativa de manejo sustentable y ahorro del consumo de agua.

OBJETIVOS PARTICULARES

- Evaluar las curvas de secado con base en un dispositivo experimental.
- Determinar la capacidad calorífica como alternativa de reutilización como material energético.
- Evaluar la cantidad de nutrientes y materia orgánica de las heces como alternativa de uso en suelo o compostas.

HIPÓTESIS

Es posible secar las heces por medio de energía solar en un dispositivo experimental y darles un uso para reincorporarlas al ciclo productivo.





CAPÍTULO 1: ANTECEDENTES

En este capítulo se resume la información recopilada y relacionada con la generación, características, tratamiento y uso de las heces humanas en el ámbito mundial, así como el agua requerida para su disposición.

1.1 El uso del agua como medio de transporte de excretas humanas

Una persona desecha aproximadamente al año de 400 a 500 litros de orina y unos 50 kg de heces base húmeda y descarga en un año del orden de 15,000 litros de agua potable para ese propósito. Utilizando el sistema convencional de drenaje, hay que agregar entre 15,000 y 30,000 L/persona·año de las llamadas aguas “grises” o “jabonosas” provenientes del baño, la cocina y la lavadora. A lo anterior se deben añadir las corrientes de agua pluvial y las aguas altamente contaminadas que provienen del sector industrial (Winblad, 2004).

Un aspecto muy importante a considerar en los escenarios futuros de México es el incremento de la población y la concentración de la población en zonas urbanas. De acuerdo con las estimaciones de CONAPO (Consejo Nacional de Población), entre 2007 y 2030 la población del país se incrementará en casi 15.1 millones de personas. Además, aproximadamente el 82% de la población total se asentará en localidades urbanas (CONAPO, 2005).

La disponibilidad de agua promedio anual en el mundo es de aproximadamente 1386 millones de kilómetros cúbicos, de los cuales el 97% es agua salada y solo el 2.5%, o 35 millones de kilómetros cúbicos, es de agua dulce, de esta cantidad casi el 70% no está disponible para consumo humano porque se encuentra en los glaciares, en la nieve y en el hielo (CONAGUA, 2008).

De este modo, en cada una de las etapas del proceso de flujo y descarga el problema se magnifica. Existen varias razones para seguir usando éste método, por ejemplo: la disposición de aguas residuales, la creencia de que el agua es un recurso ilimitado, la idea falsa de que al final del proceso el agua es tratada o que





el medio ambiente puede absorber la descarga de la planta de tratamiento, sin embargo la realidad es otra. Se tiene que considerar que la disposición de heces y orina humana son realmente un problema y que la escasez de agua es o será un problema mayor en el mundo, que solamente una diminuta fracción de las aguas residuales de los países llamados del tercer mundo son tratadas, y que alrededor de éste podemos encontrar ejemplos de ecosistemas naturales destruidos por la descarga de aguas residuales sin tratar o parcialmente tratadas (Winblad, 2004).

Un elemento que requiere de especial atención son los 50 kg/persona·año de heces, ya que estas tienden a contaminar no solamente la orina, que es relativamente inocua, contaminan un volumen significativo de agua que se usa como medio de arrastre y de manera similar o mayor al agua jabonosa (Winblad, 2004).

1.2 Disposición y aprovechamiento de las excretas humanas en la historia

La relación entre los seres humanos y sus excretas parece haber sido siempre dividido en dos campos. Por un lado, las heces, en particular han sido vistas como un residuo que debe ser eliminado lo antes posible. Por otro lado, efectos positivos tales como la mejora en el crecimiento de las plantas se han observaron alrededor de los lugares donde se depositaron las excretas. Se puede suponer razonablemente que estos recursos han sido explotados desde muy temprano. El aspecto de higiene sólo fue importante cuando mayor número de seres humanos asentaron sus viviendas en una zona limitada.

En general, las heces y la orina no parecen haber desempeñado un papel importante en la historia de la vida rural hasta el siglo 20, pero siempre importante en las ciudades y otros lugares densamente poblados.

La primera instrucción en cuanto a saneamiento e higiene se considera por muchos como el siguiente texto de la Biblia: “Y tendrás un lugar fuera del real, y saldrás allá fuera – Tendrás también una estaca entre tus armas; y será que, cuando estuvieres allí fuera, cavarás con ella, y luego al volverte cubrirás tu excremento” (La Santa Biblia, Deuteronomio 23: 12+13).





En el siglo 19, Justus von Liebig se refirió a la utilización de aguas residuales como una de las cuestiones clave para el futuro. Subrayó la importancia del reciclaje de nutrientes mediante la devolución de las excretas humanas de las zonas urbanas a las tierras agrícolas como condición para sostener la riqueza y el bienestar de los estados, así como el progreso de la cultura y la civilización [...so werden sie die Einsicht gewinnen, dass von der Entscheidung der Kloakenfrage der Städte die Erhaltung des Reichstums und der Wohlfahrt der Staaten und die Fortschritte der Kultur und Civilisation abhängig sind.] (Zoller y Liebieg, 1876, citado por Kaufmann, 2008).

En particular, antes de la introducción de abonos minerales, la disponibilidad de los nutrientes de las plantas de los excrementos humanos y de animales como el guano parece haber sido de gran importancia. Con el aumento de la disponibilidad de fertilizantes de nitrógeno producidos por la técnica de Haber-Bosch, el uso de nutrientes antropogénicos se hizo menos importante. Al mismo tiempo, la introducción de los sistemas de alcantarillado en las ciudades hizo que el uso de los nutrientes de los seres humanos se hiciera cada vez más limitado (Kaufmann, 2008).

1.3 Características y generación de heces en el ámbito internacional

1.3.1 Características de las heces

En la Tabla 1.1 se resume la información reportada por diferentes países del contenido de nutrientes en las heces. Y en la Tabla 1.2 se resumen los parámetros que caracterizan las heces que son reportadas por diferentes autores. En la Tabla 1.3 se presenta el ámbito de variación de nutrientes en las heces humanas en diferentes países por persona conforme a los datos de la Tabla 1.2.

Por último en las Tablas 1.4 y 1.5 se muestra las cantidades de excreción reportada por diferentes autores, así como su ámbito de variación.





Tabla 1.1 Contenido de nutrientes en las heces humanas excretadas en diferentes países por persona por año

País	Excreción de nutrientes estimada por persona en diversos países		
	Nitrógeno	Fósforo	Potasio
	Kg /persona·año		
China	0.5	0.2	0.5
Haití	0.3	0.1	0.3
India	0.3	0.1	0.4
Sudáfrica	0.4	0.2	0.4
Uganda	0.3	0.1	0.4

Tabla 1.2 Características y nutrientes en las heces humanas reportadas por diferentes autores

Parámetro		JÖNSSON et al., 2005	VINNERAS et al., 2006	LAAK, 1986	SCHOUW et al., 2001
	Símbolo	g/p·d	g/p·d	Parámetro/100g	g/p·d
Humedad	H ₂ O	109	-	-	-
Sólidos totales	ST	30.1	-	-	-
Sólidos volátiles	SV	23.9	-	-	-
Demanda química de oxígeno	DQO	37.4	-	30	-
Demanda bioquímica de oxígeno	DBO	22.6	-	10	-
Carbono total	CT	-	-	-	-
Nitrógeno Total	N-TOTAL	1.5	1.51	1	1.14
Fósforo	PO ₄	0.1	0.50	0.3	0.51
Potasio	K	0.9	1.0	-	0.45
Sodio	Na	No se encontró contenido en la bibliografía			
Calcio	Ca	-	-	-	0.40
Magnesio	Mg	-	-	-	0.15

p = persona d = día

Tabla 1.3 Ámbito de variación de nutrientes en las heces humanas en diferentes países por persona conforme a los datos de la TABLA 1.2

Ámbito de variaciones											
H ₂ O	ST	SV	DQO	DBO	COT	N-TOTAL	PO ₄	K	Na	Ca	Mg
g/p·d	g/p·d	g/p·d	g/p·d	g/p·d	g/p·d	g/p·d	g/p·d	g/p·d	g/p·d	g/p·d	g/p·d
109	30.1	23.9	30-37.4	10-22.6	-	1-1.51	0.1-0.51	0.45-1.0	-	0.40	0.15

p = persona d = día





1.3.2 Generación de heces

TABLA 1.4 Comparativa de excreción de heces en base húmeda y seca reportada por diferentes autores

Heces	WINBLAD 2004		JÖNSSON et al., 2004		GIZEN, 2001		MNKENI et al. 2009	
	Kg/p·d	Kg/p·a	Kg/p·d	Kg/p·a	Kg/p·d	Kg/p·a	Kg/p·d	Kg/p·a
Base húmeda	0.14	50	0.14	51	0.1-0.4	36.5-146	0.08-0.3	30-110
Base seca	-	-	0.03	11	0.03-0.06	11-22	0.02-0.04	10-15

p = persona a = año d = día

TABLA 1.5 Ámbito de variación de las heces en base húmeda y seca excretadas por persona conforme a los datos de la TABLA 1.4

Ámbito de variaciones			
Base húmeda	Base húmeda	Base seca	Base seca
Kg/p·d	Kg/p·a	Kg/p·d	Kg/p·a
0.08 - 0.4	36.5 - 146	0.02 - 0.04	10 - 22
g/p·d	g/p·a	g/p·d	g/p·a
80 - 400	36500 - 146000	20 - 40	10000 - 22000

p = persona a = año d = día

1.4 Tratamiento y uso de las excretas en el ámbito nacional e internacional

En este inciso se describa la información recopilada de las diferentes formas de uso en diversos países alrededor del mundo.

1.4.1 Heces – incineración

La incineración es un proceso aeróbico con una degradación completa de la materia orgánica. Por lo tanto, si las heces son completamente incineradas, básicamente se perderá todo el N y S en las emanaciones de gas, mientras prácticamente todo el P y K permanecerán en la ceniza. Al igual que la ceniza vegetal, la ceniza de la incineración exitosa es un concentrado y un fertilizante higiénico con alto contenido de P y K. Para utilizar de mejor manera se debe aplicar cuidadosamente este fertilizante concentrado (Jonsson et al., 2004).





1.4.2 Heces – compostaje

1.4.2.1 Compostaje termofílico

El compostaje termofílico, así como la incineración, es un proceso aeróbico que depende del calor de la materia orgánica en descomposición para alcanzar la temperatura deseada, $>50^{\circ}\text{C}$, durante un número de días que asegura una reducción segura de patógenos (Vinneras et al., 2003^a, Schonning et al., 2004). Una alta tasa de descomposición es necesaria si la composta debe llegar a esta temperatura elevada. La descomposición requiere de mucho oxígeno y el peso total de aire necesario para el proceso de compostaje es usualmente varias veces el del sustrato.

Si la orina de la letrina y las heces son procesadas conjuntamente en lugar de únicamente las heces, entonces la entrada de N en la composta aumenta de 3 a 8 veces y la mayoría del N de la orina se pierde, ya que está básicamente en forma de amoníaco, que escapa fácilmente del sistema aerobio (Jonsson et al., 2004).

La disponibilidad de K, S y P en el material de la composta es alta. Si existen fugas de lixiviados durante o después del proceso, debido a la lluvia o a un sustrato húmedo, entonces la mayoría de las fracciones disponibles de estos nutrientes se perderán. Por lo tanto, es importante que el compostaje sea manejado de tal manera que no se permita el escape de lixiviados.

Un sustrato basado completamente en heces no es normalmente suficiente para alcanzar temperaturas termofílicas, especialmente si las heces han sido mezcladas con ceniza o cal. Es necesario añadir sustratos fácilmente degradables, generalmente en cantidades muchas veces mayores a la cantidad de heces. Este sustrato suplementario puede consistir, por ejemplo, de residuos de los mercados de alimentos, desperdicios industriales de fácil descomposición o residuos de la cocina separados en la fuente. Estas adiciones afectan las concentraciones de nutrientes en la composta. Además de esto, se requiere una operación y mantenimiento excelentes para alcanzar la operación termofílica (Jonsson et al., 2004)





1.4.2.2 Compostaje a bajas temperaturas

El compostaje mesofílico y la descomposición aerobia a temperaturas ambientales, aquí llamados colectivamente como compostaje a bajas temperaturas, son mejor caracterizados como variantes a baja temperatura del compostaje termofílico y estos procesos son de igual manera aeróbicos. Los productos de estos procesos son, cuando maduros, igual de degradados que los del compostaje termofílico y los productos finales de la descomposición aerobia a estas temperaturas, dióxido de carbono y agua son también iguales (Jonsson et al., 2004).

Las dos diferencias principales entre los dos tipos de procesos de compostaje son: primero que la higienización alcanzada mediante altas temperaturas en el compostaje termofílico no se da en el compostaje a bajas temperaturas, y segundo que la necesidad adicional de sustrato fácilmente degradable, así como de entradas extensivas de operación y mantenimiento es menor (Jonsson et al., 2004).

1.4.3 Heces - almacenamiento

Otra alternativa de tratamiento secundario es el almacenamiento en un estado seco al ambiente o a una temperatura mayor. Si el nivel de humedad se mantiene bajo, menor al 20% durante todo el almacenamiento, entonces la degradación es baja y las pérdidas de N y materia orgánica también. Estas sustancias son conservadas y, después de la incorporación en el suelo y el humedecimiento, ellas son degradadas de la misma manera que el material en un compostaje mesofílico o en un *Arbor Loo* (ver punto 1.4.6.4 inciso f). Adicionalmente, puesto que la degradación tiene lugar en pequeños volúmenes en suelo húmedo con una planta sembrada, el riesgo de pérdida de amoníaco o pérdidas por lixiviados es virtualmente nulo (Jonsson et al., 2004).



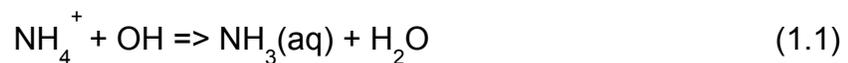


1.4.4 Heces – digestión anaerobia

La digestión anaerobia a temperaturas termofílicas, mesofílicas o ambientales es otra opción para el tratamiento secundario de las heces. Los digestores son cerrados y todas las sustancias que entran salen de ellos, ya sea con el biogas y/o con los residuos de digestión. En la digestión, una gran parte de materia orgánica se degrada a biogas (*metano y dióxido de carbono*). Una gran cantidad de S orgánico es mineralizado de las proteínas y algo de ello deja el proceso como ácido sulfhídrico contaminando el biogas. Una gran porción del N orgánico es mineralizada de las proteínas y así el N de los residuos consiste en gran parte (50 a 70%) de amonio (Berg, 2000), el remanente es N orgánico. El amonio está disponible directamente para las plantas y la disponibilidad de los otros nutrientes para las plantas es también buena. Los residuos de la digestión deben ser manipulados cuidadosamente para no perder el amonio como gas amoníaco (Jonsson et al., 2004).

1.4.5 Heces – higienización química

La higienización de las heces puede ser alcanzada mezclándolas con urea. La urea es degradada a amonio por la ureasa que está presente en las heces. (Jonsson et al., 2004)



El amoníaco es tóxico para los microbios y la reducción de patógenos es muy buena en el proceso (Vinneras et al., 2003b). Las adiciones de ceniza y cal que incrementan el pH durante el tratamiento primario desplazan la ecuación 1.1 hacia la derecha y por tanto se incrementa el efecto higienizante. Este tratamiento debe ser realizado en un contenedor cerrado. El proceso es similar al almacenamiento, en este no ocurre degradación de las heces y consecuentemente no se pierden ni materia orgánica ni N. Son dejados para que los microbios en el suelo prosperen luego de la aplicación del lodo como fertilizante. El contenido de amonio de este lodo es mayor al que existe en la orina y en los residuos de la digestión. Por ende, es un excelente fertilizante, pero al





igual que los residuos de la digestión debe ser manipulado con cuidado para evitar pérdidas de amoníaco. (Jonsson et al., 2004)

1.4.6 Heces como fertilizante

Los nutrientes más importantes para la agricultura y la horticultura alrededor del mundo son el nitrógeno, el fósforo y en tercer lugar el potasio (Heinonen-Tanski, 2003).

1.4.6.1 Nitrógeno

El nitrógeno es un elemento esencial en la síntesis de proteínas. El aire contiene 79% de nitrógeno, sin embargo las plantas no pueden fijar este mismo de la atmósfera.

Factores ambientales tales como salinidad alta, fungicidas, ondas de calor, clima frío o seco, pueden limitar la fijación microbiológica del nitrógeno. Debido a que el nitrógeno amoniacal contiene mucha más energía que el nitrógeno molecular N_2 , tanto la fijación biológica del nitrógeno, como la producción industrial necesitan mucha energía, la cual es un factor limitante para la sustentabilidad mundial.

Aunque el nitrógeno es un elemento esencial para la vida, puede ser también un contaminante cuando se aplica en el lugar y en concentraciones equivocadas (Heinonen-Tanski, 2003).

1.4.6.2 Fósforo

Es el segundo elemento más importante relacionado con el crecimiento vegetativo. Es una parte esencial en el ADN, ARN, síntesis de encimas, etc. Puede existir una escasez de fósforo en el suelo, debido a que las plantas lo usan para su crecimiento. El fósforo que se necesita debe ser reemplazado con la fertilización (Heinonen-Tanski, 2003). Una aplicación excesiva de fósforo puede llevar a la contaminación de las aguas superficiales. La contaminación del agua con fósforo se manifiesta con el crecimiento de algas y cianobacterias en las





aguas superficiales y en casos severos con la muerte de peces (Hwang y Lu, 2000).

Las fuentes de fósforo que son suficientemente puras es decir que tienen poco o nulo contenido de metales pesados son pocas ya que las minas son escasas y se estima que habrá una vasta cantidad por menos de 100 años (Driver et al., 1999). Debido a estas limitaciones debemos encontrar nuevas y mejores formas de emplear nuestros recursos disponibles para la fertilización, por ejemplo desechos fecales humanos y animales.

La excreta humana es nombrada y usada frecuentemente como suelo nocturno (*night soils*) en algunas áreas del mundo como China, Vietnam y Japón sin que se conozcan problemas relacionados con la productividad agrícola, sin embargo el uso incorrecto de la excreta humana puede causar problemas de higiene y salud (Heinonen-Tanski, 2003).

1.4.6.3 Potasio

El potasio se encuentra bastante en la naturaleza. Es el séptimo elemento más común en la Tierra. Algunos suelos minerales asociados a suelos pesados son fuentes ricas de K, conteniendo un 17% de K. El agua de mar representa la mayor fuente de potasio del mundo con 390mg/L de potasio.

El potasio es responsable de muchas funciones vitales en las plantas, animales y humanos. Se absorbe en grandes cantidades, más de las que son requeridas, es por eso que los excesos se excretan naturalmente. Este proceso ocurre en animales y plantas mediante los riñones, y en las plantas como potasa en tejido al término de cada estación, es por eso que el potasio es reciclado en grandes cantidades en la naturaleza.

Se discute en ocasiones que el ciclo del potasio es cerrado a pesar de que se aplica como fertilizante.

Si la concentración y la localización de potasio en sus fuentes originales se consideran para su uso, se puede referir a este como un recurso no renovable.





1.4.6.4 Algunos ejemplos prácticos del uso de las heces en la agricultura en el mundo

a) China

En china los agricultores han utilizado a las excretas humanas, comúnmente sin tratar, para cultivar alimentos. En la provincia de Guangxi, los sanitarios de doble cámara con desviación de orina han ganado mucha popularidad recientemente y se han construido más de 30,000 de estos, dentro de la población rural y urbana de esta zona. En la horticultura china se utiliza únicamente la orina para cultivar coles, habas, calabazas y tomates. En los campos se utiliza tanto la orina como las heces para cultivar maíz, arroz y bambú (Esrey y Andersson, 2001).

b) Etiopía

Una práctica popular en este país es (Food Always in the home) “comida siempre en casa”. El concepto está basado en un huerto dividido en secciones que se plantan en intervalos de una pocas semanas. Así mientras en unas secciones se cosecha, en otras se tiene semillas en germinación. De esta manera, hay un suministro constante de alimentos disponibles. Las secciones están bien abonadas con heces humanas y cualquier otro material orgánico, tal como residuos de jardín. La orina se usa también como fertilizante líquido (Edstrom, 1999 citado por Lorimer, 2007).

c) Guatemala

En Guatemala, la deforestación y la erosión son problemas graves en todas las zonas del altiplano. Este es el resultado de la alta densidad de población en estas zonas, junto con la distribución desigual y el uso de suelo inadecuado como la siembra de nuevos cultivos para exportación, han dejado al suelo deteriorarse. Para contrarrestar esta situación de pérdida del suelo de cultivo, los agricultores usan excretas humanas como acondicionador de suelos. Si bien se reconoce que esta práctica no puede resolver los problemas en todo el área deforestada y





erosionada, se puede considerar como un método apropiado y de bajo costo para mejorar la fertilidad y la productividad de la tierra cultivable. Por otra parte, los agricultores están conscientes de que la aplicación de fertilizantes químicos en los campos sin la reposición de la fracción de materia orgánica conduce a un empobrecimiento de los suelos (Strauss y Blumenthal, 1990).

También se introdujeron los sanitarios de doble cámara con desviación de orina porque fueron considerados como la tecnología más adecuada para la gente de la zona. Después de la defecación se agrega ceniza, una mezcla de ceniza y suelo, cal y suelo o una mezcla de todas ellas. Esta mezcla se deja secar y se aplica como abono al suelo (Strauss y Blumenthal, 1990).

d) Japón

Este país introdujo la práctica del uso de excretas humanas en la agricultura en el siglo 12 y lo siguió haciendo hasta el siglo 19. Los agricultores compraban la orina y las heces de las personas en zonas urbanas, y debido a la política y costumbres del país, la fiebre tifoidea, el cólera y otras enfermedades transmisibles eran prácticamente desconocidas. Los agricultores también colocaban cubetas en las esquinas de las ciudades y pueblos para recolectar orina. De esta manera recolectaban de manera gratuita la orina y proveían al mismo tiempo a los peatones de baños públicos sencillos (Matsui, 1997).

e) India

En un proyecto piloto en Kerala, la orina es desviada a una zona de cultivo de calabaza, por la parte posterior de algunos baños. El proyecto ha tenido éxito y existe la demanda de construir más baños de este tipo (Esrey y Andersson, 2001).

f) Zimbabwe

El *ArborLoo*: Es un diseño simple de sanitario de composta, cuenta con losa, pedestal y estructura portátil. La cámara tiene poca profundidad (máximo un metro por debajo del nivel del suelo) y está protegida por un “anillo de amarre” a ras de suelo que la asegura y eleva la letrina ligeramente por encima del nivel del





suelo. La poca profundidad de la cámara evita la posible contaminación de los mantos freáticos, en comparación con las fosas profundas. Después de cada uso se agrega ceniza y tierra, lo cual reduce olor y criadero de moscas. También pueden agregarse capas de materia orgánica, como hojas, para acelerar el proceso de compostaje. Cuando la cámara está llena en tres cuartas partes, se cambian de sitio losa y estructura. La restante cuarta parte de la fosa se rellena con una capa de tierra fértil (por lo menos 15 cm) y se planta un árbol joven sobre el contenido de la fosa. La losa y estructura se montan nuevamente encima de otra cámara poco profunda y el ciclo se repite.

La *fossa alterna*: Como su nombre latino indica, son dos fosas que se utilizan de forma alterna. Son dos cámaras poco profundas, permanentes y parcialmente alineadas. Las cámaras se encuentran situadas por debajo de una losa portátil, un pedestal y estructura. Al igual que el *ArborLoo*, la orina y las heces se acumulan en la fosa poco profunda, a la que también se agrega ceniza y tierra. Cuando la cámara en uso está casi llena, la losa con el pedestal y la estructura se cambian a la segunda cámara, mientras que el contenido de la primera se cubre con tierra (entre 15 y 30 cm). Pueden sembrarse verduras o flores si así se desea. Se pone en uso la segunda cámara, mientras se recupera el contenido de la primera ya convertido en humus, un material de aspecto terroso. Éste puede utilizarse inmediatamente en la producción agrícola, sobre todo en hortalizas, o bien puede almacenarse en bolsas hasta la siguiente temporada de lluvias. El uso de las cámaras puede alternarse cada seis meses, dependiendo del número de usuarios. Este abono de aspecto terroso es un excelente acondicionador de suelos y puede usarse para mejorar la fertilidad del terreno lo mismo en zonas urbanas que en zonas urbanas periféricas (Esrey et al., 2001).

1.5 Patógenos y enfermedades relacionadas con las heces humanas

Los patógenos y los parásitos hallados en la excreta humana pueden causar enfermedades si se contamina una persona por algún medio; las enfermedades pueden ser desde la diarrea y la desnutrición hasta enfermarse de cólera. Cuando estas enfermedades se prolongan, pueden derivar en un





crecimiento deficiente, o la carencia de hierro, de vitamina A y otros micronutrientes, estas consecuencias pueden durar toda la vida o perecer como consecuencia de estas. No todos los contagios de patógenos y parásitos causan la muerte, pero un debilitamiento constante causado por estas enfermedades predispone a la gente a una enfermedad permanente y posiblemente a la muerte.

En las heces frescas existen cuatro grupos principales de organismos que afectan a los humanos: *bacterias*, *virus*, *protozoarios* y *helmintos (lombrices)*.

Estos organismos, una vez excretados tienen las siguientes características:

- pueden ser inmediatamente infecciosos
- pueden necesitar de un período determinado fuera del cuerpo para ser infecciosos, o
- pueden requerir de un huésped intermedio antes de ser infecciosos.

Las bacterias y los virus son infecciosos inmediatamente después de ser excretados. Los protozoarios son excretados primero como quistes y pueden ser inmediatamente infecciosos o requerir de un período fuera del cuerpo. Los huevecillos de las lombrices (muchos de los cuales resisten severas condiciones ambientales) necesitan estar un tiempo fuera del cuerpo (Esrey et al., 1998).

Cuando una persona excreta un patógeno no almacenado o sin destruir, contamina el medio ambiente. Una vez que las heces tienen acceso a un ambiente abierto, a gran escala puede contaminar los dedos (manos, ropa y utensilios), líquidos (agua potable, para cocinar, bebidas y otras aguas), terreno (verduras y hortalizas caseras), moscas (caseras y de campo), animales domésticos y caracoles. Todo ellos depende del nivel de exposición que se tenga y de los cuidados de aseo que se establezcan en las comunidades.

La gente puede estar expuesta a patógenos y parásitos a través de estas rutas o también por medio de los alimentos.

Un medio ambiente contaminado expone a la gente al contagio de patógenos y, por ende, a la infección y enfermedad. La gente recién contagiada excreta al ambiente, creando un ciclo de infección, contaminación y enfermedad.





Una vez que las heces abandonan el cuerpo, y antes de que los patógenos tengan acceso a un medio ambiente de gran escala, hay varias opciones para prevenir su diseminación. El enfoque tradicional es “jalarle la palanca al inodoro” y apartar la excreta (flujo y descarga) o bien depositarla en una cámara profunda (caída y depósito).

Estos métodos para disponer de la materia fecal hacen creer que se ha evitado la contaminación del ambiente, pero es una creencia falsa pues el contenido de una cámara profunda puede filtrarse a los mantos freáticos, o inundarse en temporales severos de lluvia.

Romper el círculo vicioso de infección y reinfección exige tomar medidas preventivas justo donde inicia el problema. En primer lugar, se tiene que conservar a los patógenos fuera del medio ambiente. La gente excreta patógenos por períodos que van, de días o semanas hasta meses. En algunas comunidades una buena parte de la población excreta patógenos distintos en un mismo período. Se tiene que desarrollar una manera de eliminar los patógenos excretados o prevenir su acceso al medio ambiente. La respuesta puede ser mantener a los patógenos aislados, con seguridad, o eliminarlos rápidamente (Esrey et al., 1998).

Factores que favorecen la destrucción o inactivación de los patógenos

Un buen número de patógenos y parásitos están contenidos en las heces (algunos miles e incluso millones cada vez). Sin embargo, después de que son excretados al ambiente, casi todos, eventualmente, mueren o se hacen inofensivos. Pero algunos de estos organismos se conservan vivos por más tiempo y son capaces de causar alguna enfermedad.

El tiempo que toma morir a los organismos del mismo tipo, se conoce como *tasa de mortandad*. Esta tasa es distinta para cada tipo de organismo. Las dos excepciones son la salmonella (y otro tipo de bacteria) que pueden incluso incrementar su número fuera del cuerpo, y los huevecillos de las lombrices parásito (con su proceso de desarrollo en etapas). Si bien los huevecillos de las lombrices no se reproducen, requieren más tiempo para morir que otros patógenos.





Ciertas características ambientales expuestas en la Tabla 1.1 pueden acelerar o retrasar el proceso de muerte de los patógenos, dependiendo del nivel o grado de la condición. Las condiciones consideradas como determinantes en la tasa de mortandad son: temperatura, humedad, nutrientes, otros organismos, luz solar y pH. Cada condición varía de modo natural (por ejemplo, tiempo de secas y temporal) o de modo artificial (por ejemplo, la adición de limo). Esto significa que se puede incrementar o reducir el tiempo que le toma a un patógeno morir, a partir de su tasa promedio de mortandad. En general, en condiciones naturales, a mayor número de patógenos, la tasa de mortandad se incrementa.

Tabla 1.6 Condiciones ambientales que estimulan la muerte de patógenos (Robertson et al., 1993)

Factores Ambientales	Cómo
Temperatura	Incremento de temperatura
Humedad	Decremento de humedad
Nutrientes	Decremento de nutrientes
Luz Solar	Incremento de luz solar
pH	Incremento en pH

Cada una de las condiciones ambientales mencionadas en la Tabla 1.6 tiene promedios que favorecen la sobrevivencia de los patógenos. En la medida que los humanos cambiamos estas condiciones (o la naturaleza), las tasas de mortandad se ven alteradas de modo correspondiente. Por ejemplo, si la temperatura se incrementa, los patógenos morirían más rápido. En efecto, 99% de coliformes fecales (bacterias usuales en heces) morirán, aproximadamente en dos semanas, en el verano (época de calor) y en tres semanas durante el invierno (época de frío). Una temperatura cercana a los 60°C tendrá como consecuencia la muerte casi instantánea de todos los patógenos en las heces. Una temperatura que se mantenga en un intervalo de 50 a 60 °C, tendrá como consecuencia el no crecimiento de las bacterias y la muerte, en minutos (30 minutos o menos) de casi todos los patógenos. Estas temperaturas pueden alcanzarse usando métodos diversos, como el compostaje a alta temperatura. Por ejemplo, el decremento de la humedad y el incremento de la temperatura pueden trabajar juntos para producir





una muerte más rápida de patógenos, que si sólo se altera uno de estos factores (Robertson et al., 1993).

Las bacterias, los virus y los protozoarios tardan en morir varios meses, a veces menos. Los huevecillos de las lombrices sobreviven algunos meses y los de la especie *Ascaris* pueden permanecer vivos por años. De todos los métodos usados para la destrucción de patógenos, el compostaje de alta temperatura es el mejor modo de destruir rápidamente la mayor parte de patógenos. En realidad es muy difícil alcanzar las condiciones óptimas en tanto que algunas partes del montón de composta no alcanzan la temperatura adecuada. Esto quiere decir que algunos patógenos es posible que sobrevivan.

Generalmente se asume que, si se elimina a los patógenos más recientes a la destrucción, entonces también se destruye a todos los demás. Dos patógenos (muy diseminados y resistentes a la destrucción) son: *Ascaris lumbricoides*-la típica lombriz redonda – y el *Cryptosporidium parvum* – un tipo de parásito protozoario, que causa la diarrea (Esrey et al., 1998).

Los quistes de *Cryptosporidium parvum* (forma en que se excreta a estos protozoarios) son muy resistentes a la destrucción: pueden sobrevivir incluso a ciertas condiciones ambientales extremas (*más que los Ascaris*), como el congelamiento, altas temperaturas y el tratamiento con cloro y ozono en el agua (Robertson et al., 1993).

1.6 Sanitarios ecológicos

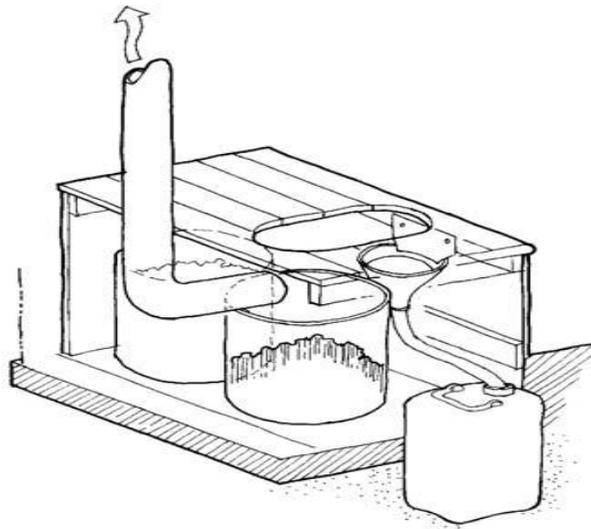
a) Bolivia

En la comunidad de El Alto, Bolivia, han sido construidos de igual manera sanitarios secos con desviación de orina como se muestra en el esquema de la Figura 1.1. Se trata de un asentamiento peri-urbano en una meseta a unos 4000 msnm. Materiales disponibles localmente y componentes del sanitario se utilizan de manera muy sencilla para la construcción del mismo. Este tipo de baño tiene un asiento de madera, mientras que el recolector de orina consta de un embudo de plástico.





Debajo del asiento de madera se encuentran dos cubetas. Las heces se depositan en las cubetas y se cubren con una combinación de cenizas, cal y aserrín, mientras que el papel higiénico se coloca en un recipiente aparte y se quema periódicamente. Las cubetas llenas se vacían en una caja aparte para el almacenamiento y deshidratación adicional para después usarlas de forma segura en la tierra. La orina es recogida en un recipiente y se utiliza como fertilizante líquido (Winblad, 2004).

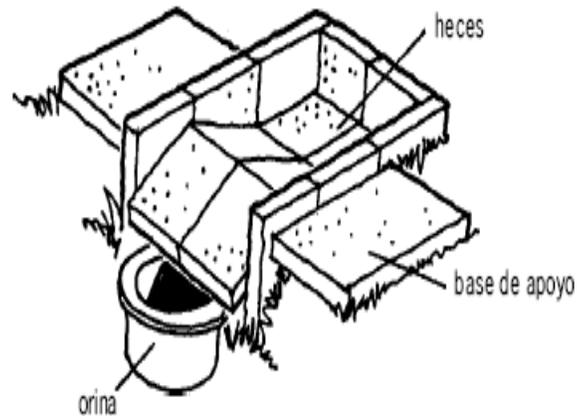


**Figura 1.1 Sanitario desviador de orina en El Alto, Bolivia
(Winblad, 2004)**

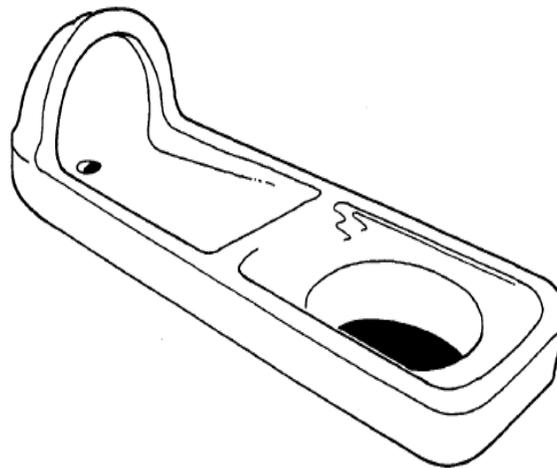
b) China

La idea de no mezclar la orina con las heces no es nueva: en algunas regiones de China existen desde hace siglos algunos sanitarios muy sencillos para lograr esta división, ver la Figura 1.2 a. Más recientemente, una fábrica de Pekín inició la producción de losas de porcelana para acucillarse, con desviación de orina como se muestra en la Figura 1.2 b.





**Figura 1.2 a Un sanitario tradicional para canalizar orina, en China.
(Esrey et al., 1998)**



**Figura 1.2 b Losa para acucillarse (con canal para orina) hecha de
porcelana. Esta losa se desarrolló en un proyecto financiado por Sanres en
China, en 1997. Ahora en una fábrica en las afueras de Pekín y se vende al
costo (el equivalente a diez dólares.) (Esrey et al., 1998)**





c) Ecuador

Desde 1985, en la provincia de Cotopaxi, en la región andina de Ecuador, se han construido sanitarios de doble cámara con tapas que hacen de calentadores solares. Se optó por un sistema de reciclaje en un intento de subsanar el problema crónico de pérdida de fertilidad del suelo en las regiones a gran altura, de 3,500 a 4,000 metros sobre el nivel del mar (ver Figura 1.3) (Esrey et al., 1998).



Figura 1.3 Sanitario con doble cámara y calentadores solares en el Ecuador (Esrey et al., 1998)

d) El Salvador

El objetivo de la comunidad de Tecpan en El Salvador fue probar y desarrollar un sistema sanitario basado en la deshidratación, con desviación de orina, con calentador solar para un sanitario con una sola cámara de tratamiento (ver Figura 1.4 a) (Esrey et al., 1998).

La orina se canaliza hacia un pozo de absorción ubicado cerca del sanitario (ya que en América Central no se utiliza la orina como fertilizante). El papel higiénico usado se deposita en una caja o una bolsa que se coloca cerca de la taza para quemarlo periódicamente, lo que es práctica común en El Salvador.





Cada una o dos semanas, se levanta la tapa del recipiente que hace de calentador solar y se empuja hacia atrás el cúmulo de heces, ceniza, cal y arena que se encuentra debajo de la taza del baño. Esta operación se hace con un azadón o un rastrillo. Cada dos o tres meses se retira el cúmulo de material seco desodorizado, se guarda en un costal y se almacena fuera del sanitario para su reciclaje en el patio (ver Figura 1.4 b) (Esrey et al., 1998)

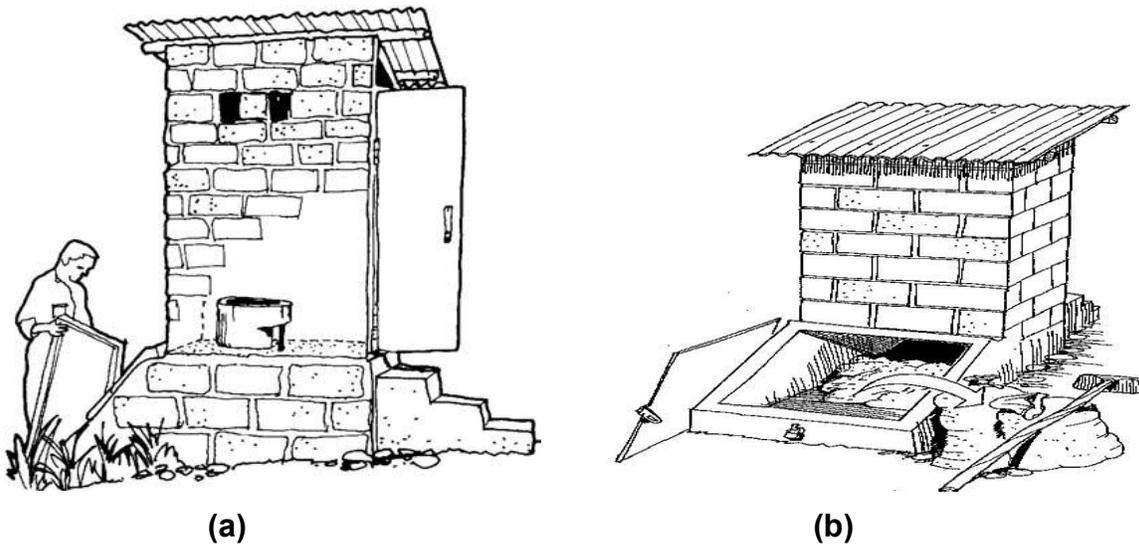


Figura 1.4 Los sanitarios secos en la comunidad de Tecpan, en las afueras de San Salvador. (a) Tienen un colector con calentador solar, lo que incrementa la evaporación en la cámara de tratamiento. (b) Se retira el cúmulo de material seco para su uso como acondicionador de suelos

e) México

Al igual que el diseño original de Vietnam, el sanitario *LASF (Letrina Abonera Seca Familiar)* y el sanitario ecológico seco cuentan con dos cámaras construidas sobre el nivel del piso, cada una de ellas con un volumen aproximado de 60 cm cúbicos. Desde un colector, la orina fluye por una manguera hacia un pozo de absorción debajo de la cámara de tratamiento. Después de utilizar el servicio, el usuario espolvorea sobre la excreta algún tipo de material secante como ceniza, tierra, o una mezcla de tierra, o aserrín, y cal (Esrey et al., 1998).





Figura 1.5 La versión mexicana del sanitario vietnamita de doble cámara del cuarto de baño en una casa moderna, donde habita una familia de altos ingresos, en la ciudad de Cuernavaca. Cuenta con una taza de sanitario (de pedestal) móvil con colector de orina. El acceso a las cámaras de tratamiento, debajo del piso del baño, está fuera de la casa.

(Esrey et al., 1998)

f) Suecia

A principios de la década de los 80's, el profesor Mats Wolgast del Karolinska Institutet, en Estocolmo, Suecia, desarrolló el sistema WM Ekologen, tipo ES. Al igual que el sistema vietnamita, se basa en un proceso de deshidratación, diseñado para desviar la orina.

Se utiliza un litro de agua para que la orina fluya hacia un tanque subterráneo. Las heces y el papel higiénico usado caen en un depósito plástico con una capacidad de ochenta litros. Una vez lleno el depósito (después de dos o tres meses) se deja a un lado y se coloca un depósito nuevo. El depósito lleno se deja en la cámara por un período de seis meses aproximadamente. Después de ese tiempo, el contenido puede procesarse, como tratamiento secundario, en un recipiente ventilado para composta (Esrey et al., 1998).



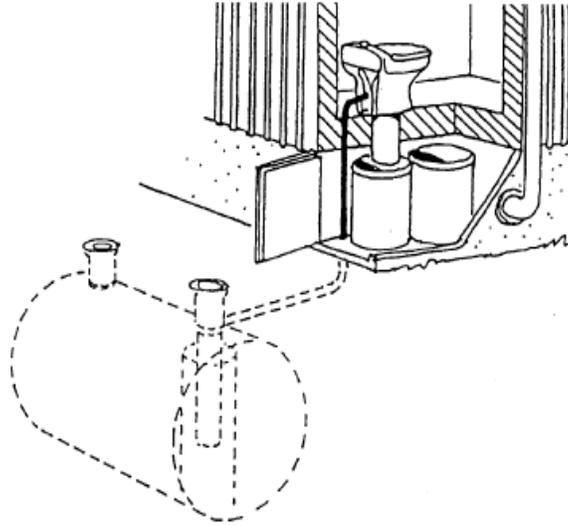


Figura 1.6 Un sanitario seco WM Ekologen, ES, instalado en el interior de una casa en Suecia. Las heces y el papel higiénico usado caen a un depósito grande. La orina se canaliza a un tanque de almacenamiento subterráneo. (Esrey et al., 1998)

g) Vietnam

El sanitario de doble cámara que se utiliza en Vietnam es un ejemplo clásico de un sistema sanitario ecológico con base en la deshidratación. Este sanitario es de uso cotidiano en el norte de Vietnam, y en los últimos años en América Central, México y Suecia. En la figura 1.7 se muestra el esquema de este tipo de sistemas.



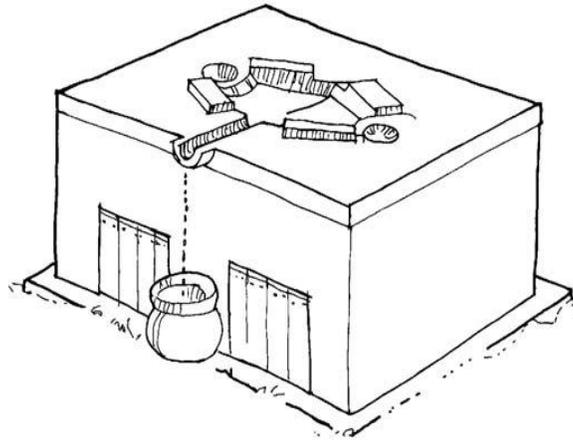


Figura 1.7 Las cámaras de tratamiento con una losa para acucillarse que desvía la orina y una olla para recogerla. También se observan las tapaderas de las aberturas que sirven para retirar el material deshidratado.

(Esrey et al., 1998)

Una losa para acucillarse cubre las dos cámaras de tratamiento, tiene dos orificios de entrada, descansos para los pies y un canal para la orina. Ambos orificios cuentan con una tapa ajustada. En la parte posterior hay dos aberturas de 30 x 30 cm para retirar el material deshidratado. Estas aberturas se mantienen selladas hasta el momento del vaciado de una de las cámaras.

La gente defeca en una de las cámaras, pero antes de utilizarla por primera vez, los miembros de la familia le cubren al piso con una capa de tierra fina con el fin de que absorba la humedad de las heces y evitar que se peguen al piso.

Después de defecar, se vierten dos jícaras de cenizas sobre las heces para que absorban la humedad, neutralicen los olores y no atraigan moscas.

El canal en la losa para acucillarse sirve para desviar la orina, que se almacena en un olla, detrás del sanitario (Esrey et al., 1998).

h) Yemen

En los barrios viejos de la ciudad de Sana'a, al igual que en otras poblaciones de Yemen, las casas tradicionales tienen de cinco a nueve pisos que





se elevan por encima de calles estrechas (ver Figura 1.8). Generalmente, en una casa habita una familia numerosa. El último piso cuenta con uno o dos cuartos de baño, muy cerca de un ducto vertical, largo y angosto. En la Figura 1.8 se puede ver el recorrido que hace el caño desde lo alto de la vivienda hasta el nivel de la calle.

Cada cuarto de baño cuenta con una losa para acucillarse, de ahí la orina corre por un canal hecho en el piso de piedra hasta llegar a un orificio abierto en la pared de la vivienda y cae por un drenaje vertical ubicado en la fachada externa del edificio.

La mayor parte de la orina se evapora en su caída por el drenaje, y el resto, si queda algo, cae en un pozo de absorción donde se seca.

Las heces caen hacia el “pozo” a través de un orificio en la losa para acucillarse, depositándose en una cámara al nivel de la calle, de donde se recolectan periódicamente ya deshidratadas. Posteriormente se ponen a desecar todavía más sobre el techo del sanitario público del barrio y, finalmente, se utilizan como combustible para calentar agua (Esrey et al., 1998).

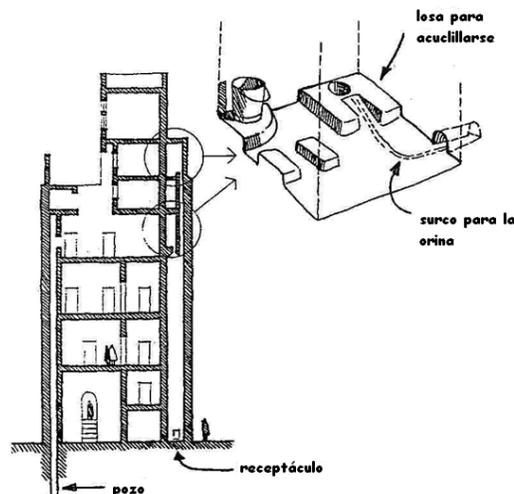


Figura 1.8 Sanitarios secos en una vivienda urbana de varios pisos, en la ciudad de Sana’a, Yemen. (Esrey et al., 1998)





i) Zimbabwe

Los sanitarios con desviador de orina que se utilizan en Zimbabwe son similares a los utilizados en otras partes del mundo y su manufactura puede ser casera o comercial. Se han ensayado lo mismo en casas habitación que en escuelas. La orina desviada se canaliza a un área de filtración o bien a un almacén para usarla posteriormente como fertilizante. Las heces se acumulan directamente en la cámara o bien se mantienen en cubetas o recipientes de plástico. Después de defecar se agrega ceniza y tierra, lo que ayuda a desecar las heces y cambiar el pH (alcalinidad). El producto semideshidratado puede introducirse de varias formas en la agricultura, puede agregarse a una composta, a surcos listos para la siembra o fosas para plantar árboles. Estos modelos evolucionan hacia sanitarios con cámaras más pequeñas ubicadas por encima del nivel del suelo y se les denomina *SkyLoo* (ver Figura 1.9). Para remover el contenido de las cámaras se utiliza generalmente una cubeta, un recipiente plástico o una bolsa plástica. Esto facilita el acceso y transferencia del contenido. Se sigue utilizando el tubo para ventilación con la malla en el extremo superior, que permite la circulación permanente de aire, removiendo olores y controlando la producción de moscas, además de reducir el contenido de humedad en la cámara contribuyendo a la descomposición de las heces (Esrey et al., 2001).

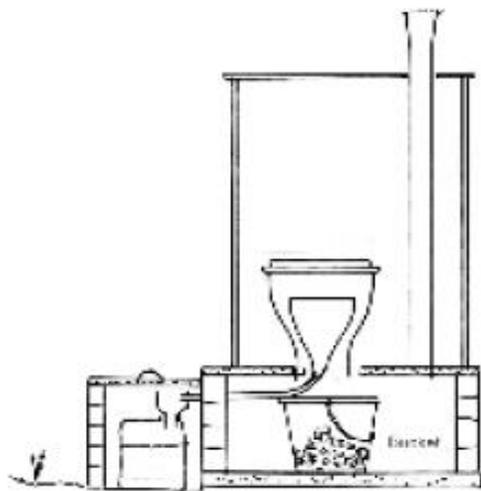


Figura 1.9 Sanitario con cámara más pequeña ubicada por encima del nivel del suelo denominado Skyloo en Zimbabwe (Esrey et al., 2001)





CAPÍTULO 2: TEORÍA DE SECADO

SECADO SOLAR

La característica esencial del proceso de secado es la eliminación de un líquido por conversión en vapor que se separa del sólido. En la práctica, la energía necesaria para evaporar el líquido es suministrada en forma de calor (Nonhebel, 1979).

El secado de diferentes materiales usando la radiación solar ha sido utilizado desde tiempos remotos en el mundo. Usualmente el material que se desea secar es puesto sobre el piso permitiendo que los rayos solares incidan sobre él y mezclando periódicamente para obtener uniformidad en el secado. Este procedimiento es simple y barato, sin embargo, tiene la limitante de un reducido grado de secado ya que la fuerza motriz del proceso es sólo la diferencia de presiones parciales de vapor a las temperaturas del material y del aire y en donde las condiciones climáticas son determinantes.

La manera de lograr que los materiales alcancen un mayor grado de sequedad es mediante el calentamiento de una corriente de aire (u otro gas) y haciéndola circular por el material.

El aire se puede calentar al fluir por superficies metálicas, las cuales son calentadas por fuego directo, vapor o radiación infrarroja (Almanza et al., 1994).

En el proceso de secado la transferencia de calor se lleva a cabo predominantemente por convección o por conducción, pues si bien es cierto que en todos los secadores se transfiere calor por radiación, es raro que sea éste el mecanismo que predomine.





2.1 Variables implícitas en el proceso de secado

Para explicar un poco más a fondo el proceso de secado se definirán los parámetros siguientes (Valiente, 2002):

2.1.1 Humedad en base seca (X)

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

$$X = \frac{1}{1-x} = \left[\frac{\text{kg H}_2\text{O}}{\text{kg heces secas}} \right] \quad (2.1)$$

2.1.2 Humedad en base húmeda (x)

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

$$x = \frac{X}{1+X} = \left[\frac{\text{kg H}_2\text{O}}{\text{kg heces húmedas}} \right] \quad (2.2)$$

2.1.3 Humedad de equilibrio (X*)

Es la mínima humedad que puede tener un sólido que está en contacto con el aire húmedo. Ésta se obtiene experimentalmente y se representa mediante gráficas experimentales llamadas curvas de equilibrio. Esta humedad no puede eliminarse mediante el aire entrante.

2.1.4 Humedad libre

Es la diferencia entre la humedad total del sólido y la humedad de equilibrio, es decir el valor de la humedad de equilibrio del sólido en contacto con el aire saturado.

$$X = X_T - X^* \quad (2.3)$$





2.1.5 Humedad crítica (X_c)

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

2.1.6 Temperatura de bulbo seco

La temperatura de bulbo seco corresponde a la temperatura ambiente, es decir, la temperatura del aire.

2.1.7 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). Esta temperatura se mide a partir de un termómetro de bulbo húmedo.

2.1.8 Humedad relativa

La humedad relativa se define como el cociente entre la presión parcial del vapor de agua en la mezcla a una temperatura dada, p_v , y la presión de saturación a la misma temperatura, p_{vs} .

$$\phi = \frac{p_v}{p_{vs}} \text{ (dec.)} = \frac{p_v}{p_{vs}} \cdot 100 \text{ (\%)} \quad (2.4)$$

2.1.9 Humedad absoluta

La humedad absoluta, denominada también humedad específica o relación de humedad, es la masa de vapor de agua por unidad de masa de aire seco y se puede expresar según la ecuación (2.5), o en función de las presiones, según la ecuación (2.6).

$$\omega = \frac{m_v}{m_{as}} \quad (2.5)$$

$$\omega = 0,62198 \frac{p_v}{p_T - p_v} \quad (2.6)$$





2.1.10 Velocidad de secado

La velocidad de secado se define como:

$$N_A = -\frac{dX}{d\theta} \left(\frac{S}{A} \right) \quad (2.7)$$

donde:

N_A : velocidad de secado [kg agua/m²/h]

S : es el peso del sólido [kg]

A : es el área de transferencia de masa [m²]

X : es la humedad de las heces $\left[\frac{\text{kg H}_2\text{O}}{\text{kg heces secas}} \right]$

θ : es el tiempo [hrs]

2.1.11 Temperatura del aire

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.

2.1.12 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.





2.1.13 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.

2.2 Mecanismos que intervienen en el proceso

2.2.1 Transferencia de calor

Hay tres formas diferentes en las que el calor puede pasar de la fuente al colector, aun cuando muchas de las aplicaciones en la ingeniería son combinación de dos o tres. Estas son, conducción, convección y radiación.

2.2.1.1 Conducción

La conducción es la transferencia de calor a través de un material fijo tal como la pared estacionaria mostrada en la Figura 2.1 La dirección del flujo de calor será a ángulos rectos de la pared, si las superficies de las paredes son isotérmicas y el cuerpo es homogéneo e isotrópico. (Kern, 1999)

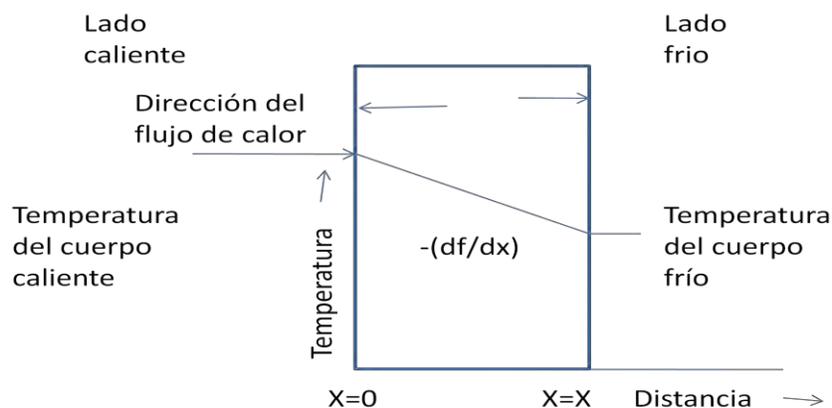


Figura 2.1 Transferencia de calor por medio de conducción en un material fijo





La conductividad térmica, que es la propiedad de un cuerpo para conducir el calor, se mide experimentalmente y está definida por la ecuación. 2.1.

$$dQ = kA \left(-\frac{dt}{dx} \right) = \left[\frac{BTU}{hr} \right] \quad (2.8)$$

donde:

dQ : es la cantidad de flujo de calor $\left[\frac{BTU}{hr} \right]$

t : es la temperatura en cualquier punto de la pared [$^{\circ}C$]

x : es el grueso de la pared en dirección del flujo de calor; por lo tanto el término $\left(-\frac{dt}{dx} \right)$ se llama gradiente de temperatura y tiene un signo negativo si se supone una temperatura mayor en la cara de la pared en donde $x = 0$ y menor en la cara donde $x = X$.

k : es la constante de proporcionalidad, peculiar a la conducción de calor por conductividad y se le conoce por conductividad térmica.

A : área [m^2] (Kern, 1999)

2.2.1.2 Convección

La convección es la transferencia de calor entre dos partes de un mismo fluido, una relativamente caliente y otra fría, las cuales interactúan por un efecto de mezclado.

Supóngase que un recipiente con un líquido se coloca sobre una llama caliente. El líquido que se encuentra en el fondo del recipiente se calienta y se vuelve menos denso que antes, debido a su expansión térmica. Este líquido adyacente al fondo del recipiente, transfiriendo así su calor promovido por un fenómeno de mezclado que se origina conforme asciende.

Así la transferencia de calor, del líquido caliente al resto del volumen, se da por convección natural o convección libre. Si se produce cualquier otro tipo de agitación, tal como la provocada por un agitador, el proceso se denomina entonces de convección forzada.





Este tipo de transferencia de calor puede ser descrito con la siguiente ecuación (Kern, 1999):

$$dQ = h A dt \quad (2.9)$$

donde:

h : constante de proporcionalidad, tiene influencia la naturaleza del fluido y la forma de agitación, y se llama coeficiente de transferencia de calor.

A : área [m²]

dt : gradiente de temperatura [°C]

dQ : cantidad de flujo de calor $\left[\frac{\text{BTU}}{\text{hr}} \right]$

2.2.1.3 Radiación

La radiación involucra la transferencia de energía radiante desde una fuente a un receptor. Cuando la radiación se emite desde una fuente a un receptor, parte de la energía se absorbe por el cuerpo y parte es reflejada por él (Kern, 1999).

2.2.2 Transferencia de masa

Las operaciones de transferencia de masa se caracterizan por transferir una sustancia a través de otras a escala molecular. Es muy importante este tipo de operaciones. Raro es el proceso químico que no requiere de la purificación inicial de las materias primas o de la separación final de los productos y subproductos.

El fenómeno que interesa realmente, es un resultado de la diferencia de concentraciones, o gradiente, en donde la sustancia que se difunde abandona el espacio donde está muy concentrada y pasa a un lugar de baja concentración (Treybal, 1968).





2.2.2.1 Clasificación de las operaciones de transferencia de masa

La clasificación de las operaciones de transferencia de masa son las siguientes:

a) Gas – gas: puesto que, con pocas excepciones, todos los gases son completamente solubles entre sí, esta categoría no se realiza prácticamente.

b) Gas – líquido: si todos los componentes del sistema se distribuyen entre las fases en el equilibrio, la operación se conoce como destilación fraccionada (o con frecuencia, simplemente destilación).

Si la fase líquida es un líquido puro que sólo contiene un componente, mientras que la gaseosa contiene dos o más, la operación se conoce como humidificación o deshumidificación, según el sentido de la transferencia.

c) Gas – sólido: si se va a evaporar parcialmente una solución sólida sin la aparición de una fase líquida, la nueva fase vapor formada y el sólido residual contienen todos los componentes originales, pero en proporciones diferentes, la operación se llama entonces sublimación fraccionada.

Sin embargo, puede suceder que no todos los componentes estén presentes en las dos fases. Si un sólido humedecido con un líquido volátil se expone a un gas relativamente seco, el líquido abandona el sólido y se difunde en el gas, operación que algunas veces se conoce como *secado* y otras como *desorción*.

f) Líquido – líquido: las separaciones en que interviene el contacto entre dos fases líquidas insolubles se conocen como operaciones de extracción líquida.

g) Líquido – sólido: cuando todos los componentes están presentes en las dos fases en el equilibrio, la operación se llama cristalización fraccionada.

h) Sólido – sólido: Debido a las extraordinariamente lentas velocidades de difusión entre fases sólidas, no existen operaciones industriales de separación dentro de esta categoría (Treybal, 1968).





Por otra parte existen los siguientes procesos de transferencia de masa:

i) 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. (Valencia, 2008)

j) 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 absorción de la misma del ambiente. (Valencia, 2008)

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

k) 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. (Valencia, 2008)

l) Humedad por adsorción

Esta humedad se retiene sólidamente sobre la superficie y en los poros del material, y requiere par su eliminación un gas con una energía considerablemente mayor que la utilizada para eliminar la humedad de hinchamiento (Valencia, 2008)

2.2.2.2 Curvas de secado

Cuando un sólido se deseca experimentalmente, casi siempre se obtienen datos que asocian el contenido de humedad con el tiempo. A continuación, estos datos se representan gráficamente como el contenido de humedad (base seca X) en función del tiempo θ , como se ilustra en la Figura 2.2



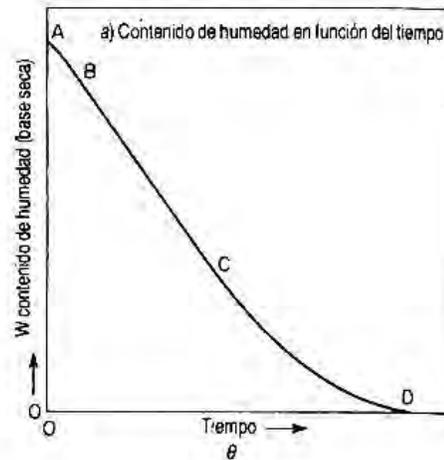


Figura 2.2 Contenido de humedad en función del tiempo

Esta curva representa el caso general en que los sólidos mojados pierden humedad, primero por evaporación desde una superficie saturada del sólido, a lo cual sigue un periodo de evaporación de la superficie saturada que tiene un área gradualmente decreciente y, por último, cuando el agua se evapora en el interior del sólido. Esta misma Figura 2.2 indica que la velocidad de desecación está sujeta a variación en función del tiempo o el contenido de humedad. Esta variación se ilustra con mayor claridad diferenciando gráfica o numéricamente la curva y haciendo una representación gráfica de $dW/d\theta$ en función de W , como se muestra en la Figura 2.3, o como $dW/d\theta$ en función de θ , como se señala en la Figura 2.4.



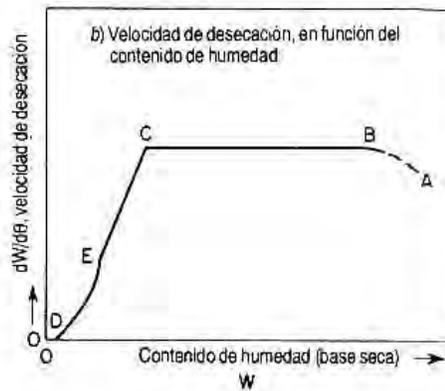


Figura 2.3 Velocidad de desecación en función del contenido de humedad

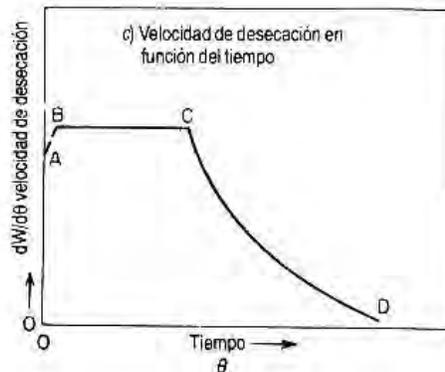


Figura 2.4 Velocidad de desecación en función del tiempo

Estas **curvas de velocidad** demuestran que el desecado no es un proceso suave y continuo en el cual un solo mecanismo ejerce el control a lo largo de toda su duración. En la Figura 2.4 se indica con claridad lo que dura cada periodo de desecación.

La sección **AB** de cada curva representa un periodo de **calentamiento** de los sólidos. La sección **BC** de cada curva representa el periodo de **velocidad constante**. El punto **C**, en donde concluye la velocidad constante y comienza a





descender el índice de desecación, se conoce como **contenido crítico de humedad**. La porción curvada **CD** de la Figura 2.2 se denomina periodo de **velocidad decreciente** y, como se señala en las Figuras 2.3 y 2.4, se caracteriza por una velocidad constante variable a lo largo del resto del ciclo de desecación. El punto **E** de la Figura 2.3 representa el punto en que toda la superficie expuesta se insatura completamente y marca el principio de la porción del ciclo de desecado durante el cual la velocidad del movimiento de la humedad interna controla la velocidad de desecación. La porción **CE** de la Figura 2.3 se define usualmente como el primer periodo de desecación con velocidad decreciente, y la porción el segundo periodo de velocidad decreciente (Perry, 1986).

2.2.2.3 Periodos de secado

a) Periodo de secado a velocidad constante

Durante este período el sólido está bañado por una capa de agua. El mecanismo de secado es en este caso equivalente a la evaporación de agua desde una superficie plana. El secado por lo tanto, dependerá solamente de la velocidad de evaporación del líquido o de la intensidad de paso del calor a través de la capa de límite del aire. (Valiente, 2002)

Si la temperatura y la humedad del aire permanecen iguales y si el área de transferencia de masa es constante, el calor que da el gas se iguala al calor latente del agua evaporada y entonces se alcanza el equilibrio. En la Figura 2.2, 2.3 y 2.4 el segmento **BC** corresponde a este periodo.

b) Periodo de secado decreciente

Da inicio cuando se alcanza la humedad crítica, entonces la superficie del sólido se insatura y la velocidad de secado está controlada por el movimiento del agua en el interior del sólido. Este periodo corresponde al segmento CD de las Figuras 2.2, 2.3 y 2.4.





Otra característica de este periodo es que la velocidad de desecación no es constante y depende del mecanismo con el cual se está llevando a cabo el secado, dos son los más comunes:

- *Capilaridad*
- *Difusión.*

Capilaridad. La teoría de capilaridad supone que hay un lecho o cama de partículas entre las cuales hay poros, los poros están a su vez conectados por pasajes o intersticios de varios tamaños y longitudes, a través de los cuales se mueve el agua, como se muestra en la Figura 2.5. (Valiente, 2002)

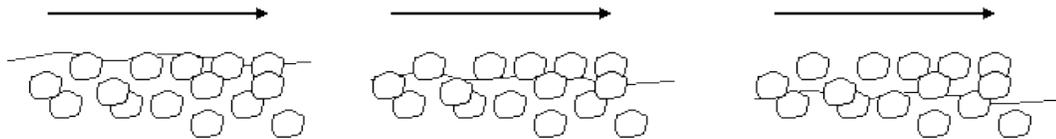


Figura 2.5 Esquema de la porosidad y espacios libres de un material por los cuales se mueve el agua por capilaridad

Las curvas típicas de secado por capilaridad tiene la siguiente forma:

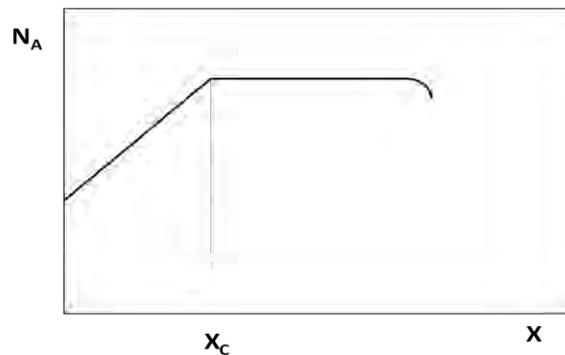


Figura 2.6 Curva típica de secado por capilaridad





En el período decreciente si está regido por la capilaridad se puede representar por una línea recta.

En secado por capilaridad la ecuación de secado puede expresarse por:

$$\left(\frac{dX}{d\theta}\right)_d = -K_1(X - X^*) \quad (2.10)$$

$$K_1 = -\frac{\left(\frac{dX}{d\theta}\right)_c}{X_c - X^*} \quad (2.11)$$

donde:

$\left(\frac{dX}{d\theta}\right)_d$: es la velocidad de secado en el periodo decreciente

$\left(\frac{dX}{d\theta}\right)_c$: es la velocidad de secado constante

X_c : es la humedad crítica

X^* : es la humedad de equilibrio

X : es la humedad del sólido al tiempo θ

K_1 : es función del periodo de secado constante

En el periodo constante:

$$N_A = \frac{S}{A} \left(-\frac{dx}{d\theta}\right)_c = -\frac{h_c}{\lambda} (T - T_i) \quad (2.12)$$

$$\frac{S}{A} = \rho_s d \quad (2.13)$$

donde:

N_A : es la velocidad de secado [kg agua/m²/h]

S : es peso del sólido [kg]

A : es el área de transferencia de masa [m²]

h_c : es el coeficiente de transferencia de calor





- T_i : es la temperatura de la interface [°C]
- ρ_s : es la densidad aparente del sólido [plg]
- d : es la profundidad del lecho [cm]

Si se reemplaza 2.11, 2.12 en 2.10:

$$\left(\frac{dx}{d\theta}\right)_d = \frac{-h_c(T-T_i)(X-X^*)}{\rho_s d(X_c-X^*)} \tag{2.14}$$

Integrando

$$\theta_d = \frac{\lambda \rho_s d(X_c-X^*)}{h_c(T-T_i)} \ln \frac{X_c-X^*}{X_f-X^*} \tag{2.15}$$

Difusión. Por otra parte, los sólidos amorfos, fibrosos o gelatinosos que mantienen su humedad atrapada como parte integral de su estructura, presentan una curva del periodo decreciente de secado del tipo como el que se muestra en la Figura 2.7. Se dice que en este caso el mecanismo controlante es la difusión.

Ejemplos de sólidos en los que se presenta el secado por difusión son: el huevo, los detergentes, las gomas, el café, los cereales, el almidón, el extracto de soya, la sangre, etc. En todos estos sólidos la humedad se mueve hacia la superficie por difusión molecular. En la Figura 2.8 se representa en forma de esquema este tipo de mecanismo. (Valiente, 2002)

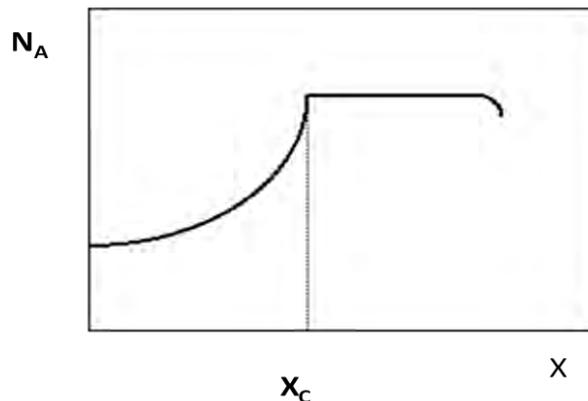


Figura 2.7 Curva representativa de secado por difusión del periodo decreciente



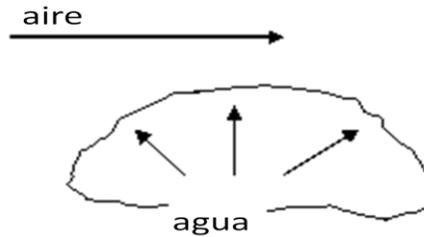


Figura 2.8 Esquema del movimiento del agua en el secado por difusión

En estos sólidos la humedad se mueve hacia la superficie por difusión molecular obedeciendo la primera y segunda ley de Fick.

Si se considera que la difusividad es constante, que la humedad está distribuida uniformemente y que los periodos de secado son largos se tiene la siguiente ecuación:

$$\theta = \frac{4d^2}{D_{SL}\pi^2} \ln \frac{X_c - X^*}{X_f - X^*} \quad (2.16)$$

donde:

d : es el espesor del sólido [cm]

X_c : es la humedad crítica

X^* : es la humedad de equilibrio

X_f : es la humedad de las heces al tiempo θ

D_{SL} : difusividad del líquido en el sólido $\left[\frac{m^2}{h} \right]$

2.3 Clasificación de secadores

Los secadores se pueden clasificar de acuerdo con el método que utiliza para la transmisión de calor a los sólidos húmedos o bien por las características de manejo y las propiedades físicas del material a secar. En el primer caso la clasificación revela las diferencias en el diseño y el funcionamiento del secador, mientras que el segundo, es más útil para seleccionar entre un grupo de secadores que se someten a una consideración preliminar en relación con un problema de desecación específico.





2.3.1 Secadores directos

Las características generales de operación de los secadores directos son en general que el secado depende de la transferencia de calor de un gas caliente al sólido húmedo, eliminándose el vapor producido por medio del mismo gas caliente (Perry, 1986). Entre los principales secadores directos están los de charolas, que son intermitente y los de atomización o espray, los rotatorios y los de túnel. (Valiente, 2002).

2.3.2 Secadores indirectos

En los secadores indirectos, el calor es transferido al material húmedo por conducción a través de una pared sólida, usualmente metálica (Perry, 1984). Entre los indirectos más importantes están los cilindros y tambor, los liofilizadores y los de charolas al vacío (Valiente, 2002).

2.4 Secado Solar

2.4.1 La radiación solar extraterrestre y la constante solar

La irradiación solar total que incide sobre una superficie normal a los rayos solares situada en el exterior de la atmósfera, I_s , varía entre 1322 y 1412 W/m² como consecuencia de la diferente distancia del Sol a la Tierra en los distintos días del año. De esta forma, se define la *constante solar*, I_{CS} , como el valor medio de la radiación solar extraterrestre, siendo su valor más aceptado de 1367 W/m², obtenido por el World Radiation Center.

En función de la constante solar, la radiación solar extraterrestre normal a la radiación, a lo largo del año, viene dada por la ecuación 2.3 siendo n el número de día del año (1 para el 1 de enero y 365 para el 31 de diciembre).

$$I_s = I_{CS} \cdot \left[1 + 0,033 \cdot \left(\frac{360 \cdot n}{365} \right) \right] \quad (2.17)$$





donde:

I_s : radiación solar extraterrestre $\left[\frac{W}{m^2}\right]$

I_{cs} : constante solar, es decir el valor medio de la radiación solar extraterrestre $1367 \left[\frac{W}{m^2}\right]$ (Montero, 2005)

2.4.2 Clasificación de secadores solares

Los secadores solares se clasifican primordialmente de acuerdo a la forma de calentar y su forma de utilizar la energía solar.

En ambos casos, se pueden clasificar en los siguientes dos grupos:

- Sistemas solares activos o de convección forzada
- Sistemas solares pasivos o de convección natural

Además de esta clasificación, se pueden identificar tres subclases de sistemas solares atendiendo a la forma de utilización de la energía solar y la manera de calentar.

- Secadores solares de tipo integral o directo
- Secadores solares de tipo distribuido o indirecto
- Secadores solares de tipo mixto

2.4.2.1 Secadores solares activos

Los sistemas solares activos dependen sólo parcialmente de la energía solar, debido a que emplean energía solar y combustibles fósiles para calentar y ventiladores para la circulación del aire. Todos los secadores solares activos, debido a su funcionamiento, son secadores de convección forzada.

Si la temperatura ambiente es la adecuada, el aire calentado naturalmente por la energía solar, se puede utilizar directamente para el proceso de secado, de otra manera, se utilizan los combustibles fósiles para aumentar la temperatura al





nivel requerido, por ejemplo durante operaciones de secado nocturnas o periodos con bajos niveles de insolación. Estos sistemas solares activos que incorporan combustibles como fuentes auxiliares de energía, son conocidos comúnmente como secadores solares híbridos (Ekechukwu et al., 1999).

a) Secadores solares activos de tipo integral

En estos diseños de secadores solares la unidad colectora de energía solar es la misma cámara de secado, por lo tanto no se necesitan conductos especiales para canalizar el aire de secado (Ekechukwu et al., 1999).

b) Secadores solares activos de tipo distribuido

En los secadores solares activos de tipo distribuido el colector solar y la cámara de secado son unidades separadas. Los cuatro componentes básicos del sistema distribuido son: la cámara de secado, el calentador de aire, el ventilador y el conducto de unión entre el calentador y la cámara (Ekechukwu et al., 1999).

Para los sistemas convencionales de secado la eficiencia de secado aumenta con la temperatura, siendo la temperatura de trabajo tan alta como el producto pueda soportar. Por el contrario, en los secadores solares tipo distribuido, la máxima temperatura posible puede no proporcionar el diseño más óptimo, ya que la eficiencia del colector solar disminuye con el aumento de la temperatura de salida.

c) Secadores solares activos de tipo mixto

Estos diseños son muy poco comunes. Estos tipos de secadores solares activos de tipo mixto combinan características del tipo integral y del tipo distribuido. Los diseños típicos comprenden los siguientes elementos: un colector de energía solar para calentar el aire, una cámara de secado y un ventilador como en un secador tipo distribuido. Sin embargo, la cámara de secado es de algún material translúcido que permite que el producto absorba directamente la radiación, al igual que en los sistemas directos (Ekechukwu et al., 1999).





2.4.2.2 Secadores solares pasivos

Los sistemas solares de circulación natural, llamados pasivos para distinguirlos de los sistemas que utilizan ventiladores para forzar el flujo de aire, dependen totalmente de la energía solar (Ekechukwu et al., 1999).

Los sistemas solares pasivos parecen ser la opción más atractiva para su uso en lugares rurales.

a) Secadores solares pasivos de tipo integral

En este tipo de secadores, el producto se coloca en una cámara de secado con paredes transparentes que permiten la insolación necesaria para el proceso de secado. Por lo tanto la radiación solar incide directamente en el producto. Con esto se extrae la humedad de los productos y paralelamente, disminuye la relación de humedad en el aire residente. Además, expande el aire en la cámara, generando la circulación y la subsiguiente eliminación de la humedad (Ekechukwu et al., 1999).

b) Secadores solares pasivos de tipo distribuido

Estos también se denominan secadores solares pasivos indirectos. En ellos el producto se encuentra en bandejas dentro de una cámara de secado opaca y es calentado por el aire circulante, que proviene de un colector solar. Un secador de este tipo se compone de las siguientes unidades básicas: colector solar de precalentamiento de aire, cámara de secado, conductos de unión convenientemente aislados y chimenea para favorecer el flujo de aire (Ekechukwu et al., 1999).

c) Secadores solares pasivos de tipo mixto

Este sistema combina las características de los secadores solares pasivos de tipo integral y de tipo distribuido. Aquí la acción combinada de la radiación solar incide directamente en el producto a secar y precalienta el aire en un colector y proporciona el calor necesario para el proceso de secado.

Así, poseen, las mismas características estructurales que los secadores pasivos del tipo distribuido, pero con la diferencia de que las paredes de la cámara





de secado son de material transparente para que la radiación solar incida directamente en el producto como en los secadores solares pasivos de tipo integral (Ekechukwu et al., 1999).

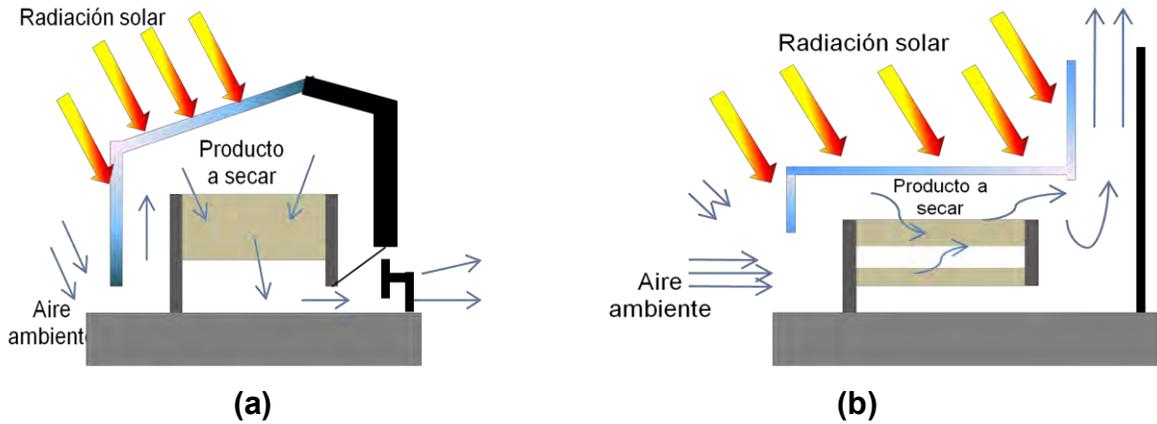


Figura 2.9 Secadores de tipo integral. (a) Secador activo directo. (b) Secador pasivo directo

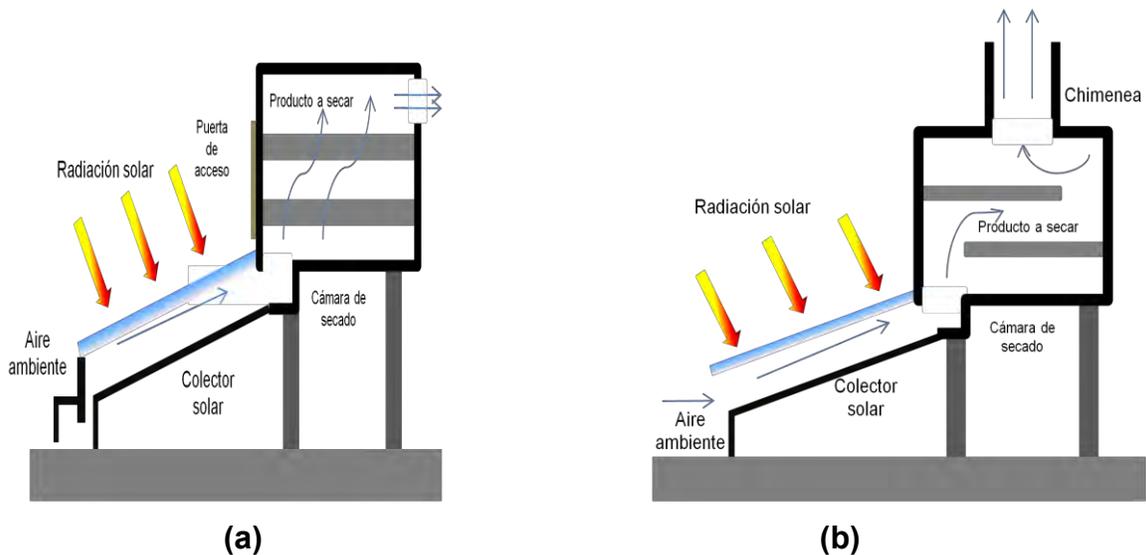


Figura 2.10 Secadores de tipo distribuido. (a) Secador activo indirecto. (b) Secador pasivo directo



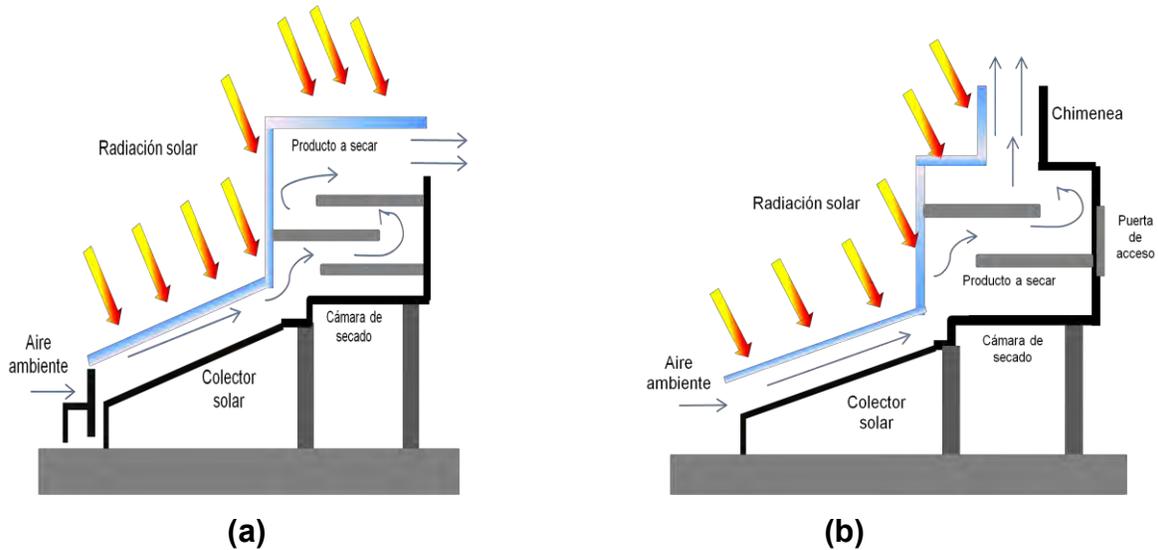


Figura 2.11 Secadores de tipo mixto. (a) Secador activo mixto. (b) Secador pasivo mixto

2.5 Captador de placa plana con cubierta y paso de aire superior

Estos colectores habitualmente se usan para conseguir temperaturas entre 10 y 35 °C sobre el ambiente. Los tipos más habituales son: de paso superior, de paso inferior, de cubierta suspendida y de cubierta perforada.

Es el diseño más sencillo dentro de los captadores con cubierta. El aire a calentar pasa a través del espacio limitado entre la cubierta y la superficie absorbidora. De esta forma, la transferencia de energía hacia el aire se produce en la superficie superior de la placa absorbidora. (Montero, 2005)

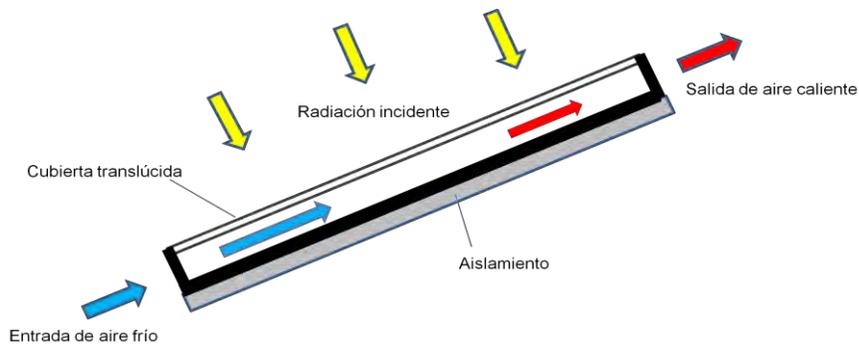


Figura 2.12 Esquema de un colector solar de aire de placa con cubierta





2.6 Descripción general del prototipo de secador solar

2.6.1 Colector solar de aire

El colector solar, de dimensiones 25 x 44 x 15 cm, es del tipo sencillo con paso de aire superior. Está formado por una lámina galvanizada de 2 mm de espesor y aislamiento de unicel de 20 mm de espesor. De esta forma, el área útil del colector es 0.11 m² y la superficie de paso de fluido de 0.0375 m².



Figura 2.13 Esquema del flujo de aire en el colector solar

2.6.2 Inclinación del colector

La inclinación de un colector es un aspecto importante a considerar. El ángulo óptimo del colector (β) respecto a la horizontal para una latitud (l) dada, para cada día del año, sería igual al indicado en la ecuación (2.5), donde δ es la declinación.

$$\beta = l - \delta \quad (2.18)$$

Resulta conveniente proporcionar la inclinación y orientación adecuada al sistema de captación de forma que se maximice durante el mayor tiempo posible la ganancia solar.

Así, para optimizar la captación de radiación se recomienda una orientación del sistema hacia el sur geográfico del lugar y una inclinación, de forma aproximada, igual a la altitud del lugar más diez grados en invierno e igual a la latitud menos diez grados en verano.





2.6.3 Cámara de secado de productos

La cámara de secado tiene unas dimensiones de 25 x 53 x 15cm. En ella se localizaron dos rieles de lámina para colocar la charola en la que se colocaran las heces y separarla de la superficie inferior. Las dimensiones de dicha charola son 23 x 48 x 2 cm. Acoplada a la cámara directamente se encuentra la parte de la descarga de dimensiones 25 x 25 x 15 cm y con un ventilador para la extracción del aire de secado.

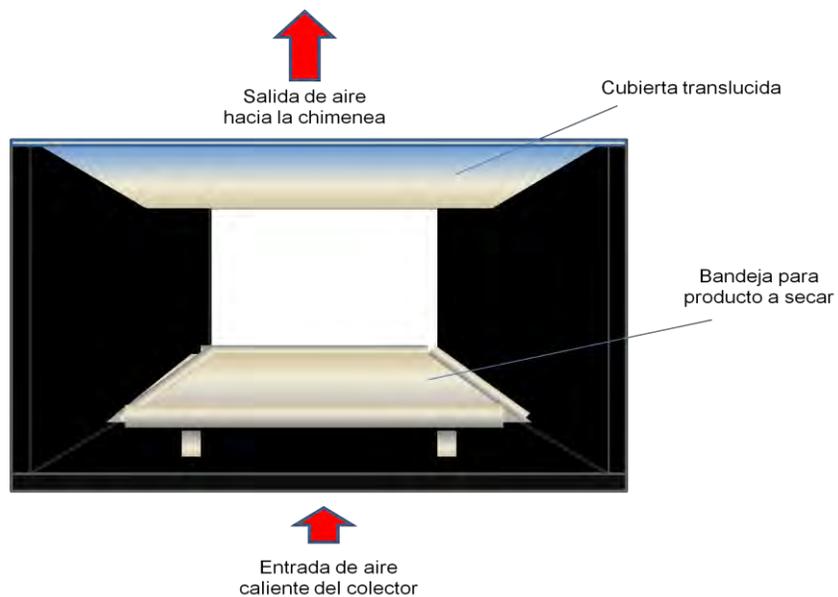


Figura 2.14 Esquema de la cámara de secado del modelo de secador solar





Capítulo 3: METODOLOGÍA

En este capítulo se describen las características del residuo de estudio, técnicas analíticas utilizadas, procedimientos que se siguieron y experimentación realizada.

3.1 Materiales

Durante la recolección de las heces y las pruebas de secado se tuvieron los cuidados necesarios para homogeneizar el residuo y evitar la contaminación y exposición por la manipulación. Durante el proceso se utilizaron guantes y cubrebocas.

Todo el material utilizado para la manipulación de las muestras fue lavado con *extran* y enjuagado con agua destilada. El procesamiento de las heces para la caracterización se llevó a cabo en los espacios recomendados para el manejo y con los cuidados requeridos por las características de ese tipo de materiales.

3.2 Caracterización fisicoquímica de heces en muestras controladas

Las muestras utilizadas en las pruebas de secado fueron colectadas durante dos semanas y corresponden a las heces de 3 personas adultas de ambos sexos, con edades entre 24 y 50 años, las cuales fueron consideradas como controladas.

Para la caracterización de las heces, de acuerdo con la información recopilada de trabajos realizados del tema, se definieron como parámetros importantes el contenido de materia orgánica, DBO, DQO, nitrógeno total, fósforo, sólidos en sus diferentes formas y metales tales como Na, Ca, Mg, y K.

Con la finalidad de conocer las propiedades fisicoquímicas, sus posibles aplicaciones y como control de las pruebas de secado, se analizaron los parámetros enlistados en la Tabla 3.1 indicando los métodos de análisis y/o el equipo de medición utilizado.





La mayoría de los parámetros fisicoquímicos fueron obtenidos de acuerdo a los procedimientos descritos en los Métodos Normalizados para el Análisis de Aguas y Aguas Residuales (APHA-AWWA-WPCF, 1992) con las respectivas adecuaciones y suponiendo que se tratan de muestras sólidas.

TABLA 3.1 Métodos de análisis y/o equipo de medición utilizado

	Parámetro	Símbolo	Método o instrumento utilizado
a	Humedad de heces secadas por radiación solar (%)	-	Gravimétrico
b	Sólidos totales	ST	*Método 2540G (APHA, 1992) siguiendo los lineamientos para muestras sólidas
c	Sólidos volátiles	SV	
d	Sólidos fijos	SF	
e	Demanda Química de Oxígeno	DQO	**Colorimétrico análogo al de la EPA 410.4
f	Demanda Bioquímica de Oxígeno	DBO	***Método respirométrico (manométrico por sensor de presión) (Sistema OxiTop WTW)
g	Carbono total	CT	Método por pirolisis y oxidación en un analizador de carbono HT 1300
h	Nitrógeno total	N-TOTAL	*Método-Kjeldahl, 4500-N _{org} B y 4500-NH ₃ E (APHA, 1992)
i	Ortofosfatos	PO₄³⁻	*Métodos digestión ácida de materia orgánica 3030 F (APHA, 1992) y **método colorimétrico análogo al de la EPA 410.4
j	Potasio	K⁺	*Método de digestión ácida de materia orgánica 3030 F y Espectrometría de Absorción Atómica de Llama 3111 (APHA, 1992)
k	Calcio	Ca²⁺	
l	Magnesio	Mg²⁺	
m	Sodio	Na⁺	
n	Capacidad o poder calorífico	-	Bomba calorimétrica de oxígeno PARR 1108

* APHA-AWWA-WPCF Métodos Normalizados para el análisis de aguas potables y residuales Edición 1992.

** Las mediciones colorimétricas se realizaron en un fotómetro Spectroquant Nova 60, utilizando los reactivos respectivos de la marca Merck





3.2.1 Humedad de las heces

Se hizo por gravimetría y una temperatura controlada de 103-105° con ayuda de una estufa durante un periodo de 24 horas. La estufa se colocó en la campana de extracción para evitar la inhalación de olores indeseables y con riesgo de efectos a la salud.

La determinación de la humedad por medio de la radiación solar se determinó por medio del dispositivo de secado, donde se colocaron varias muestras de heces para medir diariamente el peso, de tal forma que una vez que el peso fuera constante poder determinar la capacidad de secado de las heces únicamente expuestas a la radiación solar. En esta etapa se consideraron los parámetros ambientales tales como la intensidad de luz, la humedad relativa del aire y la temperatura del ambiente. La intensidad de luz se midió con el luxómetro LUX/FCMOD 840020SPER SCIENTIFIC LTD; la humedad relativa y la temperatura se leyó con un termo-higrómetro, modelo CA846 de la marca AEMC INSTRUMENTS. Cabe mencionar que la temperatura medida es puntual, es decir, es la temperatura a la hora de la lectura. En lo que respecta a las temperaturas máximas y mínimas, éstas se determinaron con un termómetro con esas características y con la información recopilada del Centro de Ciencias de la Atmósfera consultada en la página <http://pembu.unam.mx>. La radiación solar se obtuvo con la ayuda de la Estación Meteorológica Planta Solar localizada en las cercanías del jardín botánico, del laboratorio de Energías Renovables y Diseño Bioclimático de la UNAM.

3.2.2 Sólidos (ST, SV y SF)

Los sólidos en sus diferentes formas fueron cuantificados de acuerdo con el método 2540 G (APHA-AWWA-WPCF, 1992) siguiendo los lineamientos para muestras sólidas.





3.2.3 Sólidos totales (ST)

Para determinar este parámetro se siguió el método de sólidos totales, fijos y volátiles en muestras sólidas y semisólidas (APHA-AWWA-WPCF 2540G, 1992) siguiendo los lineamientos para muestras sólidas.

3.2.4 Sólidos volátiles (SV)

De la misma manera que para los sólidos totales, para determinar este parámetro se siguieron los lineamientos para muestras sólidas de APHA-AWWA-WPCF 2540G, 1992.

3.2.5 Sólidos fijos (SF)

De igual forma que para los sólidos volátiles, para determinar este parámetro se siguieron los lineamientos para muestras sólidas de APHA-AWWA-WPCF 2540G, 1992.

3.2.6 Demanda química de oxígeno (DQO)

La demanda química de oxígeno (DQO) fue determinada con el método colorímetro análogo al de la EPA 410.4 con reactivos de la marca Merck y utilizando un espectrofotómetro Nova 60 (Merck). Las muestras secas fueron homogeneizadas y pesadas, y transferidas directamente a los tubos de reacción de DQO. Posteriormente fueron sometidas a un proceso de digestión en un termoreactor Spectroquant TR 420, marca Merck, a 148°C durante 120 minutos. Los reactivos utilizados corresponden a un ámbito de lectura de 25 a 1500 mg/L de DQO.

3.2.7 Demanda bioquímica de oxígeno (DBO₅)

La DBO se determinó por el método de respirometría OXITOP de la marca WTW. Las botellas de este método se mantuvieron durante 5 días a 20°C en una incubadora de la marca WTW.





3.2.8 Carbono total (CT)

Para la determinación del carbono orgánico total se siguió el método de pirolisis y oxidación a alta temperatura de un analizador de carbono modelo HT1300. La muestra es incinerada completamente en el tubo reactor formando CO_2 para la medición, el cual es fraccionado fuera del tubo reactor a través de un analizador conectado por una bomba de integración. Después de la medición los gases pasan a través de una trampa para polvos y filtro de partículas donde el polvo, cenizas y partículas de muestra son removidas.

El módulo de sólidos HT 1300 puede ser usado pesando menos de 3000 mg dependiendo de su concentración, características de combustión, la agresividad de sus sustancias, componentes y el tamaño de un bote de combustión.

3.2.9 Nitrógeno total Kjeldahl (NTK)

La concentración de nitrógeno total en las muestras de heces fecales se cuantificó por el método de digestión-destilación Kjeldahl utilizando unidad de digestión Modelo K-424 y una de destilación Modelo K-350 ambas de la marca BÜCHI.

3.2.10 Fósforo

Para determinar este parámetro se siguió el método de digestión ácida de materia orgánica 3030F (APHA-AWWA-WPCF, 1992) y el método colorimétrico análogo al de la EPA 410.4.

3.2.11 Metales

De la misma manera que para el fósforo, se siguió el método de digestión por ácido nítrico-ácido clorhídrico para materia orgánica 3030F (APHA-AWWA-WPCF, 1992) para los metales calcio, magnesio, potasio y sodio considerando a las heces como muestras sólidas debido a que no hay ningún método específico para ellas. Posteriormente se determinaron los metales por medio de





espectrofotometría de absorción atómica, por el método de flama aire-acetileno, en un equipo marca Perkin Elmer, modelo 1100B.

3.2.12 Capacidad o poder calorífico

Este parámetro fue determinado por medio de una bomba calorimétrica de oxígeno, marca PARR 1108.

En esta bomba se coloca una muestra de sustancia a estudiar (1 a 2 g) con oxígeno a una presión de aproximadamente 40 atm. La bomba (A) a su vez es sumergida en 2 litros de agua (B) contenidos en una vasija metálica (C). El montaje del calorímetro se completa con un termómetro (D) que mide la temperatura del baño de agua, este termómetro cuenta con una lupa que permite la lectura del incremento de la temperatura en el sistema, un sistema que lo aísla de los alrededores y que está constituido por dos espacios llenos de aire (G) y una camisa externa no conductora (H).

<http://web.mst.edu/~gbert/cal/bomb/SPdisc.htm>

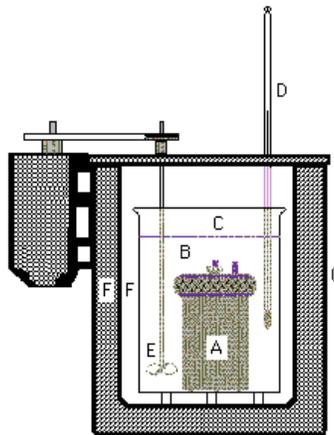


Figura 3.1 Esquema de la bomba calorimétrica de oxígeno Parr 1108





3.3 Secadores experimentales

3.3.1 Dispositivo de secado directo al sol

Para experimentar el proceso de secado de las heces fecales por exposición directa a la radiación solar, se construyó primero un dispositivo para el secado al aire libre, con el fin de obtener datos preliminares de secado con muestras controladas así como el contenido de humedad.

El dispositivo se fabricó con malla metálica, alambre galvanizado, círculo de madera y charolas de plástico.

El dispositivo de secado se colocó en la azotea del edificio 5 del Instituto de Ingeniería con el siguiente propósito:

Para que la muestra a secar recibiera la mayor cantidad de radiación solar, y así acelerar el proceso de secado, se colocó la malla metálica para evitar el contacto y la proliferación de insectos (moscas). Igualmente se le colocó un plástico translucido para permitir el paso de la radiación solar, y en dado caso de lluvia evitar que la muestra se mojara. En la Figura 3.2 a y b se muestran fotografías del dispositivo terminado, así como la forma en que este fue colocado durante las pruebas experimentales.



(a)



(b)

Figura 3.2 (a) y (b) Montaje del dispositivo de secado en la azotea del edificio 5 del Instituto de Ingeniería





Las pruebas en este dispositivo consistieron en recolectar varias muestras de heces de una familia de tres individuos de edades de entre 24 y 50 años para colocarlas adentro del dispositivo y pesar periódicamente la muestra para determinar la humedad. Por medio de la diferencia de pesos se determinó la máxima pérdida posible exponiendo las heces a radiación solar directa.

Al final se recolecto alrededor de medio kilo base seca, para su posterior caracterización fisicoquímica en el laboratorio.

3.3.2 Construcción del prototipo de secador solar

Para la construcción del prototipo de secado solar se consultó la teoría de secadores solares. El prototipo se puede clasificar como un secador mixto, ya que puede trabajar de forma activa o pasiva, es decir con el funcionamiento del ventilador o sin él.

En la Figura 3.3 se muestra la configuración y en la Figura 3.4 las dimensiones del prototipo.

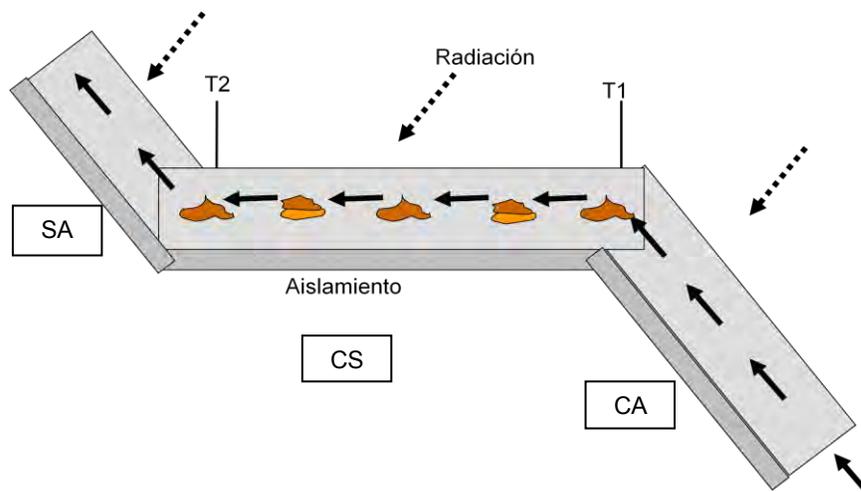


Figura 3.3 Configuración del prototipo de secador solar con sus tres partes principales, el colector de aire frío con cubierta de vidrio (CA), la cámara de secado con cubierta de vidrio (CS) y la salida (SA).





Cuenta con tres áreas principales, el colector de aire frío (CA), la cámara de secado (CS) y la salida de aire caliente con sistema opcional de extracción (SA).

Con esta configuración el aire, por efecto de densidad, fluye en forma ascendente y entra en contacto con la muestra a secar, provocando un movimiento de la humedad y del vapor de agua que se está eliminando de la muestra.

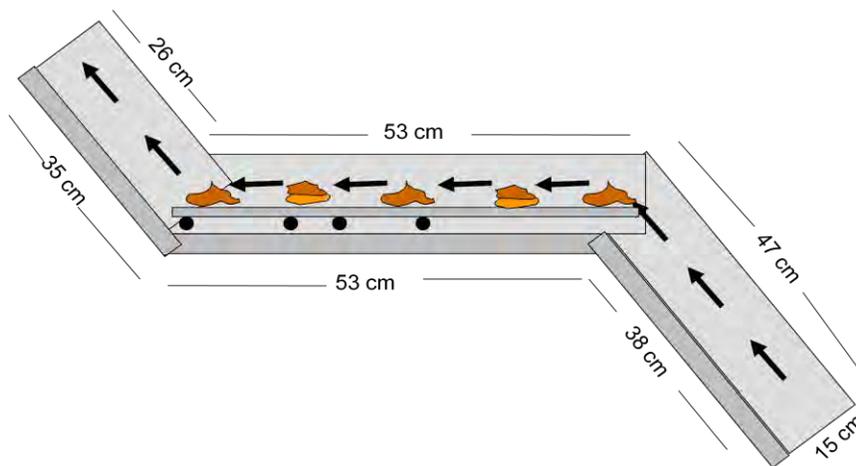


Figura 3.4 Dimensiones del secador

Primeramente, para la construcción se buscó usar materiales como lámina galvanizada para soportar altas temperaturas (Figura 3.5). La cámara de secado está provista de una cubierta de vidrio para captar la energía solar.

Dentro de la cámara de secado se ubica la charola, la cual se construyó de acero inoxidable como soporte de exposición de las muestras de heces

La estructura del secador se aisló con material de unicel (poliestireno) para evitar la pérdida de calor como se muestra en la Figura 3.5.





Figura 3.5 Aislamiento con poliestireno

Posteriormente, el material de la cubierta se pintó de negro para absorber la mayor cantidad de energía posible (Figura 3.6). Se instalaron los dispositivos correspondientes para evaluar la temperatura de entrada y salida del secador. Este prototipo se colocó sobre una base metálica de 1m de altura y fue ubicado en la azotea del edificio 5 del Instituto de Ingeniería para su operación.



Figura 3.6 Secador con termómetros para hacer lecturas de temperaturas de entrada y salida

Finalmente, para evaluar la variación de peso en tiempo real, se colocó una balanza granataria como se muestra en la Figura 3.7 sobre la base de metal, con





un soporte que atraviesa la estructura del secador hasta la charola. De esa forma se evitan también las pérdidas de calor en la cámara de secado.



Figura 3.7 Secador terminado con balanza granataria en la base

3.4 Pruebas experimentales para el secado de heces

3.4.1 Pruebas preliminares para determinar la mejor orientación del secador solar

Para estas pruebas preliminares de secado y de orientación del secador se decidió utilizar suelo con cierto grado de humedad en vez de las heces, esto debido a la mayor facilidad del manejo de la muestra.

Para que el colector solar aprovechara mejor la radiación solar se buscó la orientación hacia el sur geográfico (ver Figura 3.8), ubicando dicha posición de la siguiente manera (Montero, 2005):

- 1) Se colocó una varilla en posición vertical al suelo dos o tres horas antes del medio día solar, se midió su sombra y se señaló el extremo en el piso.
- 2) Se marcó un círculo alrededor de la varilla tomando como referencia la medida de la sombra.





- 3) Por la tarde, alrededor de las 4 pm, se volvió a señalar de nuevo el círculo cuando la sombra de la varilla alcanzó la misma longitud tomada por la mañana.
- 4) Finalmente se trazó una línea recta entre las dos líneas marcadas, la dirección de la varilla indica la posición sur geográfico.

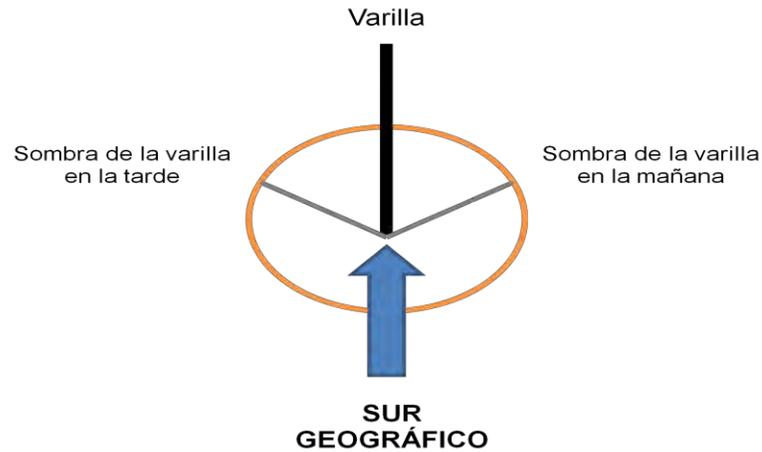


Figura 3.8 Diagrama de localización del sur geográfico

Una vez localizado el sur geográfico, se realizaron pruebas de secado con dos ángulos de inclinación y con dos configuraciones del secador como se indica en la Tabla 3.2.

TABLA 3.2 Pruebas de secado con suelo para definir la orientación y configuración del secador

Muestra	Ángulo del colector solar	Configuración del secador mixto	Secado directo al sol
Lodo	25°	Activo	Lodo
	25°	Pasivo	
	35°	Activo	
	35°	Pasivo	

De la tabla 3.2 se puede observar que se hicieron 8 pruebas de secado, es decir 4 en el secador y 4 con secado directo al sol.

Los ángulos del colector se modificaron 2 veces, ya que en la teoría menciona que entre 25° y 35° es la mejor manera de funcionamiento del colector.





Adicionalmente el secador fue operado en forma activa y en forma pasiva, es decir con el funcionamiento del ventilador o sin él.

Paralelamente, se hicieron pruebas de secado directo con el primer dispositivo de secado descrito en el inciso 3.3.1, con el fin de obtener resultados de secado con ambos sistemas bajo las mismas condiciones ambientales.

3.4.2 Procedimiento de secado con exposición directa

Este procedimiento consta en colocar una cantidad de muestra conteniendo cierta cantidad de humedad en el primer dispositivo de secado, y determinar por medio de gravimetría la humedad contenida en las heces.

3.4.3 Procedimiento de secado en el prototipo de secador solar

Primeramente se colectó en una cubeta la cantidad de heces suficientes para las pruebas de una familia de 3 individuos para tener una muestra representativa y homogénea. Una vez que se tuvo una tercera parte de la cubeta de 20 litros de heces, se procedió a pesar la cubeta en donde estaban contenidas, así como la charola.

Debido a que previamente se hicieron pruebas con lodo, al momento de empezar las pruebas con heces ya se sabía la mejor configuración y orientación del secador, es por eso que lo único que se hizo antes de meter la charola al secador fue pesar 300 gramos de heces aproximadamente.

Se realizaron 6 corridas de secado, en la 1 y 2 se colocó la muestra con un espesor de 1.5 cm, la 3 y la 4 de igual manera con un espesor de 1.5 cm pero con la diferencia de que a cada hora se hizo un rayado para cambiar el área de transferencia de masa. La muestra 5 se colocó con un espesor de 2 cm y la muestra 6 con un espesor de 1 cm. Dichas variaciones se hicieron con el propósito de analizar el efecto en el proceso de secado a pesar de la limitaciones para lograr la colecta de muestra suficiente de heces.

Con la balanza granataria se midió el peso de la muestra cada 10 minutos las primeras 3 horas, y posteriormente cada hora, durante 8 horas al día, hasta alcanzar un peso constante.





Una vez secas las heces se hicieron polvo con la ayuda de un mortero para hacer la caracterización.

3.5 Variables de control durante las pruebas de secado

Las variables o parámetros de control durante el proceso de secado se enlistan en la Tabla 3.3 con sus respectivos métodos y equipo utilizado.

TABLA 3.3 Variables a medir para las corridas de secado

	Parámetro	Método o instrumento utilizado
Aire de secado	Humedad relativa del aire a la entrada (%)	Higrómetro
	Humedad relativa del aire a la salida (%)	Higrómetro
	Temperatura del aire de entrada (°C)	Termómetro
	Temperatura del aire de salida (°C)	Termómetro
	Flujo de aire	Método de obstrucción de flujo (ver ANEXO 1)
Producto a secar	Cantidades a manejar por corrida de secado (kg)	≈0.3 kg base húmeda
	Contenido de humedad inicial (%)	Balanza granataria
	Contenido de humedad final (%)	Balanza granataria





CAPÍTULO 4: RESULTADOS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS EXPERIMENTALES DEL SECADO DE HECES HUMANAS

A continuación se resumen todos los resultados obtenidos de la experimentación para la caracterización y secado de las heces tomando como base la metodología descrita en el capítulo 3.

4.1 Caracterización fisicoquímica

La Tabla 4.1 representa los resultados de la caracterización fisicoquímica de las heces, los cuales fueron promediados de las tablas A2.1 a la A2.13 del ANEXO 2.

Tabla 4.1 Resultados promedio de la caracterización fisicoquímica de las heces

Ver Inciso del ANEXO 2	Parámetro	Símbolo o abreviatura	Valor	Unidad
A2.1	Humedad de las heces secadas únicamente por medio de radiación solar	-	71.47 ± 3.19	%
A2.2	Humedad de las heces del inciso A2.1 con un posterior secado en estufa a 103 – 105°C	-	9.33 ± 0.09	
A2.3	Sólidos volátiles	SV	87.35 ± 1.78	
A2.4	Sólidos fijos	SF	12.648 ± 1.78	
A2.5	Demanda química de Oxígeno	DQO	1498.26 ± 481.22	g Kg de heces
A2.6	Demanda bioquímica de Oxígeno	DBO	524.47 ± 61.48	
A2.7	Carbono total	CT	13.18x10 ⁻¹²	
A2.8	Nitrógeno Total	N-TOTAL	53.31 ± 4.71	
A2.9	Ortofosfatos	PO ₄ ³⁻	< 0.0000049	
A2.10	Potasio	K ⁺	22.76 ± 2.97	
A2.11	Calcio	Ca ²⁺	13.09 ± 2.44	
A2.12	Magnesio	Mg ²⁺	2.83 ± 0.83	
A2.13	Sodio	Na ⁺	2.24 ± 0.98	





4.2 Resultados de secado

Con base en los resultados obtenidos siguiendo la metodología del capítulo 3, inciso 3.4.3, se decidió operar el secador de manera pasiva (sin ventilación), con un ángulo de 35° en la inducción del calentamiento, ya que con esta configuración se obtuvieron los mejores resultados en las pruebas de secado con suelo del inciso 3.4.1.

Para efectos prácticos se describirá la primera corrida con el detalle de los cálculos, ya que las demás corridas se procesaron de la misma manera; de tal forma que todos los resultados que se obtuvieron se resumen en las Tablas 4.2 a 4.4 y únicamente se presentan las gráficas correspondientes a esas tablas de resultados.

4.2.1 Corrida 1 (detallada)

a) Peso de la charola:

$$2.129 \text{ [kg]}$$

b) Área de transferencia de masa:

$$A = 0.03 \text{ [m}^2\text{]}$$

c) Espesor: $d = 0.015 \text{ [m]}$

d) Peso de las heces húmedas:

$$\begin{aligned} (\text{Peso charola} + \text{heces al inicio}) - (\text{Peso de la charola}) &= 2.4336 \text{ [kg]} - 2.129 \text{ [kg]} = \\ &0.3046 \text{ [kg heces húmedas]} \end{aligned}$$

e) Peso de las heces secas:

$$\begin{aligned} S &= (\text{Peso charola} + \text{heces al final}) - (\text{Peso de la charola}) = 2.2302 \text{ [kg]} - \\ &2.129 \text{ [kg]} = 0.1013 \text{ [kg heces secas]} \end{aligned}$$

f) Agua inicial: $(\text{Peso de las heces húmedas}) - (\text{Peso de las heces secas}) =$

$$0.3046 \text{ [kg heces húmedas]} - 0.1013 \text{ [kg heces secas]} = 0.2033 \text{ [kg H}_2\text{O]}$$





g) Humedad en base seca: $X = \frac{\text{Agua inicial}}{\text{Peso de las heces secas}} = \frac{0.2033 \text{ kg H}_2\text{O}}{0.1013 \text{ kg Heces secas}} = 2.0069 \left[\frac{\text{kg H}_2\text{O}}{\text{kg Heces secas}} \right]$

h) Humedad en base húmeda: $X = \frac{\text{Humedad en base seca}}{(1+\text{Humedad en base seca})} = \frac{2.0029}{(1+2.0069)} = 0.6674 \left[\frac{\text{kg H}_2\text{O}}{\text{kg Heces húmedas}} \right] \approx 66.74 \% \text{ de humedad}$

i) Tiempo: $\theta = [\text{hrs}]$

j) Velocidad de secado: $N_A = -\frac{dX}{d\theta} \left(\frac{S}{A} \right) = [\text{kg agua/m}^2/\text{h}]$

Con los datos de la Tabla A3.1 del Anexo 3 se obtienen los siguientes diagramas de secado (Figuras 4.1 a 4.3):

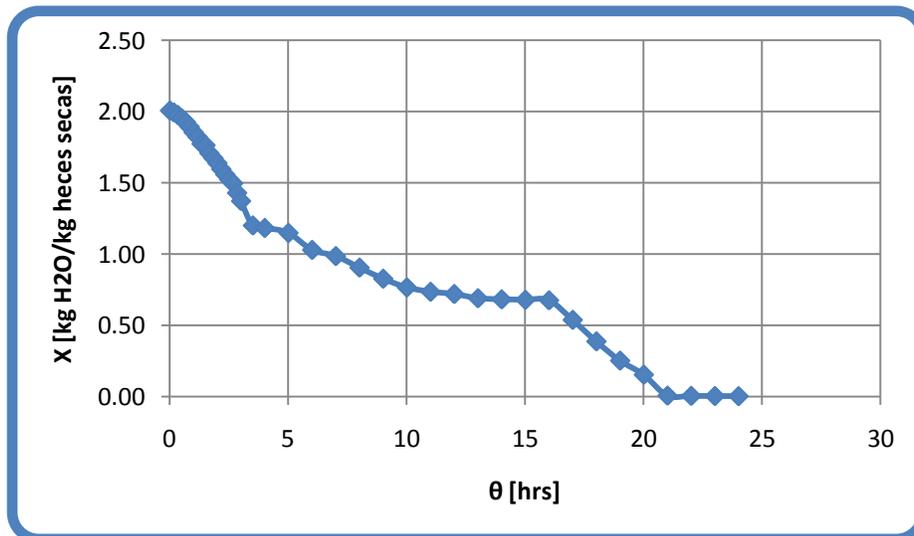


Figura 4.1 Curva de secado de heces humanas X vs θ



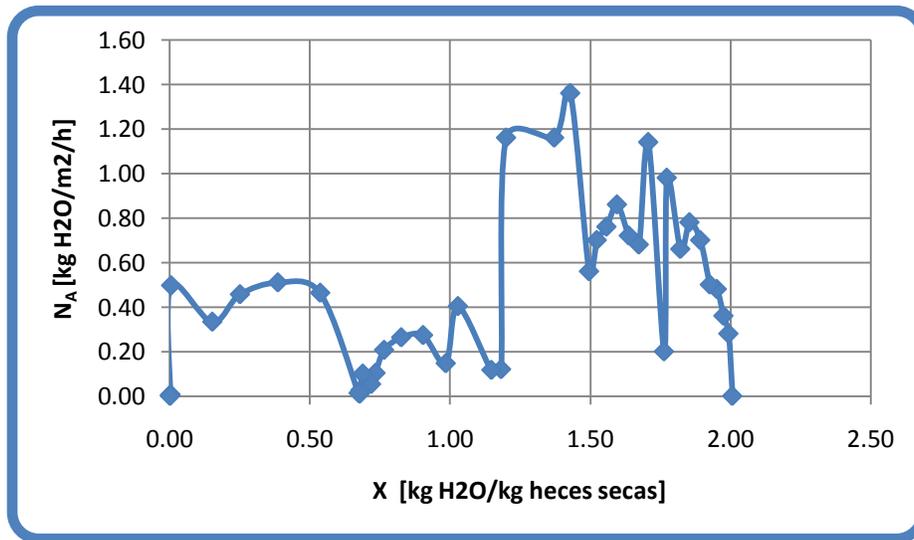


Figura 4.2 Curva de secado de heces humanas N_A vs X

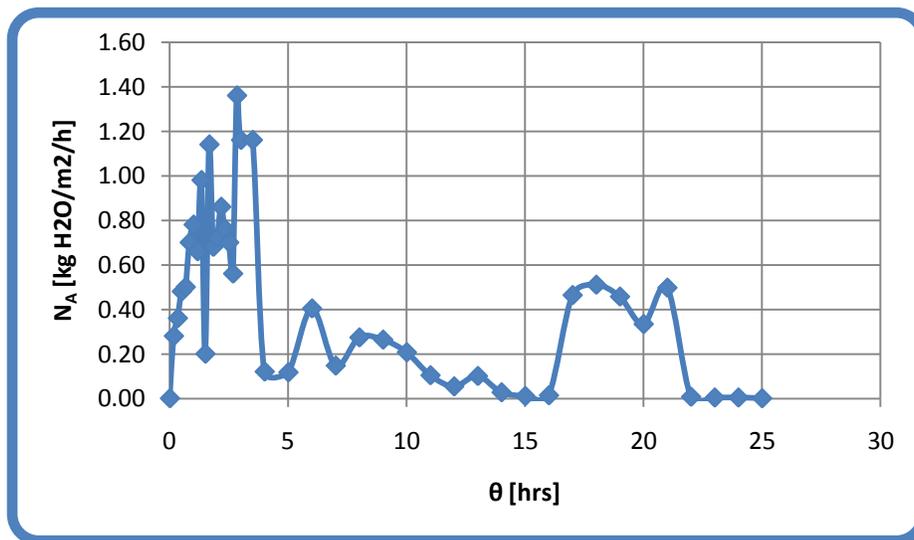


Figura 4.3 Curva de secado de heces humanas N_A vs θ

De los diagramas de las figuras 4.1 a 4.3 se identifica:

$$X^* = 0$$

$$N_{Ac} = 1.16$$

$$\Theta = 3.5$$

$$X_c = 1.1994$$





4.2.1.1 Análisis del periodo decreciente por capilaridad:

$X_c - X^* = 1.1994 - 0 = 1.1994$; para los detalles ver los datos de la Tabla A3.2 del Anexo 3

Con base en la información obtenida de las Figuras 4.1 a 4.3 y los datos de las Tablas A3.1 y A3.2 se genera la Tabla A3.3.

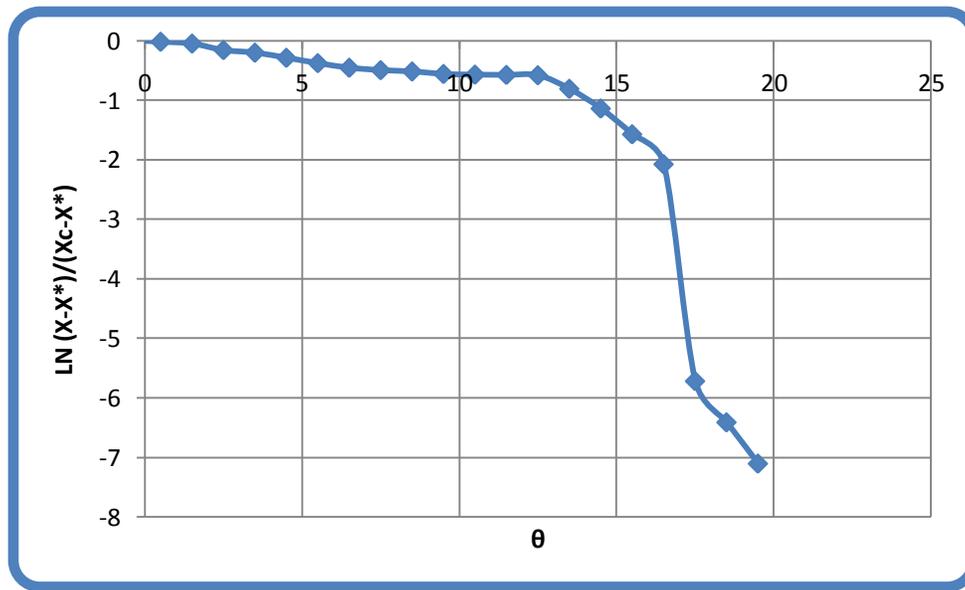


Figura 4.4 Curva de secado del periodo decreciente para capilaridad

Si controla la capilaridad en el proceso de secado, la ecuación del periodo de tiempo decreciente está dada por la ecuación 2.15, o también por:

$\theta_d = \frac{1}{K} \ln \frac{X_c - X^*}{X_f - X^*}$; en donde:

$K = \frac{-(\frac{dX}{d\theta})}{X_c - X^*}$

En este caso:

$X_c = 1.1994$

$X^* = 0$

$X_c - X^* = 1.1994 - 0 = 1.1994$





De los datos experimentales del periodo de secado constante de la Tabla A3.1 se obtiene:

$$\left(\frac{dX}{d\theta}\right)_c = 0.2079$$

$$K_{\text{teórica}} = \frac{-0.2079}{1.1994} = -0.1733$$

Para obtener el comportamiento real de la muestra se traza una línea recta en los datos experimentales y se obtiene la pendiente (ver Figura 4.4):

$$K_{\text{experimental}} = \frac{\ln 1 - \ln 0.0008}{0 - 19.5} = -0.3657$$

Este valor no es muy cercano al teórico, por lo que se podría pensar que controla la difusión.

Del proceso de secado por capilaridad se calcula el periodo decreciente cuando ésta controla:

Si se considera el tramo: $X - X^* = 0.1510$

Para $K_{\text{teórica}}$:

$$\theta_d = \frac{1}{0.1733} \ln \frac{1.1994}{0.1510} = 11.9579 \text{ hrs}$$

Para $K_{\text{experimental}}$:

$$\theta_d = \frac{1}{0.3657} \ln \frac{1.1994}{0.1510} = 5.6667 \text{ hrs}$$





4.2.1.2 Análisis del periodo decreciente por difusión:

Si lo que controla es la difusión entonces se tiene la ecuación 2.26 y por lo tanto:

$$\frac{D_{Ls}\theta}{d^2} \text{teórico} = \frac{4}{\pi^2} \ln \frac{X_c - X^*}{X_f - X^*}$$

De las Figuras 4.1 a 4.3 y los datos de las Tablas A3.1 y A3.2 se genera la Tabla A3.3 del Anexo 3, la cual es útil para graficar la Figura 4.5 y así analizar el proceso de difusión.



Figura 4.5 Curva de secado del periodo decreciente para difusión

Si se acepta la difusión, el coeficiente experimental será aproximadamente $9.6 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{h}$. Aplicando lo anterior a $X - X^* = 0.1510$ se tiene que:

$$\theta_d = \frac{4(0.015)^2}{(9.6 \times 10^{-6})(3.1416)^2} \ln \frac{1.1994}{0.1510} = 19.6844 \text{ hrs}$$





4.2.2 Corrida 2

Con los datos de la Tabla A3.4 del Anexo 3 se hacen los siguientes diagramas de secado (Figuras 4.6 a 4.8):

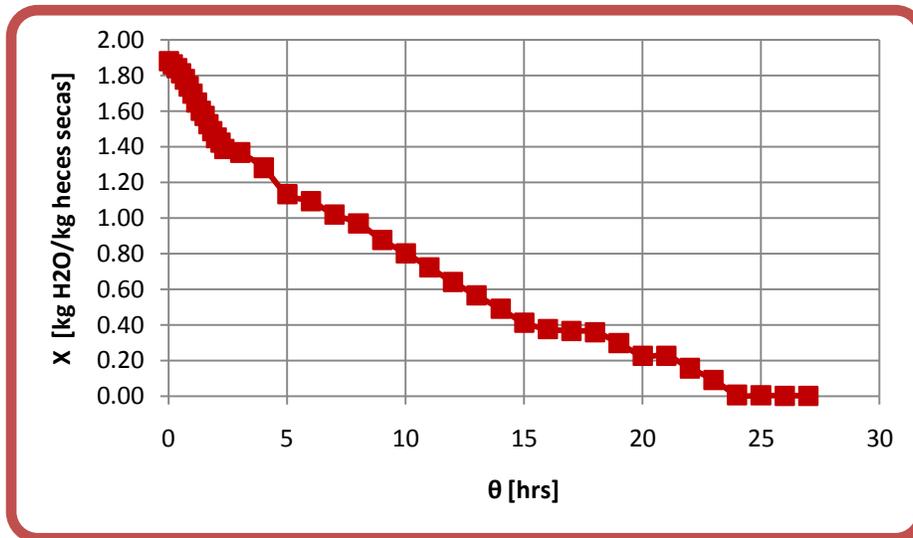


Figura 4.6 Curva de secado de heces humanas X vs θ

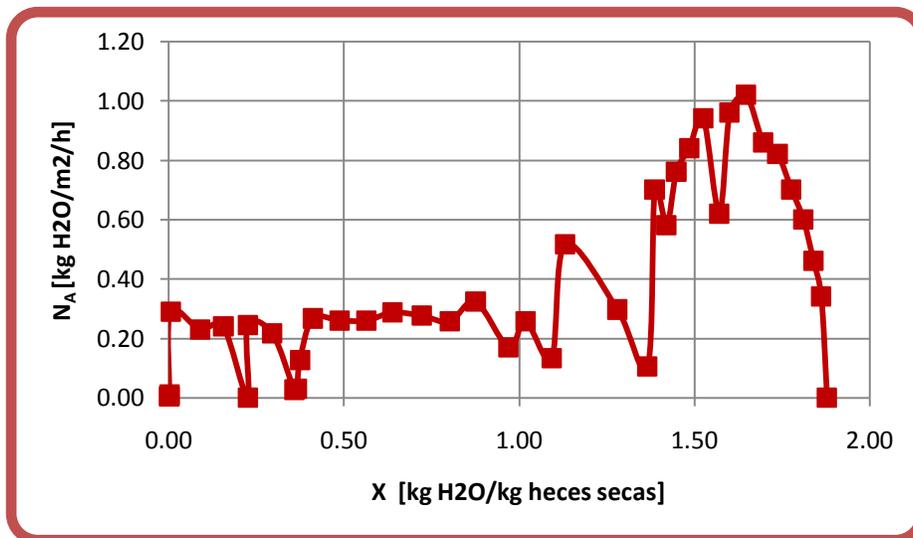


Figura 4.7 Curva de secado de heces humanas N_A vs X



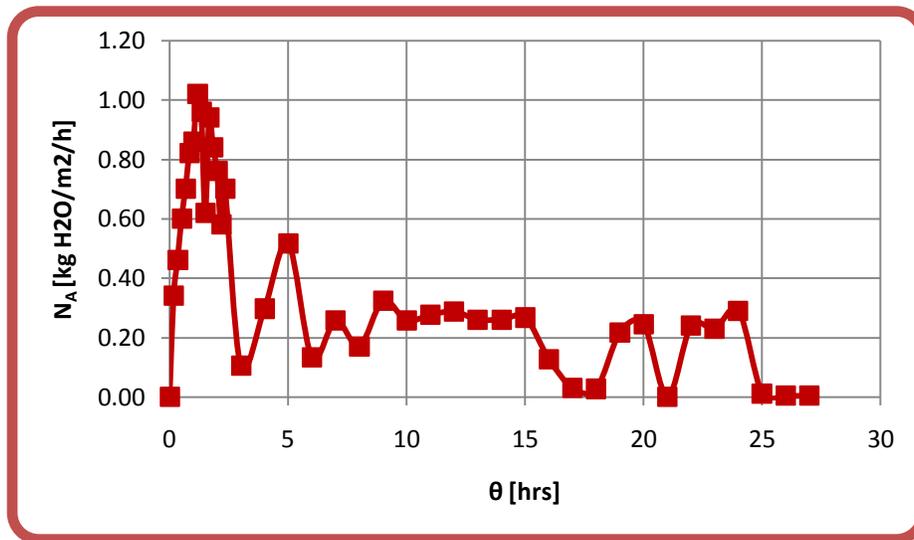


Figura 4.8 Curva de secado de heces humanas N_A vs θ

De los diagramas de las figuras 4.6 a 4.8 se identifica:

$$X^* = 0.001$$

$$N_{Ac} = 0.5167$$

$$\Theta = 5$$

$$X_c = 1.1311$$





4.2.2.1 Análisis del periodo decreciente por capilaridad:

$X_c - X^* = 1.1311 - 0.001 = 1.1301$; para los detalles ver los datos de la Tabla A3.5 del Anexo 3.

Con base en la información obtenida de las Figuras 4.6 a 4.8 y los datos de las Tablas A3.4 y A3.5 se genera la Tabla A3.6.

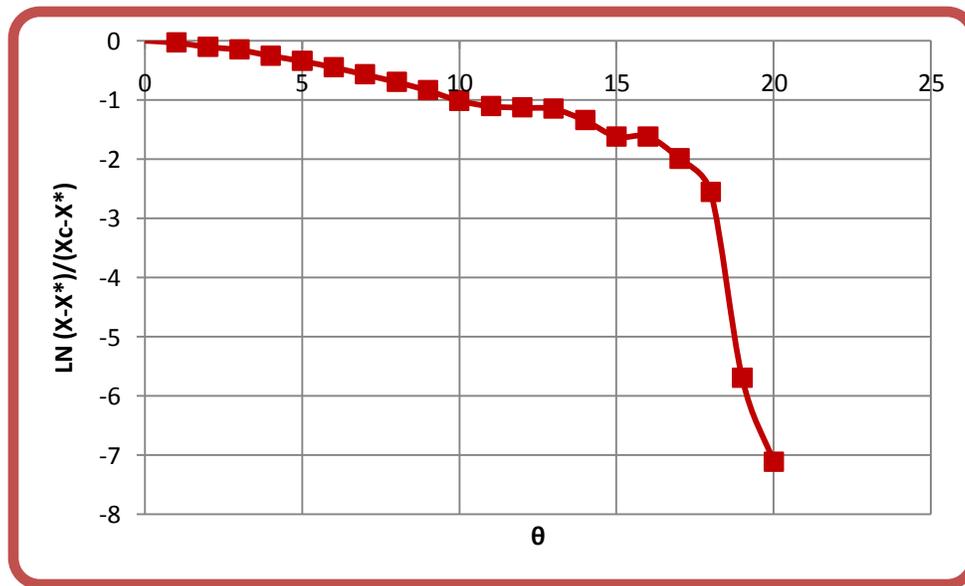


Figura 4.9 Curva de secado del periodo decreciente para capilaridad

Si controla la capilaridad la ecuación del periodo de tiempo decreciente está dada por la ecuación 2.15, o también por:

$$\theta_d = \frac{1}{K} \ln \frac{X_c - X^*}{X_f - X^*} \quad ; \text{ en donde:}$$

$$K = \frac{-\left(\frac{dX}{d\theta}\right)}{X_c - X^*}$$

En este caso:

$$X_c = 1.1311$$

$$X^* = 0.001$$

$$X_c - X^* = 1.1311 - 0.001 = 1.1301$$





De los datos experimentales del periodo de secado constante de la Tabla A3.4 se obtiene:

$$\left(\frac{dX}{d\theta}\right)_c = 0.1787$$

$$K_{\text{teórica}} = \frac{-0.1787}{1.1301} = -0.1581$$

Para obtener el comportamiento real de la muestra se traza una línea recta en los datos experimentales y se obtiene la pendiente (ver Figura 4.9):

$$K_{\text{experimental}} = \frac{\ln 1 - \ln 0.0008}{0-20} = -0.3565$$

Este valor no es muy cercano al teórico, por lo que se podría pensar que controla la difusión.

Del proceso de secado por capilaridad se puede calcular el periodo decreciente cuando ésta controla:

Si se considera el tramo: $X - X^* = 0.0877$

Para $K_{\text{teórica}}$:

$$\theta_d = \frac{1}{0.1581} \ln \frac{1.1301}{0.0877} = 16.1679 \text{ hrs}$$

Para $K_{\text{experimental}}$:

$$\theta_d = \frac{1}{0.3565} \ln \frac{1.1301}{0.0877} = 7.1701 \text{ hrs}$$





4.2.2.2 Análisis del periodo decreciente por difusión:

Si lo que controla es la difusión entonces se tiene la ecuación 2.26 y por lo tanto:

$$\frac{D_{Ls}\theta}{d^2} \text{ teórico} = \frac{4}{\pi^2} \ln \frac{X_c - X^*}{X_f - X^*}$$

De las Figuras 4.6 a 4.8 y los datos de las Tablas A3. 4 y A3.5 se genera la Tabla A3.6 del Anexo 3, la cual es útil para graficas la Figura 4.10, y así analizar el proceso de difusión.

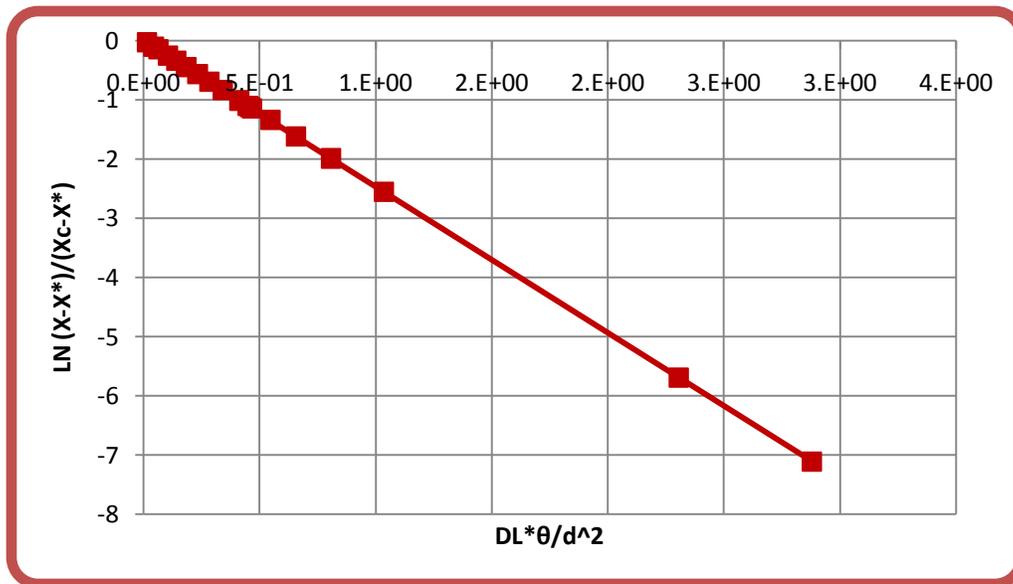


Figura 4.10 Curva de secado del periodo decreciente para difusión

Si se acepta la difusión, el coeficiente experimental será aproximadamente $1.0094 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{h}$. Aplicando lo anterior a $X - X^* = 0.1365$ se tiene que:

$$\theta_d = \frac{4(0.015)^2}{(1.0094 \times 10^{-5})(3.1416)^2} \ln \frac{1.1301}{0.0877} = 23.0920 \text{ hrs}$$





4.2.3 Corrida 3

Con los datos de la Tabla A3.7 del Anexo 3 se hacen los siguientes diagramas de secado (Figuras 4.11 a 4.13):

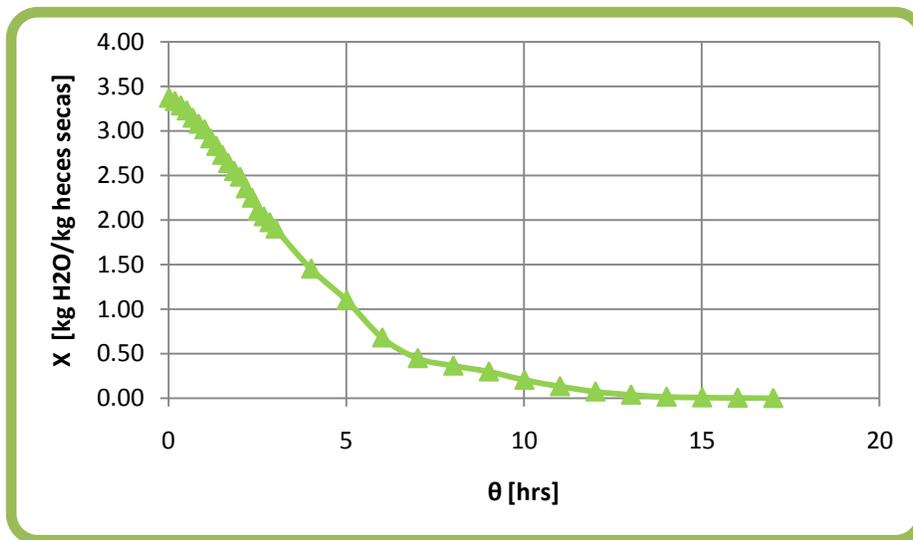


Figura 4.11 Curva de secado de heces humanas X vs θ

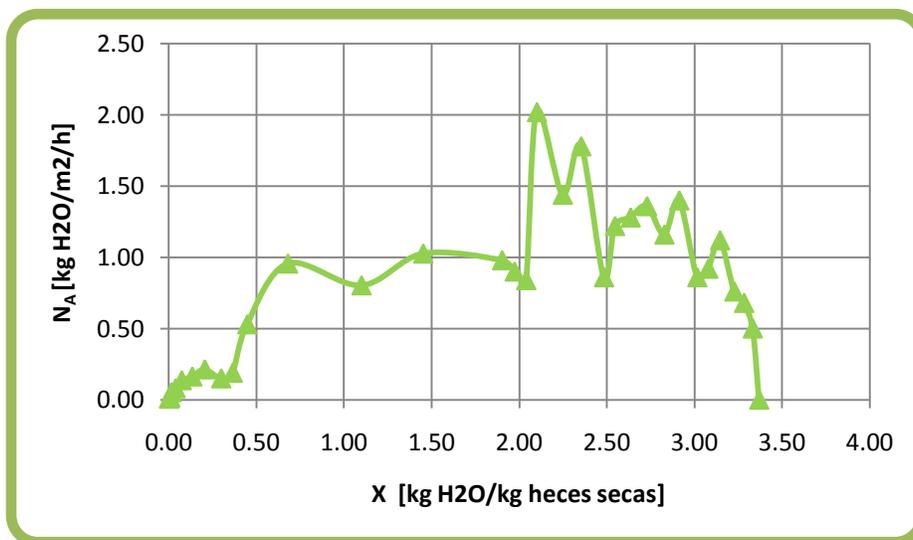


Figura 4.12 Curva de secado de heces humanas N_A vs X



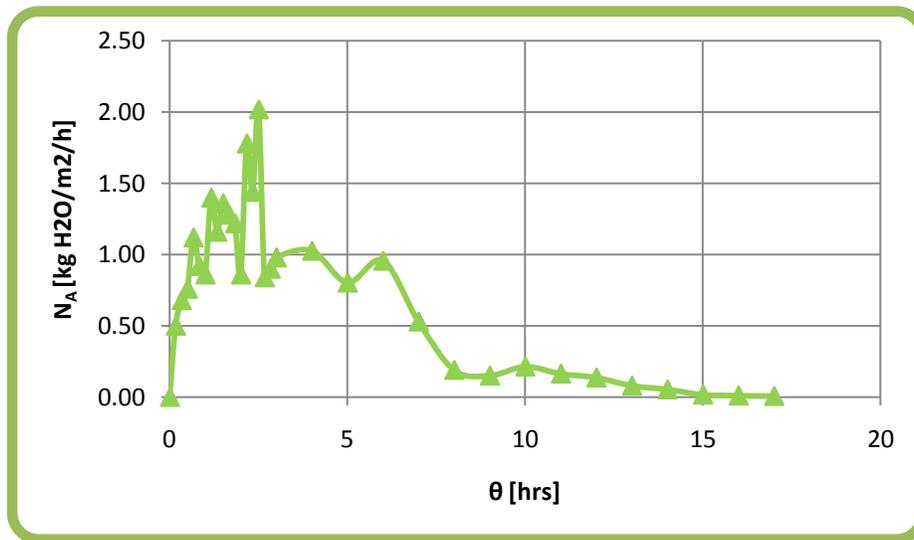


Figura 4.13 Curva de secado de heces humanas N_A vs θ

De los diagramas de las Figuras 4.11 a 4.13 se identifica:

$$X^* = 0.0029$$

$$N_{Ac} = 2.02$$

$$\Theta = 2.5$$

$$X_c = 2.1009$$





4.2.3.1 Análisis del periodo decreciente por capilaridad:

$X_c - X^* = 2.1009 - 0.0029 = 2.098$; para los detalles ver los datos de la Tabla A3.8 del Anexo 3.

Con base en la información obtenida de las Figuras 4.11 a 4.13 y los datos de las Tablas A3.7 y A3.8 se genera la Tabla A3.9.

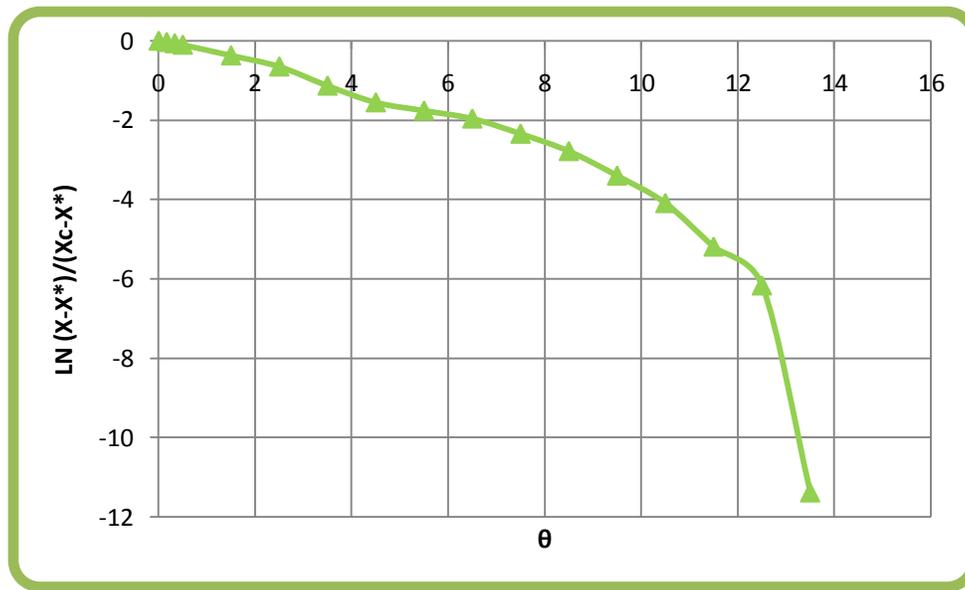


Figura 4.14 Curva de secado del periodo decreciente para capilaridad

Si controla la capilaridad la ecuación del periodo de tiempo decreciente está dada por la ecuación 2.15 o también por:

$$\theta_d = \frac{1}{K} \ln \frac{X_c - X^*}{X_f - X^*} ; \text{ en donde:}$$

$$K = \frac{-\left(\frac{dX}{d\theta}\right)}{X_c - X^*}$$

En este caso:

$$X_c = 2.1009$$

$$X^* = 0.0029$$

$$X_c - X^* = 2.1009 - 0.0029 = 2.098$$





De los datos experimentales del periodo de secado constante de la Tabla A3.7 se obtiene:

$$\left(\frac{dX}{d\theta}\right)_c = 0.4759$$

$$K_{\text{teórica}} = \frac{-0.4759}{2.098} = -0.2268$$

Para obtener el comportamiento real de la muestra se traza una línea recta en los datos experimentales y se obtiene la pendiente (ver Figura 4.14):

$$K_{\text{experimental}} = \frac{\ln 1 - \ln 0.000011}{0 - 13.5} = -0.8457$$

Este valor no es muy cercano al teórico, por lo que se podría pensar que controla la difusión.

Del proceso de secado por capilaridad se puede calcular el periodo decreciente cuando ésta controla:

Si se considera el tramo: $X - X^* = 0.0351$

Para $K_{\text{teórica}}$:

$$\theta_d = \frac{1}{0.2268} \ln \frac{2.098}{0.0351} = 18.0359 \text{ hrs}$$

Para $K_{\text{experimental}}$:

$$\theta_d = \frac{1}{0.8457} \ln \frac{2.098}{0.0351} = 4.8369 \text{ hrs}$$





4.2.3.2 Análisis del periodo decreciente por difusión:

Si lo que controla es la difusión entonces se tiene la ecuación 2.26 y por lo tanto:

$$\frac{D_{Ls}\theta}{d^2} \text{ teórico} = \frac{4}{\pi^2} \ln \frac{X_c - X^*}{X_f - X^*}$$

De las Figuras 4.11 a 4.13 y los datos de las Tablas A3.7 y A3.8 se genera la Tabla A3.9 del Anexo 3, la cual es útil para graficas la Figura 4.15, y así analizar el proceso de difusión.



Figura 4.15 Curva de secado del periodo decreciente para difusión

Si se acepta la difusión, el coeficiente experimental será aproximadamente $3.1544 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{h}$. Aplicando lo anterior a $X - X^* = 0.0351$ se tiene que:

$$\theta_d = \frac{4(0.015)^2}{(3.1544 \times 10^{-5})(3.1416)^2} \ln \frac{2.098}{0.0351} = 11.8251 \text{ hrs}$$





4.2.4 Corrida 4

Con los datos de la Tabla A3.10 del Anexo 3 se hacen los siguientes diagramas de secado (Figuras 4.16 a 4.18):

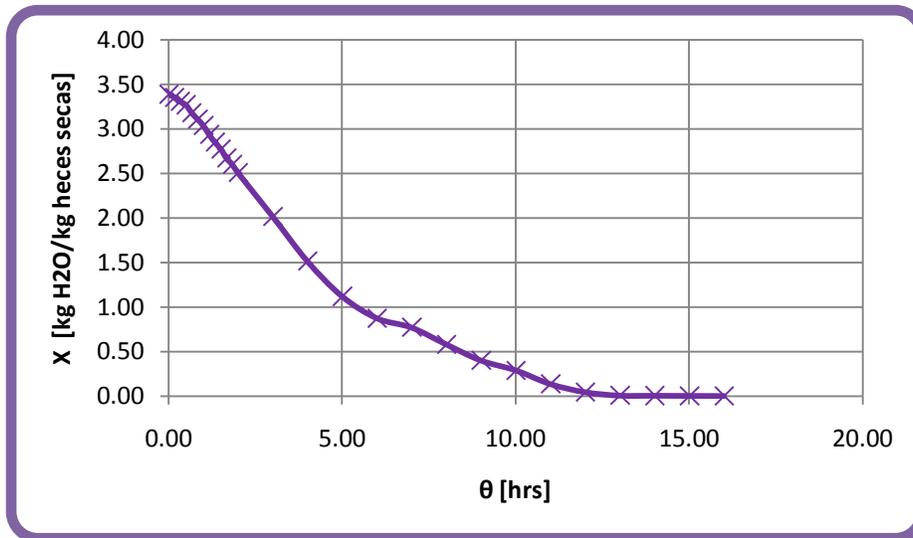


Figura 4.16 Curva de secado de heces humanas X vs θ

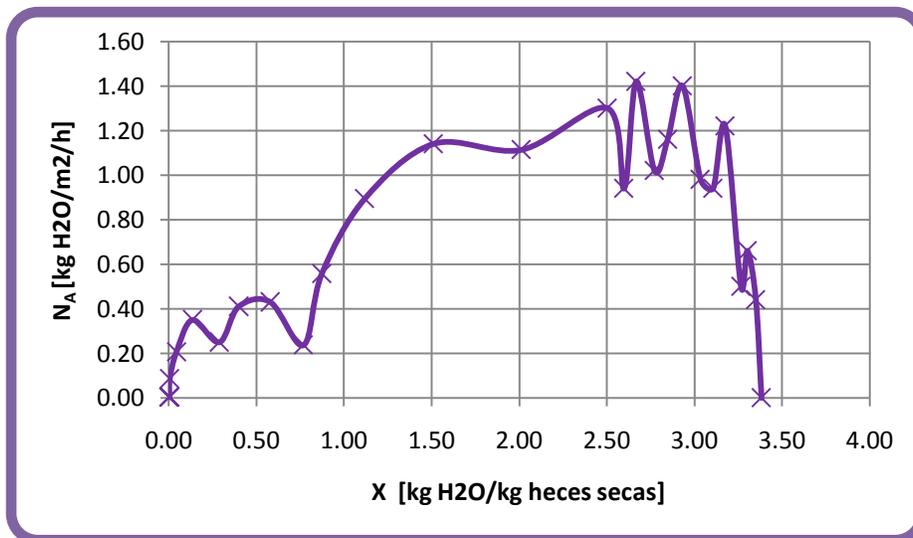


Figura 4.17 Curva de secado de heces humanas N_A vs X



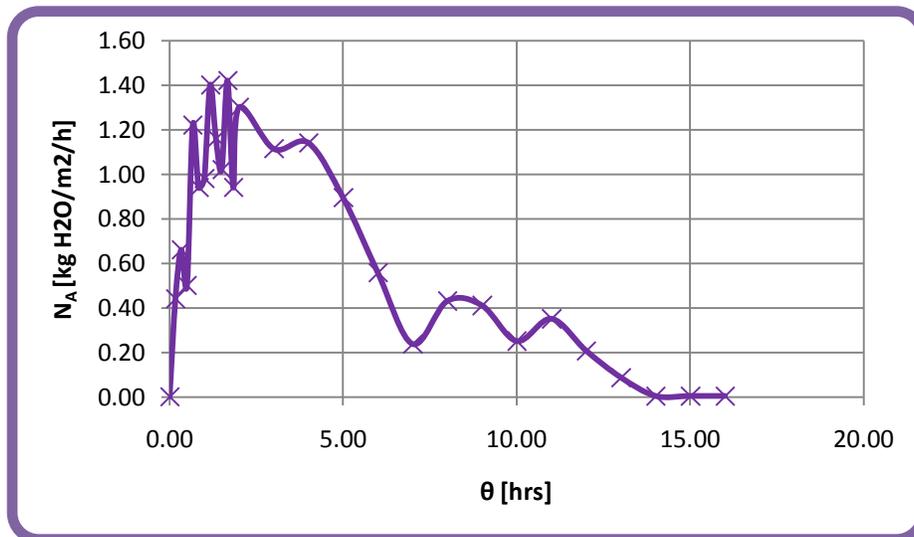


Figura 4.18 Curva de secado de heces humanas N_A vs θ

De los diagramas de las Figuras 4.16 a 4.18 se identifica:

$$X^* = 0.0015$$

$$N_{Ac} = 1.3$$

$$\Theta = 2$$

$$X_c = 2.5037$$





4.2.4.1 Análisis del periodo decreciente por capilaridad:

$X_c - X^* = 2.5037 - 0.0015 = 2.5022$; para los detalles ver los datos de la Tabla A3.11 del Anexo 3

Con base en la información obtenida de las Figuras 4.6 a 4.8 y los datos de las Tablas A3.10 y A3.11 se genera la Tabla A3.12.

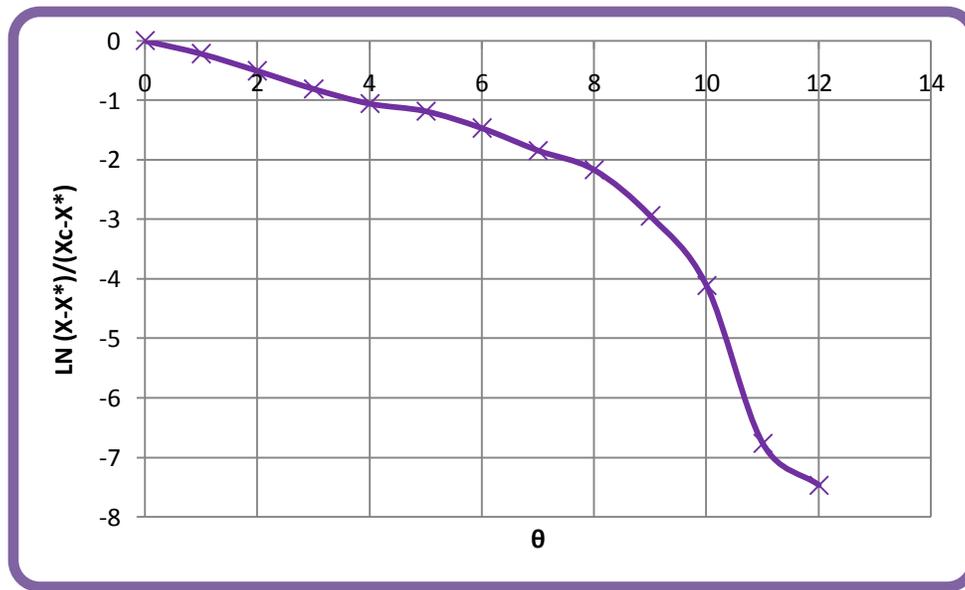


Figura 4.19 Curva de secado del periodo decreciente para capilaridad

Si controla la capilaridad la ecuación del periodo de tiempo decreciente está dada por la ecuación 2.15 o también por:

$$\theta_d = \frac{1}{K} \ln \frac{X_c - X^*}{X_f - X^*} ; \text{ en donde:}$$

$$K = \frac{-\left(\frac{dX}{d\theta}\right)}{X_c - X^*}$$

En este caso:

$$X_c = 2.5037$$

$$X^* = 0.0015$$

$$X_c - X^* = 2.5037 - 0.0015 = 2.5022$$





De los datos experimentales del periodo de secado constante de la Tabla A3.10 se obtiene:

$$\left(\frac{dX}{d\theta}\right)_c = 0.4060$$

$$K_{\text{teórica}} = \frac{-0.4060}{2.5022} = -0.1623$$

Para obtener el comportamiento real de la muestra se traza una línea recta en los datos experimentales y se obtiene la pendiente (ver Figura 4.19):

$$K_{\text{experimental}} = \frac{\ln 1 - \ln 0.00057}{0 - 12} = -0.6225$$

Este valor no es muy cercano al teórico, por lo que se podría pensar que controla la difusión.

Del proceso de secado por capilaridad se puede calcular el periodo decreciente cuando ésta controla:

Si se considera el tramo: $X - X^* = 0.2863$

Para $K_{\text{teórica}}$:

$$\theta_d = \frac{1}{0.1623} \ln \frac{2.5022}{0.2863} = 13.3573 \text{ hrs}$$

Para $K_{\text{experimental}}$:

$$\theta_d = \frac{1}{0.6225} \ln \frac{2.5022}{0.2863} = 3.4825 \text{ hrs}$$





4.2.4.2 Análisis del periodo decreciente por difusión:

Si lo que controla es la difusión entonces se tiene la ecuación 2.26 y por lo tanto:

$$\frac{D_{Ls}\theta}{d^2} \text{teórico} = \frac{4}{\pi^2} \ln \frac{X_c - X^*}{X_f - X^*}$$

De las Figuras 4.16 a 4.18 y los datos de las Tablas A3.10 y A3.11 se genera la Tabla A3.12 del Anexo 3, la cual es útil para graficar la Figura 4.20, y así analizar el proceso de difusión.

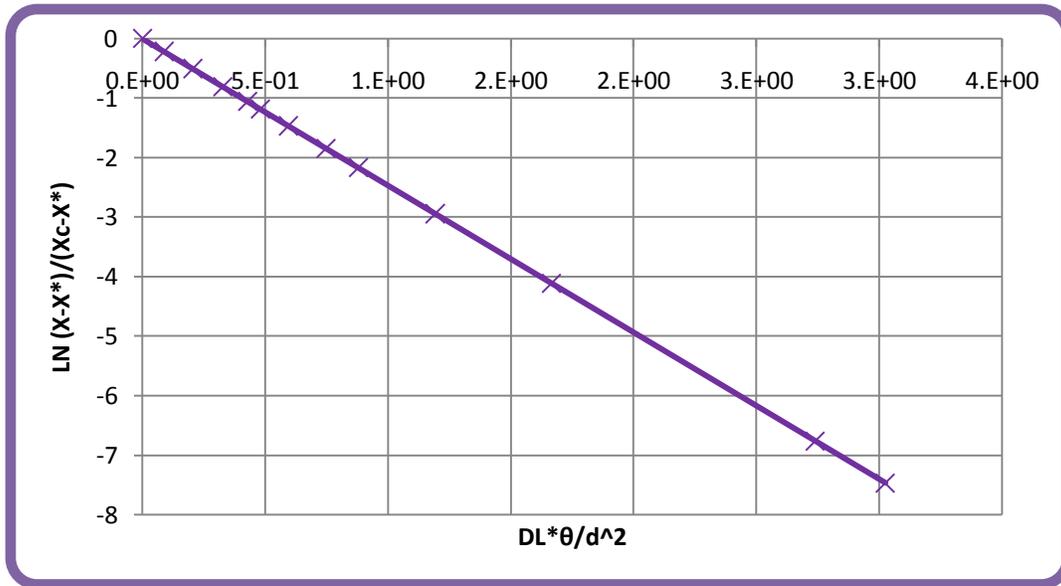


Figura 4.20 Curva de secado del periodo decreciente para difusión

Si se acepta la difusión, el coeficiente experimental será aproximadamente $3.0344 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{h}$. Aplicando lo anterior a $X - X^* = 0.2863$ se tiene que:

$$\theta_d = \frac{4(0.015)^2}{(3.0344 \times 10^{-5})(3.1416)^2} \ln \frac{2.5022}{0.2863} = 6.5148 \text{ hrs}$$





4.2.5 Corrida 5

Con los datos de la Tabla A3.13 del Anexo 3 se pueden hacer los siguientes diagramas de secado (Figuras 4.21 a 4.23):

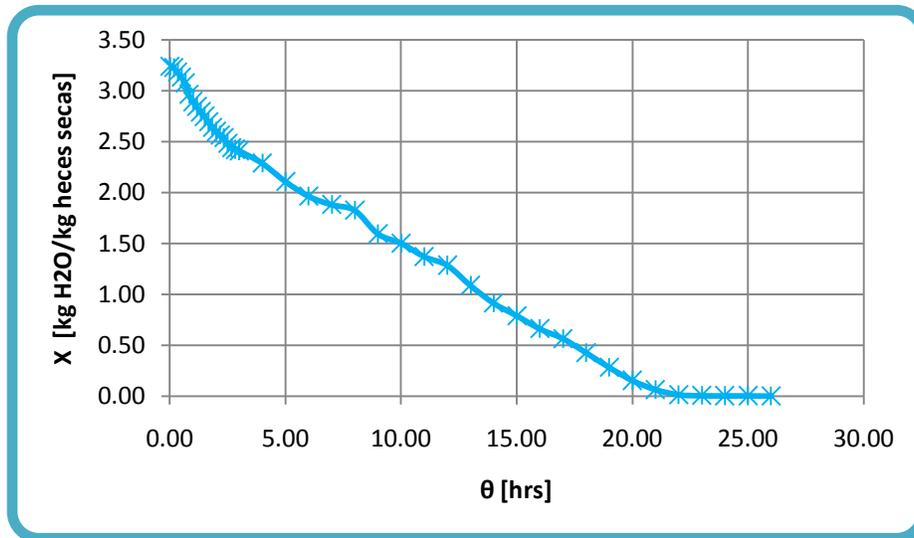


Figura 4.21 Curva de secado de heces humanas X vs θ

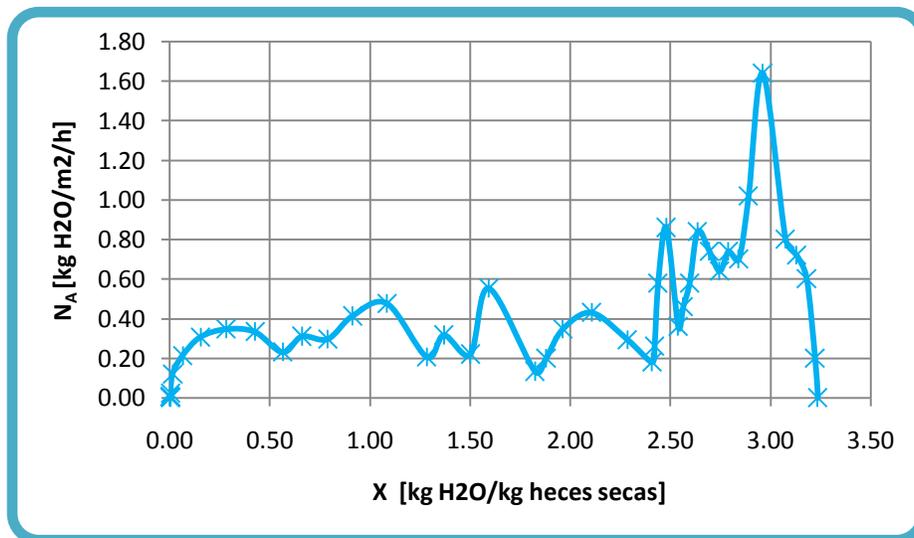


Figura 4.22 Curva de secado de heces humanas N_A vs X



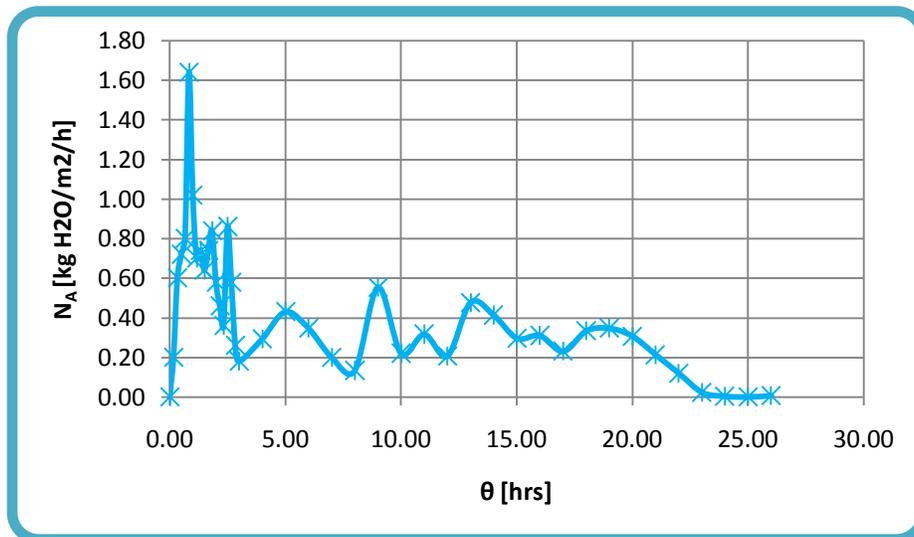


Figura 4.23 Curva de secado de heces humanas N_A vs θ

De los diagramas de las Figuras 4.21 a 4.23 se identifica:

$$X^* = 0.0028$$

$$N_{Ac} = 0.8600$$

$$\Theta = 2.5$$

$$X_c = 2.4792$$





4.2.5.1 Análisis del periodo decreciente por capilaridad:

$X_c - X^* = 2.4792 - 0.0028 = 2.4764$; para los detalles ver los datos de la Tabla A3.14 del Anexo 3.

Con base en la información obtenida de las Figuras 4.21 a 4.23 y los datos de las Tablas A3.13 y A3.14 se genera la Tabla A3.15.

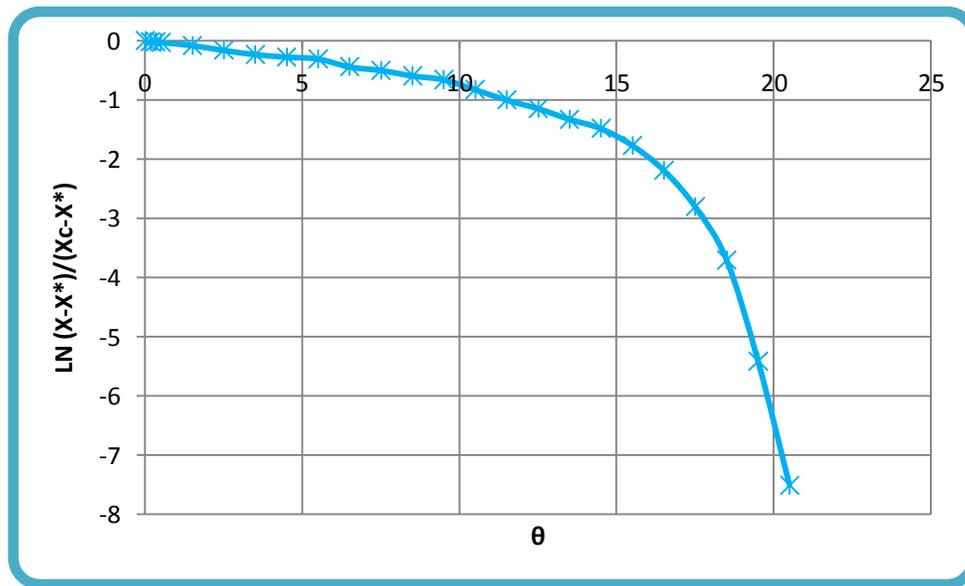


Figura 4.24 Curva de secado del periodo decreciente para capilaridad

Si controla la capilaridad la ecuación del periodo de tiempo decreciente está dada por la ecuación 2.15 o también por:

$$\theta_d = \frac{1}{K} \ln \frac{X_c - X^*}{X_f - X^*} ; \text{ en donde:}$$

$$K = \frac{-\left(\frac{dX}{d\theta}\right)}{X_c - X^*}$$

En este caso:

$$X_c = 2.4792$$

$$X^* = 0.0028$$

$$X_c - X^* = 2.4792 - 0.0028 = 2.4764$$





De los datos experimentales del período de secado constante de la Tabla A3.13 se obtiene:

$$\left(\frac{dX}{d\theta}\right)_c = 0.2839$$

$$K_{\text{teórica}} = \frac{-0.2839}{2.4764} = -0.1146$$

Para obtener el comportamiento real de la muestra se traza una línea recta en los datos experimentales y se obtiene la pendiente (ver Figura 4.24):

$$K_{\text{experimental}} = \frac{\ln 1 - \ln 0.00055}{0 - 20.5} = -0.3661$$

Este valor no es muy cercano al teórico, por lo que se podría pensar que controla la difusión.

Del proceso de secado por capilaridad se puede calcular el periodo decreciente cuando ésta controla:

Si se toma el tramo: $X - X^* = 0.1500$

Para $K_{\text{teórica}}$:

$$\theta_d = \frac{1}{0.1146} \ln \frac{2.4764}{0.1500} = 24.4671 \text{ hrs}$$

Para $K_{\text{experimental}}$:

$$\theta_d = \frac{1}{0.3661} \ln \frac{2.4764}{0.1500} = 7.6589 \text{ hrs}$$





4.2.5.2 Análisis del periodo decreciente por difusión:

Si lo que controla es la difusión entonces se tiene la ecuación 2.26 y por lo tanto:

$$\frac{D_{Ls}\theta}{d^2} \text{teórico} = \frac{4}{\pi^2} \ln \frac{X_c - X^*}{X_f - X^*}$$

De las Figuras 4.21 a 4.22 y los datos de las Tablas A3.13 y A3.14 se genera la Tabla A3.15 del Anexo 3, la cual es útil para graficar la Figura 4.25, y así analizar el proceso de difusión.



Figura 4.25 Curva de secado del periodo decreciente para difusión

Si se acepta la difusión, el coeficiente experimental será aproximadamente $1.7727 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{h}$. Aplicando lo anterior a $X - X^* = 0.1500$ se tiene que:

$$\theta_d = \frac{4(0.02)^2}{(1.7727 \times 10^{-5})(3.1416)^2} \ln \frac{2.4764}{0.1500} = 25.6419 \text{ hrs}$$





4.2.6 Corrida 6

Con los datos de la Tabla A3.16 del Anexo 3 se pueden hacer los siguientes diagramas de secado (Figuras 4.26 a 4.28):

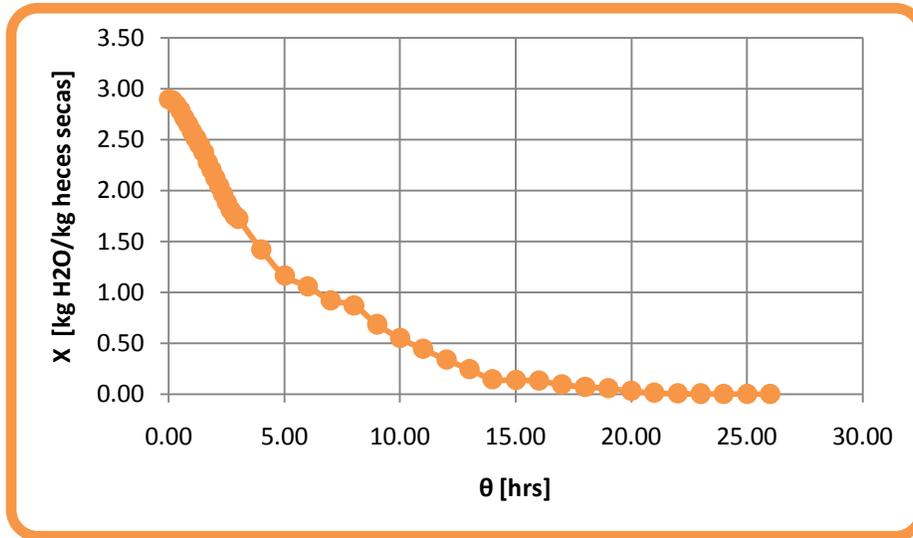


Figura 4.26 Curva de secado de heces humanas X vs θ

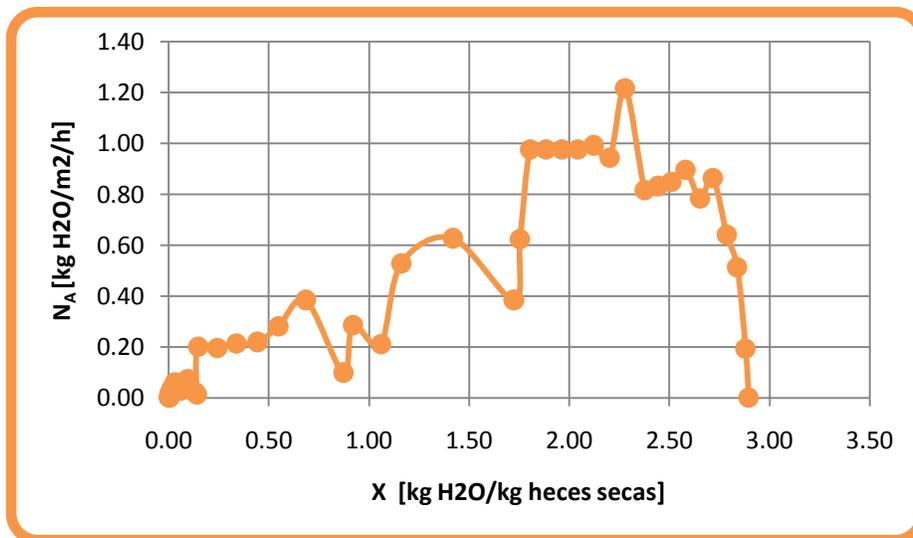


Figura 4.27 Curva de secado de heces humanas N_A vs X



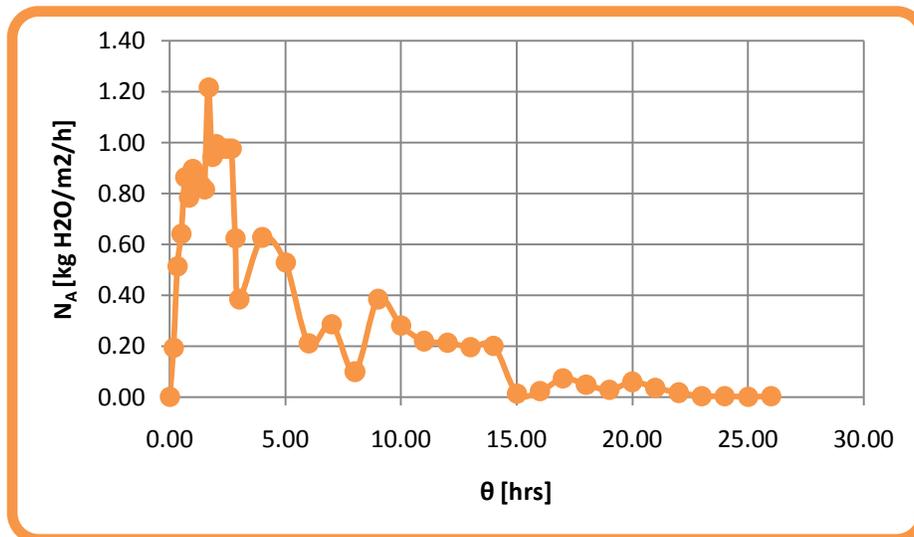


Figura 4.28 Curva de secado de heces humanas N_A vs θ

De los diagramas de las Figuras 4.26 a 4.28 se identifica:

$$X^* = 0.0013$$

$$N_{Ac} = 0.9760$$

$$\Theta = 2.1667$$

$$X_c = 1.8844$$





4.2.6.1 Análisis del periodo decreciente por capilaridad:

$X_c - X^* = 1.8844 - 0.0013 = 1.8831$; para los detalles ver los datos de la Tabla A3.17 del Anexo 3.

Con base en la información obtenida de las Figuras 4.26 a 4.28 y los datos de las Tablas A3.16 y A3.17 se genera la Tabla A3.18.

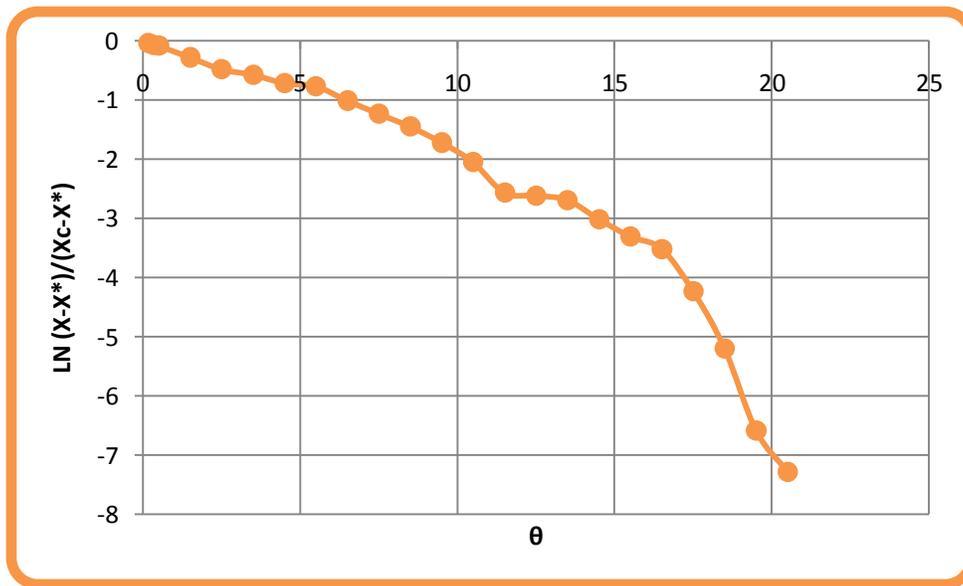


Figura 4.29 Curva de secado del periodo decreciente para capilaridad

Si controla la capilaridad la ecuación del periodo de tiempo decreciente está dada por la ecuación 2.15 o también por:

$$\theta_d = \frac{1}{K} \ln \frac{X_c - X^*}{X_f - X^*} ; \text{ en donde:}$$

$$K = \frac{-(\frac{dX}{d\theta})}{X_c - X^*}$$

En este caso:

$$X_c = 1.8844$$

$$X^* = 0.0028$$

$$X_c - X^* = 1.8844 - 0.0028 = 1.8831$$





De los datos experimentales del periodo de secado constante de la Tabla A3.16 se obtiene:

$$\left(\frac{dX}{d\theta}\right)_c = 0.3794$$

$$K_{\text{teórica}} = \frac{-0.4753}{1.8831} = -0.2015$$

Para obtener el comportamiento real de la muestra se traza una línea recta en los datos experimentales y se obtiene la pendiente (ver Figura 4.29):

$$K_{\text{experimental}} = \frac{\ln 1 - \ln 0.000689}{0 - 20.5} = -0.3551$$

Este valor no es muy cercano al teórico, por lo que se podría pensar que controla la difusión.

Del proceso de secado por capilaridad se puede calcular el periodo decreciente cuando ésta controla:

Si se considera el tramo: $X - X^* = 0.0273$

Para $K_{\text{teórica}}$:

$$\theta_d = \frac{1}{0.2015} \ln \frac{1.8831}{0.0273} = 21.0114 \text{ hrs}$$

Para $K_{\text{experimental}}$:

$$\theta_d = \frac{1}{0.3551} \ln \frac{1.8831}{0.0273} = 11.9228 \text{ hrs}$$





4.2.6.2 Análisis del periodo decreciente por difusión:

Si lo que controla es la difusión entonces se tiene la ecuación 2.26 y por lo tanto:

$$\frac{D_{Ls}\theta}{d^2} \text{teórico} = \frac{4}{\pi^2} \ln \frac{X_c - X^*}{X_f - X^*}$$

De las Figuras 4.26 a 4.28 y los datos de las Tablas A3.16 y A3.17 se genera la Tabla A3.18 del Anexo 3, la cual es útil para graficar la Figura 4.30, y así analizar el proceso de difusión.

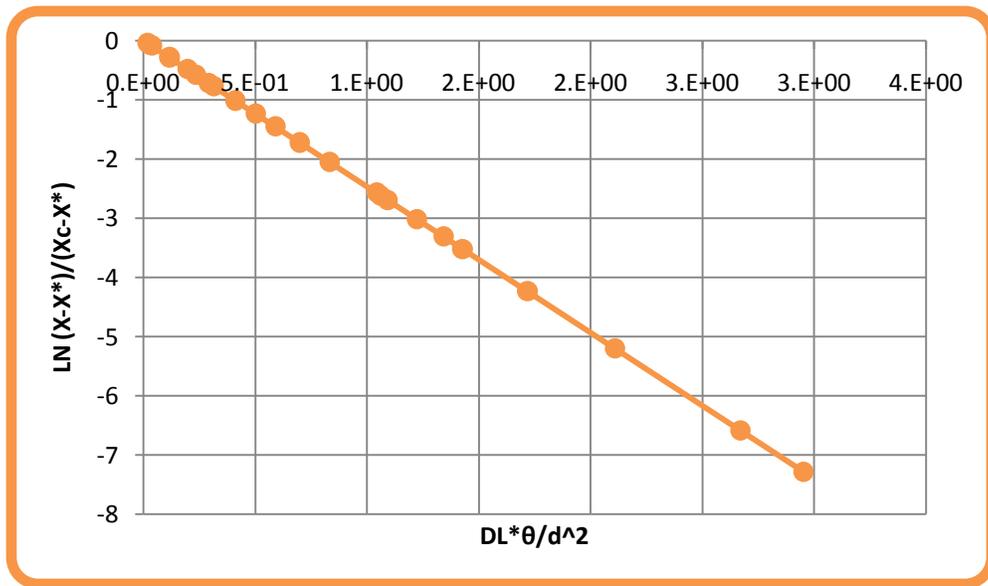


Figura 4.30 Curva de secado del periodo decreciente para difusión

Si se acepta la difusión, el coeficiente experimental será aproximadamente $8.5483 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{h}$. Aplicando lo anterior a $X - X^* = 0.0273$ se tiene que:

$$\theta_d = \frac{4(0.01)^2}{(8.5483 \times 10^{-6})(3.1416)^2} \ln \frac{1.8831}{0.0273} = 20.0728 \text{ hrs}$$





4.2.7 Resultados y análisis de las corridas de secado

Los datos de las Tablas 4.2, 4.3 y 4.4 resumen los resultados de las 6 corridas de secado. Las Tablas 4.2 y 4.2 son necesarias en conjunto con el ANEXO 3 para llegar al resultado final que se muestra en la Tabla 4.4.

Tabla 4.2 Resultados de las corridas de secado para el análisis de humedad, velocidad y tiempo en el proceso

	Corrida 1	Corrida 2	Corrida 3	Corrida 4	Corrida 5	Corrida 6	Promedios
Peso de la charola [kg]	2.129						
Área de transferencia [m²]	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.0375	-
Espesor d [m]	0.015	0.015	0.015	0.015	0.02	0.01	-
Peso heces húmedas [kg]	0.3046	0.2985	0.2989	0.2985	0.305	0.3	0.3009
Peso heces secas [kg]	0.1013	0.1037	0.0684	0.0681	0.072	0.077	0.0818
Agua inicial [kg H₂O]	0.2033	0.1948	0.2305	0.2304	0.233	0.223	0.2191
X⁽¹⁾	2.0069	1.8785	3.3699	3.3833	3.2361	2.8961	2.7951
x⁽²⁾	0.6674	0.6526	0.7712	0.7719	0.7639	0.7433	0.7284
% de humedad	66.74	65.26	77.12	77.19	76.39	74.33	72.83

$$^{(1)}X = \left[\frac{\text{kg H}_2\text{O}}{\text{kg heces secas}} \right] \quad ^{(2)}X = \left[\frac{\text{kg H}_2\text{O}}{\text{kg heces húmedas}} \right]$$





Tabla 4.3 Resultados de las corridas de secado para el análisis del periodo decreciente

	Corrida 1	Corrida 2	Corrida 3	Corrida 4	Corrida 5	Corrida 6
X^*	0	0.001	0.0029	0.0015	0.0028	0.0013
N_{a_c} [kg agua/m ² /h]	1.16	0.5167	2.02	1.3	0.86	0.9760
Θ [hrs]	3.5	5	2.5	2	2.5	2.1667
X_c	1.1994	1.1311	2.1009	2.5037	2.4792	1.8844
$X_c - X^*$	1.1994	1.1301	2.098	2.5022	2.4764	1.8831
$K_{teórica}$	-0.1733	-0.1581	-0.2268	-0.1623	-0.1146	-0.2015
$K_{experimental}$	-0.3657	-0.3565	-0.8457	-0.6225	-0.3661	-0.3551
$\left(\frac{dX}{d\theta}\right)_c$	0.2079	0.1787	0.4759	0.4060	0.2839	0.3794
D_s experimental promedio [m ² /h]	9.64×10^{-6}	1.00×10^{-5}	3.15×10^{-5}	3.03×10^{-5}	1.77×10^{-5}	8.54×10^{-6}

Tabla 4.4 Resultados de los tiempos decrecientes para las corridas de secado

Corrida	Θ_d experimental	Capilaridad				Difusión	
		$\Theta_d K_{exp}$	Error	$\Theta_d K_{teó}$	Error	Θ_d	Error
	hrs	%	Hrs	%	hrs	%	
1	21.5	5.6667	73.64	11.9579	44.38	19.6844	8.44
2	22	7.1701	67.41	16.1678	26.51	23.0920	4.96
3	14.5	4.8369	66.64	18.0359	24.39	11.8251	18.45
4	14	3.4825	75.13	13.3573	4.59	6.5148	53.47
5	23.5	7.6589	67.41	24.4671	4.12	25.6419	9.11
6	23.5	11.9228	49.26	21.0114	10.59	20.0728	14.58



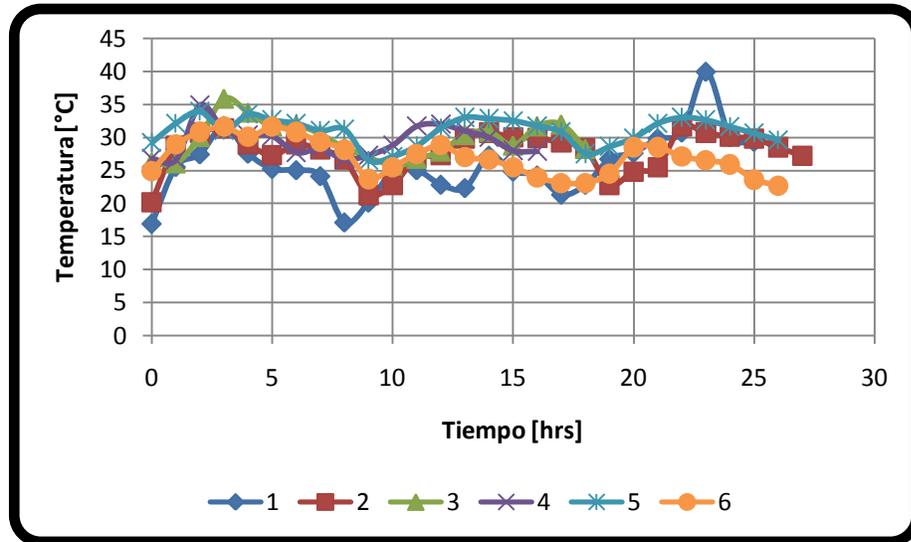


Figura 4.31 Datos de temperatura ambiente durante las 6 corridas

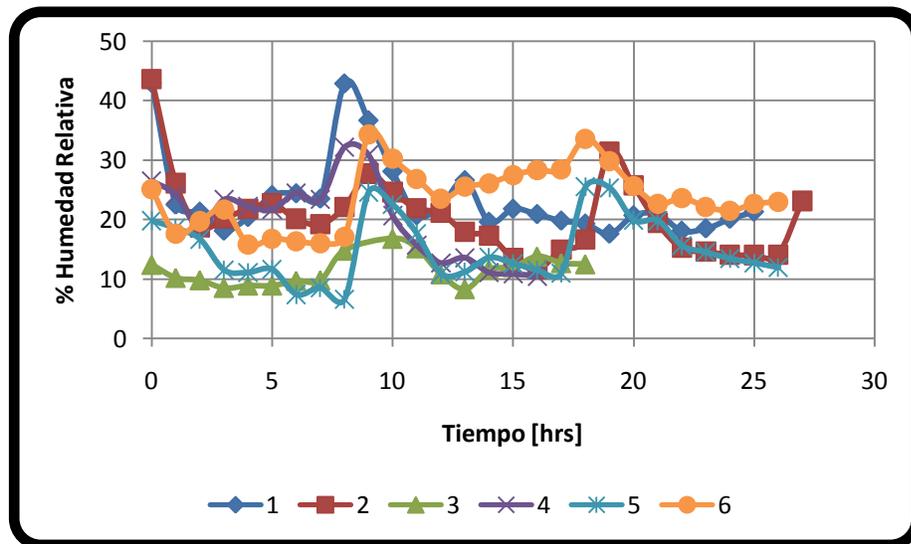


Figura 4.32 Datos de humedad relativa del ambiente durante las 6 corridas

Como resultado general de esta tesis se puede decir que es posible secar las heces humanas para tener como efecto un ahorro de agua y al mismo tiempo salvar muchos cuerpos de agua que se contaminan con ellas.

Como se puede identificar en la Tabla 4.4 de resultados de los tiempos decrecientes para las corridas de secado, el proceso que controla el secado de las heces con el dispositivo construido para este propósito es el de *difusión*.





De esta manera se considera un tiempo de secado máximo de **24 horas** efectivas, alrededor de dos días naturales, y que los tiempos mayores para el periodo decreciente son para la difusión para la cantidad de **300 g** de heces frescas sin aplicar el rayado de la muestra. También cabe mencionar que este tiempo depende del espesor del lecho y las condiciones ambientales, siendo la prueba de mayor espesor la que más tardó, como se diferencia en la Tabla 4.4 para las corridas 5 y 6.

En la corrida 6, se esperarían tiempos de secado menores, pero durante la misma llovió, sin embargo la configuración del sistema permitió, que las heces no ganaran peso sustancialmente, a esto se le atribuye que los tiempos de secado experimentales de la corrida 6 hayan sido iguales a los de la corrida 5, a pesar de que el espesor del lecho fue de la mitad de longitud, provocando un error experimental. Cabe destacar que se trató en la medida de lo posible que el lecho tuviera un espesor homogéneo, pero debido a la naturaleza del material no se pudo conseguir al cien por ciento este propósito, aún así se tuvo resultados aproximados para las corridas con las mismas características es decir, corridas 1 y 2, corridas 3 y 4 y corridas 5 y 6.

Cuando las heces pasan por un proceso de “rayado”, es decir que el área de transferencia de masa se modifica, el tiempo de secado se reduce significativamente a unas **14.5 horas** efectivas como máximo, es decir poco más de un día natural, aproximadamente la mitad de tiempo, para la misma cantidad de heces.

De esta manera se tiene una tasa de secado para este dispositivo de **0.208 Kg de heces/día en sin rayado** y **0.344 Kg de heces/día considerando el rayado que se aplicó** para un área de transferencia de **0.03m²**. El área de secado de la charola es de **0.1104 m²**, no es muy amplia, debido a ser un prototipo de secado. Por consecuencia el volumen a secar sería mayor si se aumentara el área de la charola.

Como se mencionó en los antecedentes una persona desecha aproximadamente **50 Kg** de heces base húmeda por año, si se toma esta cantidad como base de cálculo, se tiene **0.136 Kg de heces/persona/día**, es decir que





contemplando la tasa de secado del prototipo experimental descrita en el párrafo anterior, un secador solar de este tipo es suficiente para garantizar el secado de las heces de una persona. Si se desea aumentar el volumen de heces a procesar es necesario aumentar el área de secado de la charola, por ejemplo, a **1 m²** para así garantizar el volumen generado de heces de una familia de 4 integrantes, ya que el volumen de heces sería de **0.544 Kg de heces/persona/día**, y la tasa de secado aumentaría con esa área, a **0.022 Kg de heces/familia/día**, para que a pesar de la condiciones ambientales se pudiera garantizar la reducción de humedad de los residuos.

El sistema logró reducir la humedad de las heces aproximadamente un **72.83%**. Sin embargo, al terminar de secar algunas de las muestras a unos **103 – 105°C** en estufa, se logró quitar alrededor de **9.336 ± 0.09 %** de humedad extra del residuo. Tomando en cuenta que la estufa necesita energía eléctrica para su funcionamiento, y que el **9 %** extra de humedad retirada es muy poco, se considera que el secado con el dispositivo es suficiente para el fácil manejo de las heces para su posterior uso, y de esta manera utilizar únicamente de la radiación solar como fuente de energía para el secado.

Considerando otros secadores como el secador flash, el rotatorio, el de discos o el de vapor sobrecalentado, y debido a la difícil manipulación de las heces por sus características, se recomienda el uso de un dispositivo de secado parecido al estudiado en esta tesis, ya que presenta las ventajas de hacer uso nulo de energías como la eléctrica o de combustibles comunes, sin embargo se requieren mejoras para hacerlo más práctico, como el uso de un sistema que pueda despegar las heces de la superficie de la charola, ya que una vez secas son difíciles de despegar del área de transferencia de calor.

Durante las corridas de secado, en los meses de abril a mayo del 2010, se evaluaron parámetros del ambiente en el lugar de experimentación, ver Tablas A3.19 a A3.24 y Figuras 4.31 y 432, tales como temperatura y humedad relativa del aire y las temperaturas de entrada y salida del secador. Se solicitó ayuda del laboratorio de Energías Renovables y Diseño Bioclimático de la UNAM, sin embargo como se observa en las tablas mencionadas del ANEXO 3 no se tuvieron





los datos de radiación solar completos debido a problemas con el equipo de registro de la planta solar y los datos de nivel de iluminación [Lux] no son un parámetro determinante en el proceso de secado.

4.3 Alternativas de uso de las heces

4.3.1 Combustible

Como uno de los objetivos de esta tesis es mostrar que las heces pueden ser un material alternativo para la obtención de energía, es por eso que en la Tabla 4.5 se presentan ejemplos de poder calorífico de algunos combustibles comunes y en la Tabla 4.6 el de varias maderas. En la Tabla 4.7 se resumen los resultados de capacidad calorífica de las heces de este trabajo obtenidos de la descripción del inciso 3.2.

Tabla 4.5 Poder calorífico de algunos combustibles comunes

Combustible	Poder Calorífico $\frac{MJ}{Kg \text{ de material}}$
Madera (80 % de humedad)	4.1
Madera (50 % de humedad)	10.2
Viruta seca	13.4
Metanol	15
Madera (20 % de humedad)	16.2
Estiércol vacuno	17.1
Papel	17.5
Madera (seca)	20 – 21.3
Corcho	20.9
Hulla	26 – 32
Coque	26 – 35
Carbono	28
Etanol	29.6
Antracita	29.9
Diesel	42
Keroseno	43
Gas natural	44
Petróleo	44
Butano	49.5
Propano	50.6
Metano	55.8
Hidrógeno gas	143.4

(<http://onsager.unex.es/Apuntes/Termo/Tablas-Tema-3.pdf>)



**Tabla 4.6 Poder calorífico de especies vegetales (López, 2008)**

Nombre Común	Nombre Científico	Poder Calorífico (MJ/kg)				Promedio
Pasto kikuyo	Pennisetum Clandestinum	20.959	18.833	17.955	20.842	19.64725
Eucalipto 2	Eucalyptus Globulus	18.059	14.613	16.488	19.699	17.21475
Eucalipto 3	Eucalyptus Cinerea	16.809	17.722	16.454	16.794	16.94475
Cedro Blanco	Cupressus Lusitanica	21.079	20.976	19.051	23.313	21.10475
Acacia Cochliacantha	Cubata Prieta	20.976	17.786	18.081	19.365	19.052
Grevillea Robusta	Roble australiano, pino de oro.	20.514	21.302	18.73	19.658	20.051
Pasto	Pennisetum clandestinum	22.562	16.695	17.951	17.117	18.58125
Tehuiztle Rojo	Acacia Bilimekii	17.329	14.632	17.283	-	16.4146
Tehuiztle Blanco	Acacia Bilimekii	16.163	13.885	15.419	-	15.1556
Hule	Picus Elastica	20.088	18.66	16.654	-	18.4673
Jacaranda	Jacarandea Mimosifolia	17.568	20.315	19.773	-	19.2186

Tabla 4.7 Resultados de pruebas de poder calorífico para heces humanas

Muestra	Poder calorífico MJ
	Kg de heces
1	27.7977
2	22.8776
3	28.5394
4	27.1319
5	24.8857
6	34.6275
Promedio	27.6433
Desviación estándar	4.00

Si se comparan el poder calorífico de las Tablas 4.5 y 4.6 con el poder calorífico de las heces, el cual es alrededor de **27.64 ± 4 MJ/Kg de heces (ver Tabla 4.7)**, se distingue que éste último es parecido o superior al de algunas especies vegetales, lo cual lo hace buen candidato para su uso como combustible alternativo, con un 23.65% mayor de poder calorífico con respecto al cedro blanco,





que tiene el valor más alto de la **Tabla 4.6**. Si se consideran algunos combustibles comunes, se tiene un valor muy parecido a materiales como la hulla, el coque, el etanol o la antracita (ver Tabla 4.5). De esta manera es posible hacer uso de ese desecho humano y reducir los efectos ambientales que ocasionan la disposición y el tratamiento actual. Se recomienda para un estudio posterior en esta línea de investigación los gases de combustión que pueda desprender un residuo de esta naturaleza.

4.3.2 Heces como fertilizante

A continuación se hace la comparación de las características en contenidos de nutrientes de algunos residuos sólidos de animales (ver Tabla 4.8) para comparar con las heces humanas, y en la Tabla 4.9 se presenta el contenido de micronutrientes de algunos tipos de abonos orgánicos.

Tabla 4.8 Composición de diferentes tipos de estiércol (Gotaes, 1956)

Estiércol	%			
	Humedad	N	P	K
Humano	66-80	5-7	1.2-2.1	1.0-2.5
Vaca	80	1.67	1.11	0.56
Caballo	75	2.29	1.25	1.38
Oveja	68	3.75	1.87	1.25
Cerdo	82	3.75	1.87	1.25
Gallina	56	6.27	5.92	3.27
Pichón	52	5.68	5.74	3.23

Tabla 4.9 Composición química de algunos abonos orgánicos (SAGARPA, 2008)

Parámetro *	Tipo de abono orgánico					
	Vacuno	Gallinaza	Vermi-composta	Composta	Pulpa de café	Paja de arroz
Humedad	36	30	-	-	-	-
N-Total	1.5	3.7	1.1	2.1	1.68	0.5
P	0.6	1.8	0.3	1.1	0.35	0.05
K	2.5	1.9	1.1	1.6	0.36	1.38
Ca	3.2	5.6	1.6	6.5	0.50	0.22
Mg	0.8	0.7	0.5	0.6	0.64	0.11
Na	No reportado en la bibliografía					

*, por ciento





Este residuo considerado un abono orgánico, puede ser reincorporado al ciclo productivo para que las plantas obtengan nutrientes tales como C, N, P y K. El suelo con la descomposición de estos abonos, se ve enriquecido con carbono orgánico, y mejorar sus características físicas, químicas y biológicas.

Los abonos orgánicos son muy variables en sus características físicas y químicas (ver Tabla 4.9); la aplicación constante de ellos, con el tiempo, mejora las características físicas, químicas, biológicas y sanitarias del suelo.

Se recomienda para continuar con la línea de investigación de las heces como fertilizante, realizar un estudio microbiológico de las heces anterior y posteriormente al proceso de secado, para garantizar su uso seguro como acondicionador de suelos.

Considerando los resultados de la caracterización de la Tabla 4.1 de las heces se tienen los siguientes porcentajes de contenido de nutrientes en ellas:

N = 53.31 ± 4.71 g N-Total/Kg de heces ≈ 5.3 % de N-Total

P = < 0.0000049 g PO₄/Kg de heces ≈ 0.0000049 % de P

K = 22.76 ± 2.97 g K-7Kg de heces ≈ 2.2 % de K

Ca = 13.09 ± 2.44 g Ca/Kg de heces ≈ 1.3 % de Ca

Mg = 2.83 ± 0.83 g Mg/Kg de heces ≈ 0.28 % de Mg

Na = 2.24 ± 0.98 g Na/kg de heces ≈ 0.22 % de Na

Como se puede observar, las heces tienen un mayor contenido de los principales nutrientes (N, P, K), en comparación con abonos como el vacuno, el caballo, ovino y porcino (ver Tabla 4.8), pero un bajo contenido en micronutrientes (Ca, Mg y Na), los cuales son bastos en la orina. Por tal razón, debido a que las heces se consideran como desecho, se deben incorporar al ciclo productivo aprovechando en la agricultura los nutrientes que contiene, y, de esa manera, disminuir la contaminación de los cuerpos de agua, o facilitar el tratamiento de las aguas residuales como se especifica en los antecedentes.

Es muy importante recalcar que el uso de los abonos orgánicos es imprescindible, ya que el uso de fertilizantes químicos propicia que el suelo sufra





de un agotamiento acelerado de materia orgánica y de un desbalance nutricional, y que al transcurrir el tiempo pierda su fertilidad y capacidad productiva.

Es por eso que, se propone el uso de las heces como abono para mejorar y mantener los componentes orgánicos del suelo, las características de sus entidades vivientes, su fertilidad física, química y biológica y por consiguiente su productividad.

Contemplando las cantidades mencionadas en el inciso 4.2.7 de tasa de secado y contenido de humedad de las heces, es decir **≈50 Kg de heces base húmeda/persona/año** y contenido de humedad de **≈72.83% de humedad** reducida con el prototipo, considerando que las heces se pueden usar como acondicionador de suelos, se tiene una producción anual de **13.58 Kg heces secas/persona/año**, la cual se puede extrapolar para una cantidad determinada de pobladores, por ejemplo de un área rural. Ejemplo para una población de 20,000 habitantes: 13.58 Kg de heces/persona/año x 20,000 personas = 272.6 toneladas de heces/persona/año.

Es importante explicar que para asegurar que este sea un material seguro en un futuro para la industria agrícola se necesitan hacer estudios de contaminantes emergentes que podrían estar presentes en las heces tales como, fármacos, esteroides y hormonas, todos estos son contaminantes no regulados que pueden ser candidatos a regulación futura, dependiendo de investigaciones sobre sus efectos potenciales en la salud y los datos de monitoreo con respecto a su incidencia (Becerril, 2009).

4.3.3 Heces en la acuicultura

La acuicultura al igual que otras actividades productivas requiere de insumos, utiliza espacios y genera desechos. La fertilización del agua utilizada para la crianza de especies acuáticas o algunas plantas es una práctica común en los sistemas semiintensivos y tiene la finalidad de aumentar la productividad natural mediante la adición de nutrientes que pueden ser de origen orgánico e inorgánico. Los más usados en el cultivo de camarón y peces son los inorgánicos





(en diferentes combinaciones de nitrógeno, fósforo y potasio) (Strauss y Blumenthal, 1990).

A pesar de que la fertilización logra aumentar la producción, su uso desmedido es posible que deteriore las condiciones del suelo y agua y su efecto debería ser verificado también en términos de calidad del agua efluente y del cuerpo de agua receptor, y no solamente en términos de producción de los estanques.

Es por eso que se propone el uso de las heces humanas como alimentación para productos acuáticos, una vez que éstas se encuentran secas.

Cabe destacar, que de acuerdo a la bibliografía, los agentes patógenos existentes en las heces pueden ser inactivados con una temperatura aproximada a los 60° C, la cual es posible alcanzar con el dispositivo utilizado en esta tesis.

Las alternativas de uso de las heces humanas presentadas en este trabajo son aunadas a los ejemplos mencionados en el capítulo 1. Es posible que con el transcurso del tiempo y la escasez de los recursos se evalúen otras alternativas que garanticen el aprovechamiento sustentable de los recursos.





CAPÍTULO 5: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1 CONCLUSIONES

El proceso que controla el secado solar de las heces es el de *difusión*, con tiempos máximos del proceso de **14.5 a 24 hrs, es decir**, de 1 a 2 días naturales como máximo para una cantidad promedio de **0.3 Kg** de heces en base húmeda. Lo que se traduce en una tasa de secado de **0.208 Kg de heces/día a 0.344 Kg de heces/día** por un área de transferencia de **0.03m²**, dependiendo de las condiciones ambientales. Esta tasa garantiza la reducción de humedad para una persona por día.

El sistema logró reducir la humedad de las heces aproximadamente un **72.83%**, sin necesidad de alguna energía extra, más que la solar.

Las heces son una buena fuente de energía alternativa con un poder calorífico de **27.64 ± 4 MJ/Kg de heces**, el cual es un 23.65% mayor que algunas maderas tales como el cedro blanco, que en estudios es el que mayor poder calorífico presenta, y por otro lado presentan la heces el mismo poder calorífico que algunos combustibles comunes como el coque o el etanol.

Una vez que las heces pasan por el proceso de secado, se convierten en un material más fácil de manejar. Debido a las cantidades de nutrientes que estas contienen tales como C, N, P y K son un nutrimento idóneo para la agricultura o acuicultura. Sin embargo es necesario contemplar en un futuro un estudio microbiológico antes y después del secado, además de tener presentes los contaminantes emergentes, que en la mayoría de los casos corresponden a contaminantes no regulados, que pueden ser también candidatos a regulación futura, dependiendo de investigaciones sobre efectos potenciales en la salud y los datos de monitoreo con respecto a su incidencia, para no correr riesgos en recomendar ampliamente este residuo para su posterior uso.





Por otro lado existen varias desventajas en el manejo de este residuo que convendría analizar en un futuro. La principal es la aceptación de la mayoría de la población para las diversas alternativas de uso que existen para las heces, ya que en nuestra sociedad son vistas con desagrado y únicamente como producto de desecho.

El segundo inconveniente de las heces es el olor que despiden una vez expulsadas del cuerpo, el cual prevalece durante el proceso de secado, sin embargo, se reduce considerablemente una vez que éstas han disminuido su contenido de humedad y se encuentran casi al cien por ciento secas. Una vez que sucede esto, son fáciles de manejar.

5.2 RECOMENDACIONES

Debido a su viscosidad, de seguir utilizando este prototipo experimental es necesario implementar un dispositivo que desprenda las heces de la charola, y de esta manera tener menos contacto con las mismas y no estar expuestos a infecciones.

Es necesario realizar un estudio posterior de los gases de combustión que pueda desprender un residuo de esta naturaleza, y así poder utilizarlo como combustible alternativo.

Se recomienda hacer un estudio microbiológico de las heces anterior y posterior al secado, así como un análisis de contaminantes emergentes.





REFERENCIAS

- Almanza Salgado R. y Muñoz Gutiérrez F. (1994). *Ingeniería de la Energía Solar*, primera edición, El Colegio Nacional, México. ISBN 968-6664-79-5.
- Amos W. (1998). *Report in Biomass Drying Technology*. National Renewable Energy Laboratory. NREL/TP-570-25885.
- Augustus Leon M., Kumar S. y Bhattacharya S.C. (2002). *A comprehensive procedure for performance evaluation of solar food dryers*. Renewable and Sustainable Energy Reviews., **6** (4),367-393.
- AWWA, Métodos Normalizados, Para el análisis de aguas potables y residuales, (1992). Preparado y publicado conjuntamente por: AMERICAN PUBLIC HEALTH ASSOCIATION (APHA), AMERICAN WATER WORKS ASSOCIATION (AWWA), WATER POLLUTION CONTROL FEDERATION (WPCF),
Título original: <<Standard Methods>> for the examination of water and wastewater, edición 17, Ediciones Díaz de Santos, S. A., 1992.
- Becerril Bravo, J.E. (2009). *Contaminantes emergentes en el agua*. Revista Digital Universitaria (UNAM)., **10** (8),1-7.
- CONAGUA, Comisión Nacional del Agua. (2008). *Estadísticas del Agua en México*. SEMARNAT, ISBN 978-968-817-895-9.
- CONAPO, Consejo Nacional de Población. (2005). *Proyecciones de la población de México 2005-2050*. ISBN 970-628-865-1.
- Driver J., Lijmbach D. y Steen I. (1999). *Why recover phosphorus for recycling, and how?*. Environmental Technology., **20**,651-662.
- Ekechukwu O.V. y Norton B. (1999). *Review of solar-energy drying systems II: an overview of solar drying technology*. Energy Conversion and Management., **40**(6),615-655.





- Esrey S., Andersson I., Hillers A. y Sawyer R. (2001). *Cerrando el Ciclo – Saneamiento ecológico para la seguridad alimentaria*. Publicaciones sobre Recursos Hídricos No. 18. ISBN 968-5427-0-X.
- Esrey S., Winblad U., Gough J., Rapaport D., Sawyer R., Mayling S. y Vargas J. (1998). *Saneamiento Ecológico*, tr. de la 1ª. edición en inglés *Ecological Sanitation*, Asdi, Estocolmo 1998. ISBN 968-6823-49-2
- Esrey S. y Andersson I. (2001). *Ecological sanitation, closing the loop*. *Urban Magazine.*, **1**(3), 35-37.
- Gjzen H. (2001). *Low cost wastewater treatment and potentials for re-use – A cleaner production approach to wastewater management*. International Institute for Hydraulic, Infrastructural and Environmental Engineering (IHE), Netherlands.
- Gotaas H. B. (1956), *Composting-Sanitary disposal and reclamation of organic wastes*. World Health Organization. Monograph Series Number 31, Geneva, pp. 37, 40.
- Heinonen-Tanski H. and Van Wijk-Sijbesma C. (2004). *Human excreta for plant production*. *Bioresource Technology.*, **96**, 403-405.
- Holman J.P. (1981). *Métodos experimentales para ingenieros*, traducido de la tercera edición en inglés de *Experimental Methods for Engineers*, McGraw-Hill (ed), México. ISBN 0-07-029601-4.
- Hwang D.F. y Lu Y.H. (2000). *Influence of environmental and nutritional factors on growth, toxicity, and toxin profile of dinoflagellate Alexandrium minutum*. *Toxicon*, **38**, 1491-1503.
- Jannot Y. y Coulibaly Y. (1998). *The evaporative capacity as a performance index for a solar-drier air-heater*. *Solar Energy.*, **63**(6), 387-391.
- Jönsson H., Stintzing R., Vinneras B. y Salomon E. (2004). *Lineamientos para el uso de la orina y heces en la producción de cultivos*. Serie de Publicaciones de EcoSanRes. IAE (Instituto Ambiental de Estocolmo), Suecia. ISBN 91 88714 94 2.





- Jönsson H., Baky A., Jeppsson U., Hellström D. y Kärrman E. (2005). *Composition of urine, faeces, greywater and biowaste for utilization in the URWARE model*. Dept. of Industrial Electrical Engineering and Automation, Chalmers University of Technology, Gothenburg, Suecia.
- Kern D.Q. (1999). *Procesos de transferencia de calor*, Trigésima Primera Reimpresión, Compañía Editorial Continental, S.A. de C.V.
- Laak R. (1986). *Wastewater engineering design for unsewered areas*. Technomic Publishing Company, Inc. Lancaster, Pennsylvania 17604 U.S.A. ISBN 87762-462-3.
- LA SANTA BIBLIA, Deuteronomio 23: 12+13. 120.^a Edición, Verbo divino (ed).
- Lorimer M.A. (2007). *Design and Operation criteria for urine-diversion ecological sanitation systems with particular reference to public health*, Faculty of Engineering, Built Environmental and Information Technology, University of Pretoria, Pretoria.
- Matsui S. (1997). *Nightsoil collection and treatment in Japan*. Paper presented at the Sida Sanitation Workshop, August 6-9 at Balingsholm, Stockholm, Sida Report No.9.
- Mnkeni PNS. Y Austin LM. (2009). *Fertiliser value of human manure from pilot urine-diversion toilets*, Water SA., **35**(1),133-138.
- Montero I. (2005). *Modelado y construcción de un secadero solar híbrido para residuos biomásicos*, Tesis Doctoral, Universidad de Extremadura, España.
- Nonhebel M.A. y Moss H. (1979). *El secado de sólidos en la industria química, título de la obra original Drying of Solids in the Chemical Industry*, Reverté (ed).
- Otto K. (2008). *Anthropogenic Plant Nutrients as Fertiliser*, Institut für Pflanzenbauwissenschaften, Humboldt-Universität zu Berlin, pp.14 – 18.
- Perry, *Manual del Ingeniero Químico* (1986), Sexta Edición (Tercera edición es español), Tomo V, Mc Graw Hill (ed).





- Robertson L.J., Campell A.T. y Smith H.V. (1993). *Survival of Cryptosporidium parvum oocysts under various environmental pressures*, Applied and Environmental Microbiology., **58**(11), 3493-3500.
- SAGARPA, Secretaría de agricultura, ganadería, desarrollo rural pesca y alimentacion. (2008). Subsecretaría de Desarrollo Rural, Dirección General para el Desarrollo Rural, *Abonos orgánicos*.
- Schönning C. y Stenström T.A. (2004). *Lineamientos para el uso seguro de la orina y de las heces en sistemas de saneamiento ecológico*, Serie de Publicaciones de EcoSanRes, IAE (Instituto Ambiental de Estocolmo), Suecia. ISBN 91 88714 93 4.
- Schouw N.L., Danteravanich S., Mosbaek H. y Tjell J.C. (2002). *Composition of human excreta – a case study from Southern Thailand*, The Science of Total Environment., **286**, 155-166.
- Strauss M. y Blumenthal J. (1990). *Human waste in agriculture and aquaculture*, IRCWD (International Reference Centre for Waste Disposal) Report no. 09/90, Duebendorf, Switzerland.
- Tiris C., Tiris M.y Dincer I. (1995). *Investigation of the thermal efficiencies of a solar dryer*, Energy conversion and Management., **36**(3), 205-212.
- Treybal R.E. (1968). *Operaciones de transferencia de masa*, segunda edición, McGraw-Hill (ed).
- Valiente A. (2002). *Secado*. UNAM, México.
- Valencia Bonilla N.T. (2008). *Secado Solar de Lodos*, Tesis de Maestría, UNAM, México.
- Vinnerås B., Björklund A. y Jönsson H. (2003a). *Thermal composting of faecal matter as treatment and possible disinfection method – laboratory scale and pilot scale studies*. Bioresource Technology., **88**(1), 47-54.
- Vinnerås B., Holmqvist A., Bagge E., Albiñ A. y Jönsson H. (2003b). *The potential for disinfection of separated faecal matter by urea and by peracetic acid for hygienic nutrient recycling*. Bioresource Technology., **89**(2), 155-161.





- Vinnerås B., Palmquist H., Balmer P. y Jönsson H. (2006). *The characteristics of household wastewater and biodegradable solid waste – A proposal for new Swedish design values*. Urban Water Journal., **3**(1),3-11.
- Winblad U. y Simpson-Hébert M. (2004). *Ecological sanitation – revised and enlarged edition*. IAE (Instituto Ambiental de Estocolmo), Suecia. ISBN 91 88714 98 5.





Anexo 1

Método de obstrucción de flujo

Este método consiste en determinar el flujo de aire que genera el ventilador de la marca KMEX, Modelo DF0802512SEMN, por medio de una celda de presión diferencial modelo 600D2*12020 de la marca AUTO TRAN INCORPORATED (ver fotografías de las figuras A1.1) y A1.2). Para cuantificar el flujo fue necesario que primero se hiciera una curva de calibración, con objeto de saber el intervalo de lectura de la celda en mA. Los mA leídos se relacionan linealmente con las pulgadas de agua de la curva de calibración. Con la ecuación de la recta se calcularon los valores de diferencial de presión para finalmente sustituirlos en la ecuación A1.4.



(A1.1)



(A1.2)

Figura (A1.1) y (A1.2) Instalación para las mediciones a diferentes voltajes y diferentes posiciones de las mangueras de la celda de presión

En la figura A1.3 mostrada a continuación se representa el sistema de flujo unidimensional, así como la posición de las mangueras de la celda de presión para las diferentes mediciones señaladas en las tablas A1.1 y A1.2.



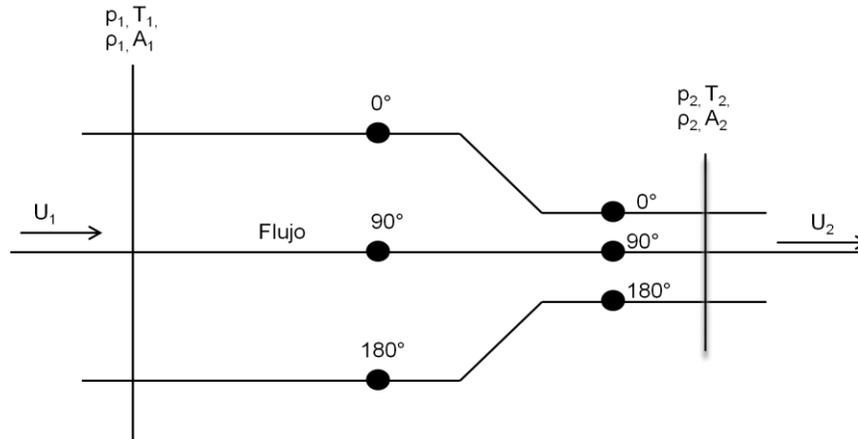


Figura A1.3 Esquema del sistema general de flujo unidimensional y las diferentes posiciones de lectura en ángulos diversos

Considerando el sistema de flujo unidireccional como el que se representa en la Figura A1.3, la ecuación de continuidad para esta situación es

$$m = \rho_1 A_1 u_1 = \rho_2 A_2 u_2 \quad (A1.1)$$

en donde u es la velocidad. Si el flujo es adiabático y sin fricción y el fluido es incompresible, podemos escribir la ecuación de Bernoulli

$$\frac{p_1}{\rho_1} + \frac{u_1^2}{2g_c} = \frac{p_2}{\rho_2} + \frac{u_2^2}{2g_c} \quad (A1.2)$$

en donde, las densidades se consideran igual ($\rho_1 = \rho_2$). Haciendo simultáneas las ecuaciones 1 y 2 se tiene, para la caída de presión

$$p_1 - p_2 = \frac{u_2^2 \rho}{2g_c} \left[1 - \left(\frac{A_2}{A_1} \right)^2 \right] \quad (A1.3)$$

y el gasto volumétrico se puede escribir como

$$Q = A_2 u_2 = \frac{A_2}{\sqrt{1 - (A_2/A_1)^2}} \sqrt{\frac{2g_c}{\rho} (p_1 - p_2)} \quad (A1.4)$$





donde:

$$Q = [\text{ft}^3/\text{seg}]$$

$$A = [\text{ft}^2]$$

$$\rho = [\text{lb}_m/\text{ft}^3]$$

$$p = [\text{lb}_f/\text{ft}^2]$$

$$g_c = 32.17 [\text{lb}_m\text{-ft}/\text{lb}_f\text{-seg}^2]$$

De lo anterior se puede concluir que una configuración como la que aparece en la figura A1.1 podría utilizarse para medición de gasto, efectuando una simple medición de la caída de presión (p_1-p_2), para luego calcular el gasto por medio de la ecuación (A1.4).

En la tabla A1.1 se resumen los datos obtenidos de las pruebas con la celda de presión, los cuales se representan gráficamente en la figura A1.4. Cabe mencionar que para el intervalo de flujo que maneja el ventilador, únicamente se utilizaron los dos primeros puntos de la curva de calibración, de lo contrario se cae en presiones negativas, lo que al final se traduce en flujos negativos, lo cual no es lógico.

Tabla A1.1 Curva de calibración de la celda de presión diferencial

Curva de calibración	
pulg. H2O	mA
0	4.4
1/4	18.01
1/2	21.5
3/4	24.9
1	26.52



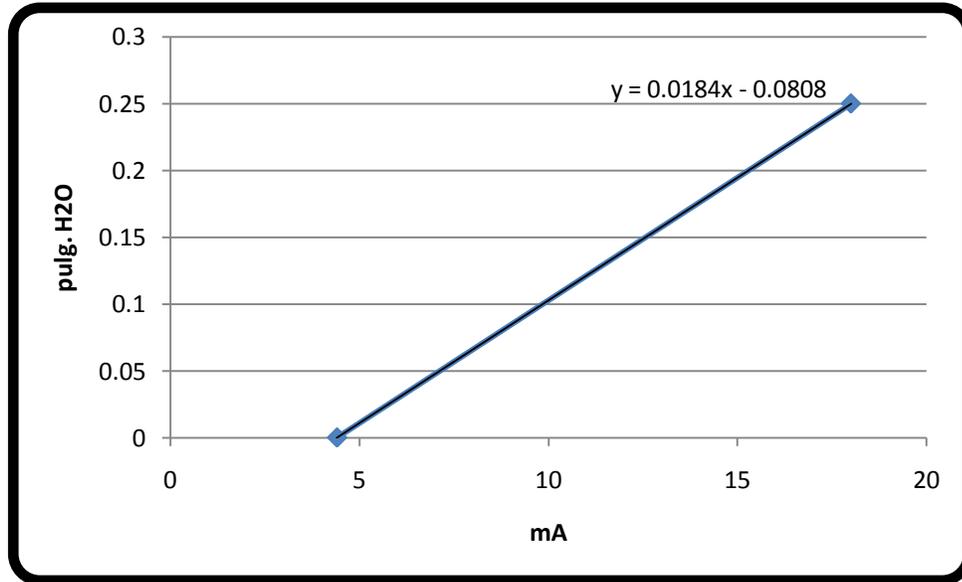


Figura A1.4 Gráfica resultante de la medición a diferentes presiones de la celda de presión, únicamente considerando los dos primeros puntos, ya que es donde el ventilador trabaja

Ecuación de la recta tomada de los dos primeros puntos

$$Y = 0.0184 x - 0.0808$$

La tabla A1.2 describe la posición de las mangueras así como la distancia de colocación de las mismas, mostrando gráficamente en la figura A1.3. Las distancias indicadas son a partir de la reducción del sistema tanto hacia la parte izquierda como la derecha del sistema de flujo unidimensional.

Tabla A1.2 Intensidad de corriente medida a diferentes voltajes, diversas distancias de colocación de las mangueras y ángulos.

Distancia/colocación	Alimentación	Intensidad de corriente		
1"/90°	12 V	5.4	5.24	5.20
2"/90°		5.27	5.20	5.14
1"/180°	9 V	4.96	4.91	4.98
2"/180°		5.00	4.98	4.98
1"/0°	6 V	4.70	4.67	4.66
2"/0°		4.70	4.73	4.65
		mA		





De acuerdo a la curva de calibración y la ecuación de la recta se tiene la siguiente tabla A1.3, la cual representa las diferencias de presión en pulg de H₂O equivalente a la intensidad de corriente señalada por la celda de presión en la tabla A1.2.

Tabla A1.3 Presión calculada por medio de la ecuación de la curva de calibración en plg H₂O

Distancia/colocación	Alimentación	Δ Presión		
1"/90°	12 V	0.019	0.016	0.015
2"/90°		0.016	0.015	0.014
1"/180°	9 V	0.010	0.010	0.011
2"/180°		0.011	0.011	0.011
1"/0°	6 V	0.006	0.006	0.005
2"/0°		0.006	0.005	0.005
		plg H₂O		

Convirtiendo las **plg H₂O** a **Lb_f/ft²** se tiene la siguiente tabla A1.4, la cual es equivalente a la tabla A1.3 con la diferencias de las unidades de caída de presión.

Tabla A1.4 Caída de presión en Lb_f/ft²

Distancia/colocación	Alimentación	Δ Presión		
1"/90°	12 V	0.098	0.083	0.077
2"/90°		0.083	0.077	0.072
1"/180°	9 V	0.051	0.051	0.057
2"/180°		0.057	0.057	0.057
1"/0°	6 V	0.031	0.031	0.025
2"/0°		0.031	0.025	0.025
		Lb_f/ft²		

Calculando con la ecuación (A1.4) se presenta la tabla A1.5, la cual muestra el flujo volumétrico calculado con las diferentes caídas de presión. De igual manera se indican las mediciones hechas a diferentes distancias y ángulos del sistema de flujo unidimensional.





donde:

$$Q = \text{ft}^3/\text{seg}$$

$$A_1 = 0.1023 \text{ ft}^2$$

$$A_2 = 0.0220 \text{ ft}^2$$

$$\rho = 0.0749 \text{ lb}_m/\text{ft}^3$$

$p = \text{lb}_f/\text{ft}^2$ en realidad es la diferencial de intensidad de corriente del método, por lo tanto equivale a la diferencial de presión de la ecuación)

$$g_c = 32.17 \text{ lb}_m\text{-ft}/\text{lb}_f\text{-seg}^2$$

Tabla A1.5 Flujo volumétrico del ventilador calculado por medio de la ecuación A1.4

Distancia/colocación	Alimentación	Flujo volumétrico		
1"/90°	12 V	0.207	0.190	0.183
2"/90°		0.190	0.183	0.177
1"/180°	9 V	0.149	0.149	0.158
2"/180°		0.158	0.158	0.158
1"/0°	6 V	0.116	0.116	0.104
2"/0°		0.116	0.104	0.104
		Ft³/seg		

Finalmente a la entrada o salida del colector se puede colocar una placa con orificios.

Para asegurar que la placa tenga la misma área útil de entrada o de descarga se perforó con una broca 13/64 pulg para garantizar el área útil.

$$\text{Área real ventilador} = 39.5 \text{ cm}^2$$

$$\text{Área de la placa con orificios} = 43.68 \text{ cm}^2$$





ANEXO 2

En este anexo se muestran las tablas con los resultados de las pruebas de en el laboratorio para la caracterización de las heces, los cuales se resumen en la Tabla 4.1

A2.1 Humedad de las heces secadas únicamente por medio de radiación solar

Tabla A2.1 Resultados de secado de heces únicamente por medio de radiación solar

Muestra	Peso inicial (g)	Peso final (g)	% Humedad removida
1	48.9	17.3	64.62
2	112.9	29.5	73.87
3	108.4	32.4	70.11
4	83	25.5	69.28
5	93.1	23.9	74.33
6	134	36.2	72.99
7	110.9	31.8	71.33
8	199.4	48.1	75.88
19	116.6	32.4	72.21
10	162.5	48.6	70.1
Promedio	116.5	48.6	71.47
Desviación estándar	-	-	3.19

$$\% \text{ de humedad removida} = 100 - \left(\frac{\text{Peso final} \cdot 100}{\text{Peso inicial}} \right)$$





A2.2 Humedad de las heces del inciso A2.1 con un posterior secado en estufa a 103 – 105°C

Tabla A2.2 Resultados de pruebas de sólidos totales para heces humanas

Muestra	Peso inicial [g]	Peso final [g]	% de humedad removida
1	2.0184	1.8297	9.349
2	3.0025	2.7250	9.242
3	3.9981	3.6202	9.452
4	5.0154	4.5489	9.301
Promedio	3.5086	3.1810	9.336
Desviación estándar	-	-	0.09

$$\% \text{ de humedad removida} = 100 - \left(\frac{\text{Peso final} \cdot 100}{\text{Peso inicial}} \right)$$

A2.3 Sólidos volátiles (SV)

Tabla A2.3 Resultados de pruebas de sólidos volátiles para heces humanas

Muestra	Peso inicial [g]	Peso final [g]	% de sólidos volátiles
1	1.8297	1.6173	88.392
2	2.7230	2.4054	88.336
3	3.6202	3.1853	87.987
4	4.5489	3.8527	84.695
Promedio	3.1805	2.7652	87.353
Desviación estándar	-	-	1.78

$$\% \text{ de sólidos volátiles} = \frac{\text{Peso final} \cdot 100}{\text{Peso inicial}}$$





A2.4 Sólidos fijos (SF)

Tabla A2.4 Resultados de pruebas de sólidos fijos para heces humanas

Muestra	Peso inicial [g]	Peso final [g]	% de sólidos fijos
1	1.8297	0.2124	11.608
2	2.7230	0.3176	11.664
3	3.6202	0.4349	12.013
4	4.5489	0.6962	15.305
Promedio	3.1805	0.4153	12.648
Desviación estándar	-	-	1.78

$$\% \text{ de sólidos fijos} = \frac{\text{Peso final} \cdot 100}{\text{Peso inicial}}$$

A2.5 Demanda química de oxígeno (DQO)

Tabla A2.5 Resultados de DQO para heces humanas en dilución

Muestra	Dilución	mg DQO	g DQO
	$\frac{\text{g de heces}}{\text{Litro}}$	g de heces	Kg de heces
1	1.0392	1576.21	1576.21
2	1.0392	1691.69	1691.69
3	1.0392	1486.72	1486.72
4	1.0392	1550.23	1550.23
Promedio		1576.21	1576.21
Desviación estándar		85.67	85.67

Tabla A2.6 Resultados de DQO para heces humanas secas

Muestra	Peso directo [g]	mg DQO	g DQO
		g de heces	Kg de heces
1	0.0016	1399.62	1399.62
2	0.0017	2021.16	2021.16
3	0.0023	1074	1074.00
Promedio		1498.26	1498.26
Desviación estándar		481.22	481.22





A2.6 Demanda bioquímica de oxígeno (DBO)

Tabla A2.7 Resultados de DBO para heces humanas en dilución

Muestra	Dilución	mg DBO	g DBO
	$\frac{\text{g de heces}}{\text{Litro}}$	$\frac{\text{g de heces}}{\text{g de heces}}$	$\frac{\text{Kg de heces}}{\text{Kg de heces}}$
1	1.0392	307.93	307.93
2	1.0392	327.17	327.17
3	1.0392	327.17	327.17
4	1.0392	288.68	288.68
5	1.0392	269.44	269.44
6	1.0392	288.68	288.68
Promedio		301.51	301.51
Desviación estándar		23.31	23.31

Tabla A2.8 Resultado de DBO para heces humanas secas

Muestra	Peso directo [g]	mg DBO	g DBO
		$\frac{\text{g de heces}}{\text{g de heces}}$	$\frac{\text{Kg de heces}}{\text{Kg de heces}}$
1	0.1015	443.35	443.35
2	0.1186	474.37	474.37
3	0.1024	568.36	568.36
4	0.1008	558.13	558.13
5	0.1062	602.82	602.82
6	0.1048	499.81	499.81
Promedio		524.47	524.47
Desviación estándar		61.48	61.48

A2.7 Carbono total (CT)

Tabla A2.9 Resultado de CT para heces humanas secas

Muestra	$\mu\text{g CT}$
	$\frac{\text{Kg de heces}}{\text{Kg de heces}}$
1	6.73
2	29.82
3	3
Promedio	13.8
Desviación estándar	14.53





A2.8 Nitrógeno total

Tabla A2.10 Resultados de Nitrógeno Total para heces humanas

Muestra	Peso [g]	ml H ₂ SO ₄ de titulación	mg N Total	g N Total
			Kg de heces	Kg de heces
1	0.1025	23.5	64195.12	64.195
2	0.1019	17.6	48361.14	48.361
3	1.1079	19.9	51640.41	51.64
4	0.1052	19.5	51901.14	51.901
5	0.1023	17.7	48445.75	48.445
6	0.1031	19.1	51871.97	51.871
7	0.0525	10.1	53866.67	53.866
8	0.0525	10.3	54933.33	54.933
9	0.0513	10	54580.90	54.58
Promedio			53310.71	53.31
Desviación estándar			4717.50	4.72

$$\text{Nitrógeno total} = \frac{(V_{\text{H}_2\text{SO}_4})(0.02 \text{ N})(14)(1000)}{g_{\text{heces}}} = \frac{\text{mg N Total}}{\text{Kg de heces}} = \text{ppm N-Total}$$

A2.9 Ortofosfatos

Tabla A2.11 Resultados de Ortofosfatos para heces humanas

Muestra	Peso Muestra	$\frac{\text{mg PO}_4}{\text{L}} *$	ppm PO ₄
1	0.1049	< 0.05	< 0.049
2	0.2032	< 0.05	< 0.049
3	0.5088	< 0.05	< 0.049
4	1.0207	< 0.05	< 0.049
5	2.0155	< 0.05	< 0.049
Promedio	-	-	-
Desviación estándar	-	-	-

*Límite de detección del equipo: 0.05 – 5.00 mg/l



A2.10 Potasio (K⁺)Tabla A2.12 Resultados de potasio (K⁺) para heces humanas

Muestra	Peso Muestra	Dilución	$\frac{\text{mg K}^+}{\text{L}}$ *	ppm K ⁺
1	0.1049	1:100	20.5	24186,17
2	0.2032	1:10	41.7	25398,09
3	0.5088	1:10	93.9	22840,58
4	1.0207	1:10	146	17702,86
5	2.0155	1:10	386	23702,44
Promedio	-	-	-	22766,03
Desviación estándar	-	-	-	2977,53

*Límite de detección del equipo: 0.83 – 20 mg/l

$$\frac{\text{mg K}^+}{\text{L}} \times \frac{1\text{L}}{1000 \text{ ml}} = \frac{\text{mg K}^+}{\text{ml}} \times \frac{100 \text{ ml}}{\text{peso muestra}} = \frac{\text{mg K}^+}{\text{g heces}} \times \frac{1000 \text{ g heces}}{1 \text{ Kg heces}} = \text{ppm K}^+$$

A2.11 Calcio (Ca²⁺)Tabla A2.13 Resultados de calcio (Ca²⁺) para heces humanas

Muestra	Peso Muestra	Dilución	$\frac{\text{mg Ca}^{2+}}{\text{L}}$	ppm Ca ²⁺
1	0.1049	1:100	16,2	15443,279
2	0.2032	33:100	25,3	12450,787
3	0.5088	1:10	59,4	11674,528
4	1.0207	1:10	103,3	10120,506
5	2.0155	50:100	317,7	15762,838
Promedio	-	-	-	13090,39
Desviación estándar	-	-	-	2445,00

*Límite de detección del equipo: 0.092 – 4 mg/l

$$\frac{\text{mg Ca}^{2+}}{\text{L}} \times \frac{1\text{L}}{1000 \text{ ml}} = \frac{\text{mg Ca}^{2+}}{\text{ml}} \times \frac{100 \text{ ml}}{\text{peso muestra}} = \frac{\text{mg Ca}^{2+}}{\text{g heces}} \times \frac{1000 \text{ g heces}}{1 \text{ Kg heces}} = \text{ppm Ca}^{2+}$$



A2.12 Magnesio (Mg^{2+})Tabla A2.14 Resultados de magnesio (Mg^{2+}) para heces humanas

Muestra	Peso Muestra	Dilución	$\frac{mg Mg^{2+}}{L}$	ppm Mg^{2+}
1	0.1049	1:10	3,9	3737,846
2	0.2032	1:10	7,0	3449,803
3	0.5088	-	8,1	1596,108
4	1.0207	-	27,3	2675,615
5	2.0155	-	54,7	2714,463
Promedio	-	-	-	2834,77
Desviación estándar	-	-	-	831,85

*Límite de detección del equipo: 0.19 – 9 mg/l

$$\frac{mg Mg^{2+}}{L} \times \frac{1L}{1000 ml} = \frac{mg Mg^{2+}}{ml} \times \frac{100 ml}{\text{peso muestra}} = \frac{mg Mg^{2+}}{g heces} \times \frac{1000 g heces}{1 Kg heces} = ppm Mg^{2+}$$

A2.13 Sodio (Na^+)Tabla A2.15 Resultados de sodio (Na^+) para heces humanas

Muestra	Peso Muestra	Dilución	$\frac{mg Na^+}{L}$	ppm Na^+
1	0.1049	-	3,9	3717,827
2	0.2032	-	5,6	2765,748
3	0.5088	-	9,4	1837,657
4	1.0207	-	14,9	1462,722
5	2.0155	-	29,3	1451,253
Promedio	-	-	-	2247,04
Desviación estándar	-	-	-	980,85

*Límite de detección del equipo: 1.7 – 80 mg/l

$$\frac{mg Na^+}{L} \times \frac{1L}{1000 ml} = \frac{mg Na^+}{ml} \times \frac{100 ml}{\text{peso muestra}} = \frac{mg Na^+}{g heces} \times \frac{1000 g heces}{1 Kg heces} = ppm Na^+$$





ANEXO 3

A3.1 Resultados de secado

Corrida 1

Tabla A3.1 Resultados de humedad y velocidad de secado de las pruebas para la corrida 1

Peso [kg]	Tiempo [hrs]	X [$\frac{\text{kg H}_2\text{O}}{\text{kg Heces secas}}$]	$\Delta\theta$ -	ΔX -	$\Delta X/\Delta\theta$ -	Na [kg agua/m ² /h]
2.4336	0.0000	2.0069	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
2.4322	0.1667	1.9931	0.1667	-0.0138	-0.0829	0.2800
2.4304	0.3333	1.9753	0.1667	-0.0178	-0.1066	0.3600
2.428	0.5000	1.9516	0.1667	-0.0237	-0.1422	0.4800
2.4255	0.6667	1.9269	0.1667	-0.0247	-0.1481	0.5000
2.422	0.8333	1.8924	0.1667	-0.0346	-0.2073	0.7000
2.4181	1.0000	1.8539	0.1667	-0.0385	-0.2310	0.7800
2.4148	1.1667	1.8213	0.1667	-0.0326	-0.1955	0.6600
2.4099	1.3333	1.7730	0.1667	-0.0484	-0.2902	0.9800
2.4089	1.5000	1.7631	0.1667	-0.0099	-0.0592	0.2000
2.4032	1.6667	1.7068	0.1667	-0.0563	-0.3376	1.1400
2.3998	1.8333	1.6732	0.1667	-0.0336	-0.2014	0.6800
2.3962	2.0000	1.6377	0.1667	-0.0355	-0.2132	0.7200
2.3919	2.1667	1.5953	0.1667	-0.0424	-0.2547	0.8600
2.3881	2.3333	1.5577	0.1667	-0.0375	-0.2251	0.7600
2.3846	2.5000	1.5232	0.1667	-0.0346	-0.2073	0.7000
2.3818	2.6667	1.4956	0.1667	-0.0276	-0.1658	0.5600
2.375	2.8333	1.4284	0.1667	-0.0671	-0.4028	1.3600
2.3692	3.0000	1.3712	0.1667	-0.0573	-0.3435	1.1600
2.3518	3.5000	1.1994	0.5000	-0.1718	-0.3435	1.1600
2.35	4.0000	1.1816	0.5000	-0.0178	-0.0355	0.1200
2.3465	5.0000	1.1471	1.0000	-0.0346	-0.0346	0.1167
2.3344	6.0000	1.0276	1.0000	-0.1194	-0.1194	0.4033
2.33	7.0000	0.9842	1.0000	-0.0434	-0.0434	0.1467
2.3218	8.0000	0.9033	1.0000	-0.0809	-0.0809	0.2733





Tabla A3.1 (continuación)

2.3139	9.0000	0.8253	1.0000	-0.0780	-0.0780	0.2633
2.3077	10.0000	0.7641	1.0000	-0.0612	-0.0612	0.2067
2.3046	11.0000	0.7335	1.0000	-0.0306	-0.0306	0.1033
2.303	12.0000	0.7177	1.0000	-0.0158	-0.0158	0.0533
2.3	13.0000	0.6881	1.0000	-0.0296	-0.0296	0.1000
2.2992	14.0000	0.6802	1.0000	-0.0079	-0.0079	0.0267
2.2989	15.0000	0.6772	1.0000	-0.0030	-0.0030	0.0100
2.2985	16.0000	0.6732	1.0000	-0.0039	-0.0039	0.0133
2.2846	17.0000	0.5360	1.0000	-0.1372	-0.1372	0.4633
2.2693	18.0000	0.3850	1.0000	-0.1510	-0.1510	0.5100
2.2556	19.0000	0.2498	1.0000	-0.1352	-0.1352	0.4567
2.2456	20.0000	0.1510	1.0000	-0.0987	-0.0987	0.3333
2.2307	21.0000	0.0039	1.0000	-0.1471	-0.1471	0.4967
2.2305	22.0000	0.0020	1.0000	-0.0020	-0.0020	0.0067
2.2304	23.0000	0.0010	1.0000	-0.0010	-0.0010	0.0033
2.2303	24.0000	0.0000	1.0000	-0.0010	-0.0010	0.0033
2.2303	25.0000	0.0000	1.0000	0.0000	0.0000	0.0000

**Tabla A3.2 Resultados para el análisis del periodo decreciente
para la corrida 1**

X	X-X*	Tiempo	Tiempo dec	(X-X*)/(Xc-X*)	LN((X-X*)/(Xc-X*))
$\left[\frac{\text{kg H}_2\text{O}}{\text{kg heces secas}} \right]$	-	[hrs]	[hrs]	-	
1.1994	1.1994	3.5000	0.0000	1.0000	6.41977E-06
1.1816	1.1816	4.0000	0.5000	0.9852	-0.01491923
1.1471	1.1471	5.0000	1.5000	0.9564	-0.044594999
1.0276	1.0276	6.0000	2.5000	0.8568	-0.154555867
0.9842	0.9842	7.0000	3.5000	0.8206	-0.197742166
0.9033	0.9033	8.0000	4.5000	0.7531	-0.283568871
0.8253	0.8253	9.0000	5.5000	0.6881	-0.373864323
0.7641	0.7641	10.0000	6.5000	0.6370	-0.450921062
0.7335	0.7335	11.0000	7.5000	0.6115	-0.491796891
0.7177	0.7177	12.0000	8.5000	0.5984	-0.513566458
0.6881	0.6881	13.0000	9.5000	0.5737	-0.555707525
0.6802	0.6802	14.0000	10.5000	0.5671	-0.567251665
0.6772	0.6772	15.0000	11.5000	0.5646	-0.571615308
0.6732	0.6732	16.0000	12.5000	0.5613	-0.577463278
0.5360	0.5360	17.0000	13.5000	0.4469	-0.805383616
0.3850	0.3850	18.0000	14.5000	0.3210	-1.136346197
0.2498	0.2498	19.0000	15.5000	0.2082	-1.569103447





Tabla A3.2 (continuación)

0.1510	0.1510	20.0000	16.5000	0.1259	-2.072055015
0.0039	0.0039	21.0000	17.5000	0.0033	-5.716198575
0.0020	0.0020	22.0000	18.5000	0.0016	-6.409345755
0.0010	0.0010	23.0000	19.5000	0.0008	-7.102492936
0.0000	0.0000	24.0000	20.5000	0.0000	-
0.0000	0.0000	25.0000	21.5000	0.0000	-

Tabla A3.3 Resultados para el análisis de difusión para la corrida 1

Tiempo dec [hrs]	$(X-X^*)/(X_c-X^*)$ Experimental	$LN(X_c-X^*)/(X-X^*)$ -	D_sT/d^2 Teórico	T_{dec}/d^2 -	D_s Exp [m ² /hr]
0.0000	1.0000	-6.4198E-06	-2.6018E-06	0.0000E+00	
0.5000	0.9852	1.4919E-02	6.0465E-03	2.2222E+03	2.7209E-06
1.5000	0.9564	4.4595E-02	1.8074E-02	6.6667E+03	2.7110E-06
2.5000	0.8568	1.5456E-01	6.2639E-02	1.1111E+04	5.6375E-06
3.5000	0.8206	1.9774E-01	8.0142E-02	1.5556E+04	5.1520E-06
4.5000	0.7531	2.8357E-01	1.1493E-01	2.0000E+04	5.7463E-06
5.5000	0.6881	3.7386E-01	1.5152E-01	2.4444E+04	6.1986E-06
6.5000	0.6370	4.5092E-01	1.8275E-01	2.8889E+04	6.3260E-06
7.5000	0.6115	4.9180E-01	1.9932E-01	3.3333E+04	5.9795E-06
8.5000	0.5984	5.1357E-01	2.0814E-01	3.7778E+04	5.5096E-06
9.5000	0.5737	5.5571E-01	2.2522E-01	4.2222E+04	5.3341E-06
10.5000	0.5671	5.6725E-01	2.2990E-01	4.6667E+04	4.9264E-06
11.5000	0.5646	5.7162E-01	2.3167E-01	5.1111E+04	4.5326E-06
12.5000	0.5613	5.7746E-01	2.3404E-01	5.5556E+04	4.2126E-06
13.5000	0.4469	8.0538E-01	3.2641E-01	6.0000E+04	5.4401E-06
14.5000	0.3210	1.1363E+00	4.6054E-01	6.4444E+04	7.1463E-06
15.5000	0.2082	1.5691E+00	6.3593E-01	6.8889E+04	9.2313E-06
16.5000	0.1259	2.0721E+00	8.3977E-01	7.3333E+04	1.1451E-05
17.5000	0.0033	5.7162E+00	2.3167E+00	7.7778E+04	2.9786E-05
18.5000	0.0016	6.4093E+00	2.5976E+00	8.2222E+04	3.1592E-05
19.5000	0.0008	7.1025E+00	2.8785E+00	8.6667E+04	3.3214E-05
20.5000	0.0000	-	-	9.1111E+04	-
21.5000	0.0000	-	-	9.5556E+04	-
				Promedio	9.6424E-06





Corrida 2

Tabla A3.4 Resultados de humedad y velocidad de secado de las pruebas para la corrida 2

Peso [kg]	Tiempo [hrs]	X	$\Delta\theta$	ΔX	$\Delta X/\Delta\theta$	Na
		$\left[\frac{\text{kg H}_2\text{O}}{\text{kg heces secas}}\right]$	-	-	-	[kg agua/m ² /h]
2.4275	0.0000	1.8785	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
2.4258	0.1667	1.8621	0.1667	-0.0164	-0.0984	0.3400
2.4235	0.3333	1.8399	0.1667	-0.0222	-0.1331	0.4600
2.4205	0.5000	1.8110	0.1667	-0.0289	-0.1736	0.6000
2.417	0.6667	1.7772	0.1667	-0.0338	-0.2025	0.7000
2.4129	0.8333	1.7377	0.1667	-0.0395	-0.2372	0.8200
2.4086	1.0000	1.6962	0.1667	-0.0415	-0.2488	0.8600
2.4035	1.1667	1.6471	0.1667	-0.0492	-0.2951	1.0200
2.3987	1.3333	1.6008	0.1667	-0.0463	-0.2777	0.9600
2.3956	1.5000	1.5709	0.1667	-0.0299	-0.1794	0.6200
2.3909	1.6667	1.5256	0.1667	-0.0453	-0.2719	0.9400
2.3867	1.8333	1.4851	0.1667	-0.0405	-0.2430	0.8400
2.3829	2.0000	1.4484	0.1667	-0.0366	-0.2199	0.7600
2.38	2.1667	1.4204	0.1667	-0.0280	-0.1678	0.5800
2.3765	2.3333	1.3867	0.1667	-0.0338	-0.2025	0.7000
2.3744	3.0000	1.3664	0.6667	-0.0203	-0.0304	0.1050
2.3655	4.0000	1.2806	1.0000	-0.0858	-0.0858	0.2967
2.35	5.0000	1.1311	1.0000	-0.1495	-0.1495	0.5167
2.346	6.0000	1.0926	1.0000	-0.0386	-0.0386	0.1333
2.3383	7.0000	1.0183	1.0000	-0.0743	-0.0743	0.2567
2.3332	8.0000	0.9691	1.0000	-0.0492	-0.0492	0.1700
2.3235	9.0000	0.8756	1.0000	-0.0935	-0.0935	0.3233
2.3158	10.0000	0.8014	1.0000	-0.0743	-0.0743	0.2567
2.3075	11.0000	0.7213	1.0000	-0.0800	-0.0800	0.2767
2.2989	12.0000	0.6384	1.0000	-0.0829	-0.0829	0.2867
2.2911	13.0000	0.5632	1.0000	-0.0752	-0.0752	0.2600
2.2833	14.0000	0.4879	1.0000	-0.0752	-0.0752	0.2600
2.2753	15.0000	0.4108	1.0000	-0.0771	-0.0771	0.2667
2.2715	16.0000	0.3742	1.0000	-0.0366	-0.0366	0.1267
2.2706	17.0000	0.3655	1.0000	-0.0087	-0.0087	0.0300
2.2698	18.0000	0.3578	1.0000	-0.0077	-0.0077	0.0267
2.2633	19.0000	0.2951	1.0000	-0.0627	-0.0627	0.2167
2.256	20.0000	0.2247	1.0000	-0.0704	-0.0704	0.2433
2.256	21.0000	0.2247	1.0000	0.0000	0.0000	0.0000
2.2488	22.0000	0.1553	1.0000	-0.0694	-0.0694	0.2400





Tabla A3.4 (continuación)

2.2419	23.0000	0.0887	1.0000	-0.0665	-0.0665	0.2300
2.2332	24.0000	0.0048	1.0000	-0.0839	-0.0839	0.2900
2.2329	25.0000	0.0019	1.0000	-0.0029	-0.0029	0.0100
2.2328	26.0000	0.0010	1.0000	-0.0010	-0.0010	0.0033
2.2327	27.0000	0.0000	1.0000	-0.0010	-0.0010	0.0033

Tabla A3.5 Resultados para el análisis del periodo decreciente para la corrida 2

X	X-X*	Tiempo	Tiempo dec	(X-X*)/(Xc-X*)	LN (X-X*)/(Xc-X*)
$\left[\frac{\text{kg H}_2\text{O}}{\text{kg heces secas}} \right]$	-	[hrs]	[hrs]	-	
1.1311	1.1301	5.0000	0.0000	1.0000	4.20671E-05
1.0926	1.0916	6.0000	1.0000	0.9659	-0.03468476
1.0183	1.0173	7.0000	2.0000	0.9002	-0.105132358
0.9691	0.9681	8.0000	3.0000	0.8567	-0.154682886
0.8756	0.8746	9.0000	4.0000	0.7739	-0.256291677
0.8014	0.8004	10.0000	5.0000	0.7082	-0.345012211
0.7213	0.7203	11.0000	6.0000	0.6374	-0.45037768
0.6384	0.6374	12.0000	7.0000	0.5640	-0.57269547
0.5632	0.5622	13.0000	8.0000	0.4974	-0.698269613
0.4879	0.4869	14.0000	9.0000	0.4309	-0.841908173
0.4108	0.4098	15.0000	10.0000	0.3626	-1.014391226
0.3742	0.3732	16.0000	11.0000	0.3302	-1.108064251
0.3655	0.3645	17.0000	12.0000	0.3225	-1.131597025
0.3578	0.3568	18.0000	13.0000	0.3157	-1.152990332
0.2951	0.2941	19.0000	14.0000	0.2602	-1.346202875
0.2247	0.2237	20.0000	15.0000	0.1979	-1.619815456
0.2247	0.2237	21.0000	16.0000	0.1979	-1.619815456
0.1553	0.1543	22.0000	17.0000	0.1365	-1.991450794
0.0887	0.0877	23.0000	18.0000	0.0776	-2.555940502
0.0048	0.0038	24.0000	19.0000	0.0034	-5.689392018
0.0019	0.0009	25.0000	20.0000	0.0008	-7.1040952
0.0010	0.0000	26.0000	21.0000	-	-
0.0000	-	27.0000	22.0000	-	-





Tabla A3.6 Resultados para el análisis de difusión para la corrida 2

Tiempo dec [hrs]	$(X-X^*)/(X_c-X^*)$ Experimental	$LN(X_c-X^*)/(X-X^*)$ -	D_sT/d^2 Teórico	T_{dec}/d^2 -	D_s Exp [m ² /hr]
0.0000	1.0000	-4.2067E-05	-1.7049E-05	0	
1.0000	0.9659	3.4685E-02	1.4057E-02	4444.44444	3.1629E-06
2.0000	0.9002	1.0513E-01	4.2608E-02	8888.88889	4.7934E-06
3.0000	0.8567	1.5468E-01	6.2690E-02	13333.3333	4.7018E-06
4.0000	0.7739	2.5629E-01	1.0387E-01	17777.7778	5.8427E-06
5.0000	0.7082	3.4501E-01	1.3983E-01	22222.2222	6.2922E-06
6.0000	0.6374	4.5038E-01	1.8253E-01	26666.6667	6.8449E-06
7.0000	0.5640	5.7270E-01	2.3210E-01	31111.1111	7.4605E-06
8.0000	0.4974	6.9827E-01	2.8300E-01	35555.5556	7.9593E-06
9.0000	0.4309	8.4191E-01	3.4121E-01	40000	8.5303E-06
10.0000	0.3626	1.0144E+00	4.1112E-01	44444.4444	9.2501E-06
11.0000	0.3302	1.1081E+00	4.4908E-01	48888.8889	9.1857E-06
12.0000	0.3225	1.1316E+00	4.5862E-01	53333.3333	8.5991E-06
13.0000	0.3157	1.1530E+00	4.6729E-01	57777.7778	8.0877E-06
14.0000	0.2602	1.3462E+00	5.4559E-01	62222.2222	8.7685E-06
15.0000	0.1979	1.6198E+00	6.5648E-01	66666.6667	9.8473E-06
16.0000	0.1979	1.6198E+00	6.5648E-01	71111.1111	9.2318E-06
17.0000	0.1365	1.9915E+00	8.0710E-01	75555.5556	1.0682E-05
18.0000	0.0776	2.5559E+00	1.0359E+00	80000	1.2948E-05
19.0000	0.0034	5.6894E+00	2.3058E+00	84444.4444	2.7306E-05
20.0000	0.0008	7.1041E+00	2.8792E+00	88888.8889	3.2391E-05
21.0000	-0.00003	-	-	93333.3333	-
22.0000	-0.0009	-	-	97777.7778	-
				Promedio	1.0094E-05





Corrida 3

Tabla A3.7 Resultados de humedad y velocidad de secado de las pruebas para la corrida 3

Peso	Tiempo	X	$\Delta\theta$	ΔX	$\Delta X/\Delta\theta$	Na
[kg]	[hrs]	$\left[\frac{\text{kg H}_2\text{O}}{\text{kg heces secas}} \right]$	-	-	-	[kg agua/m ² /h]
2.4279	0.0000	3.3699	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
2.4254	0.1667	3.3333	0.1667	-0.0365	-0.2193	0.5000
2.422	0.3333	3.2836	0.1667	-0.0497	-0.2982	0.6800
2.4182	0.5000	3.2281	0.1667	-0.0556	-0.3333	0.7600
2.4126	0.6667	3.1462	0.1667	-0.0819	-0.4912	1.1200
2.408	0.8333	3.0789	0.1667	-0.0673	-0.4035	0.9200
2.4037	1.0000	3.0161	0.1667	-0.0629	-0.3772	0.8600
2.3967	1.1667	2.9137	0.1667	-0.1023	-0.6140	1.4000
2.3909	1.3333	2.8289	0.1667	-0.0848	-0.5088	1.1600
2.3841	1.5000	2.7295	0.1667	-0.0994	-0.5965	1.3600
2.3777	1.6667	2.6360	0.1667	-0.0936	-0.5614	1.2800
2.3716	1.8333	2.5468	0.1667	-0.0892	-0.5351	1.2200
2.3673	2.0000	2.4839	0.1667	-0.0629	-0.3772	0.8600
2.3584	2.1667	2.3538	0.1667	-0.1301	-0.7807	1.7800
2.3512	2.3333	2.2485	0.1667	-0.1053	-0.6316	1.4400
2.3411	2.5000	2.1009	0.1667	-0.1477	-0.8860	2.0200
2.3369	2.6667	2.0395	0.1667	-0.0614	-0.3684	0.8400
2.3324	2.8333	1.9737	0.1667	-0.0658	-0.3947	0.9000
2.3275	3.0000	1.9020	0.1667	-0.0716	-0.4298	0.9800
2.2967	4.0000	1.4518	1.0000	-0.4503	-0.4503	1.0267
2.2726	5.0000	1.0994	1.0000	-0.3523	-0.3523	0.8033
2.2439	6.0000	0.6798	1.0000	-0.4196	-0.4196	0.9567
2.228	7.0000	0.4474	1.0000	-0.2325	-0.2325	0.5300
2.2223	8.0000	0.3640	1.0000	-0.0833	-0.0833	0.1900
2.2178	9.0000	0.2982	1.0000	-0.0658	-0.0658	0.1500
2.2114	10.0000	0.2047	1.0000	-0.0936	-0.0936	0.2133
2.2065	11.0000	0.1330	1.0000	-0.0716	-0.0716	0.1633
2.2024	12.0000	0.0731	1.0000	-0.0599	-0.0599	0.1367
2.2	13.0000	0.0380	1.0000	-0.0351	-0.0351	0.0800
2.1984	14.0000	0.0146	1.0000	-0.0234	-0.0234	0.0533
2.1979	15.0000	0.0073	1.0000	-0.0073	-0.0073	0.0167
2.1976	16.0000	0.0029	1.0000	-0.0044	-0.0044	0.0100
2.1974	17.0000	0.0000	1.0000	-0.0029	-0.0029	0.0067





Tabla A3.8 Resultados para el análisis del periodo decreciente para la corrida 3

X	X-X*	Tiempo	Tiempo dec	(X-X*)/(Xc-X*)	LN (X-X*)/(Xc-X*)
$\frac{\text{kg H}_2\text{O}}{\text{kg heces secas}}$	-	[hrs]	[hrs]	-	
2.1009	2.0980	2.5000	0.0000	1.0000	-1.08709E-05
2.0395	2.0366	2.6667	0.1667	0.9707	-0.029715681
1.9737	1.9708	2.8333	0.3333	0.9394	-0.06255297
1.9020	1.8991	3.0000	0.5000	0.9052	-0.099579786
1.4518	1.4489	4.0000	1.5000	0.6906	-0.370211344
1.0994	1.0965	5.0000	2.5000	0.5226	-0.648847355
0.6798	0.6769	6.0000	3.5000	0.3227	-1.131179953
0.4474	0.4445	7.0000	4.5000	0.2119	-1.55186078
0.3640	0.3611	8.0000	5.5000	0.1721	-1.759487696
0.2982	0.2953	9.0000	6.5000	0.1408	-1.960593545
0.2047	0.2018	10.0000	7.5000	0.0962	-2.341569909
0.1330	0.1301	11.0000	8.5000	0.0620	-2.780121805
0.0731	0.0702	12.0000	9.5000	0.0335	-3.397399808
0.0380	0.0351	13.0000	10.5000	0.0167	-4.090205497
0.0146	0.0117	14.0000	11.5000	0.0056	-5.187452984
0.0073	0.0044	15.0000	12.5000	0.0021	-6.16487836
0.0029	0.0000	16.0000	13.5000	0.000011	-11.37941637
0.0000	-	17.0000	14.5000	-	-

Tabla A3.9 Resultados para el análisis de difusión para la corrida 3

Tiempo dec	(X-X*)/(Xc-X*)	LN(Xc-X*)/(X-X*)	DsT/d^2	Tdec/d^2	Ds Exp
[hrs]	Experimental	-	Teórico	-	[m ² /hr]
0.0000	1.0000	1.0871E-05	4.4058E-06	0.0000E+00	-
0.1667	0.9707	2.9716E-02	1.2043E-02	7.4074E+02	1.6258E-05
0.3333	0.9394	6.2553E-02	2.5352E-02	1.4815E+03	1.7112E-05
0.5000	0.9052	9.9580E-02	4.0358E-02	2.2222E+03	1.8161E-05
1.5000	0.6906	3.7021E-01	1.5004E-01	6.6667E+03	2.2506E-05
2.5000	0.5226	6.4885E-01	2.6297E-01	1.1111E+04	2.3667E-05
3.5000	0.3227	1.1312E+00	4.5845E-01	1.5556E+04	2.9472E-05
4.5000	0.2119	1.5519E+00	6.2894E-01	2.0000E+04	3.1447E-05
5.5000	0.1721	1.7595E+00	7.1309E-01	2.4444E+04	2.9172E-05
6.5000	0.1408	1.9606E+00	7.9459E-01	2.8889E+04	2.7505E-05
7.5000	0.0962	2.3416E+00	9.4900E-01	3.3333E+04	2.8470E-05
8.5000	0.0620	2.7801E+00	1.1267E+00	3.7778E+04	2.9825E-05
9.5000	0.0335	3.3974E+00	1.3769E+00	4.2222E+04	3.2611E-05





Tabla A3.9 (continuación)

10.5000	0.0167	4.0902E+00	1.6577E+00	4.6667E+04	3.5522E-05
11.5000	0.0056	5.1875E+00	2.1024E+00	5.1111E+04	4.1134E-05
12.5000	0.0021	6.1649E+00	2.4985E+00	5.5556E+04	4.4973E-05
13.5000	0.000011	1.1379E+01	4.6119E+00	6.0000E+04	7.6865E-05
14.5000	-0.0014	-	-	6.4444E+04	-
				Promedio	3.1544E-05

Corrida 4

Tabla A3.10 Resultados de humedad y velocidad de secado de las pruebas para la corrida 4

Peso [kg]	Tiempo [hrs]	X	$\Delta\theta$	ΔX	$\Delta X/\Delta\theta$	Na
		kg H ₂ O kg heces secas	-	-	-	[kg agua/m ² /h]
2.4275	0.0000	3.3833	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
2.4253	0.1667	3.3510	0.1667	-0.0323	-0.1938	0.4400
2.422	0.3333	3.3025	0.1667	-0.0485	-0.2907	0.6600
2.4195	0.5000	3.2658	0.1667	-0.0367	-0.2203	0.5000
2.4134	0.6667	3.1762	0.1667	-0.0896	-0.5374	1.2200
2.4087	0.8333	3.1072	0.1667	-0.0690	-0.4141	0.9400
2.4038	1.0000	3.0352	0.1667	-0.0720	-0.4317	0.9800
2.3968	1.1667	2.9325	0.1667	-0.1028	-0.6167	1.4000
2.391	1.3333	2.8473	0.1667	-0.0852	-0.5110	1.1600
2.3859	1.5000	2.7724	0.1667	-0.0749	-0.4493	1.0200
2.3788	1.6667	2.6681	0.1667	-0.1043	-0.6256	1.4200
2.3741	1.8333	2.5991	0.1667	-0.0690	-0.4141	0.9400
2.3676	2.0000	2.5037	0.1667	-0.0954	-0.5727	1.3000
2.3342	3.0000	2.0132	1.0000	-0.4905	-0.4905	1.1133
2.3	4.0000	1.5110	1.0000	-0.5022	-0.5022	1.1400
2.2732	5.0000	1.1175	1.0000	-0.3935	-0.3935	0.8933
2.2565	6.0000	0.8722	1.0000	-0.2452	-0.2452	0.5567
2.2494	7.0000	0.7680	1.0000	-0.1043	-0.1043	0.2367
2.2365	8.0000	0.5786	1.0000	-0.1894	-0.1894	0.4300
2.2242	9.0000	0.3979	1.0000	-0.1806	-0.1806	0.4100
2.2167	10.0000	0.2878	1.0000	-0.1101	-0.1101	0.2500
2.2062	11.0000	0.1336	1.0000	-0.1542	-0.1542	0.3500
2.2	12.0000	0.0426	1.0000	-0.0910	-0.0910	0.2067
2.1974	13.0000	0.0044	1.0000	-0.0382	-0.0382	0.0867





Tabla A3.10 (continuación)

2.1973	14.0000	0.0029	1.0000	-0.0015	-0.0015	0.0033
2.1972	15.0000	0.0015	1.0000	-0.0015	-0.0015	0.0033
2.1971	16.0000	0.0000	1.0000	-0.0015	-0.0015	0.0033

Tabla A3.11 Resultados para el análisis del periodo decreciente para la corrida 4

X	X-X*	Tiempo	Tiempo dec	(X-X*)/(Xc-X*)	LN (X-X*)/(Xc-X*)
$\frac{\text{kg H}_2\text{O}}{\text{kg heces secas}}$	-	[hrs]	[hrs]	-	
2.5037	2.5022	2.0000	0.0000	1.0000	-1.15611E-05
2.0132	2.0117	3.0000	1.0000	0.8040	-0.218182326
1.5110	1.5095	4.0000	2.0000	0.6033	-0.50538312
1.1175	1.1160	5.0000	3.0000	0.4460	-0.807442508
0.8722	0.8707	6.0000	4.0000	0.3480	-1.055574509
0.7680	0.7665	7.0000	5.0000	0.3063	-1.183106252
0.5786	0.5771	8.0000	6.0000	0.2306	-1.466977748
0.3979	0.3964	9.0000	7.0000	0.1584	-1.842390325
0.2878	0.2863	10.0000	8.0000	0.1144	-2.167843355
0.1336	0.1321	11.0000	9.0000	0.0528	-2.941161898
0.0426	0.0411	12.0000	10.0000	0.0164	-4.109296293
0.0044	0.0029	13.0000	11.0000	0.0012	-6.758393669
0.0029	0.0014	14.0000	12.0000	0.0006	-7.462467143
0.0015	0.0000	15.0000	13.0000	0.0000	-
0.0000	-	16.0000	14.0000	-	-

Tabla A3.12 Resultados para el análisis de difusión para la corrida 4

Tiempo dec	(X-X*)/(Xc-X*)	LN(Xc-X*)/(X-X*)	DsT/d^2	Tdec/d^2	Ds Exp
[hrs]	-	-	-	-	[m ² /hr]
0.0000	1.0000	1.1561E-05	4.6855E-06	0.0000E+00	0
1.0000	0.8040	2.1818E-01	8.8426E-02	4.4444E+03	1.9896E-05
2.0000	0.6033	5.0538E-01	2.0482E-01	8.8889E+03	2.3043E-05
3.0000	0.4460	8.0744E-01	3.2724E-01	1.3333E+04	2.4543E-05
4.0000	0.3480	1.0556E+00	4.2781E-01	1.7778E+04	2.4064E-05
5.0000	0.3063	1.1831E+00	4.7949E-01	2.2222E+04	2.1577E-05
6.0000	0.2306	1.4670E+00	5.9454E-01	2.6667E+04	2.2295E-05
7.0000	0.1584	1.8424E+00	7.4669E-01	3.1111E+04	2.4001E-05
8.0000	0.1144	2.1678E+00	8.7859E-01	3.5556E+04	2.471E-05
9.0000	0.0528	2.9412E+00	1.1920E+00	4.0000E+04	2.98E-05
10.0000	0.0164	4.1093E+00	1.6654E+00	4.4444E+04	3.7472E-05





Tabla A3.12 (continuación)

11.0000	0.0012	6.7584E+00	2.7391E+00	4.8889E+04	5.6026E-05
12.0000	0.0006	7.4625E+00	3.0244E+00	5.3333E+04	5.6708E-05
13.0000	0.0000	-	-	5.7778E+04	-
14.0000	-0.0006	-	-	6.2222E+04	-
				Promedio	3.03446E-05

Corrida 5

Tabla A3.13 Resultados de humedad y velocidad de secado de las pruebas para la corrida 5

Peso [kg]	Tiempo [hrs]	X	$\Delta\theta$	ΔX	$\Delta X/\Delta\theta$	Na
		kg H ₂ O kg heces secas	-	-	-	[kg agua/m ² /h]
2.434	0.0000	3.2361	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
2.433	0.1667	3.2222	0.1667	-0.0139	-0.0833	0.2000
2.43	0.3333	3.1806	0.1667	-0.0417	-0.2500	0.6000
2.4264	0.5000	3.1306	0.1667	-0.0500	-0.3000	0.7200
2.4224	0.6667	3.0750	0.1667	-0.0556	-0.3333	0.8000
2.4142	0.8333	2.9611	0.1667	-0.1139	-0.6833	1.6400
2.4091	1.0000	2.8903	0.1667	-0.0708	-0.4250	1.0200
2.4056	1.1667	2.8417	0.1667	-0.0486	-0.2917	0.7000
2.4019	1.3333	2.7903	0.1667	-0.0514	-0.3083	0.7400
2.3987	1.5000	2.7458	0.1667	-0.0444	-0.2667	0.6400
2.395	1.6667	2.6944	0.1667	-0.0514	-0.3083	0.7400
2.3908	1.8333	2.6361	0.1667	-0.0583	-0.3500	0.8400
2.3879	2.0000	2.5958	0.1667	-0.0403	-0.2417	0.5800
2.3856	2.1667	2.5639	0.1667	-0.0319	-0.1917	0.4600
2.3838	2.3333	2.5389	0.1667	-0.0250	-0.1500	0.3600
2.3795	2.5000	2.4792	0.1667	-0.0597	-0.3583	0.8600
2.3766	2.6667	2.4389	0.1667	-0.0403	-0.2417	0.5800
2.3753	2.8333	2.4208	0.1667	-0.0181	-0.1083	0.2600
2.3744	3.0000	2.4083	0.1667	-0.0125	-0.0750	0.1800
2.3656	4.0000	2.2861	1.0000	-0.1222	-0.1222	0.2933
2.3527	5.0000	2.1069	1.0000	-0.1792	-0.1792	0.4300
2.3423	6.0000	1.9625	1.0000	-0.1444	-0.1444	0.3467
2.3363	7.0000	1.8792	1.0000	-0.0833	-0.0833	0.2000
2.3323	8.0000	1.8236	1.0000	-0.0556	-0.0556	0.1333
2.3157	9.0000	1.5931	1.0000	-0.2306	-0.2306	0.5533





Tabla A3.12 (continuación)

2.3091	10.0000	1.5014	1.0000	-0.0917	-0.0917	0.2200
2.2996	11.0000	1.3694	1.0000	-0.1319	-0.1319	0.3167
2.2934	12.0000	1.2833	1.0000	-0.0861	-0.0861	0.2067
2.2791	13.0000	1.0847	1.0000	-0.1986	-0.1986	0.4767
2.2667	14.0000	0.9125	1.0000	-0.1722	-0.1722	0.4133
2.2578	15.0000	0.7889	1.0000	-0.1236	-0.1236	0.2967
2.2485	16.0000	0.6597	1.0000	-0.1292	-0.1292	0.3100
2.2416	17.0000	0.5639	1.0000	-0.0958	-0.0958	0.2300
2.2316	18.0000	0.4250	1.0000	-0.1389	-0.1389	0.3333
2.2212	19.0000	0.2806	1.0000	-0.1444	-0.1444	0.3467
2.212	20.0000	0.1528	1.0000	-0.1278	-0.1278	0.3067
2.2056	21.0000	0.0639	1.0000	-0.0889	-0.0889	0.2133
2.202	22.0000	0.0139	1.0000	-0.0500	-0.0500	0.1200
2.2013	23.0000	0.0042	1.0000	-0.0097	-0.0097	0.0233
2.2012	24.0000	0.0028	1.0000	-0.0014	-0.0014	0.0033
2.2012	25.0000	0.0028	1.0000	0.0000	0.0000	0.0000
2.201	26.0000	0.0000	1.0000	-0.0028	-0.0028	0.0067

Tabla A3.14 Resultados para el análisis del periodo decreciente para la corrida 5

X	X-X*	Tiempo	Tiempo dec	(X-X*)/(Xc-X*)	LN (X-X*)/(Xc-X*)
$\frac{\text{kg H}_2\text{O}}{\text{kg heces secas}}$	-	[hrs]	[hrs]	-	
2.4792	2.4764	2.5000	0.0000	1.0000	-1.34605E-05
2.4389	2.4361	2.6667	0.1667	0.9837	-0.016412054
2.4208	2.4180	2.8333	0.3333	0.9764	-0.023851355
2.4083	2.4055	3.0000	0.5000	0.9714	-0.029034253
2.2861	2.2833	4.0000	1.5000	0.9220	-0.081179261
2.1069	2.1041	5.0000	2.5000	0.8497	-0.162896948
1.9625	1.9597	6.0000	3.5000	0.7914	-0.234014492
1.8792	1.8764	7.0000	4.5000	0.7577	-0.27746861
1.8236	1.8208	8.0000	5.5000	0.7353	-0.307523825
1.5931	1.5903	9.0000	6.5000	0.6422	-0.442911163
1.5014	1.4986	10.0000	7.5000	0.6051	-0.502281968
1.3694	1.3666	11.0000	8.5000	0.5519	-0.594447468
1.2833	1.2805	12.0000	9.5000	0.5171	-0.659529235
1.0847	1.0819	13.0000	10.5000	0.4369	-0.828066598
0.9125	0.9097	14.0000	11.5000	0.3673	-1.001446297
0.7889	0.7861	15.0000	12.5000	0.3174	-1.147491295
0.6597	0.6569	16.0000	13.5000	0.2653	-1.326995543





Tabla A3.14 (continuación)

0.5639	0.5611	17.0000	14.5000	0.2266	-1.484681831
0.4250	0.4222	18.0000	15.5000	0.1705	-1.769082036
0.2806	0.2778	19.0000	16.5000	0.1122	-2.187819741
0.1528	0.1500	20.0000	17.5000	0.0606	-2.804074037
0.0639	0.0611	21.0000	18.5000	0.0247	-3.702231173
0.0139	0.0111	22.0000	19.5000	0.0045	-5.408617566
0.0042	0.0014	23.0000	20.5000	0.000552	-7.502186487
0.0028	0.0000	24.0000	21.5000	-	-
0.0028	0.0000	25.0000	22.5000	-	-
0.0000	-	26.0000	23.5000	-	-

Tabla A3.15 Resultados para el análisis de difusión para la corrida 5

Tiempo dec [hrs]	$(X-X^*)/(X_c-X^*)$	$LN(X_c-X^*)/(X-X^*)$	D_sT/d^2	T_{dec}/d^2	$D_s \text{ Exp}$ [m ² /hr]
0.0000	1.0000	1.3460E-05	5.4553E-06	0.0000E+00	-
0.1667	0.9837	1.6412E-02	6.6515E-03	4.1667E+02	1.5964E-05
0.3333	0.9764	2.3851E-02	9.6665E-03	8.3333E+02	1.16E-05
0.5000	0.9714	2.9034E-02	1.1767E-02	1.2500E+03	9.4137E-06
1.5000	0.9220	8.1179E-02	3.2901E-02	3.7500E+03	8.7735E-06
2.5000	0.8497	1.6290E-01	6.6019E-02	6.2500E+03	1.0563E-05
3.5000	0.7914	2.3401E-01	9.4842E-02	8.7500E+03	1.0839E-05
4.5000	0.7577	2.7747E-01	1.1245E-01	1.1250E+04	9.9958E-06
5.5000	0.7353	3.0752E-01	1.2463E-01	1.3750E+04	9.0643E-06
6.5000	0.6422	4.4291E-01	1.7950E-01	1.6250E+04	1.1046E-05
7.5000	0.6051	5.0228E-01	2.0357E-01	1.8750E+04	1.0857E-05
8.5000	0.5519	5.9445E-01	2.4092E-01	2.1250E+04	1.1337E-05
9.5000	0.5171	6.5953E-01	2.6730E-01	2.3750E+04	1.1255E-05
10.5000	0.4369	8.2807E-01	3.3560E-01	2.6250E+04	1.2785E-05
11.5000	0.3673	1.0014E+00	4.0587E-01	2.8750E+04	1.4117E-05
12.5000	0.3174	1.1475E+00	4.6506E-01	3.1250E+04	1.4882E-05
13.5000	0.2653	1.3270E+00	5.3781E-01	3.3750E+04	1.5935E-05
14.5000	0.2266	1.4847E+00	6.0172E-01	3.6250E+04	1.6599E-05
15.5000	0.1705	1.7691E+00	7.1698E-01	3.8750E+04	1.8503E-05
16.5000	0.1122	2.1878E+00	8.8669E-01	4.1250E+04	2.1495E-05
17.5000	0.0606	2.8041E+00	1.1364E+00	4.3750E+04	2.5976E-05
18.5000	0.0247	3.7022E+00	1.5005E+00	4.6250E+04	3.2442E-05
19.5000	0.0045	5.4086E+00	2.1920E+00	4.8750E+04	4.4965E-05
20.5000	0.000552	7.5022E+00	3.0405E+00	5.1250E+04	5.9327E-05
21.5000	-0.00001	-	-	5.3750E+04	-
22.5000	-0.00001	-	-	5.6250E+04	-





Tabla A3.15 (continuación)

23.5000	-0.0011	-	-	5.8750E+04	
				Promedio	1.77276E-05

Corrida 6

Tabla A3.16 Resultados de humedad y velocidad de secado de las pruebas para la corrida 6

Peso [kg]	Tiempo [hrs]	X	$\Delta\theta$	ΔX	$\Delta X/\Delta\theta$	Na
		$\frac{\text{kg H}_2\text{O}}{\text{kg heces secas}}$	-	-	-	[kg agua/m ² /h]
2.429	0.0000	2.8961	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
2.4278	0.1667	2.8805	0.1667	-0.0156	-0.0935	0.1920
2.4246	0.3333	2.8390	0.1667	-0.0416	-0.2494	0.5120
2.4206	0.5000	2.7870	0.1667	-0.0519	-0.3117	0.6400
2.4152	0.6667	2.7169	0.1667	-0.0701	-0.4208	0.8640
2.4103	0.8333	2.6532	0.1667	-0.0636	-0.3818	0.7840
2.4047	1.0000	2.5805	0.1667	-0.0727	-0.4364	0.8960
2.3994	1.1667	2.5117	0.1667	-0.0688	-0.4130	0.8480
2.3942	1.3333	2.4442	0.1667	-0.0675	-0.4052	0.8320
2.3891	1.5000	2.3779	0.1667	-0.0662	-0.3974	0.8160
2.3815	1.6667	2.2792	0.1667	-0.0987	-0.5922	1.2160
2.3756	1.8333	2.2026	0.1667	-0.0766	-0.4597	0.9440
2.3694	2.0000	2.1221	0.1667	-0.0805	-0.4831	0.9920
2.3633	2.1667	2.0429	0.1667	-0.0792	-0.4753	0.9760
2.3572	2.3333	1.9636	0.1667	-0.0792	-0.4753	0.9760
2.3511	2.5000	1.8844	0.1667	-0.0792	-0.4753	0.9760
2.345	2.6667	1.8052	0.1667	-0.0792	-0.4753	0.9760
2.3411	2.8333	1.7545	0.1667	-0.0506	-0.3039	0.6240
2.3387	3.0000	1.7234	0.1667	-0.0312	-0.1870	0.3840
2.3152	4.0000	1.4182	1.0000	-0.3052	-0.3052	0.6267
2.2954	5.0000	1.1610	1.0000	-0.2571	-0.2571	0.5280
2.2875	6.0000	1.0584	1.0000	-0.1026	-0.1026	0.2107
2.2768	7.0000	0.9195	1.0000	-0.1390	-0.1390	0.2853
2.2731	8.0000	0.8714	1.0000	-0.0481	-0.0481	0.0987
2.2587	9.0000	0.6844	1.0000	-0.1870	-0.1870	0.3840
2.2482	10.0000	0.5481	1.0000	-0.1364	-0.1364	0.2800
2.24	11.0000	0.4416	1.0000	-0.1065	-0.1065	0.2187
2.232	12.0000	0.3377	1.0000	-0.1039	-0.1039	0.2133
2.2247	13.0000	0.2429	1.0000	-0.0948	-0.0948	0.1947



**Tabla A3.16 (continuación)**

2.2172	14.0000	0.1455	1.0000	-0.0974	-0.0974	0.2000
2.2167	15.0000	0.1390	1.0000	-0.0065	-0.0065	0.0133
2.2159	16.0000	0.1286	1.0000	-0.0104	-0.0104	0.0213
2.2132	17.0000	0.0935	1.0000	-0.0351	-0.0351	0.0720
2.2114	18.0000	0.0701	1.0000	-0.0234	-0.0234	0.0480
2.2104	19.0000	0.0571	1.0000	-0.0130	-0.0130	0.0267
2.2082	20.0000	0.0286	1.0000	-0.0286	-0.0286	0.0587
2.2069	21.0000	0.0117	1.0000	-0.0169	-0.0169	0.0347
2.2063	22.0000	0.0039	1.0000	-0.0078	-0.0078	0.0160
2.2062	23.0000	0.0026	1.0000	-0.0013	-0.0013	0.0027
2.2061	24.0000	0.0013	1.0000	-0.0013	-0.0013	0.0027
2.2061	25.0000	0.0013	1.0000	0.0000	0.0000	0.0000
2.206	26.0000	0.0000	1.0000	-0.0013	-0.0013	0.0027

Tabla A3.17 Resultados para el análisis del periodo decreciente para la corrida 6

X	X-X*	Tiempo	Tiempo dec	$(X-X^*)/(X_c-X^*)$	$\text{LN}(X-X^*)/(X_c-X^*)$
kg H ₂ O kg heces secas	-	[hrs]	[hrs]	-	
1.8844	1.8831	2.5000	0.0000	1.0000	8.2759E-06
1.8052	1.8039	2.6667	0.1667	0.9579	-0.04297125
1.7545	1.7532	2.8333	0.3333	0.9310	-0.07145074
1.7234	1.7221	3.0000	0.5000	0.9145	-0.08938845
1.4182	1.4169	4.0000	1.5000	0.7524	-0.2844608
1.1610	1.1597	5.0000	2.5000	0.6159	-0.48472441
1.0584	1.0571	6.0000	3.5000	0.5614	-0.57735073
0.9195	0.9182	7.0000	4.5000	0.4876	-0.71828062
0.8714	0.8701	8.0000	5.5000	0.4621	-0.77203365
0.6844	0.6831	9.0000	6.5000	0.3628	-1.01401056
0.5481	0.5468	10.0000	7.5000	0.2903	-1.23667941
0.4416	0.4403	11.0000	8.5000	0.2338	-1.45331271
0.3377	0.3364	12.0000	9.5000	0.1786	-1.72248567
0.2429	0.2416	13.0000	10.5000	0.1283	-2.05356857
0.1455	0.1442	14.0000	11.5000	0.0766	-2.56978868
0.1390	0.1377	15.0000	12.5000	0.0731	-2.61588021
0.1286	0.1273	16.0000	13.5000	0.0676	-2.6943526
0.0935	0.0922	17.0000	14.5000	0.0490	-3.01664408
0.0701	0.0688	18.0000	15.5000	0.0366	-3.30903682
0.0571	0.0558	19.0000	16.5000	0.0297	-3.51813301
0.0286	0.0273	20.0000	17.5000	0.0145	-4.23483505





Tabla A3.17 (continuación)

0.0117	0.0104	21.0000	18.5000	0.0055	-5.19999334
0.0039	0.0026	22.0000	19.5000	0.0014	-6.58666281
0.0026	0.0013	23.0000	20.5000	0.000689	-7.28031037
0.0013	0.0000	24.0000	21.5000	-	-
0.0013	0.0000	25.0000	22.5000	-	-
0.0000	-	26.0000	23.5000	-	-

Tabla A3.18 Resultados para el análisis de difusión para la corrida 6

Tiempo dec [hrs]	$(X-X^*)/(X_c-X^*)$ Experimental	$\ln(X_c-X^*)/(X-X^*)$ -	$D_s T/d^2$ Teórico	T_{dec}/d^2 -	$D_s \text{ Exp}$ [m ² /hr]
0.0000	1.0000	-8.2759E-06	-3.3541E-06	0	-
0.1667	0.9579	4.2971E-02	1.7416E-02	1666.66667	1.0449E-05
0.3333	0.9310	7.1451E-02	2.8958E-02	3333.33333	8.6873E-06
0.5000	0.9145	8.9388E-02	3.6228E-02	5000	7.2455E-06
1.5000	0.7524	2.8446E-01	1.1529E-01	15000	7.6858E-06
2.5000	0.6159	4.8472E-01	1.9645E-01	25000	7.858E-06
3.5000	0.5614	5.7735E-01	2.3399E-01	35000	6.6854E-06
4.5000	0.4876	7.1828E-01	2.9111E-01	45000	6.469E-06
5.5000	0.4621	7.7203E-01	3.1289E-01	55000	5.6889E-06
6.5000	0.3628	1.0140E+00	4.1096E-01	65000	6.3225E-06
7.5000	0.2903	1.2367E+00	5.0120E-01	75000	6.6827E-06
8.5000	0.2338	1.4533E+00	5.8900E-01	85000	6.9294E-06
9.5000	0.1786	1.7225E+00	6.9809E-01	95000	7.3484E-06
10.5000	0.1283	2.0536E+00	8.3228E-01	105000	7.9264E-06
11.5000	0.0766	2.5698E+00	1.0415E+00	115000	9.0564E-06
12.5000	0.0731	2.6159E+00	1.0602E+00	125000	8.4814E-06
13.5000	0.0676	2.6944E+00	1.0920E+00	135000	8.0887E-06
14.5000	0.0490	3.0166E+00	1.2226E+00	145000	8.4317E-06
15.5000	0.0366	3.3090E+00	1.3411E+00	155000	8.6522E-06
16.5000	0.0297	3.5181E+00	1.4258E+00	165000	8.6414E-06
17.5000	0.0145	4.2348E+00	1.7163E+00	175000	9.8075E-06
18.5000	0.0055	5.2000E+00	2.1075E+00	185000	1.1392E-05
19.5000	0.0014	6.5867E+00	2.6695E+00	195000	1.369E-05
20.5000	0.000689	7.2803E+00	2.9506E+00	205000	1.4393E-05
21.5000	-0.000001	-	-	215000	-
22.5000	-0.000001	-	-	225000	-
23.5000	-0.0007	-	-	235000	-
				Promedio	8.54837E-06





Parámetros ambientales para las 6 corridas

Corrida 1

Tabla A3.19 Parámetros ambientales leídos para la corrida 1

Tiempo	T ₁	T ₂	T _{amb}	HR _{amb}	LUX	Radiación
[hrs]	[°C]	[°C]	[°C]	%	X 1000	[W/m ²]
0.0000	32	33	16.9	43	560	620.6
0.1667	35	36	17.9	42.1	593	653.1
0.3333	39	38	18.8	41.2	658	687.1
0.5000	40	39	20.9	38.6	718	720
0.6667	42	38	20.7	26.8	704	762
0.8333	42	41	24.1	26.1	766	734
1.0000	43	43	25.5	22.5	828	817
1.1667	45	44	28.6	19.6	883	836
1.3333	43	43	28.2	24.1	933	872
1.5000	44	45	27.6	21.2	958	895
1.6667	45	46	29.6	19.6	999	916
1.8333	45	43	29.3	20.5	1034	938
2.0000	46	45	27.4	21.3	1059	954
2.1667	46	48	29.5	20.1	1059	970
2.3333	48	50	28.5	18	1201	1012
2.5000	45	49	30.4	16.6	1151	1016
2.6667	46	49	30.7	17.6	1161	1041
2.8333	45	49	31.3	17.2	1212	1051
3.0000	48	51	31.7	18.1	1194	412.7
3.5000	46	50	25.9	21.7	1252	1120
4.0000	45	49	27.5	20.4	1144	418.2
5.0000	34	38	25.2	24.1	1083	405.8
6.0000	30	31	25	24.4	279	512.1
7.0000	28	29	24.1	23.5	425	642.7
8.0000	30	31	17.1	42.9	570	257.5
9.0000	41	44	20.1	36.7	793	620.8
10.0000	45	49	24.8	28.1	1106	-
11.0000	47	51	25	20.7	861	-
12.0000	30	32	22.8	22.4	86	-
13.0000	24	24	22.3	26.6	404	-
14.0000	40	35	27.2	19.6	998	818
15.0000	36	34	24.8	21.8	326	655.4
16.0000	27	28	24.2	20.9	298	437.6



**Tabla A3.19 (continuación)**

17.0000	31	32	21.3	19.8	670	-
18.0000	41	44	22.8	19.3	786	-
19.0000	48	52	26.7	17.6	1110	-
20.0000	49	48	27.6	20.7	867	-
21.0000	50	51	29.8	20.9	109	-
22.0000	46	53	30.7	18.1	436	-
23.0000	40	43	39.9	18.5	1000	-
24.0000	42	43	30	20.1	365	-
25.0000	41	41	29.3	21.3	289	-

Corrida 2**Tabla A3.20 Parámetros ambientales leídos para la corrida 2**

Tiempo	T₁	T₂	T_{amb}	HR_{amb}	LUX	Radiación
[hrs]	[°C]	[°C]	[°C]	%	X 1000	[W/m²]
0.0000	33	32	20.2	43.6	600	-
0.1667	38	35	28.7	26.1	612	-
0.3333	41	39	30.7	18.7	702	-
0.5000	42	40	31.3	20.2	714	-
0.6667	41	41	28.9	21.8	780	-
0.8333	44	42	27.3	22.7	817	-
1.0000	43	46	28.9	20.1	859	-
1.1667	43	43	28.2	19.2	887	-
1.3333	43	43	26.6	22.1	931	-
1.5000	43	44	21.3	27.7	943	-
1.6667	44	45	22.8	24.6	964	-
1.8333	46	46	26.8	21.9	976	-
2.0000	46	47	27.3	21.1	928	-
2.1667	47	49	29.8	17.9	1043	-
2.3333	45	48	30.7	17.3	1022	-
3.0000	46	48	30	13.5	1013	-
4.0000	49	52	29.9	11.6	1112	-
5.0000	45	50	29.2	14.9	1105	-
6.0000	45	49	28.3	16.6	838	-
7.0000	38	39	22.8	31.4	727	-
8.0000	32	32	24.8	25.7	259	-
9.0000	32	32	25.5	19.4	685	642.9
10.0000	41	45	31.6	15.2	865	-
11.0000	48	52	30.7	14.6	1050	-





Tabla A3.20 (continuación)

12.0000	49	49	30.1	14.1	1037	-
13.0000	50	52	29.8	14	1063	-
14.0000	46	54	28.5	14.1	1076	-
15.0000	41	43	27.2	23.1	1018	-
16.0000	42	42	20.2	43.6	769	-
17.0000	41	42	28.7	26.1	752	-
18.0000	36	36	30.7	18.7	776	-
19.0000	43	43	31.3	20.2	759	646.5
20.0000	42	45	28.9	21.8	898	823
21.0000	42	47	27.3	22.7	1102	-
22.0000	50	47	28.9	20.1	1203	-
23.0000	48	48	28.2	19.2	1232	-
24.0000	45	46	26.6	22.1	998	-
25.0000	42	43	21.3	27.7	1012	-
26.0000	37	37	22.8	24.6	329	-
27.0000	40	43	26.8	21.9	405	399.2

Corrida 3

Tabla A3.21 Parámetros ambientales leídos para la corrida 3

Tiempo [hrs]	T₁ [°C]	T₂ [°C]	T_{amb} [°C]	HR_{amb} %	LUX X 1000	Radiación [W/m ²]
0.0000	39	34	26.2	12.4	735	-
0.1667	40	36	26.1	10.2	720	-
0.3333	41	35	30.1	9.8	806	-
0.5000	45	42	35.9	8.5	842	-
0.6667	45	46	33.8	8.9	870	-
0.8333	46	46	31.7	8.9	924	-
1.0000	46	48	31.9	9.7	940	-
1.1667	48	48	30.5	9.8	977	-
1.3333	48	46	28.5	14.8	1000	-
1.5000	49	45	25.8	16.8	1022	-
1.6667	48	42	26.8	15.2	1071	-
1.8333	50	49	27.9	10.8	1089	-
2.0000	49	51	30.4	8.3	1013	-
2.1667	48	50	30.9	11.6	1161	-
2.3333	49	51	28.8	12	1109	-
2.5000	49	50	31.7	13.8	1110	-
2.6667	48	51	32	12.7	1091	-





Tabla A3.21 (continuación)

2.8333	49	51	28.3	12.5	1190	-
3.0000	48	52	26.2	12.4	1201	-
4.0000	49	51	26.1	10.2	1187	-
5.0000	49	52	30.1	9.8	1123	-
6.0000	49	44	35.9	8.5	959	-
7.0000	40	40	33.8	8.9	733	-
8.0000	34	36	31.7	8.9	469	-
9.0000	40	45	31.9	9.7	762	-
10.0000	48	50	30.5	9.8	882	-
11.0000	52	50	28.5	14.8	1043	-
12.0000	53	55	25.8	16.8	1131	-
13.0000	49	56	26.8	15.2	1086	-
14.0000	48	51	27.9	10.8	1067	-
15.0000	51	55	30.4	8.3	896	-
16.0000	50	53	30.9	11.6	765	-
17.0000	35	35	28.8	12	550	-

Corrida 4

Tabla A3.22 Parámetros ambientales leídos para la corrida 4

Tiempo [hrs]	T₁ [°C]	T₂ [°C]	T_{amb} [°C]	HR_{amb} %	LUX X 1000	Radiación [W/m ²]
0.0000	35	32	26.8	26.5	567	-
0.1667	38	34	26.6	24.2	689	-
0.3333	41	36	34.9	18.6	799	-
0.5000	42	41	31.2	23.4	842	-
0.6667	44	42	30.4	22.2	905	-
0.8333	45	45	30.2	21.7	925	-
1.0000	45	45	27.7	24.5	941	-
1.1667	45	46	28.3	23.4	965	-
1.3333	44	46	26.7	32.2	987	-
1.5000	45	47	27.3	30.9	1000	-
1.6667	45	47	28.8	20.7	1225	-
1.8333	45	48	31.7	15.7	1055	-
2.0000	45	49	32	12.7	1054	-
3.0000	50	49	31	13.6	1023	-
4.0000	49	50	30	11.1	990	-
5.0000	49	52	28	10.9	805	-
6.0000	36	39	27.9	10.5	327	-





Tabla A3.22 (continuación)

7.0000	34	32	26.8	26.5	121	-
8.0000	36	38	26.6	24.2	777	-
9.0000	44	45	34.9	18.6	886	-
10.0000	48	51	31.2	23.4	1045	-
11.0000	51	55	26.2	12.4	1132	-
12.0000	50	53	26.1	10.2	1089	-
13.0000	49	51	30.1	9.8	1054	-
14.0000	47	53	35.9	8.5	834	-
15.0000	46	49	33.8	8.9	743	-
16.0000	45	47	31.7	8.9	546	-

Corrida 5

Tabla A3.23 Parámetros ambientales leídos para la corrida 5

Tiempo	T ₁	T ₂	T _{amb}	HR _{amb}	LUX	Radiación
[hrs]	[°C]	[°C]	[°C]	%	X 1000	[W/m ²]
0.0000	43	42	29.2	19.8	806	-
1.0000	43	42	32.1	18.5	822	-
2.0000	48	45	33.9	16.7	868	-
3.0000	45	47	31	11.5	910	-
4.0000	45	45	33.5	11.1	956	-
5.0000	42	49	32.6	11.6	983	-
6.0000	48	49	32.1	7.4	977	-
7.0000	49	50	31	8.5	1042	-
8.0000	50	53	31.2	6.6	1073	-
9.0000	51	54	26.5	24.6	1092	-
10.0000	48	54	27.1	22.5	1118	-
11.0000	51	52	28.7	17.6	1138	-
12.0000	51	54	31.4	10.9	1148	-
13.0000	52	55	33	11.2	1173	-
14.0000	52	54	32.8	13.6	1183	-
15.0000	53	54	32.5	12.6	1190	-
16.0000	52	54	31.7	11.5	1191	-
17.0000	51	53	30.8	11	1196	-
18.0000	50	54	27.5	25.5	1199	-
19.0000	52	57	28.6	25.3	1142	-
20.0000	52	57	29.9	19.9	1099	-
21.0000	51	45	32.1	19.8	999	-





Tabla A3.23 (continuación)

22.0000	45	49	33	15.6	761	-
23.0000	44	41	32.6	14.5	657	-
24.0000	37	39	31.6	13.4	789	-
25.0000	45	47	30.6	12.7	967	-
26.0000	46	49	29.6	11.9	1111	-

Corrida 6

Tabla A3.24 Parámetros ambientales leídos para la corrida 6

Tiempo [hrs]	T ₁ [°C]	T ₂ [°C]	T _{amb} [°C]	HR _{amb} %	LUX X 1000	Radiación [W/m ²]
0.0000	38	33	24.9	25.1	587	-
1.0000	40	35	28.9	17.6	602	-
2.0000	45	37	30.8	19.7	641	-
3.0000	41	39	31.6	21.7	694	-
4.0000	43	42	30.1	15.8	720	-
5.0000	42	42	31.6	16.8	713	-
6.0000	44	44	30.8	16.3	776	-
7.0000	45	46	29.3	16	813	-
8.0000	43	46	28.1	17.1	826	-
9.0000	43	45	23.7	34.3	855	-
10.0000	45	47	25.5	30.2	885	-
11.0000	46	48	27.5	26.8	905	-
12.0000	47	48	28.8	23.5	955	-
13.0000	47	47	27	25.5	999	-
14.0000	47	49	26.6	26.1	1001	-
15.0000	48	49	25.5	27.5	1045	-
16.0000	49	50	23.9	28.3	1098	-
17.0000	50	51	23.1	28.4	1112	-
18.0000	49	53	23.1	33.6	996	-
19.0000	50	57	24.5	29.8	1111	-
20.0000	52	48	28.5	25.6	1058	-
21.0000	49	46	28.5	22.6	678	-
22.0000	39	40	27.1	23.6	244	-
23.0000	34	34	26.5	22.1	99	-
24.0000	36	32	25.9	21.5	639	-
25.0000	44	45	23.6	22.6	733	-
26.0000	47	50	22.7	23	990	-

