

UCLV
Universidad Central
"Marta Abreu" de Las Villas



FQF
Facultad de
Química y Farmacia

**Departamento de Ingeniería
Química**

TRABAJO DE DIPLOMA

**Título: Evaluación de secador solar para macroalgas
marinas**

Autora: Edisleidy Acosta Carbajal

Tutores: Dr. C. Agustín García Rodríguez (UCLV)

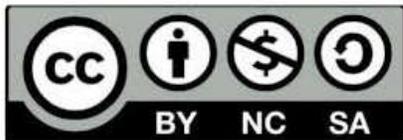
Ing. Liset Roche Delgado (UCLV)

Curso 2017-2018

Este documento es Propiedad Patrimonial de la Universidad Central “Marta Abreu” de Las Villas, y se encuentra depositado en los fondos de la Biblioteca Universitaria “Chiqui Gómez Lubian” subordinada a la Dirección de Información Científico Técnica de la mencionada casa de altos estudios.

Se autoriza su utilización bajo la licencia siguiente:

Atribución- No Comercial- Compartir Igual



Para cualquier información contacte con:

Dirección de Información Científico Técnica. Universidad Central “Marta Abreu” de Las Villas. Carretera a Camajuaní. Km 5½. Santa Clara. Villa Clara. Cuba. CP. 54 830

Teléfonos.: +53 01 42281503-1419

PENSAMIENTO

..“No hay ventura ni desgracia en el mundo, sino la comparación de un estado con otro, he ahí todo.

*Sólo el que ha experimentado el colmo del infortunio puede sentir la felicidad suprema. Es preciso haber querido morir, amigo mío, para saber cuán buena y hermosa es la vida. Vivid, pues, y sed dichosos, hijos queridos de mi corazón, y no olvidéis nunca que hasta el día en que Dios se digne descifrar el porvenir del hombre, toda la sabiduría humana estará resumida en dos palabras:
¡Confiar y esperar!”...*

El Conde de Montecristo, 1844. Alejandro Dumas.

AGRADECIMIENTOS

La gratitud es el legítimo pago del esfuerzo ajeno, es reconocer que todo lo que somos es la suma del sudor de los demás, es tener conciencia de que un hombre solo no vale nada.

Es por ello que mediante estas simples palabras y sin mencionar nombres quisiera agradecer a todas aquellas personas que de una forma u otra contribuyeron a que este trabajo pudiera realizarse y con ello, mis sueños. A todos ello GRACIAS

Resumen

La etapa de secado de la biomasa algal es una de las que más influyen en el costo del procesos de obtención de biomasa, si no se utiliza energía solar como medio de calentamiento del aire para el secado, por lo que el objetivo de este trabajo es la evaluación de un secador solar indirecto con circulación natural de aire para el secado de la macroalga marina *Ulva Lactuca*.

El estudio de secado de la *Ulva* en el laboratorio en una estufa de bandeja con circulación de aire permite determinar la curva de caracterización de secado del proceso y el régimen de secado del alga, lo que brinda la información necesaria para realizar la evaluación de equipos de secado a niveles superiores. Los índices alcanzados de humedad crítica y de equilibrio para la *Ulva Lactuca* fueron de 23% y 6 % respectivamente. Se describe el secador solar utilizado para el estudio de secado de la macroalga objeto de estudio y se realiza un estudio experimental para la evaluación de las características de operación del equipo y la eficiencia del proceso de secado bajo condiciones atmosféricas ambientales.

El secador trabaja adecuadamente logrando reducir la humedad desde 87% a 7% y alcanza una eficiencia del colector entre 49% y 71% para las diferentes corridas experimentales; valores estos que se encuentran en rangos adecuados dadas las características del equipo captador del calor solar. La eficiencia global del proceso de secado está entre 37.8% y 46.58% en las corridas experimentales efectuadas, lo que corresponde adecuadamente con los niveles esperados en los secadores solares que fluctúan entre 40 y 60%.

Summary

The stage of drying of the algal biomass is one of those that most influence the cost of the processes of obtaining biomass, if solar energy is not used as a means of heating the air for drying so the objective of this work is the evaluation of an indirect solar dryer with natural circulation of air for the drying of the marine Macroalga *Ulva Lactuca*. The study of drying of the *Ulva* in the laboratory in a tray stove with air circulation allows to determine the drying characterization curve of the process and the drying regime of the

alga, which provides the necessary information to perform the evaluation of equipment dried to higher levels. The reached rates of critical humidity and equilibrium for the *Ulva Lactuca* were 23% and 6% respectively.

The solar dryer used to study the drying of the macroalga under study is described and an experimental study is carried out to evaluate the operation characteristics of the equipment and the efficiency of the drying process under atmospheric environmental conditions.

The dryer works properly achieving a reduction of humidity from 87% to 7% and achieves a collector efficiency between 49% and 71% for the different experimental runs; These values are in suitable ranges given the characteristics of the solar heat collector equipment. The overall efficiency of the drying process is between 37.8 and 46.58% in the experimental runs carried out, which correlates adequately with the expected levels in solar dryers that fluctuate between 40 and 60%.

TABLA DE CONTENIDOS

PENSAMIENTO.....	i
AGRADECIMIENTOS.....	ii
RESUMEN.....	iii
INTRODUCCIÓN.....	1
CAPÍTULO 1 REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA.....	5
1.1 Generalidades de las algas.....	5
1.2 Clasificación de las macroalgas.....	6
1.3 Características de la Ulva Lactuca.....	8
1.4 Usos y aplicaciones de la Ulva Lactuca.....	9
1.5 Fundamentos de los procesos de secado.....	11
1.6 Equipamiento para el secado.....	13
1.7 Clasificación de los secaderos solares.....	15
1.8 Formas del secado de algas.....	16
Conclusiones parciales.....	17
CAPÍTULO 2. MATERIALES Y MÉTODOS.....	19
2.1 Recolección y preparación de la muestra a secar.....	19
2.2 Estudio de secado y determinación del contenido de humedad en el equilibrio en estufa.....	20
2.3 Cálculo y construcción de la curva de régimen de secado.....	21
2.4 Técnica operatoria para la determinación de la humedad en el equilibrio.....	25
2.5 Resultados obtenidos de la prueba de secado en la estufa.....	26
Conclusiones parciales.....	32
CAPÍTULO 3. Evaluación de secador solar para macroalga.....	33
3.1 Descripción del equipo experimental.....	33
3.1.1 Materiales empleados en la construcción del secador.....	34
3.2 Prueba y puesta en marcha del secador.....	35
3.2.1 Determinación de los parámetros de la prueba de secado.....	35
3.3 Resultados y discusión de la prueba de secado.....	38

3.4 Cálculo de los parámetros del colector de temperatura.....	52
3.5 Cálculo de la eficiencia del colector.....	55
3.5.1 Análisis de resultados de la eficiencia del colector.....	58
3.6 Cálculo de la eficiencia del secadero.....	57
Conclusiones parciales.....	59
CONCLUSIONES.....	66
RECOMENDACIONES.....	67
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	68
ANEXOS.....	74

Introducción

Las energías de fuentes alternativas como la solar, que contrarresten el uso intensivo de la biomasa forestal o de combustibles fósiles, constituyen una innovación técnica muy importante para frenar el proceso de deforestación que amenaza la sostenibilidad y la biodiversidad en el planeta **(BANOUT, J. et al, 2005)** y aunque la práctica del secado con energía solar es muy antigua, los primeros trabajos, fundamentalmente de carácter práctico, se reportan desde 1940. El desarrollo teórico y experimental del tema se observa a partir de 1960, donde, además, se aprecia el avance en el diseño de los secadores solares **(CORP, S.; LUGONES, B, 2016)**.

La preservación de productos alimentarios es esencial para mantenerlos por largo tiempo sin un deterioro posterior de la calidad del producto. Varias tecnologías de procesos han sido utilizadas a escala industrial para preservar estos productos. Entre estas, el secado se ajusta especialmente a países en desarrollo con pocas instalaciones de procesamiento térmico y a bajas temperaturas. **(MUJUMDAR, A.S. et al., 2007)**.

El uso de los sistemas térmicos solares para conservar vegetales y otras cosechas ha mostrado que es una opción práctica, económica y ambientalmente compatible. Los sistemas de calentamiento solar pueden mejorar la calidad del producto, a la vez que reduce desechos y combustibles tradicionales, mejorando la calidad de vida. La tecnología de secado solar ofrece una alternativa que puede procesar los vegetales en condiciones limpias, higiénicas y sanitarias con las normas nacionales e internacionales. Esta ahorra energía, tiempo, ocupa menor área, mejora la calidad del producto, hace más eficiente el proceso y protege al medio ambiente **(ZHANG, M. et al. 2005)**, **(FUNEBO, T.; OHLSSON, T., 1998)**.

La etapa de secado de la biomasa algal es una de las que más influyen en el costo de operación de procesos de obtención de biomasa de algas si no se utiliza energía solar como medio de calentamiento del aire para el secado **(WEISS, W.; BUCHINGER, J, 2016)**. Los secadores pueden ser continuos y discontinuos, pero en este tipo de proceso a pequeña escala se recomienda utilizar secadores discontinuos. Dentro de estos se encuentran los secadores de bandeja, de estantes al vacío, por congelado y solares **(TREYBAL, R. E. 1977)**. Estos últimos no necesitan de energía eléctrica para su funcionamiento, y los materiales para su construcción son de fácil acceso, como la madera o plástico para asegurar un aislamiento adecuado en la cámara de secado y los

materiales de la superficie captadora de la energía de la radiación solar son el vidrio, cobre, etcétera, por lo que su costo de construcción, operación y mantenimiento son mucho menores que los secadores anteriormente mencionados **(CORP, S.; LUGONES, B, 2016)**.

Existen distintos tipos de secaderos solares, los cuales se clasifican en secadores solares directos, indirectos y un híbrido de ambos, de acuerdo a la forma en que se transfiere el calor; a la forma en que la energía solar es utilizada y la circulación del aire dentro del mismo se clasifican en sistemas de secado con energía solar activa y pasiva, que son los secadores con circulación natural y forzada **(WEISS, W.; BUCHINGER, J, 2016)**, **(LIK, C.2016)**.

Para evitar que el material a secar, se deteriore, es conveniente utilizar secadores solares indirectos con circulación natural o con energía solar pasiva.

(LANCHAS, A.,2012) utiliza secadores solares directos tipo sauna, en los que se alcanza una temperatura de entre 35 °C - 50 °C, mientras que en los secadores indirectos se alcanzan temperaturas entre 30 °C y 80 °C.

Las plantas cuyas partes comestibles son las hojas son valoradas debido a su contenido de minerales y sales **(LANCHAS, A.,2012)** tal es el caso del alga marina *Ulva Lactuca*, conocida como lechuga de mar. El cambio más común que ocurre en los vegetales verdes durante el procesamiento térmico y almacenamiento es el cambio de color de verde brillante a carmelita **(SCHWARTZ, S. J.; VON-ELBE, J.H. 1983)** ;**(AN-ERL KING, V. et al. 2001)**. Un pretratamiento previo a la operación de secado puede ayudar a la retención de la clorofila. Varios métodos de pretratamiento pueden ser usados, conjuntamente con el proceso de secado para mantener o mejorar la calidad de producto secado, siendo el blanqueo el más común. **(SCHWARTZ, S. J.; VON-ELBE, J.H.1983)**, **(AN-ERL KING, V. et al..2001)**, **(AKTAS, T. et al. 2007)**,**(RASTOGI, N.K. et al .2004)**, **(MATE, J.I. et al.1999)**, **(AHMED, J. et al. 2001)**,**(NAPHAPORN, C. et al. 2010)**

Los principios del secado para productos agrícolas y marinos se aplican en general al secado mecánico convencional. Sin embargo, se debe apuntar que los principios del secado convencional son independientes del tipo de energía utilizada **(EKECHUKWU, O.V.1999)**. La velocidad de secado depende solamente de las propiedades del material a secar, la temperatura del aire de secado y el contenido de humedad. Sobre esto, hay muchas investigaciones en estudios experimentales y modelación matemática del proceso de secado solar de varios vegetales y frutas. **(BALA, B. K.; MONDOL, M.R.A. 2001)**, **(BELESSIOTIS, V.; DELYANNIS.2011)**,**(BENA,B.; FULLER, R.J. 2002)**, **(BENAMOUN,**

L.; BELHAMRI, A. 2003), (BEUCHAT, L.R.), (BOILIN, H.R. et al. 1980), (AYENSU, A.; ASIEDU-BONDZIE, V).

Como un ejemplo, se formula una ecuación empírica que predice el tiempo de secado, la cual es válida para secado solar en temperaturas desde 60 °C - 80 °C hasta 140 ° para secado convencional e híbrido (EISSEN, W. et al 1985).

El secado convectivo con aire caliente es el método más popular aplicado para reducir el contenido de humedad en frutas y vegetales (LEWICKI, P.P.2006). El coeficiente de difusión del agua que refleja la total complejidad del transporte de agua se refiere como un coeficiente efectivo. Generalmente es difícil predecir los valores de los coeficientes de difusión teóricamente, por tanto, se pueden usar técnicas experimentales basadas en la cinética absorción/desorción, distribución del contenido de humedad o porosidad (BIALOBRZEWSKI, I.; MARKOWSKI, M.2004). Para vegetales con contenido de humedad altamente significativo se asume que la difusión másica se determina por las condiciones externas de la transferencia de masa. La velocidad del movimiento de la humedad durante el secado se describe bien por el valor de la difusividad efectiva (Def) (JASIM, A. et al.).

Los secaderos solares admiten discretas cantidades de biomasa húmeda y están protegido de las situaciones ambientales que puedan dañar el producto, además no necesita energía eléctrica para su funcionamiento, con bajos costos de construcción y operación.

Problema científico: Es insuficiente la información existente sobre el diseño y operación de secadores solares para macroalgas marinas que permitan pasar progresivamente a escalas superiores.

Hipótesis: Con la evaluación de un sistema de secado solar se obtendrán los parámetros fundamentales y las condiciones de operación para el secado de macroalgas marinas que permiten pasar progresivamente a escalas superiores.

Objetivo general:

Evaluar un secador solar indirecto con circulación natural de aire para el secado de Macroalgas marinas.

Objetivos específicos:

1. Realizar análisis bibliográfico sobre el secado solar de macroalgas marinas, que incluye: influencia de la iluminación, condiciones atmosféricas (humedad relativa, temperatura y velocidad del aire), tecnologías de secado y equipamientos.

-
2. Determinar los índices fundamentales del proceso de secado de la macroalga *Ulva Lactuca* a escala de laboratorio en estufa con circulación de aire.
 3. Instalar un secador solar de circulación natural a nivel piloto para secar macroalgas marinas en las condiciones más favorables para el desarrollo del proceso.
 4. Evaluar el sistema de secado según los parámetros de control operacional en el proceso como son: radiación solar y condiciones atmosféricas (humedad y temperatura).

Capítulo 1. Revisión bibliográfica.

1.1 Generalidades de las algas.

Fue el oxígeno generado por la fotosíntesis de las algas verde azules, y posteriormente por las algas eucariotas, más desarrolladas, el que formó nuestra atmósfera. Actualmente, las algas realizan cerca de 50 % de la fotosíntesis del planeta, lo que las ubica en una posición crucial para el mantenimiento de la vida en la Tierra. **(Fernández Avilés., Y. , 2012).**

Las algas poseen una diversidad mayor que muchos grupos de plantas terrestres o de grupos de animales, existen más de 36 000 especies conocidas de algas, desde algas microscópicas unicelulares flageladas o no flageladas hasta algas pluricelulares que pueden llegar a medir más de 50 metros de largo. Se cree que la edad geológica de las algas verde azules es poco más o menos 3 550 millones de años, a diferencia de los 400 millones de años que tienen las plantas terrestres.

(Fernández Avilés., Y., 2012).

La diversidad de las algas también está dada por su bioquímica y fisiología, además por la organización de su material genético que se refleja tanto en las algas verde azules, llamadas procariotas, que son más simples y están relacionadas con las bacterias, como en el resto de las especies de algas, llamadas eucariotas. Esta diversidad genética y fenotípica se manifiesta más claramente en su diversidad ecológica, que es la que determina su distribución en la biosfera. Por otra parte, conviene señalar que los tan apreciados arrecifes coralinos están compuestos por una gran cantidad de algas hasta tres cuartas partes del tejido de un coral vivo son algas, y que mucha de la productividad primaria generada por estos corales se debe a las algas, mientras que en las regiones costeras las macroalgas son un componente ecológico vital para el desarrollo de comunidades de invertebrados al servirles de refugio y alimento, y cuya repercusión se observa en las pesquerías de otros organismos marinos como peces y moluscos. Las 36 000 especies de algas conocidas apenas representan 17 % de las especies que existen actualmente, lo que indica que el número total de especies de algas que existen en el mundo debe superar las 200 000. **(Robledo, 2012).**

Las algas son un tipo de plantas de organización sencilla que pueden vivir en aguas marinas o dulces. Las algas componen un grupo de organismos que utiliza la luz para transformar dióxido de carbono en biomasa, aceites o azúcares y se extiende por una amplia variedad de ecosistemas acuáticos y terrestres. Dentro del reino de estos

organismos fotosintéticos existen dos grupos diferenciados, microalgas y macroalgas.

(Candelaria, 2012)

A diferencia de las plantas, las algas no tienen una verdadera raíz, tallo, hojas o tejido vascular y su forma de reproducción es simple. Su cuerpo vegetativo es una estructura llamada talo (talofitas). **(Barrios, 2011).**

Se considera que hay unas 15 800 especies de macroalgas repartidas entre: macroalgas rojas (6 000 especies), pardas (1 800), verdes (8 000 especies, de las cuales 1 000 son especies marinas y el resto de agua dulce).

1.2 Clasificación de las macroalgas.

La macroalga es un tipo de alga marina multicelular y por lo tanto se diferencia de las algas microscópicas en su tamaño. Las macroalgas son generalmente algas de tipo marrón o rojo que se encuentran entre otros tipos de alga, como el alga verde. Están principalmente asociadas a fondos principalmente rocosos, formando colonias de cientos o miles de organismos. A este tipo de agrupaciones se les conoce como praderas o bosques de macroalgas. **(Colectivo de autores, 2015).** Las macroalgas marinas comprenden 92 géneros, agrupadas en verdes (Chlorophyta) con alrededor 4 038 especies en el mundo, pardas (Phaeophyta) aproximadamente 3 054 especies en el mundo y rojas (Rhodophyta) con 6 110 especies en el mundo y dentro de ellas con 12, 29 y 50 géneros respectivamente **(Barrios, 2011).**

Las macroalgas, conocidas como los vegetales más sencillos, ya que su estructura está formada por una agrupación de células con cierta diferenciación **(Chapman & Chapman, 1980)**, donde ciertas partes de la planta asumen funciones específicas. Poseen plastos ricos en clorofila y otros pigmentos; y se reproducen, generalmente en fases alternas, sexual y asexualmente. Las algas marinas viven hasta la profundidad donde llega la luz solar; salvo algunas algas rojas, que pueden habitar a 100 m. Este grupo tan específico del reino vegetal, en una de sus clasificaciones fundamentales se divide en base al pigmento predominante en su estructura, siendo la más aceptada por los botánicos en la actualidad.

Esta clasificación divide a las algas en cuatro grupos:

Cianofíceas (algas verde-azuladas): Son organismos procariotas fotosintéticos que poseen clorofila a, están más próximos a las otras bacterias fotosintéticas que a las algas eucariotas, por lo que también se les denomina cianobacterias **(BERNADÓ, P. N. 2014)**.

Rodofíceas (algas rojas): El color pardo rojizo viene dado por la existencia de biliproteínas (ficoeritrina y ficocianina, principalmente), que contribuyen a enmascarar el color verde de la clorofila a y b; como material de reserva estas células acumulan almidón y su pared celular contiene, además de fibrillas de celulosa, galactanos sulfatados como el agar y los carragenanos. Son organismos eucarióticos presentes sobre todo en el medio marino, la mayoría son pluricelulares aunque también hay especímenes unicelulares; constituyen el grupo más diverso entre las algas bentónicas **(BERNADÓ, P. N. 2014)**

Feofíceas (algas pardas): La coloración parda, de tonalidad muy variable, se debe a la presencia de una gran cantidad de xantófilas, entre las que destacan fucoxantina y flavoxantina; además de la clorofila a poseen clorofila c; que muchas veces son enmascaradas por la abundancia de los otros pigmentos **(BERNADÓ, P. N. 2014)**. Son algas eucariotas, pluricelulares y morfológicamente muy diversas; se encuentran sólo en agua de mar y con formas que van desde algas filamentosas de estructura sencilla hasta algas que tienen tejidos diversificados por los que se realiza transporte de nutrientes dentro de la planta. En general, este tipo de algas es de crecimiento rápido y de gran tamaño, pudiendo alcanzar hasta las 200 m de largo. Son muy utilizadas como estabilizantes de emulsiones, como fertilizantes y para la obtención de yodo, entre otras.

Clorofíceas (algas verdes): Es un grupo muy heterogéneo de algas con clorofila a y b, algunas xantófilas tales como luteína, violaxantina, neoxantina y enteroxantina; con esta composición de pigmentos el cuerpo del alga se ve verde, lo que permite una fácil identificación en terreno. Una característica biológica importante de este grupo es el almidón que almacenan como material de reserva en sus células, **(BERNADÓ, P. N. 2014)**. Morfológicamente son muy variadas, desde algas unicelulares a pluricelulares bastante complejas. Se pueden reproducir en forma alternada vegetativa, asexual o sexualmente. Son muy importantes porque constituyen el primer eslabón en la cadena alimenticia de su hábitat y contribuyen al aporte de oxígeno atmosférico. Son algas que han colonizado todos los ambientes, encontrándose el 90 % de las especies en agua dulce y el 10 % restante en aguas marinas; siendo en los mares fríos y templados donde se produce la mayor cantidad de especies.

1.3 Características de la Ulva Lactuca.

Ulva Lactuca, conocida comúnmente como lamilla, es un alga verde incluida entre las lechugas de mar, que crece en la zona intermareal de la mayoría de los océanos del mundo.

Esta es de talo verde laminar, foliáceo, lobulado, formado por dos capas de células, fijado al sustrato por rizoides que crecen como expansiones de las células basales del talo. Puede llegar a medir 1 m de longitud, de contorno más o menos redondeado, a veces dividido. Sus largas hojas le dan un aspecto similar al de la lechuga. En la zona basal puede presentar unas costillas más oscuras debido al agrupamiento de rizoides color verde claro u oscuro. Para una correcta determinación es necesario su observación al microscopio; en este se puede observar como sus células se disponen en líneas ligeramente curvas, todas con un pirenoide generalmente, y que las células más superiores que emiten rizoides son del mismo tamaño que las que no los emiten. **(Álvarez Cobelas, M., Gallardo, T. 1989).**

Especie dioica cuyos talos productores de gametos masculinos (gametófitos masculinos) se distinguen de los productores de gametos femeninos (gametófitos femeninos) por la tonalidad de los márgenes de la lámina: verde amarillento en los primeros y verde oscuro en los segundos. **(Basaure, P., 2011).**

Esta es un alga comestible, que contiene vitamina C y vitamina A. En cosmética se utiliza en la elaboración de productos por sus propiedades hidratantes y diversas poblaciones costeras le dan uso agrícola como fertilizante. **(Colectivo de autores, 2015).**

Poseen un alto contenido de fibra dietética, especialmente de fibra soluble aunque la mayor fuente de polisacáridos es obtenida a partir de las macroalgas rojas y pardas, también existen polisacáridos sulfatados que forman la pared celular en las algas verdes Ulva Fasciata y Ulva Lactuca poseen cantidades considerables de este componente, el cual varía de acuerdo al lugar y época del año. En Ulva Lactuca se ha comprobado la presencia de glucosa, xylosa, glucitol y un trisacárido. **(Basaure, P., 2011).**

La reproducción en Ulva sigue un ciclo lunar con emisión de los elementos reproductores en los períodos de luna llena o cambios de luna. El período reproductivo de estas macroalgas es de marzo a julio, cuando se acercan grandes mareas. Con buenas condiciones ambientales los talos jóvenes crecen entre 3 mm y 5 mm en menos de un mes y se tornan adultas entre 3 y 4 meses. Su ciclo de vida es corto, se estima que dura

entre 5 y 8 meses. Los talos maduran en algunas semanas en ambientes de salinidades bajas y temperaturas altas. **(Basaure, P., 2011)**.

Estos organismos marinos mantienen una elevada tasa de crecimiento cuando la disponibilidad de nutrientes es alta.

En las costas cubanas es común observar *Ulva Fasciata* y *Ulva Lactuca*. Estos vegetales marinos alcanzan aproximadamente 15 cm de altura cuando están adheridas al sustrato, rocas u otros objetos sólidos en fondos arenosos de aguas someras. En lugares tranquilos se han encontrado talos de hasta 1 m de altura y 30 cm o 50 cm de ancho. Ambas especies pueden resistir períodos largos de desecación, por lo que están capacitadas para vivir en el mesolitoral. **(Cano Mallo, 2008)**.

Atendiendo el análisis de composición de la *Ulva Lactuca*, referido a peso seco (mg/100g), los siguientes son los datos: Nitrógeno (0,95 – 2,94), fósforo (130,4 – 20,55), potasio (792,7 – 2 816,2), sodio (674,77 – 1 075,8), calcio (858,0 – 880,0), magnesio (3 582,2 - 3 785,3). Los componentes orgánicos referidos a porcentaje peso seco son: Proteína (5,9 % – 18,38 %), fibra (7,6 %- 27,4 %), cenizas (25,5 % - 33,4 %), carbohidratos (49,25 % - 68,9 %), materia orgánica/Demanda Química de Oxígeno DQO (2 726,0 mg/L – 3 456 mg/L). **(Basaure, 2011)**

A modo de comentario general **(Basaure, 2011)** es posible afirmar que esta especie de alga contiene 10 veces más vitamina C que una naranja, 2 veces más de vitamina A que una col, posee un alto porcentaje de hierro, de hecho 10 gramos de esta alga equivalen a 500 gramos de consumo de espinaca, 100 gramos de *Ulva Lactuca* corresponden a 2 veces más de hierro si se consumen 100 gramos de lenteja, posee además de yodo, pigmentos como los carotenoides y las xantofilas. Una vez desalinizada, su pH medio corresponde a 6.8. Es una materia orgánica rica en vitamina E, B y B₁₂.

1.4 Usos y aplicaciones de la Ulva Lactuca.

La *Ulva Lactuca* presentan multitud de propiedades y compuestos muy interesantes para diferentes sectores de la economía como la alimentación animal, químicos, cosméticos y demás productos farmacéuticos. Uno de los principales usos que se pueden dar es el aprovechamiento de su capacidad para acumular diferentes nutrientes y contaminantes. Esto hace que tengan un importante papel en el desarrollo de biofiltros para aguas residuales, ya procedan de industrias, de explotaciones acuícolas o de explotaciones agrícolas **(Coletivo autores, 2014)**. Por ejemplo, debido al crecimiento que ha

experimentado la acuicultura, el nivel de fósforo y nitrógeno inorgánico en el agua se ha visto incrementado de manera importante. Acompañado por el vertido de materia orgánica generado también por esta producción intensiva, favorecen las condiciones idóneas para que se produzcan procesos de eutrofización en lagos, costas y estuarios. Con la biofiltración mediante macroalgas de los nutrientes como N y P, se consigue una elevada proporción de proteína en éstas que permite su utilización en la fabricación de piensos. Además, son capaces de acumular algunos contaminantes como metales pesados, siendo de utilidad para tratar efluentes de diferentes industrias. **(Machado. S, 2015)**

El aprovechamiento de diferentes componentes que pueden generar éstas y que presentan diferentes aplicaciones en la industria alimentaria como para elaborar gelatinas o dar una consistencia gelatinosa a alimentos y preparados industriales y tienen un importante poder conservante **(Lordan, 2011)**. Entre estos componentes destacan diferentes antioxidantes, vitaminas, proteínas, ácidos grasos y polisacáridos **(Lordan, 2011; Pereira, 2012)**. Presenta muchas aplicaciones en diferentes industrias como la producción de anticoagulante, antioxidantes, inmunomoduladores, antihipercolesterolemicos, antihiperlipidémicos, antivirales, antitumorales y sirve también como elicitador en defensa en plantas. Además se utiliza en la fabricación de biomateriales como nanofibras, macropartículas, medios de cultivo celular, antiadhesivos e hidrogeles **(Coste, 2015)**.

En el mundo de los cosméticos, se utilizan extractos de *Ulva Lactuca*, ya que contiene un compuesto, la aosaína, con muchas propiedades beneficiosas para la piel. La aosaína de la *Ulva Lactuca* se encarga de proteger la elastina y el colágeno, ya que inhibe la acción de un enzima que se llama elastasa. También es utilizada por su estimulación, regeneración celular, acción antioxidante y efectos de limpieza radicales, por lo que se usa en la confección de cremas. Presentan capacidad de proteger la piel frente a la radiación. Se incorporan en jabones, cremas de afeitado, mascarillas, Su acción benéfica además se manifiesta en curas de rejuvenecimiento de la piel o contra la obesidad y celulitis. **(Machado. S, 2015)**

Según **(Bernadó, 2014)** también pueden ser utilizadas como fuentes de combustibles biológicos, puesto a que sus aceites esenciales son utilizados para obtener biodiesel, bioetanol, biobutanol por lo que permiten reducir el impacto ecológico. **(Machado. S, 2015)**

Estas macroalgas son capaces de colaborar en sostener el ecosistema puesto a que son alimento para otras especies y generan oxígeno gracias a su capacidad para la fotosíntesis.

Sus usos medicinales aumentan cada día por sus propiedades estimuladoras del crecimiento, y retardadoras del envejecimiento. También actúan sobre el sistema inmunológico, mejorando la digestión, desintoxicando y neutralizando venenos.

1.5 Fundamentos de los procesos de secado

En los estudios más teóricos se pone el énfasis en los mecanismos de transferencia de energía y de materia, así, el secado se puede definir como un proceso en que hay intercambio simultáneo de calor y masa, entre el aire del ambiente de secado y el sólido. Dos procesos ocurren simultáneamente cuando un sólido húmedo es sometido a un secado térmico.

1. Hay transferencia de energía (calor) de los alrededores para evaporar la humedad de la superficie.
2. Hay transferencia de la humedad hacia la superficie del sólido.

De estos dos procesos dependerá la rapidez con la cual el secado se lleve a cabo.

Para que el secado se ejecute, la humedad debe ganar calor de sus alrededores y de esta manera poder evaporarse, para ser liberado por un gas transportador. La acumulación de vapor sobre la superficie de secado y el manejo adecuado de estas condiciones es determinante para lograr un proceso satisfactorio **(Weiss and Buchinger, 2014)**

Las operaciones de secado pueden llevarse a cabo en lotes o en continuo. El secado por lotes, es una operación relativamente cara, en consecuencia se limita a operaciones a pequeña escala, a plantas piloto, a trabajos de investigación y para secar materiales valiosos cuyo costo total será poco alterado por el costo agregado en la operación de secado.

Para reducir el contenido de humedad en el secado de diversos materiales, es conveniente estimar el tamaño del secador, las diferentes condiciones de operación de humedad y temperatura para el gas empleado, y el tiempo requerido para lograr el grado de secado. El contenido de humedad de equilibrio del material a secarse bajo condiciones específicas de humedad y temperatura del gas debe determinarse experimentalmente. Las mediciones de velocidad del secado por lotes son relativamente fáciles de obtener a

partir de datos experimentales y proporcionan mucha información no sólo para la operación por lotes sino también para la continua. **(Carter, 2012)**

La operación de secado es una operación de transferencia de masa de contacto gas-sólido, donde la humedad contenida en el sólido se transfiere por evaporación hacia la fase gaseosa, en base a la diferencia entre la presión de vapor ejercida por el sólido húmedo y la presión parcial de vapor de la corriente gaseosa. Cuando estas dos presiones se igualan, se dice que el sólido y el gas están en equilibrio y el proceso de secado cesa.

Es un fenómeno complejo que involucra la transferencia de calor y masa (el transporte de calor hacia dentro del material y el transporte de agua hacia el exterior). Existen muchos mecanismos posibles de secado, pero aquellos que controlan el secado de una partícula dependen de su estructura y de los parámetros de secado - condiciones de secado (temperatura T , velocidad v y humedad relativa del aire), contenido de humedad, dimensiones, superficie expuesta a la velocidad de transferencia, y contenido de humedad de equilibrio de la partícula **(Colectivo de autores, 2015)**.

Durante la transferencia de calor se pretende eliminar el agua en forma de vapor de la superficie de la partícula, algunas condiciones toman un papel importante como son: la temperatura, flujo del aire y humedad, área de superficie expuesta al calor y presión. Ya que estas condiciones durante la etapa inicial del secado son importantes para remover la humedad de la superficie. En algunos materiales el exceso de evaporación en la superficie, puede causar encogimiento, esto después de que la humedad inicial ha sido removida dando lugar a altos porcentajes de humedad del interior hacia la superficie, formando tensiones dentro del material ocasionando deformaciones .

Los factores que pueden determinar la rapidez de secado, son: la temperatura, su contenido de humedad y la naturaleza física dentro de la partícula. Durante la transferencia de calor hacia un material húmedo, un gradiente de temperatura se genera dentro del material mientras la evaporación de la humedad ocurre en la superficie. La evaporación hace que la humedad del material vaya desde el interior hacia la superficie, lo cual sucede a través de mecanismos como son: flujo capilar y presión interna causada por el encogimiento durante el secado. **(Weiss and Buchinger, 2014)**

Observaciones experimentales han llevado a la división de dos fases de secado, una está relacionada con la velocidad constante, mientras que la segunda fundamenta la velocidad decreciente de secado. El contenido de humedad durante estas dos fases ocurre en el

punto de transición y se llama punto crítico conocido comúnmente como humedad crítica y se le conoce como periodo inicial a la etapa constante.

La figura 1.1 muestra el comportamiento de la humedad con respecto al tiempo durante el proceso de secado. La parte uniforme corresponde al periodo de velocidad constante y la no uniforme a la velocidad decreciente.

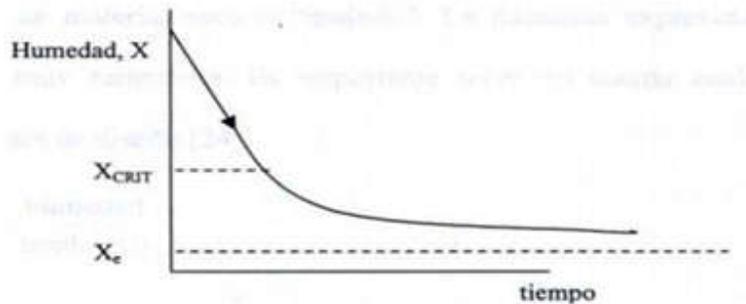


Figura 1.1 Gráfico de humedad contra tiempo.

La humedad de equilibrio es función de la humedad relativa y de la temperatura para una determinada sustancia.

1.6 Equipamiento para el secado

De acuerdo a la clasificación de la operación de secado se encuentran los siguientes tipos de equipos (**Treybal, 1977**):

- Secaderos de calentamiento directo.

a) Equipos discontinuos

Secaderos de bandejas con corriente de aire.

Secaderos de cama fluidizada.

Secaderos con circulación a través del lecho sólido.

b) Equipos continuos

Secaderos de túnel.

Secaderos neumáticos.

Secaderos ciclónicos.

Secaderos de cama chorreada.

Secaderos de cama vibratoria.

Secadero de cama fluidizada.

Secaderos sprays.

Secaderos de tipo turbina.

Secaderos rotatorios.

- Secaderos de calentamiento indirecto:

a) Equipos discontinuos.

Secaderos de bandejas a vacío.

Secaderos de bandejas a presión atmosférica.

Secaderos por congelación.

b) Equipos continuos.

Secaderos de tambor.

Secaderos con circulación a través del lecho

Sustancias húmedas pueden ser secadas mediante la transferencia de calor, utilizando gases secos a través de la materia húmeda, independientemente de que el material a secar pueda o no ser fluidizable, un suministro de calor, comúnmente de gases secos es necesario. En algunos casos el producto a ser secado va a tolerar ser secado por gases calientes para procesos de combustión, mientras que otros productos son menos tolerantes y requieren de gases no como lo es el aire caliente. Sistemas de lecho fluidizado han sido desarrollados como suministradores de gas caliente para realizar el secado, como en la manufactura del cemento, etc. Algunos tipos de sistemas proveen fluidos calientes de combustión mientras que otros producen aire limpio y caliente. A causa de los procesos de secado que utilizan técnicas de fluidización, se han discutido facciones relacionadas con algunos tipos de secaderos, así como de procesos de diseño. Si el producto es capaz de ser fluidizado en el estado de humedad, se puede llevar a cabo un buen contacto entre la partícula y el gas. Además de una generosa manejabilidad y que las partes del sistema no se necesitan trasladar de un lugar a otro todo el tiempo, hacen a este proceso realmente atractivo para cualquier industria (**MONTERO, I.2005**).

Otro tipo de secadero que es muy utilizado es el de charolas o bandejas el cual es un equipo totalmente cerrado y aislado en el cual los sólidos se colocan en grupos de charolas en el caso de sólidos particulados. La transmisión de calor puede ser directa del gas a los sólidos, donde se utiliza la circulación de grandes volúmenes de gas caliente, o indirecta, utilizando repisas o bases calentadas, serpentines de radiador o paredes refractarias al interior de la cubierta. En unidades de calor indirecto, excepto cuando los equipos de repisas al vacío, casi siempre se necesita la circulación de una pequeña cantidad de gas para eliminar el vapor de humedad del compartimiento y evitar la saturación y condensación del gas. Las unidades de compartimientos se emplean para

calentar y secar madera, cerámica, materiales en hojas (sostenidas en postes), objetos pintados y metálicos, y todas las formas de sólidos particulados. (MONTERO, I.2005).

1.7 Clasificación de los secaderos solares.

Existen distintos tipos de secaderos solares como los que explican (Lik Hii et al., 2012) y (Weiss and Buchinger, 2014) en sus estudios, los cuales se clasifican en: directos, indirectos y un híbrido de ambos, de acuerdo a la forma en que se transfiere el calor; y de acuerdo a la forma en que la energía solar es utilizada y la circulación del aire dentro del mismo, se clasifican en sistemas de secaderos con energía solar activa y pasiva, que son los secaderos con circulación natural y forzada. También existen combinaciones de estas clasificaciones como en la figura 1.2.

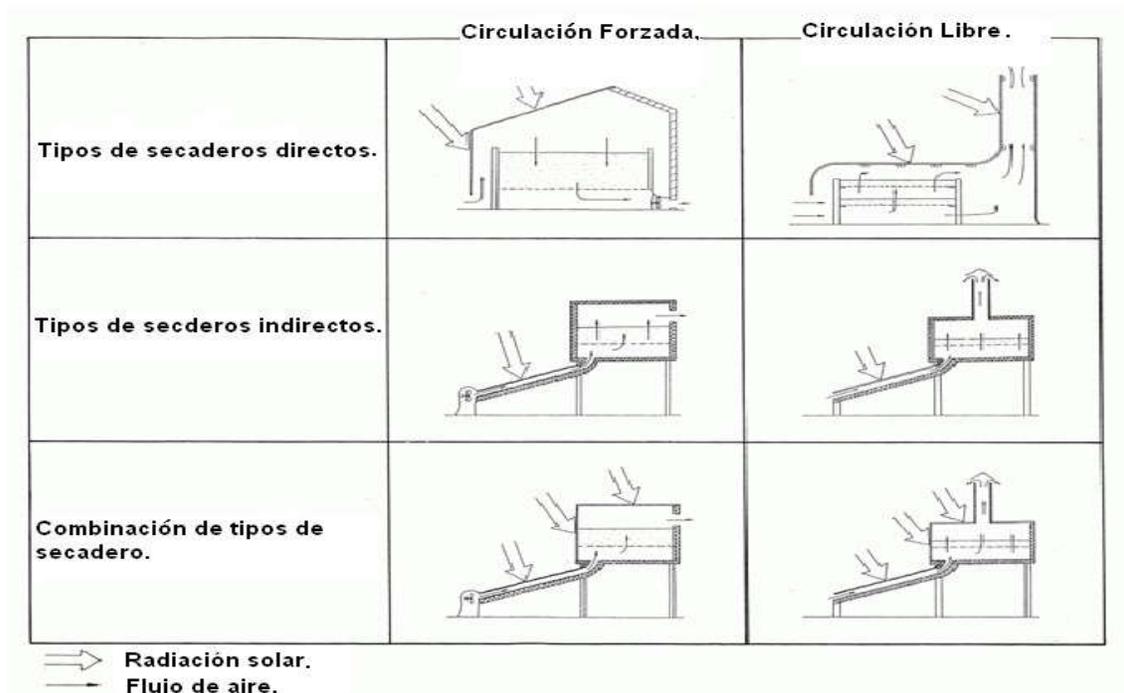


Figura 1.2 Clasificación de los secaderos solares.

Los secaderos solares directos son los que reciben directamente la energía de los rayos del sol para secar material que se desea. Los indirectos son los que la energía solar que recibe el material a secar es de forma indirecta a través del aire, el cual recibe directamente la energía de los rayos de sol para aumentar su temperatura; estos presentan un colector, el cual se encarga de calentar el aire por medio de la energía de radiación solar. Los secaderos de energía solar activa son los que el aire que interactúa

con el material a secar presenta una circulación forzada en su interior, mientras que los de energía solar pasiva son los que presentan la circulación natural del aire en su interior.

Para evitar que el material a secar, el alga, se deteriore, es conveniente utilizar secaderos solares indirectos con circulación natural o con energía solar pasiva, **(Khan et al., 2014)** utiliza secaderos solares directos tipo sauna, en los que se alcanza una temperatura entre 35 °C - 50 °C, mientras que en los secaderos indirectos se alcanzan temperaturas entre 30 y 80 °C según **(Weiss and Buchinger, 2014)**.

Los secaderos solares indirectos presentan las siguientes ventajas y desventajas.

Ventajas:

1. Son eficaces, económicamente rentables y fácil de ser aceptados para algunos productos.
2. Se reduce significativamente las mermas durante el secado, a diferencia del secado tradicional donde se producen dichas mermas en mayor cantidad.
3. Los resultados económicos son muy positivos en cuanto a la reducción de mermas en épocas de lluvia. Las mermas en otros periodos son escasas.
4. Permiten obtener un producto final de mayor calidad.
5. Una disminución del tiempo de secado comparado con el secado directo

Desventajas:

1. Las plantas secan en el intervalo de tiempo que exista radiación solar de intensidad adecuada.

1.8 Formas de secado algas.

La etapa de secado de la biomasa algal es una de las que más influyen en el costo de operación de procesos de producción de macroalgas, si no se utiliza energía solar como medio de calentamiento del aire para el secado **(Weiss and Buchinger, 2014)**. Estos secaderos pueden ser de diferentes tipos como los discontinuos y los continuos, pero en este tipo de proceso a pequeña escala se recomienda utilizar secaderos discontinuos. Dentro de estos se encuentran los secaderos de bandeja, los secaderos de estantes al vacío, los secaderos por congelado y los secaderos solares **(Treybal, 1977)**. Estos

últimos no necesitan de energía eléctrica para su funcionamiento, y los materiales para su construcción son de fácil acceso, como la madera o plástico para asegurar un aislamiento adecuado en la cámara de secado y materiales de superficie captadora de la energía de la radiación solar como el vidrio, cobre, etcétera, por lo que su costo de construcción, operación e implementación son mucho menores que los secaderos anteriormente mencionados según **(Treybal, 1977)**.

Para el secado de algas se utilizan distintos tipos de secadero como el usado por **(Fudholi, 2015)** para macroalgas, en el cual obtienen una disminución del contenido de secado de un 94,6 % al 8,33 % de humedad en un período de 7 horas con un rango de temperaturas entre 30 °C y 65 °C en el mismo. Este secadero es solar con un colector que es el encargado de absorber la energía solar para el calentamiento del aire que pasa por el secadero. Mientras que **(San. et al, 2012)** obtiene un contenido de humedad de 30 % luego de tener el alga 3 días expuesta al sol directamente en condiciones climáticas muy similares. **(MONTERO, I.2005)**.

Khan et al. (2014) utilizan secaderos tipo sauna para el secado de macroalgas en el cual la disminución del contenido de humedad fue de un 92,68 % a un 50 % en 2 días y de un 96,28 % a un 35 % de humedad en 4 días con unas temperaturas que oscilaban en un rango de entre 45 °C y 50 °C y comparan estas condiciones con el secado directamente al sol del alga donde se alcanza como máximo una temperatura de 40 °C y una disminución de un 32 % de humedad de la macroalga (*Kappaphycus striatum* variety Sacol). **Ramirez, (2011)** seca la *Ulva Lactuca* por medio de energía solar por el lapso de 3 semanas para luego convertirla en abono orgánico para distintos cultivos. **(MONTERO, I.2005)**

Conclusiones parciales

1. La ciencia reconoce las algas como los seres vivos que contribuyeron de forma excepcional al desarrollo de la atmósfera en la tierra a través de la generación del oxígeno y la captación del dióxido de carbono que limitaban el desarrollo de la vida en el planeta.
2. Se selecciona la *Ulva Lactuca* para el estudio del proceso de secado por su disponibilidad y características, ya que se desarrolla en abundancia en la costa de nuestro país y tiene un alto contenido en vitaminas, proteínas y grasas, siendo la

biomasa final fuente de obtención de productos de alto valor agregado, lo que pudiera contribuir a la viabilidad técnico - económica y ambiental del proceso.

3. El empleo de la luz solar o la exposición al flujo de aire calentado para el secado en general, constituye una opción que además de ecológica logra resultados cualitativos especialmente para la mayoría en los materiales vegetativos como hojas, tallos, semillas, flores y las algas muy beneficiosos para su conservación cuando se desarrollan procedimientos adecuados en cada caso.
4. Todo parece indicar que el secado de la biomasa algal mediante secado solar indirecto con circulación libre constituye el método más factible desde el punto de vista técnico, económico y ambiental.

Capítulo 2. Estudio de secado de macroalga Ulva Lactuca en estufa

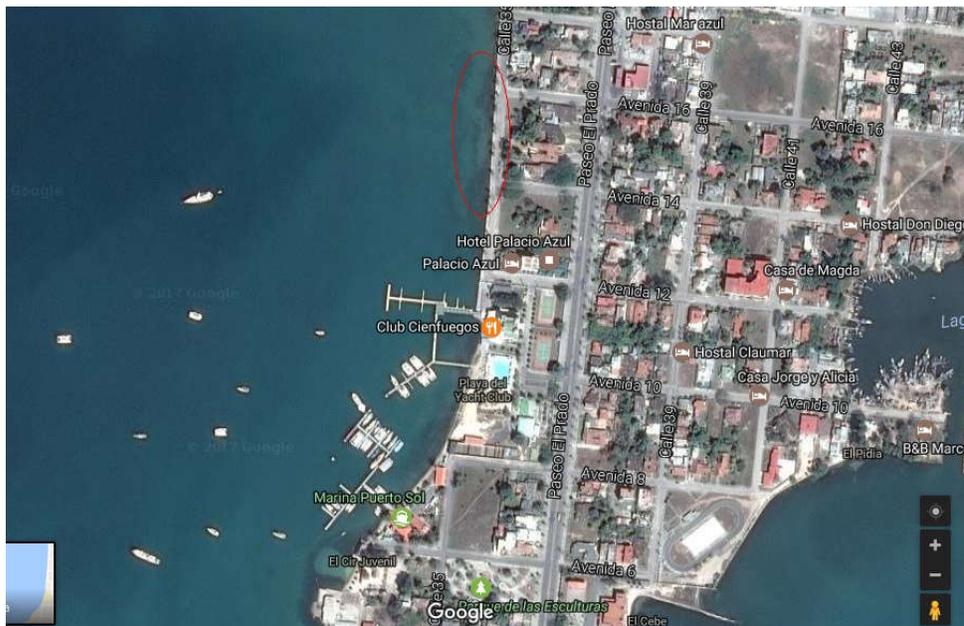
En este capítulo se realiza el estudio fundamental del proceso de secado del alga *Ulva Lactuca* a escala de laboratorio para determinar las curvas de caracterización de secado del proceso, la humedad crítica y la humedad de equilibrio del proceso. Se describen los principales materiales y métodos empleados en el mismo.

MATERIALES Y MÉTODOS

2.1 Recolección y preparación de la muestra a secar

El proceso de recolección de la *Ulva* se realiza de forma manual en la zona costera de la bahía de Cienfuegos entre el Club Cienfuegos y del Hotel Palacio Azul Imagen 2, a una profundidad entre 20 y 80 centímetros aproximadamente. Una vez seleccionadas las muestras, se le realiza una limpieza preliminar con agua de mar, cuyo fin es eliminar algunos sólidos u otros organismos fácilmente visibles adheridos a la superficie de la misma que puedan deteriorarla en su posterior transportación. Las muestras fueron transportadas en recipientes reciclados para agua con volumen de 4L.

Imagen 2.1 : Área donde se recolectaron las muestras de *Ulva Lactuca*



Luego de ser transportada la Ulva hasta la zona de ensayos de secado, se procede a un segundo proceso de lavado para eliminar los organismos que no son de interés para el estudio todavía presentes en la misma, como lo son residuos de otras especies de algas, arena y sólidos.

Para el secado se toma una porción de alga húmeda, anteriormente escurrida en una rejilla de acero inoxidable durante un tiempo de 15 minutos (min), con el objetivo de eliminarle el exceso de agua utilizada en la etapa de limpieza.

2.2 Estudio de secado y determinación del contenido de humedad en el equilibrio en estufa.

Según (**Treybal, 1977**), con respecto a la muestra de una sustancia, la rapidez de secado puede determinarse suspendiendo la muestra en un gabinete o tubería, en una corriente de aire, para un balance. Entonces, el peso de la muestra secada puede medirse como una función del tiempo. Deben observarse ciertas precauciones para que los datos sean de máxima utilidad. La muestra no debe ser muy pequeña. Más aún, las siguientes condiciones deben parecerse lo más posible a las condiciones que, según se prevé, predominen en la operación a gran escala:

1. La muestra debe soportarse en forma similar sobre un plato o estructura.
2. Debe tener la misma relación de superficie que se seca a la que no se seca.
3. Debe sujetarse a condiciones similares de transferencia de calor por radiación.
4. El aire debe tener la misma temperatura, humedad y velocidad (con la misma velocidad y dirección con respecto a la muestra).

Si es posible, se deben realizar varias pruebas sobre muestras de diferente espesor. También deben obtenerse el peso seco de la muestra. La exposición de la muestra a aire de temperatura, humedad y velocidad constantes constituye el secado en condiciones constantes de secado como se muestra en la Figura 2.2. La actividad del agua o el contenido de humedad de equilibrio están determinados por el tipo de material a tratar, su temperatura y humedad. Así, un producto tiene una presión de vapor característica para cada temperatura y humedad contenida. Esto determina si el material adsorberá o emitirá humedad en su exposición al aire.

El contenido de humedad de equilibrio de un material es el valor de la humedad que tiene después de haber sido expuesto, durante un largo periodo de tiempo, a unas condiciones particulares de un medio ambiente. Para ese contenido de humedad, la presión de vapor

ejercida por la humedad del producto se iguala con la presión de vapor del aire circundante a su alrededor.

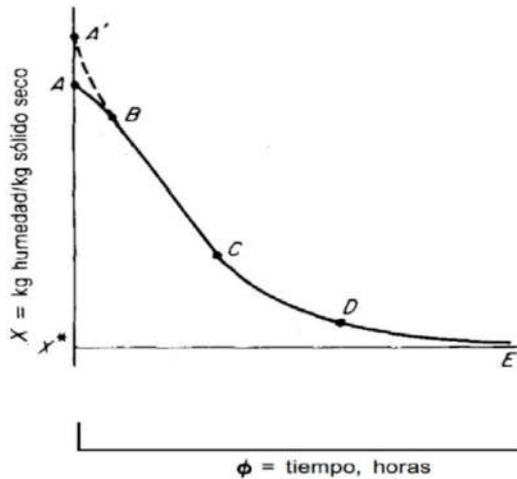


Figura 2.2 Condiciones de secado constantes

2.3 Cálculo y construcción de la curva de régimen de secado

Según (Treybal, 1977) a partir de los datos obtenidos durante una de estas pruebas, se puede graficar una curva de contenido de humedad como función del tiempo (figura 2.2). Esta será directamente útil para determinar el tiempo necesario para secar grandes lotes en las mismas condiciones de secado. Se puede obtener mucha información si los datos se convierten a regímenes (o fluxes) de secado, expresadas como $N \frac{\text{masa}}{\text{tiempo}(\text{área})}$ y se grafican contra contenido de humedad, como en la figura 2.3. Esto puede hacerse midiendo las pendientes de las tangentes trazadas a la curva de la figura 2.2 o determinando, a partir de la curva, pequeños cambios en el contenido de humedad Δx para los cambios pequeños correspondientes en el tiempo $\Delta \theta$ y calculando el régimen de secado como $N = -S_s \frac{\Delta X}{A \Delta \theta}$. Aquí, S_s es la masa de sólido seco; A es la superficie húmeda sobre la cual sopla el gas y a través de la cual tiene lugar la evaporación en el caso del secado de aire por circulación cruzada. En el caso del secado por circulación transversal, A es la sección transversal del lecho medida a ángulos rectos a la dirección del flujo del gas.

Algunas veces, la curva de régimen de secado se grafica con la ordenada expresada como $\frac{\text{masa de humedad evaporada}}{(\text{tiempo})(\text{masa sólido seco})}$, que en la notación presente es $-dX/d\theta$.

Generalmente hay dos partes principales en la curva de rapidez de la *figura 2.3*, un periodo de rapidez constante y uno de rapidez decreciente, como se señala en la figura. Aunque a menudo sólidos diferentes y condiciones distintas de secado dan lugar a curvas de formas muy diferentes en el periodo decreciente de la rapidez, la curva que se muestra ocurre con frecuencia. Algunas de las diferencias que pueden aparecer se consideraran posteriormente, más por ahora se van a analizar las razones que se dan ordinariamente para las diversas partes de la curva presentada.

Si un sólido se encuentra inicialmente muy húmedo, la superficie está cubierta con una delgada película de líquido, que se supone como humedad total no ligada. Cuando se expone a aire relativamente seco, la evaporación tiene lugar desde la superficie. La rapidez a la cual se evapora la humedad puede describirse en función de k_y , un coeficiente de transferencia de masa del gas y de la diferencia de humedad entre el gas en la superficie líquida Y_s , y en la corriente principal Y . Entonces, para el secado por circulación tangencial:

$$N_c = k_y(Y_s - Y)$$

Se puede prever que el coeficiente k_y permanece constante siempre y cuando no cambien la velocidad y dirección del flujo de gas sobre la superficie. La humedad Y_s es la humedad a saturación en la temperatura superficial del líquido t_s ; por lo tanto, depende de esta temperatura. Puesto que la evaporación de humedad absorbe calor latente, la superficie líquida llega y permanece en una temperatura en el equilibrio tal que la rapidez del flujo de calor en el entorno de la superficie es exactamente igual a la rapidez de absorción de calor. Por lo tanto, Y_s permanece constante. Los capilares e intersticios del sólido, llenos de líquido, pueden llevar líquido hasta la superficie tan rápidamente como el líquido se evapora en ésta. Puesto que además Y permanece constante en las condiciones constantes de secado, la rapidez de evaporación debe permanecer constante en el valor N_c como se muestra en la *figura 2.2* y *2.3* entre el punto *B* y *C*. Al principio, la superficie sólida y la líquida están generalmente más frías que la temperatura superficial final t_s ; la rapidez de evaporación aumenta cuando la temperatura superficial aumenta hasta su valor final durante el periodo *AB* sobre estas curvas. En forma alternativa, la temperatura en el equilibrio t_s puede ser menor que el valor inicial, lo cual dará lugar a

una curva $A'B$ mientras ocurre el ajuste inicial. Generalmente el periodo inicial es tan corto que de ordinario se ignora en el análisis subsecuente de los tiempos de secado.

Cuando el contenido de humedad promedio del sólido alcanza un valor X_C , el contenido crítico de humedad (figura 2.3) la película superficial de humedades reduce tanto por evaporación que el secado posterior produce puntos secos que aparecen sobre la superficie; estos ocupan cada vez porciones más grandes de la superficie expuesta al continuar el secado. Sin embargo, puesto que la rapidez N se calcula mediante la superficie gruesa constante A , el valor de N debe descender aun cuando la rapidez por unidad de superficie húmeda permanezca constante. Esto da lugar a la primera parte del periodo decreciente de la rapidez, el periodo de secado superficial no saturado, desde el punto C hasta el D (figuras. 2.2 y 2.3). Finalmente, la película superficial original de líquido se habrá evaporado completamente a un contenido de humedad promedio del sólido que corresponde al punto D . Esta parte de la curva puede faltar completamente, o puede constituir el total del periodo decreciente de la rapidez. En el caso de algunos textiles, se han necesitado otras explicaciones para el periodo lineal de secado.

Al continuar el secado, la rapidez con la cual se puede mover la humedad a través del sólido es el paso controlante, a causa de los gradientes de concentración que existen entre las partes más profundas y la superficie. Como la concentración de humedad generalmente decrece mediante el secado, la rapidez de movimiento interno de la humedad decrece. En algunos casos, la evaporación puede tener lugar debajo de la superficie del sólido en un plano o zona que se va hundiendo más profundamente en el sólido al irse secando. En cualquier caso, la rapidez de secado decae aún más rápidamente que antes, como de D a E (figura 2.3). En el punto E , el contenido de humedad del sólido ha caído hasta el valor en el equilibrio X^* para la humedad del aire predominante y el secado se detiene.

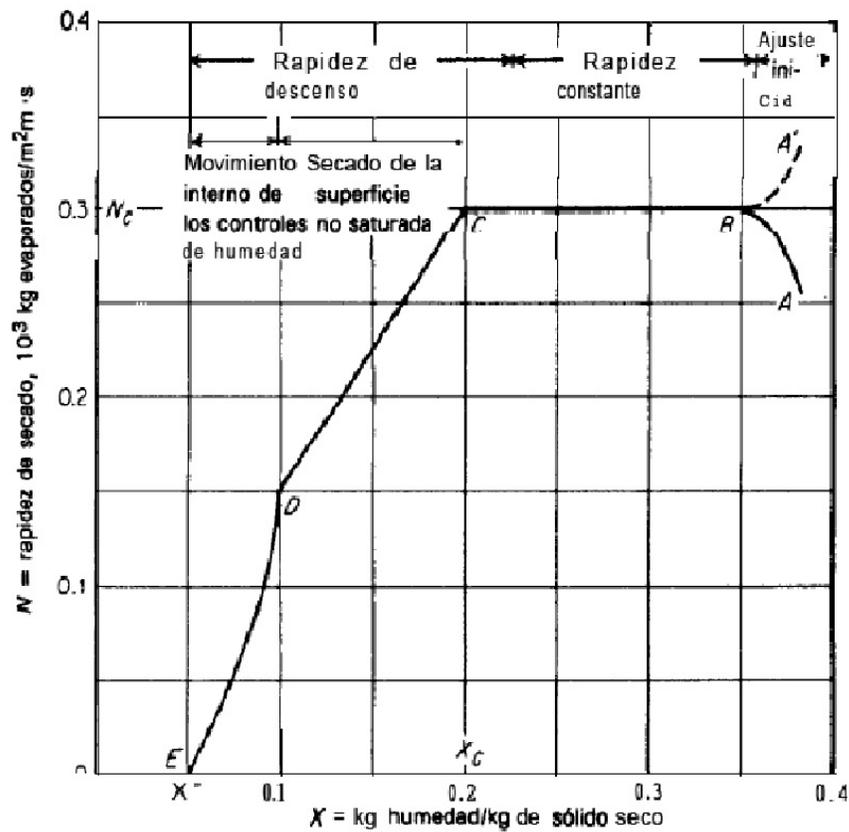


Figura 2.3 Curva de régimen de secado. Condiciones de secado constantes

Para la realización de dichas pruebas, se utiliza una estufa de laboratorio de bandejas aireada, cámara de calentamiento de aire y cámara de secado como se muestra en la figura 2.4; Imagen 2.3 y 2.4 (Anexo 2). El aire luego de atravesar la cámara de secado sale a la atmósfera por la parte superior del secadero y el sólido se saca de la estufa. La temperatura del aire que entra a la cámara de secado se toma en el termómetro que se encuentra instalado al efecto en la misma y las temperaturas de bulbo húmedo y bulbo seco a la entrada y salida del mismo con un psicómetro.

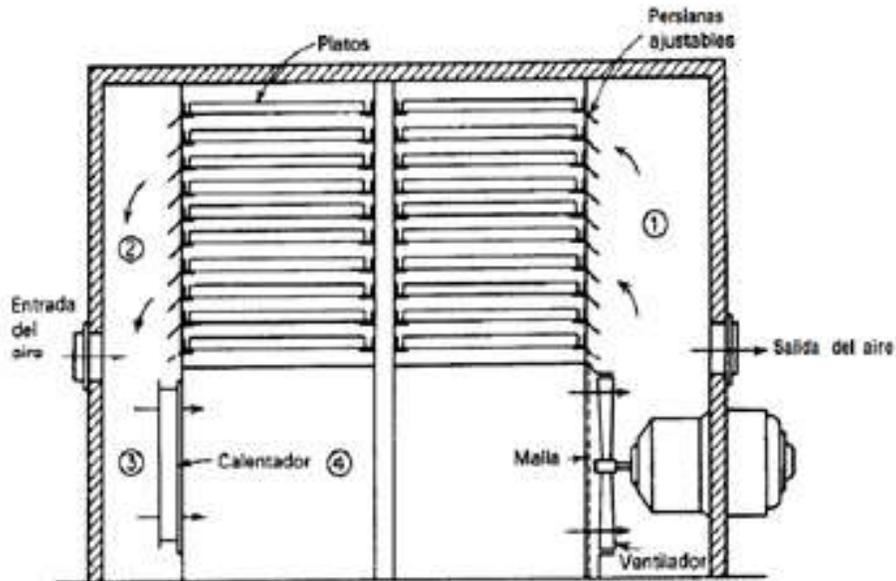


Figura 2.4 Esquema de la estufa aireada

2.4 Técnica operatoria para la determinación de la humedad en el equilibrio

Trabajo operacional en la estufa.

Para el secado se toma una porción de alga húmeda, anteriormente escurrida en papel periódico durante un tiempo de 20 minutos (min), con el objetivo de eliminarle el exceso de agua utilizada en la etapa de limpieza. Luego se pesa aproximadamente 0.36 kg del alga, la cual se distribuye de forma homogénea en una bandeja de aluminio con forma rectangular, con aproximadamente un espesor de 1 cm de algas como se muestra en la imagen 2.5 (Anexo 2), estas se alimentan a la estufa aireada a una temperatura de trabajo constante previamente ajustada a 60 °C.

La determinación de la humedad se realiza con una balanza modelo KERN MRS 120-3 (rango máx. 124 g, resolución 0,001 g / 0,01 %, temperatura de calefacción 30 °C – 230 °C, protocolo GLP); como se muestra en la imagen 2.6 y 2.7 (Anexo 2). Para ello se toman muestras en el tiempo, de una porción del alga depositada en la bandeja dentro de la estufa en un crisol y se pesa (P_i), luego se introduce la misma en la balanza la cual

posee entre sus funciones, calcular de forma automática la humedad contenida en el alga y detener su funcionamiento una vez que el producto haya alcanzado el peso constante. Todo este proceso se realiza de forma automatizada mediante calefacción. Concluido dicho proceso la muestra se deja enfriar y posteriormente se pesa (P_f) con la finalidad de rectificar los valores de forma manual y comparar los resultados con los arrojados por el equipo.

$$X(t) = \frac{P_i - P_f}{P_i}$$

Así se obtiene para cada muestra sometida al secado, la humedad de la misma en función del tiempo para la construcción de la curva de secado.

Se tomaron muestras cada 5 durante la primera hora, cada 10 minutos en la segunda hora, 20 minutos en la tercera hora y el tiempo siguiente 3 horas cada 30 minutos.

Con este procedimiento de realizan 3 corridas para asegurar la veracidad de los datos.

2.5 Resultados obtenidos de la prueba de secado en la estufa

Tabla No. 2.1 : Estudio de secado en estufa de la macroalga Ulva Lactuca.

Corrida No. 1

Ejemplo de cálculo:

$$X(t) = \frac{P_i - P_f}{P_i}$$

Humedad : $X(t) = \frac{1,161 - 0.164}{1.161} = 0.85 * 100 = 85.87 \%$

$$N = -S_s \frac{\Delta X / A \Delta \theta}{z}$$

$$S_s = \rho_s * z = 0.017$$

A

Donde:

ρ_s : densidad de sólido (alga)= 1.7 kg/m²

z: espesor del sólido= 1 cm = 0.01 m

$$N = 0.017 * \frac{0.4204}{0.01} = 0.0007148 * 10^3 = 0.7148$$

Tiempo (t) (min)	PI(g)	PF(g)	Humedad (%)	Hdad.BS X(kga/kg s.s)	$\Delta\Theta$	Δx	$N(10^3)$ (g/m ² *min)
0	1,161	0,164	85,87	6,0792	10	0,4204	0,7148
10	0,934	0,194	79,22	3,8144	5	0,354	1,203667
15	0,324	0,182	43,82	0,7802	10	0,199	0,339984
25	0,256	0,195	23,82	0,3128	15	0,1022	0,115885
40	0,272	0,235	13,602	0,1574	5	0,0082	0,027971
45	0,446	0,389	12,78	0,1465	5	0,0006	0,002326
50	0,354	0,309	12,71	0,1456	5	0,0018	0,006253
55	0,447	0,391	12,52	0,1432	35	0,0086	0,004225
90	0,386	0,341	11,65	0,1319	10	0,0031	0,005403
100	0,291	0,258	11,34	0,1279	10	0,0088	0,015006
110	0,459	0,411	10,45	0,1167	10	0,0001	0,000305
120	0,364	0,326	10,43	0,1165	20	0,0017	0,00145
140	0,409	0,367	10,26	0,1144	20	0,0005	0,00049
160	0,284	0,255	10,21	0,1137	20	0,0015	0,001358
180	0,388	0,349	10,05	0,1117	30	0,0103	0,005886
210	0,466	0,424	9,01	0,0990	30	0,005	0,003378
240	0,499	0,457	8,41	0,0919	30	0,0075	0,004261
270	0,561	0,518	7,66	0,0830	30	0,0011	0,000643
300	0,437	0,404	7,55	0,08168	30	4,32E-05	2,45E-05
330	0,424	0,392	7,54	0,08163	30	0,00105	0,000597
360	0,430	0,398	7,44	0,0804	10	0,4204	

En esta primera corrida es necesario mencionar que fueron eliminados 7 puntos de la corrida debido a que el cálculo del régimen de secado era negativo ya que la humedad en esos casos en lugar de disminuir aumentaba sin dudas al tomar muestras en cortos

intervalos (5 min) generó problemas de muestreo al tomar muestras de diferentes puntos de la bandeja y además porque la estufa en ocasiones tenía problemas para mantener la temperatura constante en 60 °C requiriendo ajuste.

Como se puede observar en esta corrida, inicialmente el alga tiene una humedad de 85,8 %, al transcurrir 10 minutos la muestra pierde un 6,6 % de humedad. Los cambios más apreciables de pérdida de humedad se manifiestan entre los 15 minutos y 25 minutos disminuyendo de 79,2 % - 43,8 % - 23,8 %. La muestra a los 40 minutos refleja que la humedad disminuye de 23,8 % a 13,6 %. Luego la humedad va disminuyendo lentamente en el tiempo; perdiendo desde los 40 minutos hasta los 360 minutos llegando a alcanzar la muestra un valor mínimo de 7,44 %.

Es de resaltar que la operación en general se desarrolla correctamente, la humedad en el equilibrio se acerca a valores 7 % y la humedad crítica es 23,82 %; el alga tuvo una pérdida de humedad en 6 horas de 78,43 % de la humedad total y el índice de correlación R^2 para la variación de la humedad en el tiempo es de 0.941 con una serie polinómica de 5^{to} orden y para el régimen de secado $R^2=0.996$ con serie polinómica de 2^{do} orden.

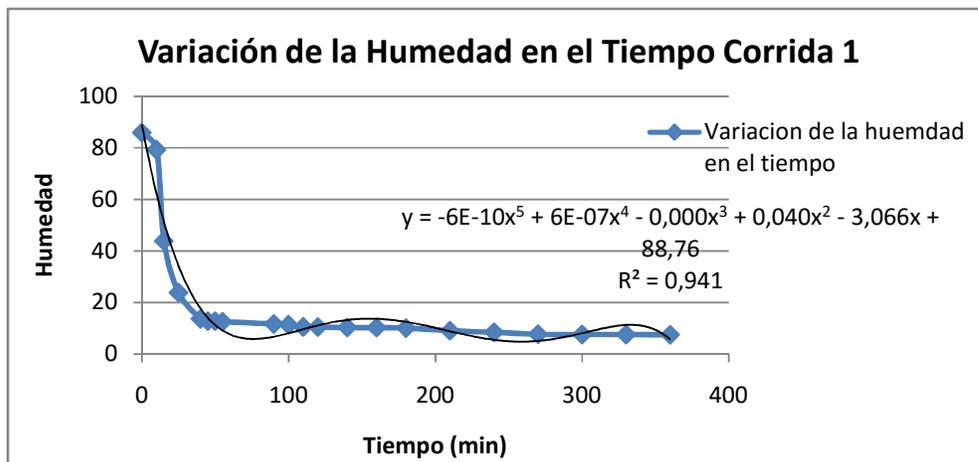


Gráfico 2.1: Variación de la humedad en el tiempo corrida 1

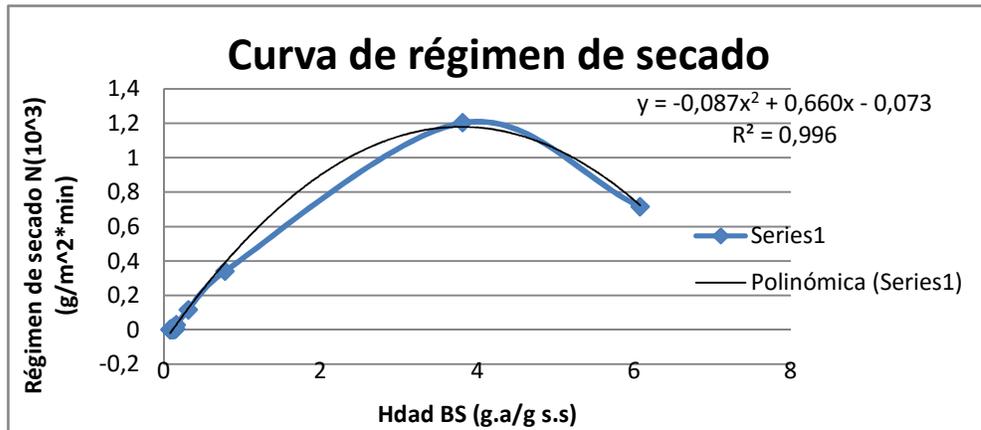


Gráfico 2.2: Curva de régimen de secado corrida 1

Corrida 2

Tabla No. 2.2: Estudio de secado en estufa de la macroalga Ulva Lactuca.

Corrida No. 2 (ver Anexo 3)

Los resultados se resumen en las siguientes gráficas:

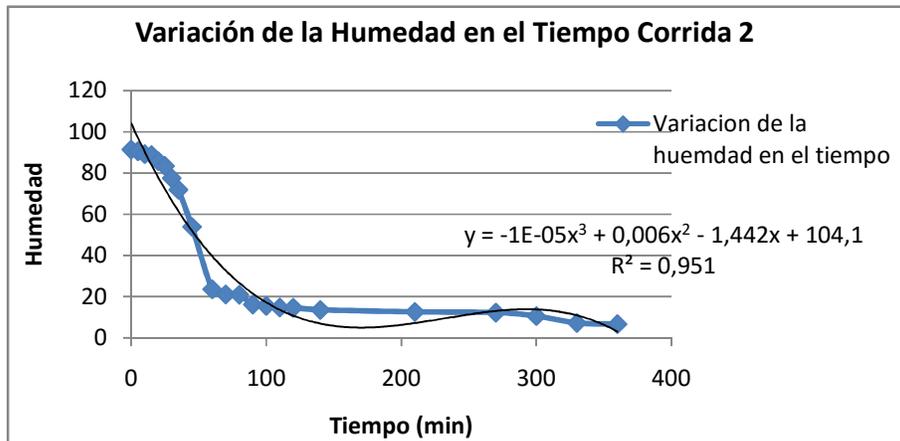


Gráfico 2.3: Variación de la humedad en el tiempo corrida 2

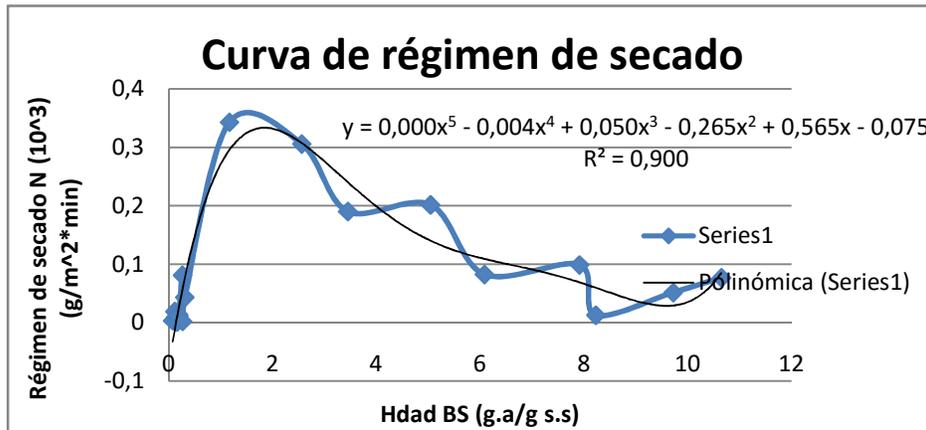


Gráfico 2.4: Curva de régimen de secado corrida 2

En esta corrida se eliminaron 6 por el mismos motivos que se explicaron anteriormente.

Como se puede observar la muestra tiene inicialmente una humedad 91,4 % la cual no disminuye mucho, pues al cabo de los primeros 25 minutos solo pierde un 7,95 %. Ya entre los 30 minutos y 35 minutos disminuye de 83,4 % - 77,52 % - 71,9 %. Los cambios más apreciables de pérdida de humedad se evidencian entre los 45 minutos y 60 minutos que va de 71,9 % - 53,9 % - 23,6 %. En los próximos 300 minutos en que las muestras están en la estufa se pierde 16,8 % de humedad, lo que demuestra que en la primera hora se pierde 67,8 %.

La operación de secado transcurre en general adecuadamente, la humedad en el equilibrio se acerca a valores 6 % y la humedad crítica es 23,67 %, el coeficiente de correlación R^2 en la variación de la humedad en tiempo alcanza un valor de 0,951 con una serie polinómica de 3^{er} orden y para el régimen de secado $R^2=0,900$ con serie polinómica de 5^{to} orden.

Tabla No. 2.3: Estudio de secado en estufa de la macroalga Ulva Lactuca. Corrida No. 3 (ver Anexo 3)

Los resultados se resumen en las siguientes gráficas:

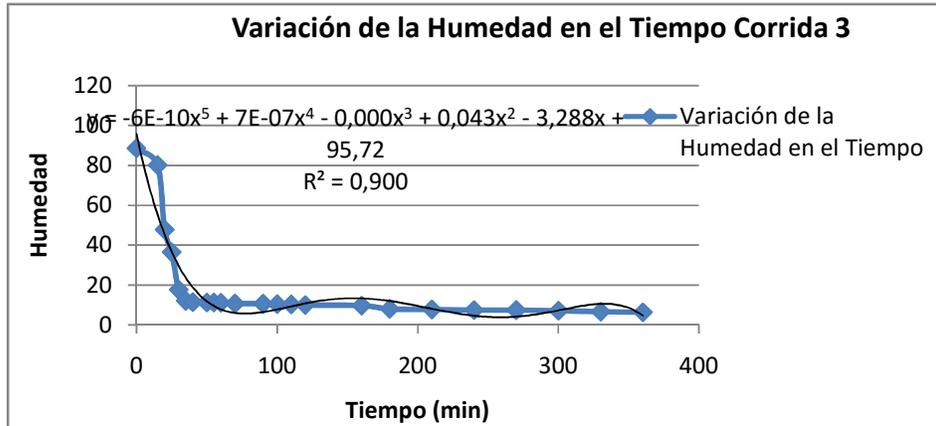


Gráfico 2.5: Variación de la humedad en el tiempo corrida 3

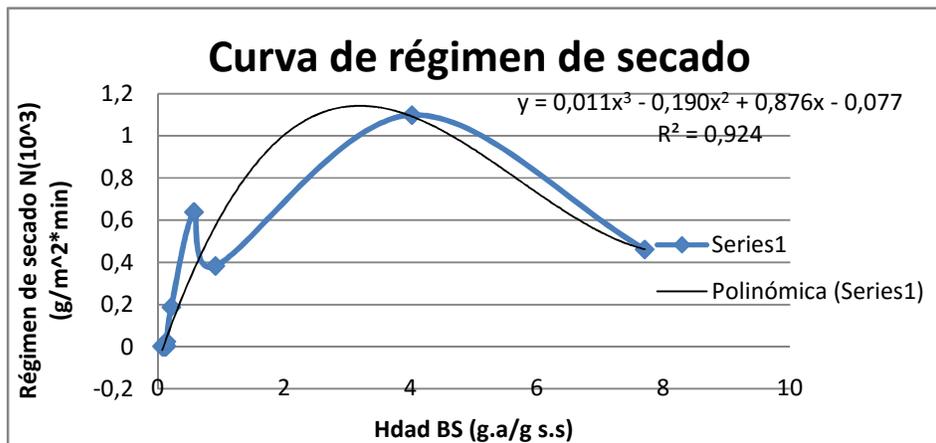


Gráfico 2.6: Curva de régimen de secado corrida 3

En esta corrida al igual que en las anteriores se eliminaron puntos, en esta ocasión fueron 5, por los motivos explicados anteriormente.

En esta corrida como se puede observar el alga tiene una humedad inicial de 88,5 % y al cabo de los 15 minutos pierde 7,7 %. Los cambios más apreciables de pérdida de humedad se manifiestan de los 15 minutos a los 30 minutos ya que disminuye de 80,08 % - 47,7 % - 36,4 % - 17,6 %. En los próximos 330 minutos la humedad del alga disminuye lentamente, perdiendo 11,1 % y obteniendo un valor mínimo de humedad de 6,42 %.

En esta corrida es en la que más rápidamente ha disminuido la humedad, perdiéndose 70,4 % de humedad en 30 minutos; la humedad en el equilibrio se acerca a valores 6 % y la humedad crítica es 17,69 %. El valor del coeficiente R^2 en la variación de la humedad en el tiempo es de 0.9 con una serie polinómica de 5^{to} orden y para el régimen de secado $R^2=0.924$ para serie polinómica de 3^{er} orden.

Conclusiones parciales

1. Las pruebas de secado en estufa permitieron determinar del régimen de secado del alga simulado en la estufa de bandeja con circulación de aire, que brinda la información necesaria para realizar la evaluación de equipos de secado a niveles superiores.
2. Dada la naturaleza de las algas con un contenido morfológico característico cercano a las células vegetales, pero más frágiles aún, su muestreo debe ser el adecuado para evitar el deterioro de las mismas y su manipulación debe ser muy cuidadosa para disminuir errores experimentales.
3. Como característica general del comportamiento en el laboratorio, se obtuvo un régimen de secado descrito por un coeficiente de correlación R^2 mayor del 90 %
4. El máximo régimen de velocidad de secado se alcanza en todos los casos en los primeros 60 minutos con alrededor del 70 % de remoción de la humedad inicial.
5. Los índices de secado en general mostraron adecuada correspondencia en los diferentes experimentos. La humedad crítica en la corrida 1 y 2 fue de 23 % y en la 3 de 17 % y la humedad en el equilibrio se encuentra en todos los casos entre valores de 6 % y 7 %.

CAPÍTULO 3 Evaluación de secador solar para macroalgas

En el presente capítulo se describe el secador solar utilizado para el estudio de secado de macroalga *Ulva Lactuca* objeto de estudio. Se realiza un estudio experimental para la evaluación de las características de operación del equipo y la eficiencia de operación bajo condiciones atmosféricas ambientales.

3.1 Descripción del equipo experimental

Para el estudio de secado del alga se utiliza un secador solar debido a que no necesita energía eléctrica y a que su costo de adquisición es mucho menor que el de otros secaderos. De los tipos de secador solar el que mejor se adecua al proceso es el secador solar de bandejas indirecto con circulación pasiva de aire, puesto que no se requieren grandes volúmenes de biomasa a secar y además está protegido de las situaciones ambientales que puedan dañar el producto a secar como se muestra en la figura 3.1.

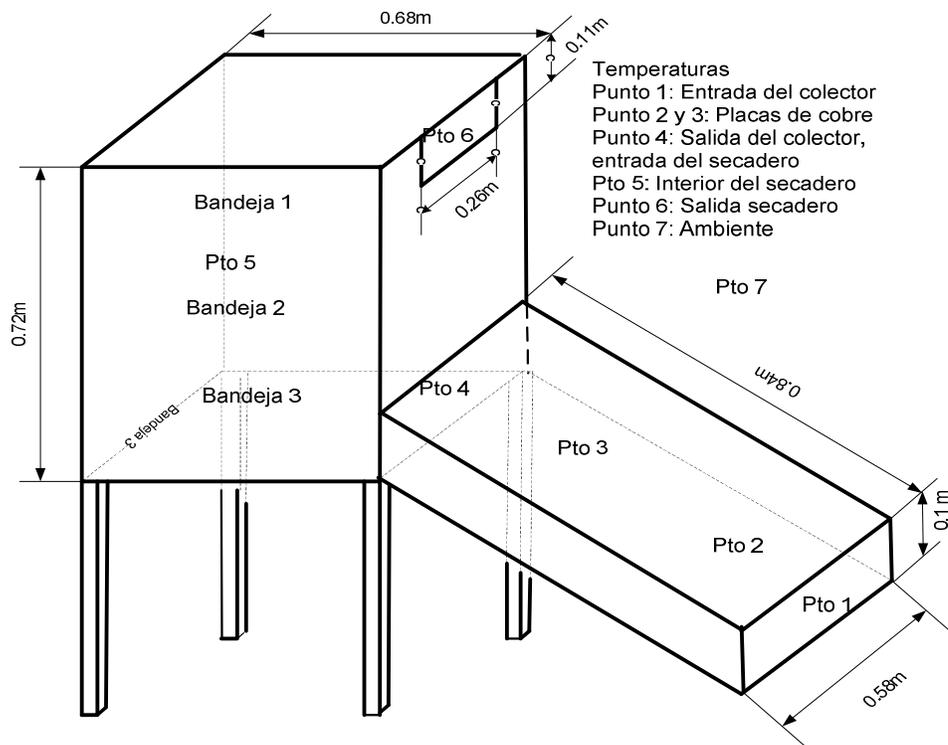


Figura 3.1 Dimensiones del secador solar

Los componentes principales del secador solar son el colector solar de aire y la cámara de secado. En el interior del colector se colocan láminas de cobre, las cuales se calientan con la energía captada de la radiación solar y el efecto invernadero provocado, consiguiendo calentar y a su vez inducir un movimiento natural por convección en el aire, y fundamentalmente reducir su humedad relativa.

La cámara de secado es donde se encuentran las bandejas en las que se coloca el producto a secar, el aire que llega a la cámara de secado es el aire antes calentado proveniente del colector el cual llega con mejores propiedades desecantes, debido al proceso de convección antes mencionado, al calentarse el aire este se hace más ligero, por lo que ascenderá en el interior de toda la cámara de secado, creando corrientes de aire seco las cuales favorecen la extracción de la humedad del objeto a secar, saliendo finalmente por el orificio superior de la cámara de secado con menor temperatura y mayor humedad relativa.

3.1.1 Materiales empleados en la construcción del secador

Los materiales empleados en el estudio para la construcción del secador solar fueron escogidos en gran medida por su factibilidad económica y son los siguientes:

1. Planchas de bagazo (1.5 unidades), se emplea como recubrimiento del secador, para ello se acondicionaron diversas tapas de acuerdo a los planos. Se elige este material por ser ligero.
2. Madera Pino, se elige este tipo de madera por su fácil accesibilidad, fue usada para la estructura del secador.
3. Láminas de cobre de un milímetro de grosor, estas fueron prensadas y moldeadas de forma ondulada, estas se colocan en el colector con el fin de absorber la energía calorífica emitida por el sol.
4. Vidrio cristal (2 placas 0.4m x 0.65m), estas placas de vidrio fue colocada sobre las pestañas laterales del colector, para evitar su deslizamiento.
5. Bisagras tamaño medio (2), estas fueron utilizadas en la puerta ubicada en la parte posterior de la cámara de secado.

3.2 Prueba y puesta en marcha del secador

Para el estudio en cuestión el secador se establece en las afueras del laboratorio de operaciones unitarias, una vez aquí se procede a su montaje, para posteriormente colocar el producto a secar en las tres gavetas construidas y emplazadas en su interior.

La muestra de alga recolectada para el estudio comprende 0,36 kg de biomasa húmeda la cual se distribuye de forma homogénea 0,28 kg en las gavetas del secadero con 1 cm de espesor en cada una de ellas quedando así lista para el estudio.

Se tomaron muestras iniciales y variables en el tiempo con el fin de determinar la humedad en el equilibrio, así como los valores de humedad en el tiempo para la construcción de su respectiva curva y la de régimen de secado. Para el cumplimiento del estudio en cuestión se utilizaron diferentes instrumentos de medición y materiales como son:

Utensilios de laboratorio

1. Crisoles: depositar las muestras y colocarlas en la estufa.
2. Adhesivo: fijar en los crisoles para su posterior marcaje con el número de muestras tomadas y sus respectivos pesos.
3. Lápiz cristalográfico: para marcar el número de las muestras tomadas.
4. Reloj: sincronizar los tiempos de toma de muestras así como valores de temperatura en los distintos puntos seleccionados del secador.
5. Termómetros (escala 0 a 100 ° C): para determinar la temperatura interior del secador y la temperatura de las placas de cobre.
6. Balanza analítica: tomar el peso de la muestra a la entrada y salida de la estufa.
7. Psicrómetro: para medir las temperaturas de bulbo húmedo y bulbo seco.

3.2.1 Determinación de los parámetros de la prueba de secado

Para la determinación de la humedad de cada muestra en el tiempo por diferencia de peso en la prueba de secado se toman pequeñas muestras en crisoles y se pesan (P_i), luego se introducen las mismas en la estufa a una temperatura constante de 60 ° C. Se saca de la estufa cada cierto intervalo de tiempo, se deja enfriar y posteriormente se pesa

(P_f) hasta que la misma alcance su peso constante. Con estos valores se determina la humedad:

$$X(t) = \frac{\text{kgdehumedad}}{\text{Kgdesólidoseco}} .$$

Las muestras se tomaron de cada una de las bandejas de la siguiente manera: el primer día se tomaron muestras cada 60 minutos por el transcurso de cuatro horas obteniendo un total de 15 muestras; el segundo día muestras cada 60 minutos por el transcurso de tres horas con un total de 12 muestras; con el objetivo de obtener los valores de humedad en el tiempo y el régimen de secado con el mismo procedimiento de cálculo descrito en el capítulo 2. Igualmente se realizan tres corridas con el fin de tener una mayor veracidad en los datos.

También se tomaron valores de temperatura en distintas partes del secador como son, entrada del colector, placas de cobre, la salida de aire del colector, que es la misma que entra al secador, en el interior del secador así como a la salida del mismo, estas temperaturas fueron tomadas con intervalo de 15 (min) y con ellas se determinó la humedad relativa (Ver tabla 3.1,3.2 y 3.3 Cálculo de humedad relativa en distintos puntos del secadero) (Anexo 5)

Es de destacar que en la primera corrida y a principios de la segunda no se tomaron los valores de temperatura de la salida del colector, entrada del secadero y la temperatura ambiente.

La humedad relativa fue calculada por la ecuación de Ferrel y Carrier considerando la presión atmosférica de 1013.25 hPa.

$$\text{Ferrel : Hr} = \frac{e_s(T_w) - P(T - T_w) (\Psi + \phi T_w)}{e_s(T)} * 100$$

$$\text{Carrier: Hr} = \frac{\left[e_s(T_w) - \frac{[P - e_s(T_w)] * (T - T_w)}{\theta + x T_w} \right]}{e_s(T)} * 100$$

Donde:

$e(T)$ = presión parcial real de vapor de agua en aire húmedo en Pa, a la temperatura de bulbo seco t ó T

$e_s(T_w)$ = presión parcial de vapor de agua en aire húmedo saturado en Pa, a la temperatura de bulbo húmedo T_w ó t_w

P = presión atmosférica local en Pa

T_w = temperatura de bulbo húmedo en K = $t_w(^{\circ}\text{C}) + 273,15$

ψ (psi) = $4,53 \cdot 10^{-4} \text{ K}^{-1}$ (Ferrel)

ϕ (fi) = $7,59 \cdot 10^{-7} \text{ K}^{-2}$ (Ferrel)

θ (theta) = 1 940 (Carrier)

χ (ji) = -1,44 (Carrier)

3.3 Resultados y discusión de la prueba de secado

Tabla No. 3.4: Estudio de secado en secadero solar de la macroalga Ulva Lactuca. Corrida No. 1

Dia 1	Hora	Tiempo (min)	PI (g)	PF (g)	Humedad (%)	Hdad.BS X(kga/kg s.s)	$\Delta\theta$	Δx	$N(10^3)$ (g/m ² *min)
Bandeja 1	11,35	0	0,68	0,12	81,91	4,52	60	0,0208	0,0058
Bandeja 1	12,35	60	1,88	0,38	79,83	3,95	60	0,254	0,072
Bandeja 1	1,35	120	0,52	0,23	54,40	1,19	60	0,257	0,0729
Bandeja 1	2,35	180	0,49	0,35	28,65	0,40	60	0,052	0,0149
Bandeja 1	3,35	240	0,38	0,29	23,37	0,305	60	-0,001	-0,0005
Dia 2	10,3	300	0,33	0,25	23,56	0,308	60	0,022	0,0063
Bandeja 1	11,3	360	0,48	0,38	21,31	0,2708	60	0,004	0,0012
Bandeja 1	12,3	420	0,69	0,54	20,86	0,263	60	0,103	0,029
Bandeja 1	1,3	480	3,29	2,95	10,47	0,116			

Dia 1	Hora	Tiempo (min)	PI (g)	PF (g)	Humedad (%)	Hdad.BS X (kga/kg s.s)	$\Delta\theta$	Δx	N(10 ³) (g/m ² *min)
Bandeja 2	11,35	0	1,297	0,214	83,50	5,06	60	0,025	0,0071
Bandeja 2	12,35	60	1,388	0,264	80,979	4,25	60	0,17	0,0485
Bandeja 2	1,35	120	0,343	0,124	63,84	1,766	60	0,256	0,0727
Bandeja 2	2,35	180	0,55	0,34	38,18	0,61	60	0,13	0,0392
Bandeja 2	3,35	240	0,415	0,314	24,33	0,32	60	-0,013	-0,0037
Dia 2	10,3	300	0,522	0,388	25,67	0,34	60	0,01	0,0041
Bandeja 2	11,3	360	0,62	0,47	24,19	0,319	60	0,010	0,0030
Bandeja 2	12,3	420	0,402	0,309	23,13	0,30	60	0,150	0,0426
Bandeja 2	1,3	480	3,83	3,52	8,093	0,088			

Dia 1	Hora	Tiempo (min)	PI (g)	PF (g)	Humedad (%)	Hdad.BS X (kga/kg s.s)	$\Delta\theta$	Δx	N(10 ³) (g/m ² *min)
Bandeja 3	11,35	0	1,44	0,164	88,61	7,78	60	0,09	0,0279
Bandeja 3	12,35	60	1,336	0,284	78,74	3,704	60	0,17	0,0487
Bandeja 3	1,35	120	0,754	0,29	61,53	1,6	60	0,31	0,0892
Bandeja 3	2,35	180	0,376	0,263	30,05	0,42	60	0,05	0,0167
Bandeja 3	3,35	240	0,489	0,371	24,13	0,31	60	-0,01	-0,0044
Dia 2	10,3	300	0,49	0,364	25,71	0,34	60	0,03	0,008
Bandeja 3	11,3	360	0,389	0,301	22,62	0,29	60	0,0010	0,0002
Bandeja 3	12,3	420	0,906	0,702	22,51	0,29	60	0,11	0,033
Bandeja 3	1,3	480	4,085	3,655	10,52	0,11			

Como podemos observar en esta primera corrida que las tres bandejas tienen un comportamiento similar siendo la humedad inicial de la muestra 81 % en la primera, 83 % en la segunda y 88 % en la tercera, al cabo de una hora la bandeja que más humedad

pierde es la número 3 la cual pierde un 10 % siendo esta la que está más cercana a la entrada del secadero; las bandejas 1 y 2 perdieron 2 % y 3 % respectivamente. Al cabo de los 120 minutos y 180 minutos se ven los cambios más apreciables en las muestras. La bandeja 1 a los 60 minutos se encontraba con 79,8 %, al transcurrir 120 minutos en 54,4 % y a los 180 minutos en 28,6 %. En las bandejas 2 y 3 se aprecia un comportamiento similar; la número 2 se encontraba en 80,9 % y al cabo de los 120 minutos y 180 minutos en 63,8 % y 38,1 % y la bandeja 3 tiene una humedad de 78,7 %, a los 120 minutos 61,5 % y a los 180 minutos 30 %. Como se puede observar en el transcurso de estas 2 horas las bandejas 1,2 y 3 pierden 51,2 %, 42,8 % y 48,7 % de humedad respectivamente. Es preciso destacar que estos cambios tan apreciables en la humedad trascurrieron en los horarios de 12:35 p.m. a 2:35 p.m.

En las últimas muestras tomadas se determina que la bandeja 1 pierde 5,3 % de humedad, la 2, 13,8 % y la número 3, 5,9 %. Después de esto se procede a guardar las bandejas que fueron tapadas con papel periódico y al día siguiente se procede a tomar muestras iniciales de cada una de las bandejas para determinar cómo fue su comportamiento durante toda la noche y se determina que las muestras absorbieron algo de humedad, sin dudas por aumentar la humedad relativa ambiental en el local de almacenaje del secador.

Las última muestras tomadas de las bandejas 1,2 y 3 el primer día eran de 23,3 %, 24,3 % y 24,1 % y al día siguiente fueron de 23,5 %, 25,6 % y de 25,7 % respectivamente.

En ese segundo día las muestras al cabo de la hora y de las dos horas no variaron prácticamente. La bandeja 1 en el transcurso de las 2 horas pierde 2,7 %, la 2, 2,5 % y la 3, 3,1 %.

Al cabo de las 3 horas en el horario de 12:30 p.m. a 1:30 p.m. si se muestra un cambio más apreciable, la bandeja 1 se encontraba en 20,8 % y disminuye a 10,4 %, la 2 de 23,1 % a 8 % y la 3 de 22,5 % a 10,5 %.

Como se puede apreciar en esta corrida el secadero funciona de forma apropiada llegando la humedad en el equilibrio a valores de 10 % para las bandejas 1 y 3 y a 8 % en la bandeja 2; la humedad crítica es de 23,37 %, 24,33 % y 24,13 % para las bandejas 1,2 y 3 respectivamente.

La bandeja 1, para la variación de la humedad en el tiempo tiene un valor de correlación $R^2=0.931$ con una serie polinómica de segundo orden, en las bandejas 2 y 3 se utilizaron igualmente series polinómicas de segundo orden con un $R^2=0.934$ y $R^2=0.939$.

La curva de régimen de secado presenta un coeficiente de correlación $R^2=0.971$ y $R^2=0.936$ con una serie polinómica de 2^{do} orden para la bandeja 1 y 2; y para las bandeja 3 $R^2=0.990$ y $R^2=0.936$ con una serie polinómica de 3^{er} de orden. Es de señalar que en los horarios de 12:00 pm. a 2:30 pm. se aprecian los mayores cambios en la humedad.

En ambos días en que se efectuó la corrida las condiciones atmosféricas fueron solamente afectadas por periodos nublados en especial en las horas de la mañana, lo que explica el mayor efecto de secado del equipo en horas del mediodía. Ver tablas 3.1, 3.2 y 3.3 (Temperaturas y cálculo de humedades relativas corrida 1, 2 y 3) Anexo 5

Los resultados se resumen en las siguientes gráficas:

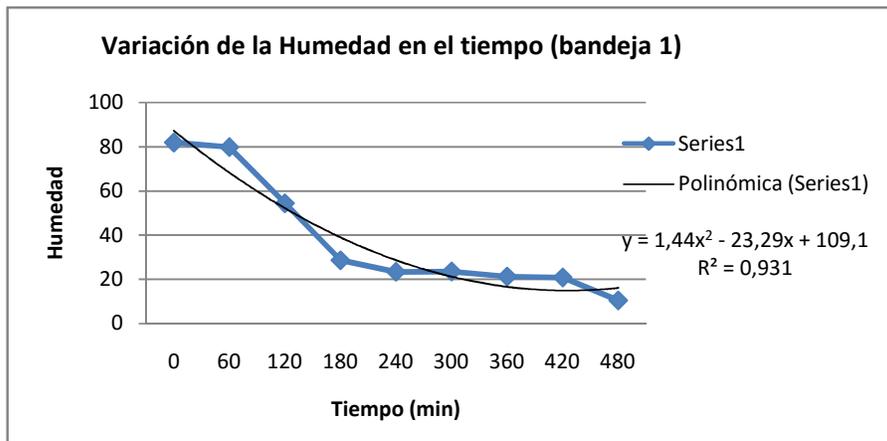


Gráfico 3.1: Variación de la humedad en el tiempo corrida 1 bandeja 1

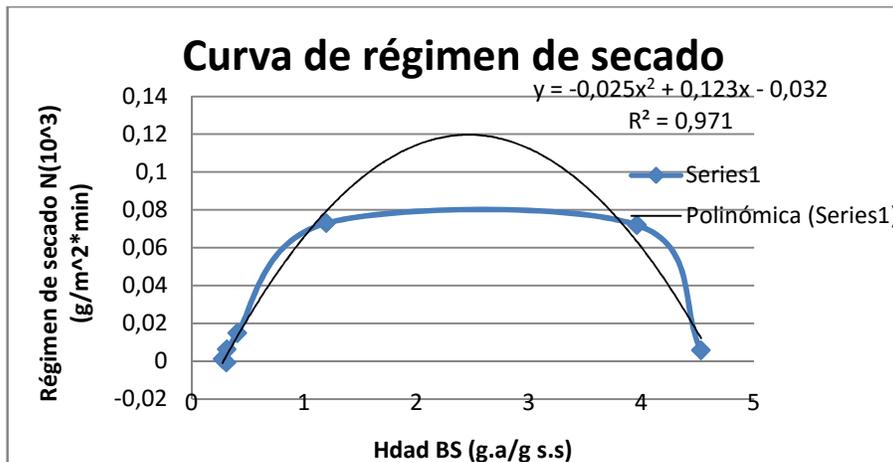


Gráfico 3.2 Curva de régimen de secado corrida 1 bandeja 1

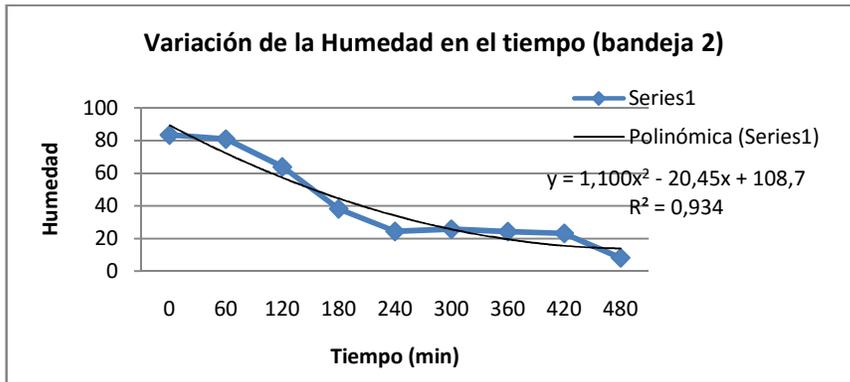


Gráfico 3.3: Variación de la humedad en el tiempo corrida 1 bandeja 2

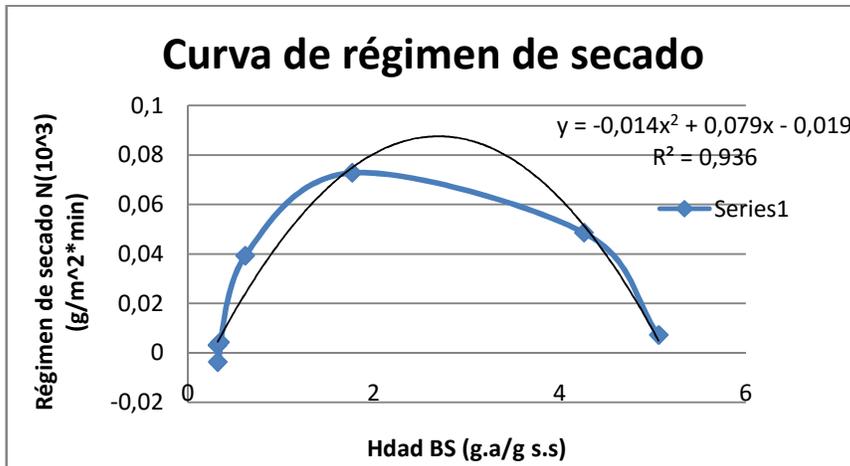


Gráfico 3.4 Curva de régimen de secado corrida 1 bandeja 2

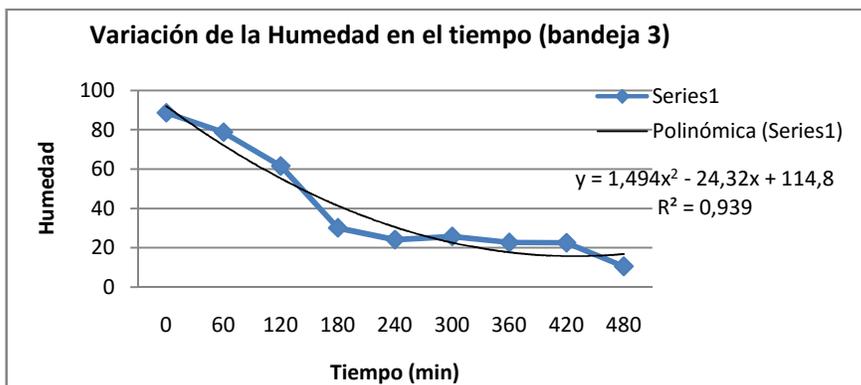


Gráfico 3.5: Variación de la humedad en el tiempo corrida 1 bandeja 3

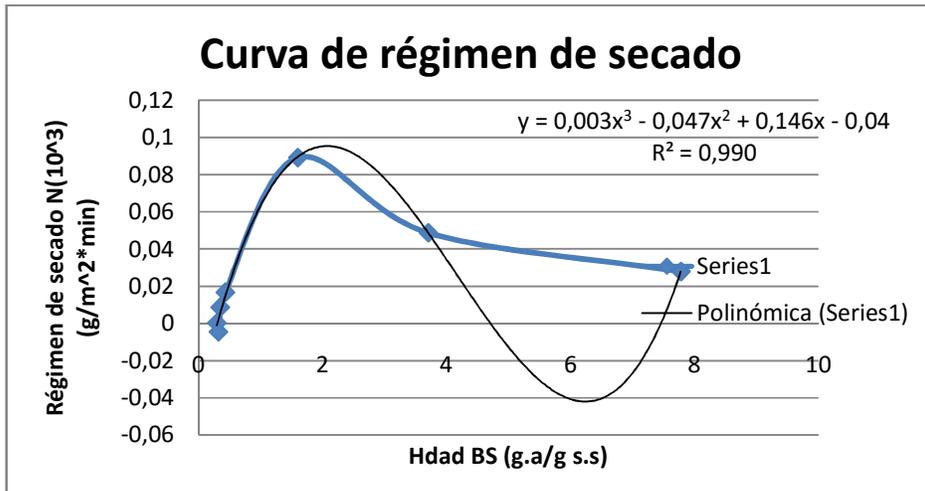


Gráfico 3.6 Curva de régimen de secado corrida 1 bandeja 3

Gráficos de Humedades relativas corrida 1

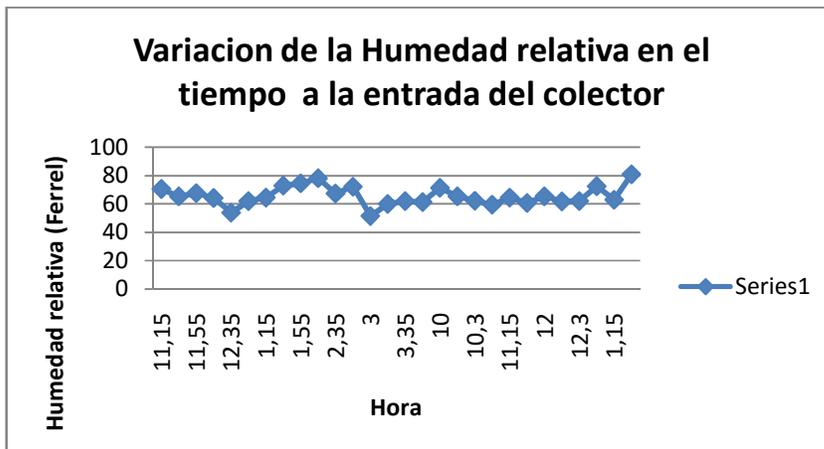


Gráfico 3.7 Variación de la humedad relativa en el tiempo a la entrada del colector corrida 1

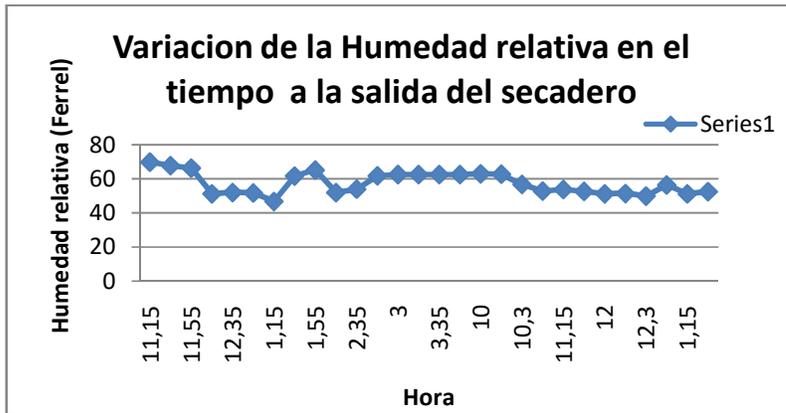


Gráfico 3.8 Variación de la humedad relativa en el tiempo a la salida del secadero corrida 1

Corrida 2

Tabla No. 3.5: Estudio de secado en secadero solar de la macroalga *Ulva Lactuca*. Corrida No. 2 (Ver Anexo 4)

Los resultados se resumen en las siguientes gráficas:

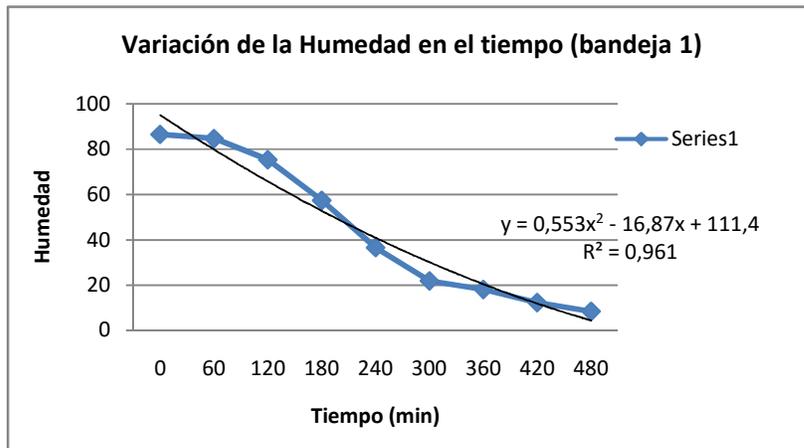


Gráfico 3.9: Variación de la humedad en el tiempo corrida 2 bandeja 1

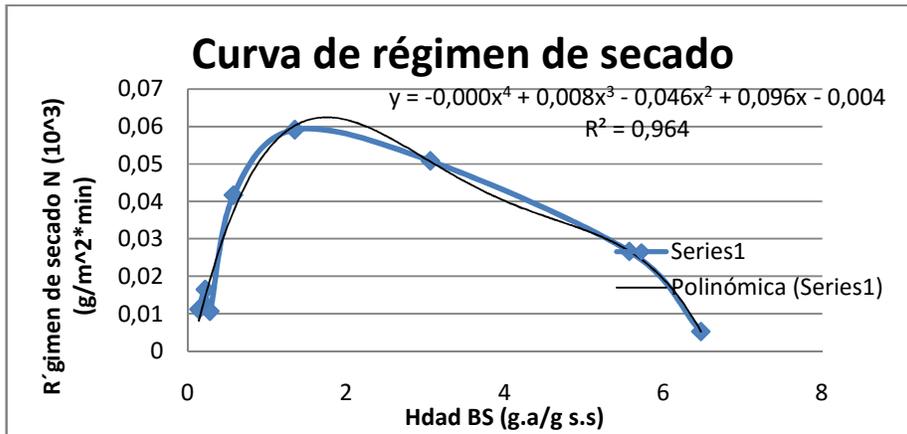


Gráfico 3.10: Curva de régimen de secado corrida 2 bandeja 1

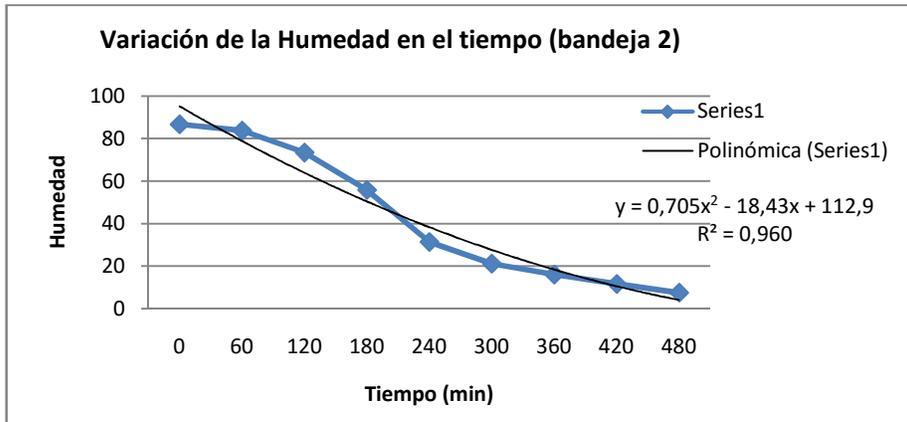


Gráfico 3.11: Variación de la humedad en el tiempo corrida 2 bandeja 2

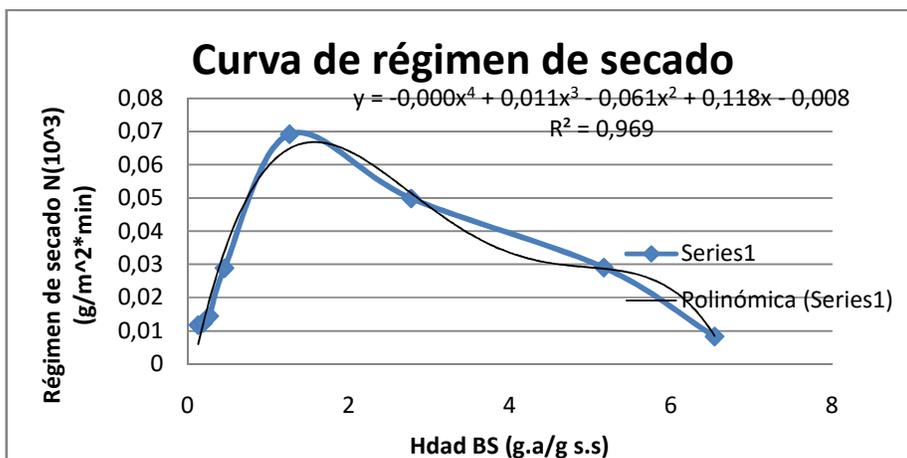


Gráfico 3.12: Curva de régimen de secado corrida 2 bandeja 2

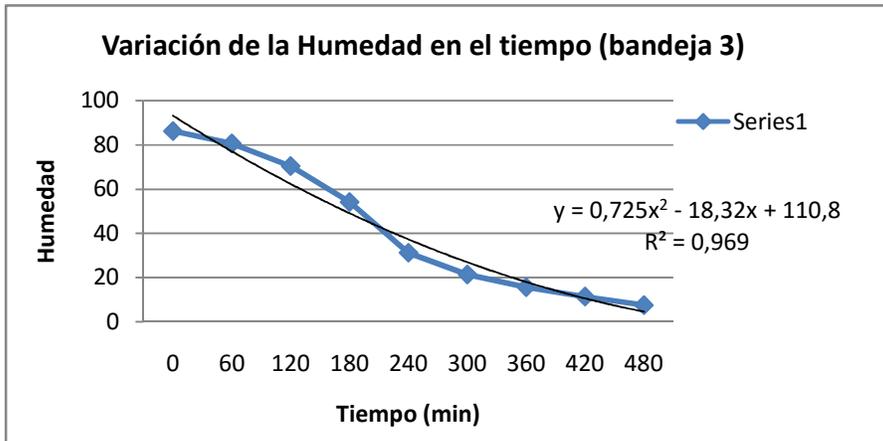


Gráfico 3.13: Variación de la humedad en el tiempo corrida 2 bandeja 3

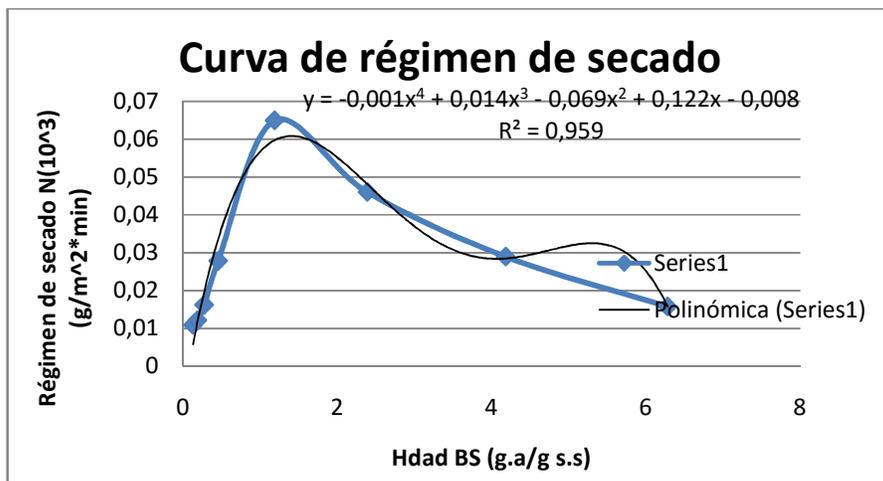


Gráfico 3.14: Curva de régimen de secado corrida 2 bandeja 3

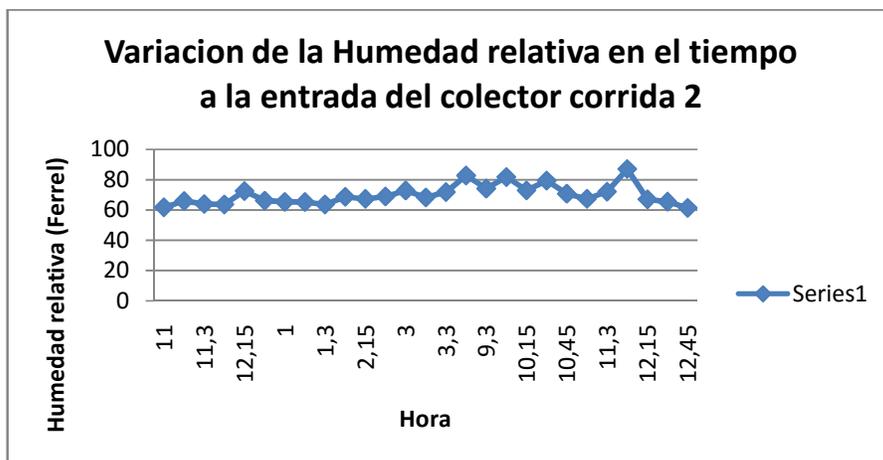


Gráfico 3.15: Variación de la humedad relativa en el tiempo a la entrada del colector corrida 2

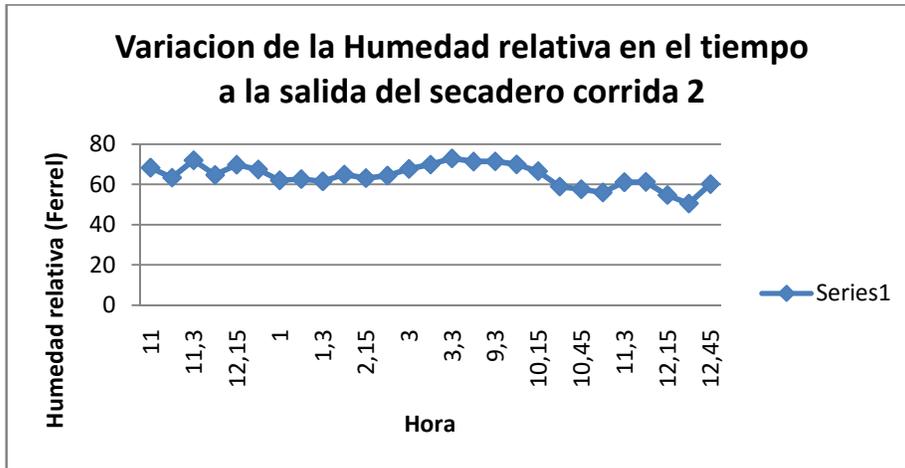


Gráfico 3.16: Variación de la humedad relativa en el tiempo a la salida del secadero corrida 2

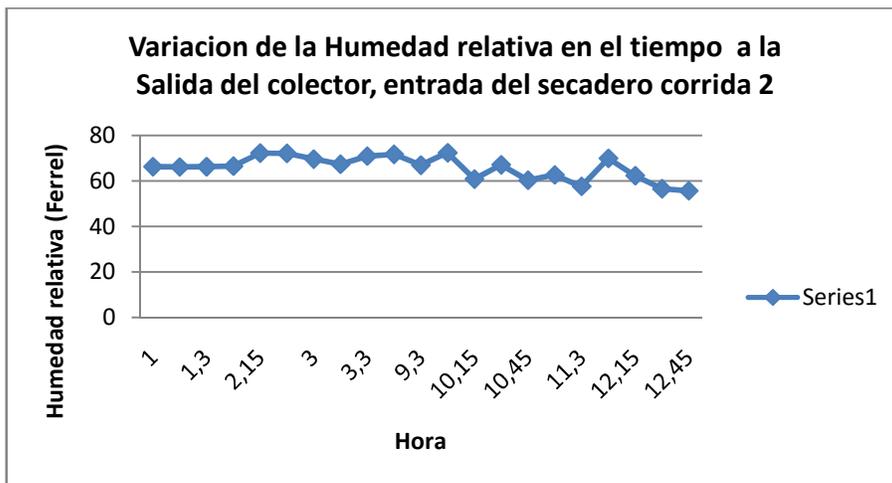


Gráfico 3.17: Variación de la humedad relativa en el tiempo a la salida del colector, entrada del secadero corrida 2

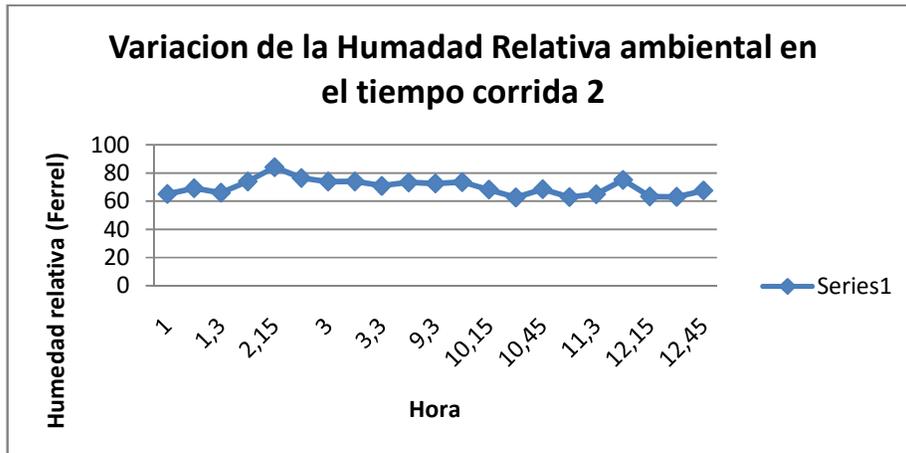


Gráfico 3.18: Variación de la humedad relativa ambiental en el tiempo corrida 2

En esta segunda corrida el contenido de humedad inicial del alga para las bandejas 1, 2 y 3 es de 86,6 %, 86,7 % y 86,2 % respectivamente y al cabo de 60 minutos se aprecia una pérdida de humedad de 1,9 %, 3 % y 5,5 %; y como en la corrida número uno la que más pierde humedad al cabo de los 60 minutos es la bandeja 3. Para las próximas muestras tomadas a los 120 minutos, 180 minutos y 240 minutos en el horario de la 1:15 pm., 2:15 pm. y 3:15 pm., es donde se observa la mayor pérdida de humedad disminuyendo en la bandeja 1 de: 84,7 % - 75,3 % - 57,4 % - 36,5 %. En la bandeja 2 fue de: 83,7 % - 73,4 % - 55,8 % - 31,4 % y en la bandeja 3 de: 80,7 % - 70,4 % - 54,2 % - 31,1 %. Luego de esto las bandejas fueron guardadas y tapadas con papel periódico.

En el segundo día al tomar las muestras iniciales para ver el comportamiento que tuvo durante la noche se puede observar que la humedad disminuye en la bandeja 1,2 y 3 un: 14,7 %, 10,2 % y 9,8 % respectivamente contrario a lo esperado, pero en respuesta a la protección a que se somete y la disminución de humedad relativa del aire esa noche más fría que favoreció sin dudas la deshidratación de las muestras.

En las 3 horas posteriores la bandeja 1 pierde 13,5 % de humedad llegando hasta un valor de 8,3 %. La bandeja 2 disminuye un 13,7 % y la humedad de la última muestra tomada fue de 7,5 %. La bandeja 3 tuvo un comportamiento similar a las anteriores llegando a perder 13,9 % y la última muestra tuvo un valor de humedad de 7,6 %.

Por lo tanto la humedad en el equilibrio en la bandeja 1 es de 8 % y en las bandejas 2 y 3 es de 7 %; la humedad crítica para las tres bandejas se encuentra sobre los 21 % de humedad.

En esta corrida se observa que el secadero al igual que en la corrida anterior presenta un comportamiento adecuado siendo el coeficiente de correlación R^2 en la variación de la humedad en el tiempo para las bandejas 1,2 y 3 de 0,961, 0,960 y 0,969 con una serie polinómica de segundo orden. Y en la de régimen de secado R^2 para las bandejas 1,2 y 3 es de 0,964, 0,969 y 0,959 con una serie polinómica de 4^{to} orden.

En ambos días en que se efectuó la corrida las condiciones atmosféricas fueron afectadas largos periodos nublados en especial en las horas de la mañana, aún así, el mayor efecto de secado ocurre en horas del mediodía. (Ver tabla 3.2 anexo 5)

Corrida 3

Tabla No. 3.6: Estudio de secado en secadero solar de la macroalga Ulva Lactuca. Corrida No. 3 (Ver Anexo 4)

Los resultados se resumen en las siguientes gráficas:

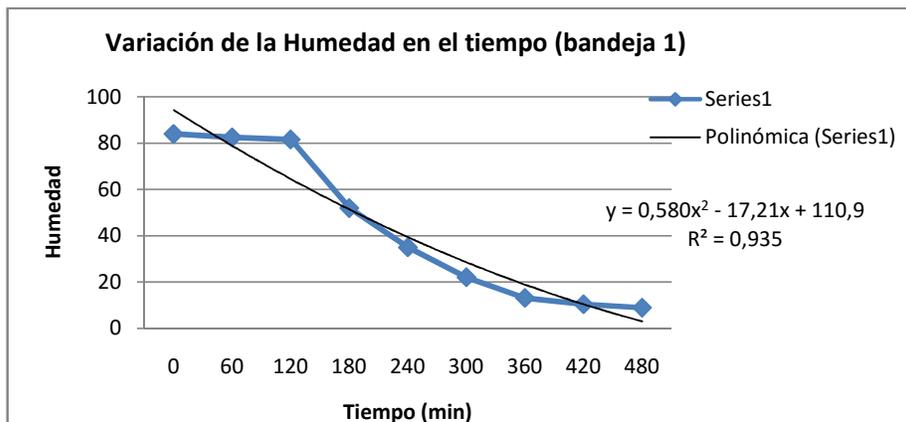


Gráfico 3.19: Variación de la humedad en el tiempo corrida 3 bandeja 1

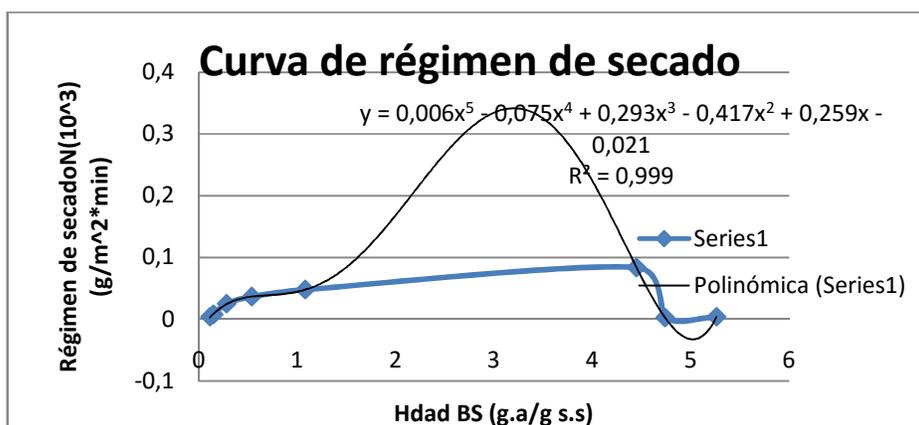


Gráfico 3.20: Curva de régimen de secado corrida 3 bandeja 1

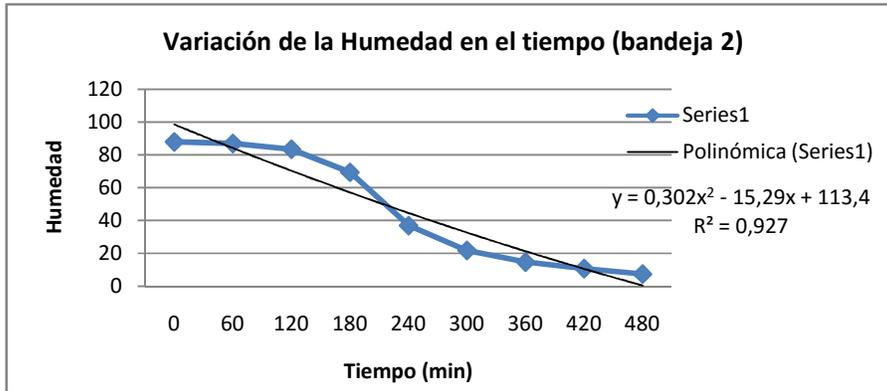


Gráfico 3.21: Variación de la humedad en el tiempo corrida 3 bandeja 2

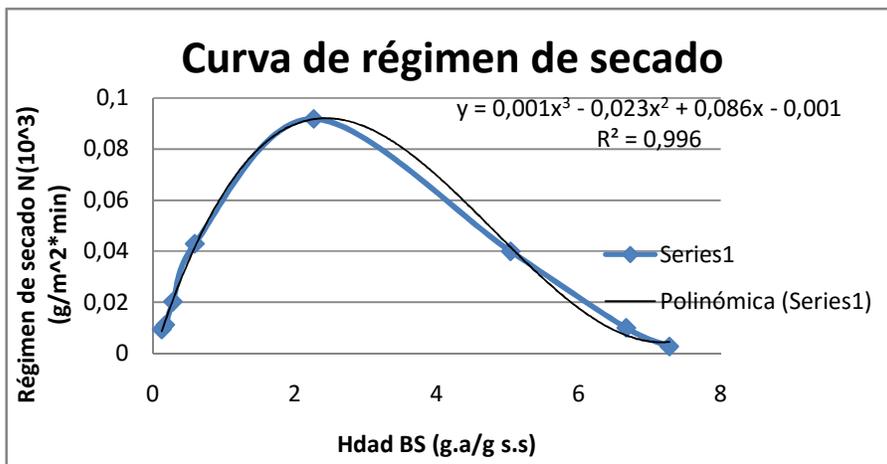


Gráfico 3.22: Curva de régimen de secado corrida 3 bandeja 2

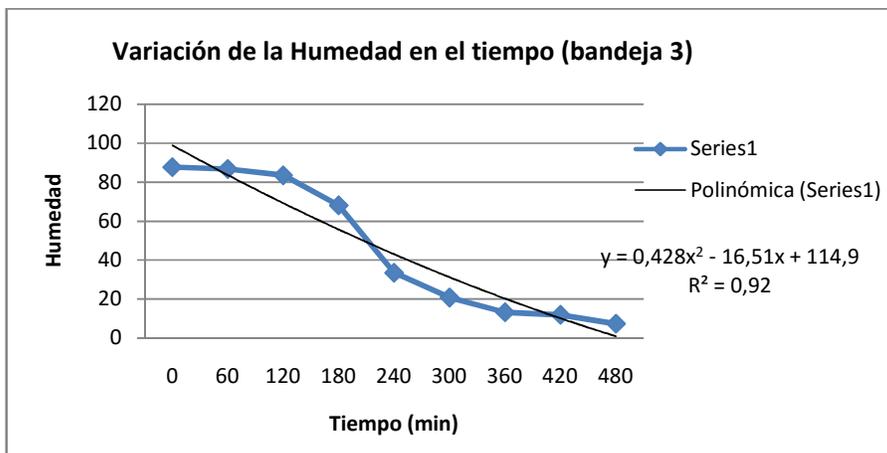


Gráfico 3.23: Variación de la humedad en el tiempo corrida 3 bandeja 3

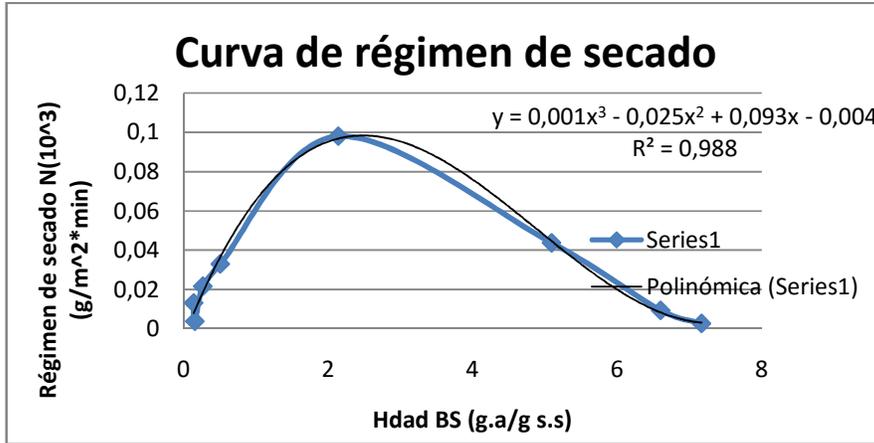


Gráfico 3.24: Curva de régimen de secado corrida 3 bandeja 3

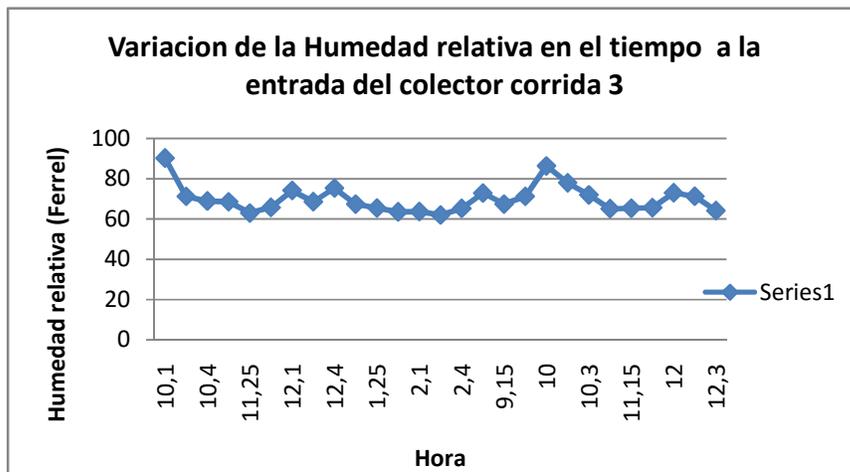


Gráfico 3.25: Variación de la humedad relativa en el tiempo a la entrada del colector corrida 3

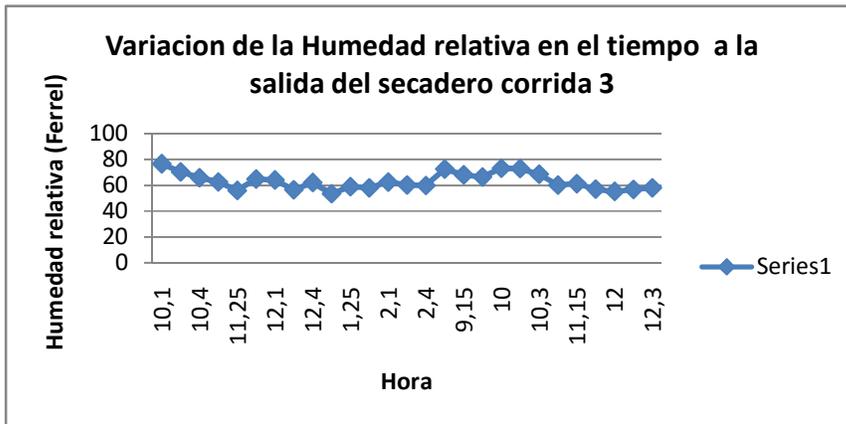


Gráfico 3.26: Variación de la humedad relativa en el tiempo a la salida del secadero corrida 3

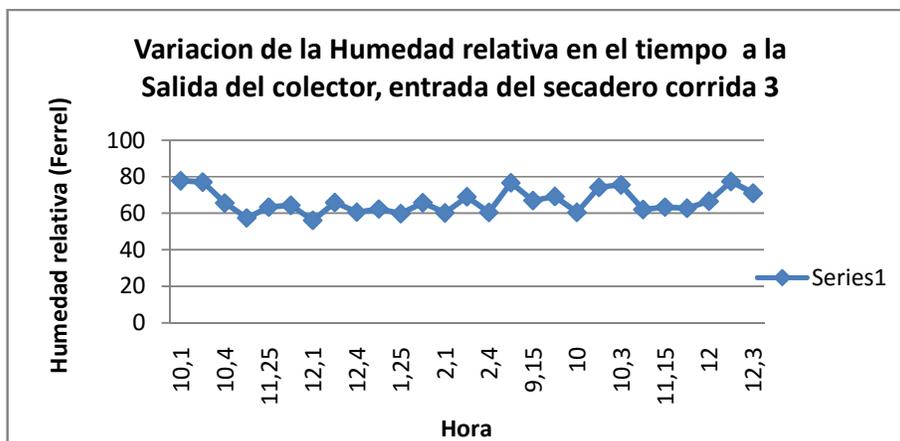


Gráfico 3.27: Variación de la humedad relativa en el tiempo a la salida del colector, entrada del secadero corrida 3

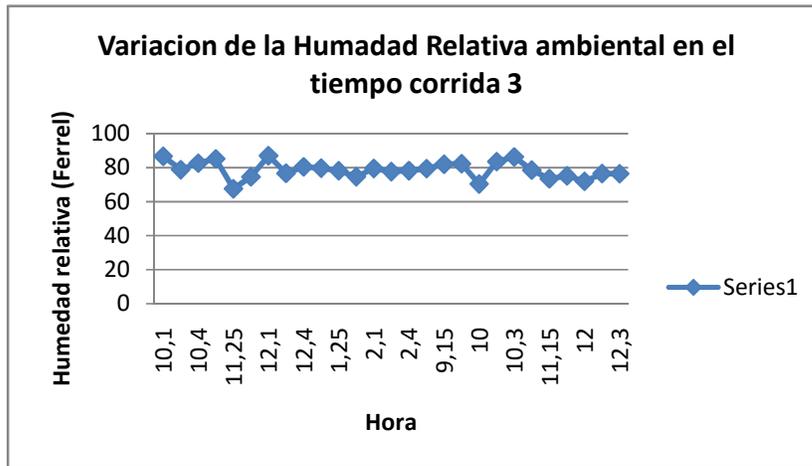


Gráfico 3.28: Variación de la humedad relativa ambiental en el tiempo corrida 3

El comportamiento de la humedad en esta corrida no se aleja mucho de lo que sucede en las corridas uno y dos. Aquí en alga tiene una humedad inicial de 84 % en la bandeja 1, 87,9 % en la 2 y 87,7 % en la 3. El alga al cabo de las 60 minutos y 120 minutos no pierde mucha humedad; en la 1 pierde a los 60 minutos 1,5 % y a los 120 minutos, 0,9 %. En la bandeja 2 disminuye la humedad a los 60 minutos y 120 minutos 1 % y 3,5 % respectivamente; y en la bandeja 3: 0,9 % y 3,3 %.

En los horarios de 12:25 a 2:25 es cuando se observa la disminución más drástica en la humedad disminuyendo en la bandeja 1 de: 81,6 % - 51,9 % - 34,9 %; en la bandeja 2 de: 83,4 % - 69,3 % - 36,9 % y en la 3 de: 83,5 % - 68,1 % - 33,5 %.

Luego del transcurso de estas horas las bandejas se guardan con el procedimiento descrito anteriormente y al siguiente día, al tomar las muestras iniciales se observa que tiene un comportamiento similar al de la corrida 2 disminuyendo la humedad en las bandejas 1,2 y 3 a 22 %, 21,7 % y 30,9 % de humedad respectivamente.

Al transcurrir las tres horas siguientes los resultados arrojan que la bandeja 1 y 3 pierde 13,5 % de humedad llegando hasta un valor de 8,8 % y 7,4 % respectivamente y la bandeja 2 pierde 14,4 % llegando a 7,3 % de humedad.

Por lo tanto la humedad en el equilibrio en la bandeja 1 es de 8 % y en las bandejas 2 y 3 es de 7 %; la humedad crítica para las bandejas 1,2 y 3 se encuentra sobre los 22 %, 21 % y 20 % de humedad respectivamente.

Para esta corrida se utiliza al igual que en las anteriores en las curvas de variación de la humedad en el tiempo series polinómicas de segundo orden y se obtuvo R^2 para la bandeja 1,2 y 3 con valores de 0,935, 0,927 y 0,92 respectivamente y para régimen de

secado con series polinómica de 5^{TO} orden R^2 de 0.999 para la bandeja 1 y para las bandejas 2 y 3 $R^2=0.996$ y $R^2=0.988$ con una serie polinómica de 3^{er} orden

Esta corrida efectuada en la misma semana que la anterior (corrida 2), tuvo un comportamiento aún más similar por las condiciones atmosféricas con cielos nublados como se describió anteriormente.

Tabla No .3.7: Resumen de la remoción total de humedad por bandejas en las diferentes corridas experimentales.

Corrida 1	% total de Remoción de humedad	Humedad final del alga
Bandeja 1	71.44	10.47
Bandeja 2	75.41	8.09
Bandeja 3	78.09	10.52
Corrida 2		
Bandeja 1	78.23	8.38
Bandeja 2	79.21	7.52
Bandeja 3	78.61	7.65
Corrida 3		
Bandeja 1	75.16	8.83
Bandeja 2	80.57	7.34
Bandeja 3	80.31	7.44

Como se puede observar en la corrida 1 se remueve menos humedad que en la segunda por estar ubicada en la parte superior del secadero y recibir el aire más saturado dada las características operacionales del equipo y en la segunda menos que en la tercera. El máximo valor de pérdida de humedad se observa en la corrida 3, en las bandejas 2 y 3 con valores de 80,57 % y 80,31 % y además fueron los que reportaron la humedad más baja con valores de 7,34 % y 7,44 %.

3.4 Cálculo de los parámetros del colector de temperatura.

Dimensionamiento del colector de temperatura.

El secador está condicionado por diferentes factores como lo son, diferencia de temperatura, condiciones climatológicas (humedad del aire, nubosidad), el área de

transferencia de calor y la velocidad del aire atmosférico por lo que el diseño conceptual del colector de temperatura está condicionado por las siguientes consideraciones. Se asume el área de transferencia de calor constante para todas las situaciones atmosféricas que pueden ocurrir. La temperatura disminuye en la medida que la irradiación solar disminuye. La velocidad del aire es constante. El diseño del secador para condiciones desfavorables requiere mayor nivel de análisis para obtener valores adecuados de eficiencia de secado.

El colector de temperatura se construye de materiales de fácil acceso como madera, vidrio y cobre. Este consiste en una especie de gaveta que en su interior presenta varias placas metálicas de cobre doblada de forma tal que da la impresión de un haz de tubos. Este gavetero se cubre con una lámina de vidrio para cerrar la superficie y hacer pasar la energía solar. El colector tiene una abertura en la parte superior de la entrada que es por donde pasa el aire para aumentar su temperatura antes de entrar a la cámara de secado. Las dimensiones de este colector se presentan en la *figura 3.2*.

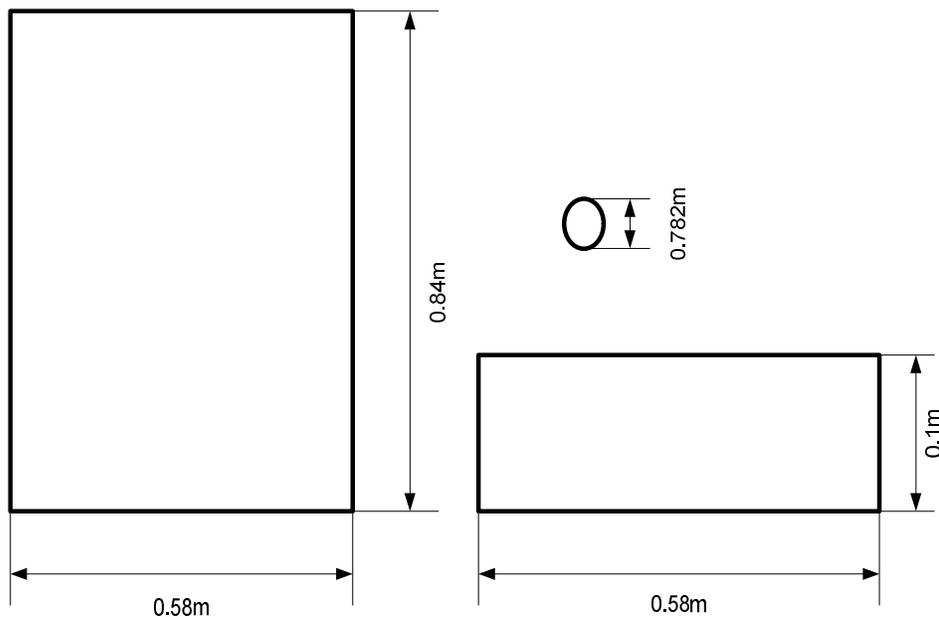


Figura 3.2 Dimensiones del colector de temperatura. Vista frontal y superior.

Área del colector.

Para estos cálculos se utiliza la metodología expresada por **(Weiss and Buchinger, 2014)** y se considera el espacio entre placas como un haz de tubos, uno al lado del otro, de 1plg de diámetro exterior y una longitud de 80cm. Los datos de los tubos y las dimensiones de la placa se obtienen de la tabla 10 de la página 948 de **(KERN, 1999)**.

El número de tubos se obtiene por la siguiente ecuación.

$$\#detubos = \frac{Lc}{DI}$$

Donde:

L_c -Longitud de la abertura del colector.

DI-Diámetro interior del tubo.

Flujo de aire en el colector.

El flujo de aire se calcula por la siguiente ecuación.

$$F = v \cdot Ast$$

Donde:

F -Flujo de aire en el colector.

V -Velocidad del aire en el colector 3m/s (**Pavlov, 1981**).

Ast - Área de la sección transversal del colector.

El área de la sección transversal del colector es la diferencia entre el área de la sección transversal del conducto del aire y el área que ocupa la sección transversal de las placas.

El flujo másico es igual al flujo volumétrico multiplicado por la densidad del aire que según (**Pavlov, 1981**) es 1.29 kg/m³.

Ver Tabla 3.8 Cálculo de parámetros del colector de temperatura.

3.5 Cálculo de la eficiencia del colector

$$\eta_c = \frac{Q_u}{H_t A_c}$$

Ecuación de Balance Energético en colectores de placa plana

$$Q_{abs} = Q_{util} + Q_{perd} + du/dt$$

Donde:

Q_{abs} (W): Es el calor total incidente absorbido por unidad de tiempo.

Q_{util} (W): Es el calor útil que se trasfiere al fluido de trabajo.

Q_{perd} (W): Perdidas de calor (alrededores) por radiación, convección y conducción.

du/dt (W): Rapidez del cambio de energía almacenada en el colector, despreciable.

$dt/du=0$

$$Q_{abs} = H A_c (\tau\alpha)$$

$$(\tau\alpha) = \frac{\tau\alpha}{1-(1-\alpha)\rho}$$

Donde:

H (W/m^2): Es la energía solar incidente. A_c (m^2): Es el área efectiva del colector.

A_c (m^2): Es el área efectiva del colector.

τ : Transmitancia solar efectiva de la cubierta del colector

α : Absorbancia de la placa absorbente del colector

ρ : refractancia difusiva, toma diferentes valores según el número de cubiertas que se utilicen para 1 cubierta $\rho = 0.16$, para 2 cubiertas $\rho = 0.24$, para 3 cubiertas $\rho = 0.29$, para 4 cubiertas $\rho = 0.3$

$Q_{util} = m C_p dT/dt$

Donde:

m (kg): Masa de aire

C_p ($J/kg^\circ C$): Capacidad calorífica del fluido

dT/dt ($^\circ C/s$): Rapidez del cambio de temperatura con respecto al tiempo

$Q_{perd} = U_1 A_c (T_{pm} - T_a)$

Donde:

U_1 ($W/m^2 ^\circ C$): Coeficiente de pérdidas de calor por radiación, convección y conducción

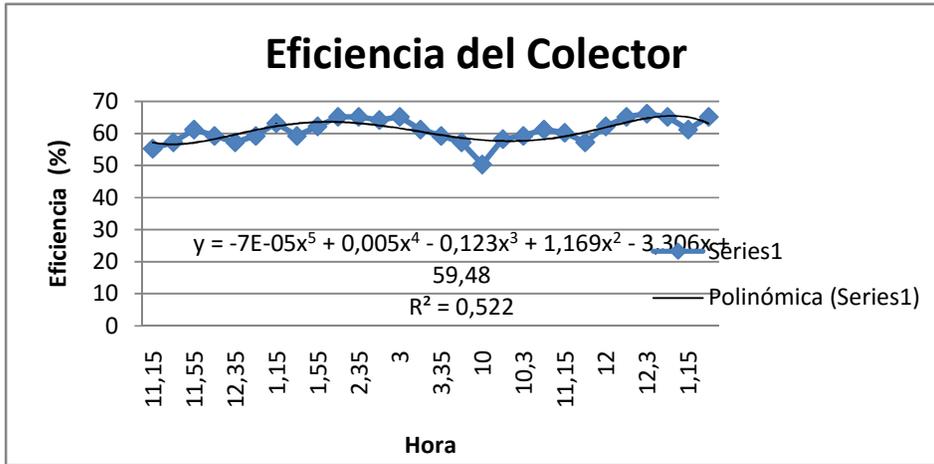
T_{pm} ($^\circ C$): Temperatura media de la placa de absorción

Considerando un día soleado con una radiación solar de $1000W/m^2$. Si la transmitancia del vidrio 0.88, la absorbancia de las placas de cobre es de 0.9 y el coeficiente de refractancia difusiva para una cubierta de vidrio es de 0.16, podemos obtener el calor útil del colector solar.

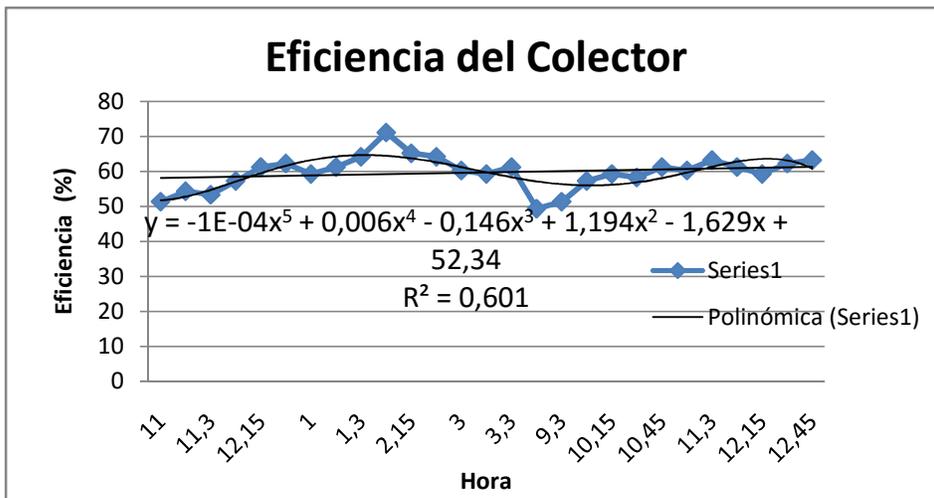
Tabla No. 3.9, 3.10 y 3.11: Cálculo de la eficiencia del colector Corrida 1,2 y 3 (Ver Anexo 7)

Los resultados se resumen en las siguientes gráficas:

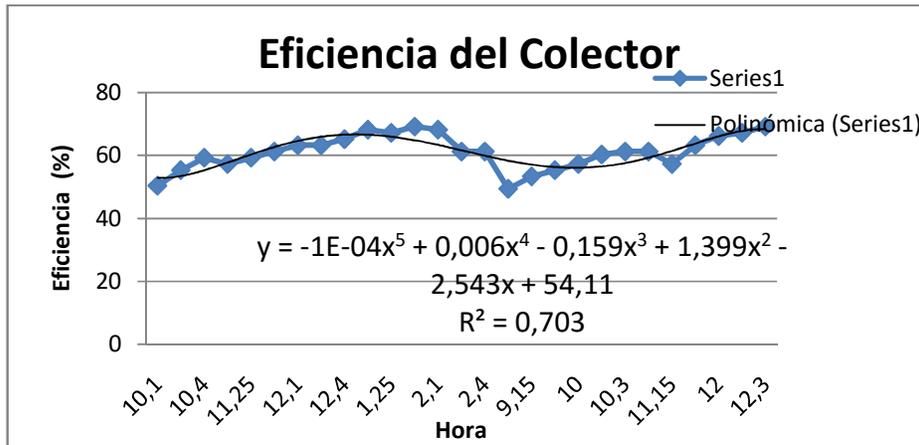
Corrida 1



Gráfica 3.29: Cálculo de la eficiencia del colector corrida 1
Corrida 2



Gráfica 3.30: Cálculo de la eficiencia del colector corrida 2
Corrida 3



Gráfica 3.31: Cálculo de la eficiencia del colector corrida 3

3.5.1 Análisis de resultados de la eficiencia del colector

Como se puede observar las tres corridas presentan un comportamiento similar encontrándose la eficiencia en el rango desde 49 %- 71 %. En la corrida 1 la eficiencia inicial fue de 55,29 % y a medida del paso de las hora asciende progresivamente hasta alcanzar un valor máximo de 65,17 % en los horarios de 2:15 p.m, 2:35 p.m y 3:00 p.m y de ahí desciende progresivamente hasta 57,27 %. En el segundo día la eficiencia inicial es de 50,36 % y a medida del paso del tiempo va aumentando hasta alcanzar un valor máximo de 66,16 % el cual disminuye hasta 65,17 %. En esta corrida se evidencia que el colector funciona de forma adecuada con una eficiencia promedio de 60,83 %, una media acotada de 61,03, una desviación promedio de 2,95 y $R_2 = 0,522$.

La corrida 2 comienza con una eficiencia de 51,34 % la cual va aumentando progresivamente al paso del tiempo hasta alcanzar un valor máximo de 71,09 % en el horario de las 3:00 p.m la cual va disminuyendo hasta un valor de 61,22 %. Al día siguiente la eficiencia inicial es de 49,37 % y fue aumentando con el paso del tiempo hasta 63,19 %. En esta corrida se evidencia que el colector funciona de forma adecuada con una eficiencia promedio de 59,68 %, una media acotada de 59,64, una desviación promedio de 3,46 y $R_2 = 0,601$.

En la corrida 3 la eficiencia inicial es de 50,36 % la cual va aumentando a medida del paso del tiempo hasta alcanzar un valor máximo de 69,12 % a la 1:40 p.m; luego va disminuyendo hasta alcanzar un valor de 61,22 %. Al día siguiente la eficiencia inicial es

de 49,37 % y aumenta progresivamente hasta un valor de 69,12 %. En esta corrida se evidencia que el colector funciona de forma adecuada con una eficiencia promedio de 61,15%, una media acotada de 61,26, una desviación promedio de 4,29 y $R_2=0,703$.

3.6 Cálculo de la Eficiencia del secadero

Cálculo de la eficiencia del secadero en términos de temperatura

$$E_t = \frac{T_1 - T_2}{T_1 - T_a} * 100$$

Donde:

E_t (%): Eficiencia del secadero en términos de temperatura

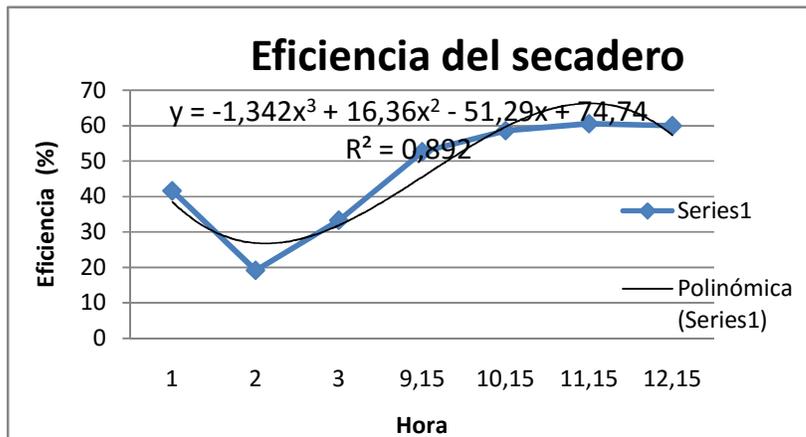
T_1 ($^{\circ}\text{C}$): Temperatura del aire a la entrada del secadero

T_2 ($^{\circ}\text{C}$): Temperatura del aire a la salida del secadero

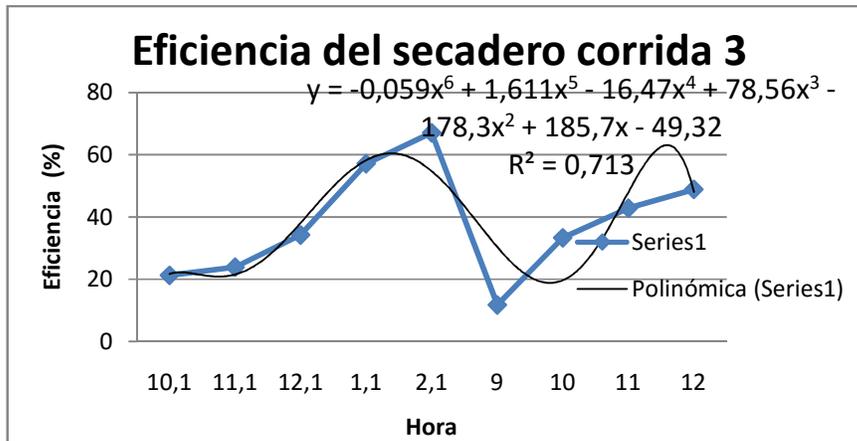
T_a ($^{\circ}\text{C}$): Temperatura del aire ambiental

Es de señalar que en el primer día ni se midieron las temperaturas a la salida del colector (entrada del secadero), ni la temperatura ambiental por lo tanto no se pudo calcular la humedad relativa ni la eficiencia del secadero en esa corrida ni en la mañana del primer día de la segunda corrida.

Los resultados se resumen en las siguientes gráficas:



Gráfica 3.32: Cálculo de la eficiencia del secadero en términos de temperatura corrida 2



Gráfica 3.33: Cálculo de la eficiencia del secadero en términos de temperatura corrida 3

Como se puede observar en ambas corridas se aprecia un comportamiento similar de la eficiencia del secadero en la corrida 2 la primera eficiencia se tomó a las 1:00 p.m. la cual fue de 41,66 %, esta fue aumentando progresivamente hasta alcanzar un valor máximo de 60,06 %. Esta corrida tiene una eficiencia promedio de 46,58 %, una media acotada de 46,58, una desviación promedio de 13,006 y un coeficiente de correlación $R^2 = 0,892$ con una serie polinómica de 3^{er} orden.

La corrida 3 a las 10:10 a.m. tiene una eficiencia de 21,27 % la cual al transcurso de las horas aumenta hasta un valor máximo de 67,04 %. Al día siguiente la primera eficiencia fue de 11,76 % a las 9:00 a.m. y fue aumentando progresivamente hasta un valor de 48,88 % que fue la última eficiencia tomada a las 12:00 p.m. Esta corrida tiene una eficiencia promedio de 37,82 %, una media acotada de 37,82, una desviación promedio de 14,36 y un coeficiente de correlación $R^2 = 0,713$ con una serie polinómica de 6^{to} orden.

Como se pudo observar en los horarios de 12:00 p.m. - 2:00 p.m. es donde se evidencia la mayor eficiencia del secadero y además se puede corroborar lo antes expuesto en la prueba de secado que este es el horario donde el alga pierde más humedad.

Cálculo de la eficiencia del secadero en términos de masa de agua evaporada

$$\eta_s = \frac{(W_0 - W_t) * L_v}{(H_t * A_c)}$$

Donde:

η_s : Eficiencia del secador solar

W_0 : Peso del material inicial (Kg)

W_t : Peso del material en el tiempo (Kg)

L_v : Calor latente de vaporización del agua en el alga (KJ/Kg) (**WARREN L.McCABE, JULIAN C.SMITH, 1937**)

H_t : Radiación horaria incidente sobre la superficie inclinada en el colector (KJ/m²)

A_c : Área del colector (m²)

$$\text{Ejemplo de cálculo: } \eta_s = \frac{(W_0 - W_t) * L_v}{(H_t * A_c)} = \frac{(0.8191 - 0.286) * 2425,78}{1000 * 3.72325} = 38.083\%$$

Tabla 3.12: Cálculo de la Eficiencia del Secadero Corrida 1

Hora	Eficiencia bandeja 1	Eficiencia bandeja 2	Eficiencia bandeja 3
11,15	1,37471182	1,6939577	6,4500697
12,15	17,875275	12,8005423	17,6088678
1,15	34,732648	29,5791075	38,1792004
2,15	38,0832377	38,447111	41,9104049
3,15	37,9532829	37,6218983	40,8707669
10	39,48876	38,7004182	43,0004646
11	39,707672	39,2463326	42,9500428
12	46,4653187	49,0579158	50,7473275
1			

Tabla 3.12: Cálculo de la Eficiencia del Secadero Corrida 2

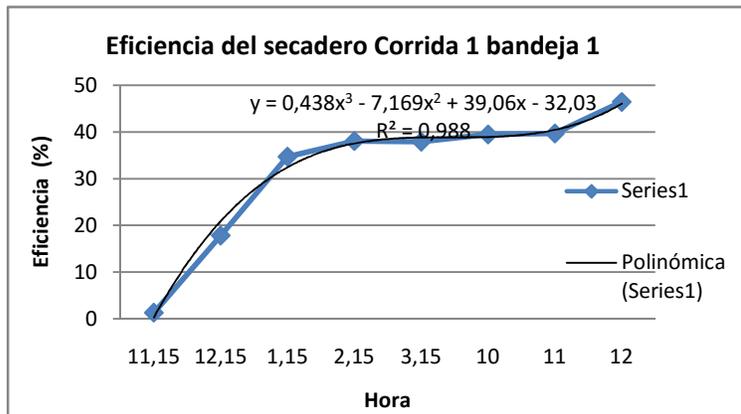
Hora	Eficiencia bandeja 1	Eficiencia bandeja 2	Eficiencia bandeja 3
11	1,19228561	1,95456657	3,58337205
12	7,29695887	8,64199047	10,2664248
1	19,024448	20,1320357	20,8487101
2	32,5536633	35,9324867	35,6725772
3	42,0533551	42,5601786	42,0403596
9,15	44,6292701	45,476249	45,9323145
10,15	48,2781873	48,7395267	48,5380968
11,15	50,8772822	51,4490831	51,0722143

12,15			
-------	--	--	--

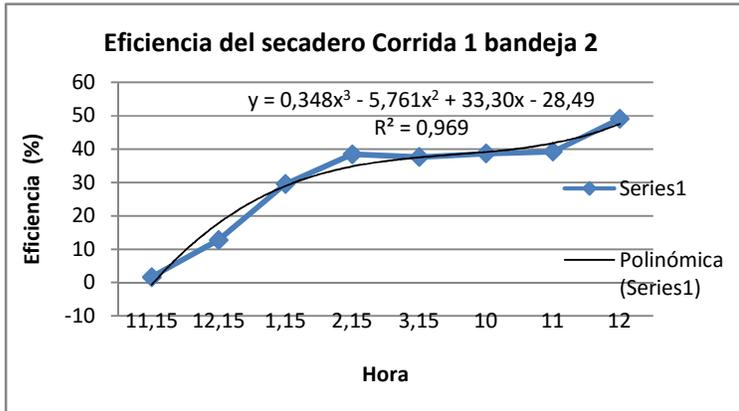
Tabla 3.14: Cálculo de la Eficiencia del Secadero Corrida 3

Hora	Eficiencia bandeja 1	Eficiencia bandeja 2	Eficiencia bandeja 3
10,1	0,97728329	0,65152219	0,58636997
11,1	1,55945693	2,92398174	2,72904962
12,1	20,9138624	12,1183128	12,769835
1,1	31,9038896	33,1384597	35,2177356
2,1	40,2859706	43,0150202	43,4048844
9	46,2580756	47,7565766	48,4732511
10	47,8883231	50,2275085	49,1618796
11	48,8629837	52,3457708	52,1508387
12			

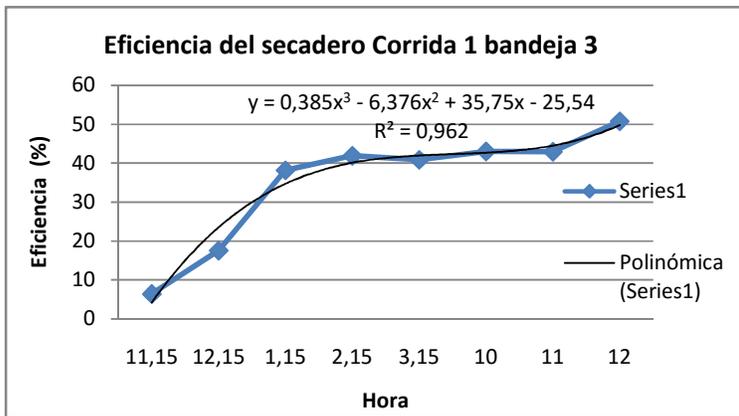
Los resultados se resumen en las siguientes gráficas:



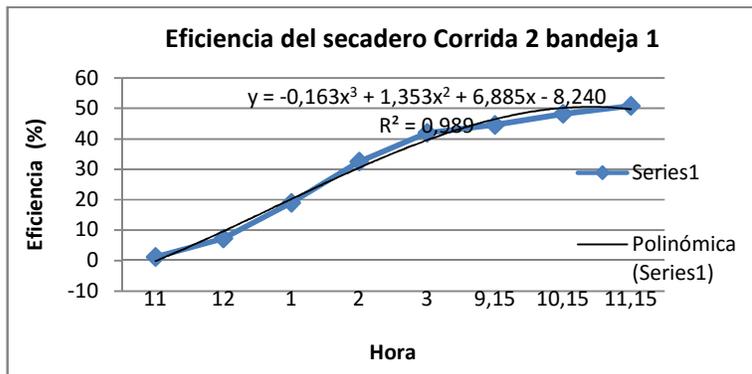
Gráfica 3.34: Cálculo de la eficiencia del secadero en términos de masa de agua evaporada corrida 1 bandeja 1



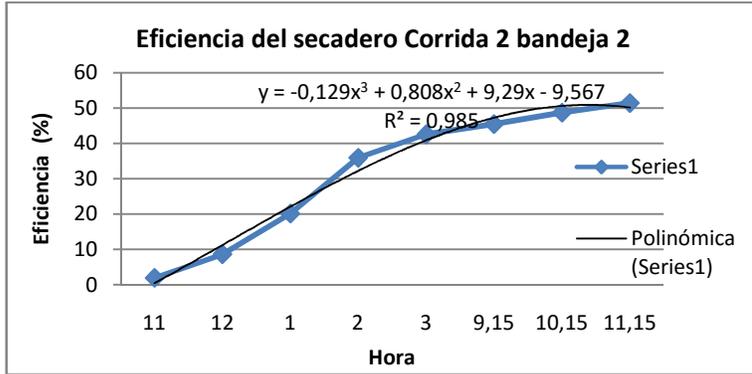
Gráfica 3.35: Cálculo de la eficiencia del secadero en términos de masa de agua evaporada corrida 1 bandeja 2



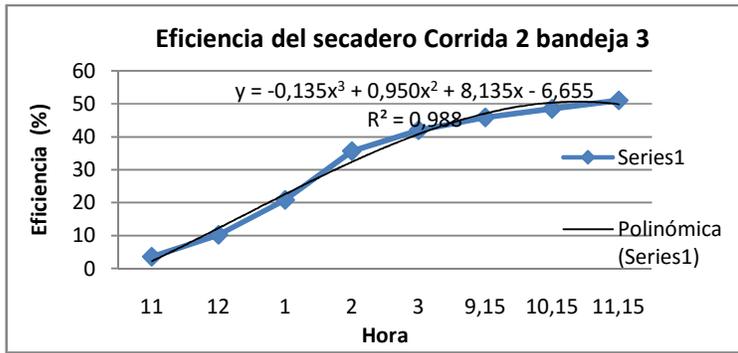
Gráfica 3.36: Cálculo de la eficiencia del secadero en términos de masa de agua evaporada corrida 1 bandeja 3



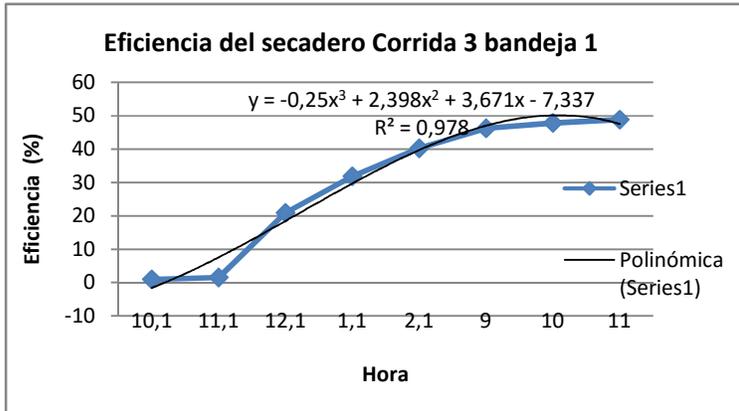
Gráfica 3.37: Cálculo de la eficiencia del secadero en términos de masa de agua evaporada corrida 2 bandeja 1



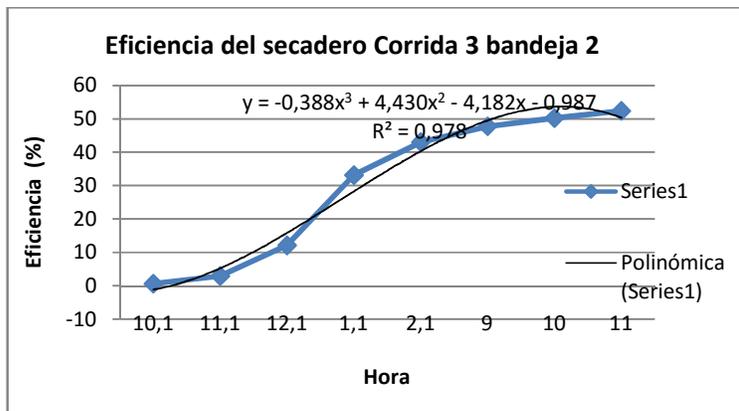
Gráfica 3.38: Cálculo de la eficiencia del secadero en términos de masa de agua evaporada corrida 2 bandeja 2



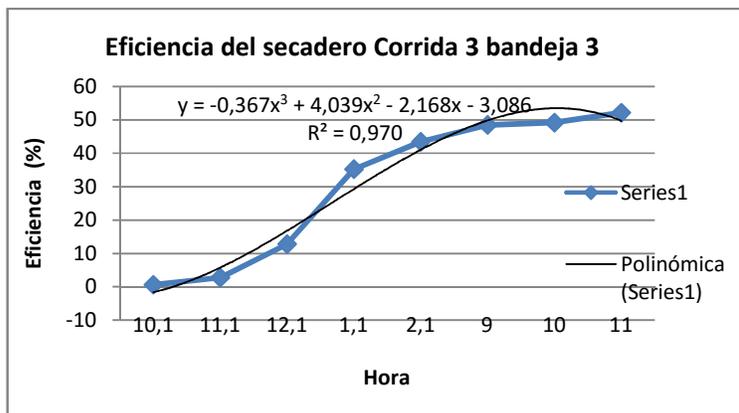
Gráfica 3.39: Cálculo de la eficiencia del secadero en términos de masa de agua evaporada corrida 2 bandeja 3



Gráfica 3.40: Cálculo de la eficiencia del secadero en términos de masa de agua evaporada corrida 3 bandeja 1



Gráfica 3.41: Cálculo de la eficiencia del secadero en términos de masa de agua evaporada corrida 3 bandeja 2



Gráfica 3.42: Cálculo de la eficiencia del secadero en términos de masa de agua evaporada corrida 3 bandeja 3

Como se puede observar las tres corridas, y las tres bandejas de cada una de ellas, tienen un comportamiento similar comenzando en horarios de la mañana con una eficiencia baja y a medida del paso de las horas va aumentando progresivamente hasta cerca del 50 %. El coeficiente de correlación para todos los casos es mayor de 0.96 con una serie polinómica de tercer orden.

Conclusiones parciales

1. Se comprueba que la experimentación se desarrolla adecuadamente en cada corrida al obtenerse un índice de humedad crítica en todos los casos entre 21 % y 23 % y la humedad en el equilibrio de alrededor del 7%.
2. Como se observa en la Tabla 3.7 el % de remoción de humedad se encuentra entre el 71 % y el 80 %. En las bandejas 2 y 3 los niveles son más cercanos a este último valor, con humedad final inferiores al 8 %.
3. Las características de instalación de la planta requiere una operación del sistema sencilla y su control es facial de lograr siempre y cuando las condiciones ambientales sean favorables.
4. La eficiencia del colector de temperatura se encuentra entre el 49 % y 71 % lo que indica que se encuentra en los rangos esperados en este tipo de secadores solares de circulación natural.
5. La eficiencia global del secadero se mueve en el rango de 30 % a 45% siendo las horas del mediodía cuando más eficiente de muestra el secador.

Conclusiones

1. El empleo de la luz solar o la exposición al flujo de aire calentado para el secado en general, constituye una opción que además de ecológica logra resultados cualitativos especialmente para la mayoría en los materiales vegetativos como hojas, tallos, semillas, flores y las algas muy beneficiosos para su conservación cuando se desarrollan procedimientos adecuados en cada caso.
2. Como característica general del comportamiento en el laboratorio, se obtuvo un régimen de secado descrito por un serie polinómica de 6to. orden con un coeficiente de correlación R^2 mayor del 90 %. El máximo régimen de velocidad de secado se alcanza en todos los casos en los primeros 60 minutos con alrededor del 70 % de remoción de la humedad inicial.
3. Los índices de secado en general mostraron adecuada correspondencia en los diferentes experimentos, tanto en estufa como en el secadero solar piloto. La humedad crítica fluctuó alrededor del 23 % y la humedad en el equilibrio se encuentra en todos los casos entre 6 % y 8 % en ambos niveles de escala investigados
4. La eficiencia del colector de temperatura se encuentra entre el 49 % y 71% lo que indica que está en los rangos esperados reportados en la literatura para este tipo de colectores solares.
5. La eficiencia global del secadero se mueve en el rango de 30 % a 45% siendo las horas del mediodía cuando más eficiente de muestra el secador como era de esperar y coincidente con informaciones reportadas.

Recomendaciones

1. Para el desarrollo de la experimentación deben extremarse las medidas de muestreo para asegurar resultados aun más precisos, especialmente relacionado con la toma de la temperatura y la humedad relativa.
2. El estudio de secado de las algas debe efectuarse en diferentes épocas del año por la incidencia que pudiera tener la radiación solar en el proceso.
3. El diseño del equipo evaluado puede mejorarse para evitar pérdidas del aire calentado y mayor eficiencia del colector.

Referencias bibliográficas

1. BANOUT, J. et al, Uso de secadores solares para el procesamiento de cultivos en la Amazonía peruana. Suscripciones LEISA. Revista Agroecología. 2005, Vol. 21, No. 1. <http://www.agriculturesnetwork.org/magazines/latin-america/energia-en-la-finca/uso-de-secadores-solares-para-el-procesamiento-de-cultivos-en-la-amazonia-peruana>
2. CORP, S.; LUGONES, B. Método gráfico para el diseño de secadores solares.2016. <http://www.cubasolar.cu/biblioteca/Ecosolar/Ecosolar03/HTML/articulo01.htm>
3. MUJUMDAR, A.S. et al. Global R & D needs in Drying. Drying Technology.2007, 25, 4, 647-648
4. ZHANG, M. et al. Trends in Microwave Related Drying of Fruit and Vegetables. Trends in Food Science & Technology.2006, 17, 524-534
5. FUNEBO, T.; OHLSSON, T. Microwave-Assisted Air Dehydration of Apple and Mushroom. Journal of Food Engineering.1998, 38, 353-367
6. WEISS, W.; BUCHINGER, J. Solar Drying Austrian Development Cooperation. 2016. <http://www.aee-intec.at/0uploads/dateien553.pdf>
7. TREYBAL, R. E. Operaciones con transferencia de masa, Segunda Edición, Universidad de Rhode Island. McGraw-Hill, 1977, 218 -715
8. LIK, C. Solar Drying: Fundamentals, Applications and Innovations. 2016. http://www.arunmujumdar.com/file/Publications/books/Solar\%20Drying_Fundamentals_Applications_and_Innovations.pdf
9. MONTERO, I. MODELADO Y CONSTRUCCIÓN DE UN SECADERO SOLAR HIBRIDO PARA RESIDUOS BIOMÁSICOS. TESIS DOCTORAL. UNIVERSIDAD DE EXTREMADURA. BADAJOZ. ESPAÑA. 2005, 286 p. ISBN: 84-7723-711-5. <https://dialnet.unirioja.es/servlet/tesis?codigo=576>
10. LANCHAS, A. La madera Termo-tratada. 2014. <http://protecciondelamadera.com/la-madera-termo-tratada-usos-y-aplicaciones/>
11. AWARE, R. et al. Solar Drying: Fundamentals, Applications and Innovations. Ed. Hii, C.I.; Jangam, S.V.; Ong, S.P.; Mujumdar, A. S. Singapore. 2012, 1-145. ISBN 978- 981-07-3336-0
12. SCHWARTZ, S. J.; VON-ELBE, J.H. Kinetics of Chlorophyll Degradation to Pyropheophytin in Vegetables. Journal of Food Science.1983, 48, 1303-1306
13. AN-ERL KING, V. et al. Chlorophyll Stability in Spinach Dehydrated by Freeze-Drying and Controlled Low-Temperature Vacuum Dehydration. Food Research International.2001, 34, 2-3, 167-175

14. AKTAS, T. et al. Effects of Pretreatments of Sliced Vegetables with Trehalose on Drying Characteristics and Quality of Dried Products. *Food and Bioproducts Processing. Trans ICheme, Part C.* 2007, 178-183
15. RASTOGI, N.K. et al. Influence of Osmotic Pre-Treatments on Rehydration Characteristics of Carrots. *Journal of Food Eng.* 2004, 65, 287-292
16. MATE, J.I. et al. The Effect of Blanching on the Mechanical Rehydration Properties of Dried Potato Slices. *European Food Research and Technology.* 1999, 209, 343-347
17. AHMED, J. et al. Drying Characteristics and Product Quality of Coriander Leaves. *Food and Bioproducts Processing.* 2001, 79, 103-106
18. NAPHAPORN, C. et al. Effect of Pretreatment on Surface Topographical Features of Vegetables During Drying. *Journal of Food Engineering.* 2010, 101, 41-48
19. EKECHUKWU, O.V. Review of Solar – Energy Drying Systems I: An Overview of Drying Principles and Theory. *Energy Conversion and Management.* 1999, 40, 593-613
20. BALA, B. K.; MONDOL, M.R.A. Experimental Investigation on Drying of Fish Using Solar Tunnel Dryer. *Drying Technology.* 2001. 19, 1532-1537
21. BELESSIOTIS, V.; DELYANNIS, E. Solar Drying. *Solar Energy.* 2011. 85, 1665-16
22. BENA, B.; FULLER, R.J. Natural Convection Solar Dryer with Biomass Back-Up Heater. *Solar Energy.* 2002, 72, 1, 75-83
23. BENNAMOUN, L.; BELHAMRI, A. Design and Simulation of a Solar Dryer for Agriculture Products. *Journal of Food Engineering.* 2003, 59, 259-266
24. BEUCHAT, L.R. Microbial Stability as Affected by Water Activity. *Cereal Foods World.* 26, 7, 345-349
25. BOILIN, H.R. et al. Fruit Drying by Solar Energy. International Organization for Standardization, Geneva (Switzerland). Western Regional Research Center. Berkeley, CA, USA 1980.
26. AYENSU, A.; ASIEDU-BONDZIE, V. Solar Drying with Convective Self-Flow and Energy Storage. *Solar and Wind Technology.* 3, 4, 273-279
27. EISSEN, W. et al. Solar Drying of Grapes. *Drying Technology.* 1985. 3, 63-64
28. LEWICKI, P.P. Design of Hot Air Drying for Better Foods. *Trends in Food Science and Technology.* 2006, 17, 153-163
29. BIALOBRZEWSKI, I.; MARKOWSKI, M. Mass Transfer in the Celery Slice: Effects of Temperature, Moisture Content, and Density on Water Diffusivity. *Drying Technology.* 2004, 22 1777-1789

30. JASIM, A. et al. Handbook of Vegetables and Vegetable Processing. Wiley – Blackwell. USA. 2010, 788 p. ISBN: 978-0-8138-1541-1
31. BRENNENDORFER, B. et al. Solar Dryers - Their Role in Post-Harvest Processing. Commonwealth Secretariat Publications. Londres. Reino Unido. 1985.
32. GARCÍA-RODRÍGUEZ, A.; HERNÁNDEZ – TOUSET, J.P. Diseño conceptual de sistema para el cultivo intensivo de macroalgas marinas. Revista Tecnología Química. Editorial Oriente. 2012, Vol. 32, No. 2, 147 – 153, ISSN 2224- 6185
33. GARCÍA-RODRÍGUEZ, A. et al. Evaluación de sistema experimental para el cultivo intensivo de macroalgas marinas. Revista Centro Azúcar. 2012. Vol. 39, No. 3, 21-27. ISSN 2223-4861
34. PAVLOV, K. F. Problemas y ejemplos para el curso de operaciones básicas y aparatos en tecnología química, MOSCÚ, E. M. (ed.), 1981, 19 - 548
35. KERN, D. Q. 1999. PROCESOS TRANSFERENCIA DE CALOR. In: COMPAÑÍA EDITORIAL CONTINENTAL, S. A. D. C. V. M. (ed.) *PROCESS HEAT TRANSFER*. Primera edición: 1965
35. BERNADÓ, P. N. 2014 Algas...¿Qué son y para que sirven?
36. CANDELARIA, M. 2012 Algas para producir combustible.
TTrigésima primera reimpresión: 1999 ed. Mexico: MCGRAW HILL BOOK COMPANY, INC.
37. Basaure, P. (2011, agosto 3). Alga Ulva lactuca/composta y biogás.
38. Álvarez Cobelas, M., & Gallardo, T. (1989). Una revisión sobre la biotecnología de las algas. Anaerobic digestion of macroalgae: methane potentials, pre-treatment, inhibition and co-digestion. (2011). Recuperado 17 de abril de 2014, a partir de <http://www.unboundmedicine.com/medline/citation/22335117/Anaerobic>
39. Cano Mallo, M. de la C. (2008). Bases biológicas de ulva fasciatadelile, (chlorophyta) para su posible explotación, al oeste de la habana, cuba. Universidad de la Habana <http://www.oceandocs.org/.../Tesis%20Doctorado%20Mercedes%20Cano%200..ww.scielo.org.ve/scielo.php?pid=S0254-07702009000200005...>
40. Colectivo de autores. (2015, febrero). A Review of the Potential of Marine Algae as a Source of Biofuel in Ireland. Recuperado a partir de http://www.seai.ie/Publications/Renewables_Publications_/Bioenergy/Algaereport.pdf
41. Colectivo de autores. (2015). Energía de la algas presente y futuro.
42. Colectivo de autores. (2015). EnergyProductionfrom Marine Biomass (Ulva lactuca). Recuperado a partir de [http:// www.algecenterdanmark.dk](http://www.algecenterdanmark.dk)

43. Colectivo de autores. (2015, noviembre 22). Challenges in micro and macroalgae cultivation in the Baltic Sea Region. Recuperado a partir de http://www.baltic.org/files/2380/SUBMARINER_ScanBalt_2012_Seppala.pdf
44. Colectivo de autores. (2015, mayo). Danish State-of-Art on Micro and Macro Algae. Recuperado a partir de http://www.nordicinnovation.org/Documents/Attachments/NordicAlgaeNetwork_MarineProject/NIC%20DK%20report%20Iceland%20150512.pdf
45. Colectivo de autores. (2015). Biofuel Production in Ireland—An Approach to 2020 Targets with a Focus on Algal Biomass. Recuperado a partir de www.mdpi.com/journal/energies
46. Colectivo de autores. (2015). Ulva lactuca-wikipedia enciclopedia libre. Recuperado a partir de es.wikipedia.org/wiki/Ulva_lactuawww.asturnatura.com/especie/ulva-lactuca.html
47. Colectivo de autores. (2015, junio 5). Fast Detection of Nutrient Limitation in Macroalgae and Seagrass with Nutrient-Induced Fluorescence. Recuperado 17 de abril de 2014, a partir de <http://www.plosone.org/article/info%3Adoi%2F10.1371%2Fjournal.pone.0068834>
48. Colectivo de autores. (s. f.). Capture of CO₂ Emissions Using Algae. Recuperado a partir de [http://www.oilgae.com/ref/downloads/Analysis_of_CO₂ Capture_Using_Algae.pdf](http://www.oilgae.com/ref/downloads/Analysis_of_CO2_Capture_Using_Algae.pdf)
- 49 Machado, M.S (2015) Producción de Ulva a partir de un sistema de recirculación acuícola
50. Figueroa, Félix et al. (2009). Effects of nutrient supply on photosynthesis and pigmentation in Ulvalactuca(Chlorophyta): responses to short-term stress. *Acuatic Biology*, Vol. 7: 173–183
51. Boffill, Y.(2012). Reducción de emisiones industriales de dióxido de carbono mediante la producción de biomasa microalgal, Tesis presentada en opción al Título Académico de Máster en Ingeniería de Procesos Biotecnológicos.
52. Alencar, J. R., Horta Junior, P. A., & Celino, J. J. (2010). Cultivo de Camarão Branco *Litopenaeus Vannamei* (Boone, 1931) com a Macro-alga *Ulva Lacuata* Linneaus (Chlorophyta) no Tratamento de Efluentes em Sistema Fechado de Recirculação 10(2). Recuperado a partir de <http://eduep.uepb.edu.br/rbct/sumarios/pdf/alencar.pdf>
53. Robledo Ramírez, D. (1993). Cultivo, adaptación morfológica y fisiopatología de macroalgas marinas de interés industrial.

-
54. Robledo, D. (2012, abril 15). LAS ALGAS Y LA BIODIVERSIDAD. Recuperado a partir de www.maph49.galeon.com/biodiv2/alga.html
55. WARREN L. McCABE; JULIAN C. SMITH 1937 UNIT OPERATIONS OF CHEMICAL ENGINEERING 914-915

Anexos 2.1: Imagen No 1 Macroalga Ulva Lactuca

Reino: *Plantae*

División: *Chlorophyta*

Clase: *Ulvophyceae*

Orden: *Ulvales*

Familia: *Ulvaceae*

Género: *Ulva*

Especie: *Ulva lactuca*

Anexo 2

Imagen No 2.3 y 2.4 Estufa aireada



Imagen 2.5



Imagen 2.6



Imagen 2.7



Anexo 3

Tabla No. 2.2: Estudio de secado en estufa de la macroalga *Ulva Lactuca*. Corrida No. 2

Tiempo (t) (min)	PI(g)	PF(g)	Humedad (%)	Hdad.BS X(kga/kg s.s)	$\Delta\Theta$	Δx	N(10 ³) (g/m ² *min)
0	1,782	0,153	91,41	10,64	5	0,0225	0,0766
5	1,286	0,120	90,66	9,71	5	0,01508	0,0512
10	1,393	0,151	89,16	8,22	5	0,0037	0,0126
15	1,278	0,143	88,78	7,91	5	0,029	0,0988
20	2,082	0,294	85,87	6,08	5	0,024	0,0824
25	1,118	0,185	83,45	5,04	5	0,059	0,2014
30	1,326	0,298	77,52	3,44	5	0,055	0,1901
35	1,329	0,373	71,93	2,56	10	0,1799	0,3058
45	0,634	0,292	53,94	1,17	15	0,3026	0,3430
60	0,435	0,332	23,67	0,31	10	0,025	0,0432
70	0,582	0,459	21,13	0,26	10	0,0011	0,0019
80	0,580	0,458	21,01	0,26	10	0,0476	0,0809
90	0,363	0,304	16,25	0,19	10	0,0064	0,0109
100	0,410	0,346	15,60	0,18	10	0,0081	0,0138
110	0,419	0,357	14,79	0,17	10	0,00105	0,0017
120	0,422	0,360	14,69	0,17	20	0,01055	0,0089
140	0,330	0,285	13,63	0,15	70	0,00978	0,0023
210	0,395	0,345	12,65	0,14	60	0,00382	0,0010
270	0,391	0,343	12,27	0,13	30	0,0165	0,0093

300	0,546	0,488	10,62	0,11	30	0,0335	0,0190
330	0,413	0,383	7,263	0,07	30	0,0054	0,0030
360	0,387	0,361	6,718	0,07			

Tabla No. 2.3: Estudio de secado en estufa de la macroalga Ulva Lactuca. Corrida No. 3

Tiempo (t) (min)	PI(g)	PF(g)	Humedad (%)	Hdad.BS X(kga/kg s.s)	$\Delta\theta$	Δx	$N(10^3)$ (g/m ² *min)
0	0,940	0,108	88,51	7,70	15	0,407	0,4618
15	0,743	0,148	80,08	4,02	5	0,323	1,0988
20	0,402	0,210	47,76	0,91	5	0,112	0,3830
25	0,411	0,261	36,49	0,57	5	0,187	0,6391
30	0,226	0,186	17,69	0,21	5	0,055	0,1878
35	0,115	0,101	12,17	0,136	5	0,007	0,0243
40	0,288	0,255	11,45	0,129	10	0,00168	0,0028
50	0,186	0,165	11,29	0,1272	5	0,000186	0,0006
55	0,346	0,307	11,27	0,1270	5	0,000609	0,0020
60	0,223	0,198	11,21	0,1262	10	0,00399	0,0067
70	0,222	0,198	10,81	0,1212	20	0,000965	0,0008
90	0,252	0,225	10,71	0,12	10	0,00233	0,0039
100	0,229	0,205	10,48	0,1170	10	0,0017	0,0030
110	0,233	0,209	10,30	0,1148	10	0,00247	0,0042
120	0,189	0,170	10,05	0,1117	40	0,00278	0,0011
160	0,266	0,240	9,77	0,1083	20	0,0166	0,0141
180	0,456	0,419	8,11	0,0883	30	0,00291	0,0016
210	0,473	0,436	7,82	0,0848	30	0,0027	0,0015
240	0,424	0,392	7,54	0,0816	30	0,00059	0,0003
270	0,414	0,383	7,48	0,0809	30	0,0032	0,0018
300	0,335	0,311	7,16	0,0771	30	0,0045	0,0025
330	0,492	0,459	6,70	0,0718	30	0,0028	0,0015

360	0,529	0,495	6,42	0,0686			
-----	-------	-------	------	--------	--	--	--

Dia 1	Hora	Tiempo (min)	PI (g)	PF (g)	Humedad (%)	Hdad.BS X (kga/kg s.s)	$\Delta\theta$	Δx	N (10 ³) (g/m ² *min)
Bandeja 3	11,15	0	0,91	0,125	86,26	6,28	60	0,055	0,0157
Bandeja 3	12,15	60	2,788	0,538	80,70	4,18	60	0,1021	0,0289
Bandeja 3	1,15	120	1,047	0,309	70,487	2,388	60	0,162	0,0460
Bandeja 3	2,15	180	0,483	0,221	54,244	1,18	60	0,2291	0,0649
Bandeja 3	3,15	240	0,383	0,263	31,33	0,45	60	0,0981	0,0278
Dia 2	9,3	300	0,516	0,405	21,511	0,274	60	0,057	0,0162
Bandeja 3	10,3	360	0,551	0,464	15,78	0,18	60	0,0428	0,0121
Bandeja 3	11,3	420	0,4	0,354	11,5	0,129	60	0,0384	0,0108
Bandeja 3	12,3	480	0,444	0,41	7,657	0,082			

Tabla 3.6: Estudio de Secado en secadero solar de la Macroalga Ulva Lactuca. Corrida No. 3

Dia 1	Hora	Tiempo (min)	PI (g)	PF (g)	Humedad (%)	Hdad.BS X (kga/kg s.s)	$\Delta\theta$	Δx	N (10 ³) (g/m ² *min)
Bandeja 1	10,25	0	0,645	0,103	84,03	5,262	60	0,014	0,00411
Bandeja 1	11,25	60	0,993	0,173	82,57	4,739	60	0,009	0,002
Bandeja 1	12,25	120	1,117	0,205	81,64	4,448	60	0,296	0,084
Bandeja 1	1,25	180	0,635	0,305	51,96	1,081	60	0,169	0,0481
Bandeja 1	2,25	240	0,426	0,277	34,97	0,537	60	0,129	0,0367
Dia 2	9,15	300	0,536	0,418	22,01	0,282	60	0,089	0,0252
Bandeja 1	10,15	360	0,619	0,538	13,085	0,150	60	0,0277	0,0078
Bandeja 1	11,15	420	0,621	0,557	10,305	0,114	60	0,0142	0,0040
Bandeja 1	12,15	480	0,428	0,39	8,878	0,097			
Dia 1	Hora	Tiempo (min)	PI (g)	PF (g)	Humedad (%)	Hdad.BS X (kga/kg s.s)	$\Delta\theta$	Δx	N (10 ³) (g/m ² *min)

Bandeja 2	10,25	0	1,117	0,135	87,91	7,274	60	0,009	0,0027
Bandeja 2	11,25	60	1,058	0,138	86,95	6,666	60	0,035	0,0099
Bandeja 2	12,25	120	1,262	0,209	83,43	5,0382	60	0,141	0,0399
Bandeja 2	1,25	180	1,024	0,314	69,33	2,2611	60	0,324	0,091
Bandeja 2	2,25	240	0,577	0,364	36,915	0,585	60	0,151	0,0429
Dia 2	9,15	300	0,487	0,381	21,76	0,278	60	0,0715	0,0202
Bandeja 2	10,15	360	0,616	0,526	14,610	0,171	60	0,039	0,0111
Bandeja 2	11,15	420	0,769	0,687	10,663	0,119	60	0,033	0,009
Bandeja 2	12,15	480	0,708	0,656	7,34	0,0792			
Dia 1	Hora	Tiempo (min)	PI (g)	PF (g)	Humedad (%)	Hdad.BS X (kga/kg s.s)	$\Delta\theta$	Δx	N (10 ³) (g/m ² *min)
Bandeja 3	10,25	0	1,16	0,142	87,758	7,16	60	0,0091269	0,002
Bandeja 3	11,25	60	1,376	0,181	86,84	6,60	60	0,032	0,009
Bandeja 3	12,25	120	1,194	0,196	83,584	5,09	60	0,154	0,043
Bandeja 3	1,25	180	0,889	0,283	68,166	2,14	60	0,345	0,097
Bandeja 3	2,25	240	0,539	0,358	33,58	0,505	60	0,126	0,035
Dia 2	9,15	300	0,454	0,359	20,92	0,26	60	0,075	0,021
Bandeja 3	10,15	360	0,69	0,598	13,33	0,15	60	0,01	0,003
Bandeja 3	11,15	420	0,598	0,526	12,040	0,13	60	0,045	0,013
Bandeja 3	12,15	480	0,672	0,622	7,44	0,08			

Anexo 6

Tabla 3.8 Cálculo de parámetros del colector de temperatura.

Dimensiones del haz de tubos

Diametro exterior del tubo	plg	1	Dimensiones del colector de aire		
Diametro exterior del tubo	m	0,0254	Seccion transversal		
	BWG	12	largo	m	0,65
	Numero de tubos	33	ancho	m	0,15
Area de fljo de un tubo	plg ²	0,479	Area (total)	m ²	0,0975
Area de fuljo de la placa	plg ²	15,6750307	Area interna	m ²	0,00030986
Area de fljo de la placa	m ²	0,01545158	Diametro externo	m	0,0226314
Espesor	plg	0,109	Area externa	m ²	0,00040227
Espesor	m	0,0027686	Area ocupada por un tubo	m ²	9,2402E-05
DI del tubo	plg	0,782	Area ocupada por las placas	m ²	0,0030238

DI del tubo	m	0,0198628			
Longitud del tubo	m	0,8	Area de la sección transversal	m ²	0,0944762
Longitud del tubo	pie	2,624672	Flujo da aire en el colector		
Superficie de transferencia de calor externa	(pie ² /pie)	0,2618	Flujo	m ³ /s	0,28342861
Superficie o area de transferencia de calor(de un tubo)externa	pie ²	0,68713913	Velocidad	m/s	3
Superficie o area de transferencia de calor(de un tubo)interna	m ²	0,06383731	densidad del aire	kg/m ³ (Pavlov)	1,29
Superficie o area de transferencia de calor(de las placas)interna	m ²	2,08904341	Flujo masico	kg/s	0,36562291
Superficie de transferencia de calor(de un tubo)interna	(pie ² /pie)	0,2048	Flujo masico	kg/s	0,36562291
Superficie o area de transferencia de calor(de un tubo)interna	pie ²	0,53753283			
Superficie o area de transferencia de calor(de un tubo)interna	m ²	0,04993843			
Superficie o area de transferencia de calor(de las placas)interna	m ²	1,63420965			
Superficie o area de transferencia de calor(de las placas)total	m ²	3,72325307			

Anexo 7

Tabla 3.9: Cálculo de la eficiencia del colector Corrida 1

Flujo masico del aire m			Temperatura	Temperatura	Temperatura	Temperatura	Ganancia del		
m(Kg/s)	0,36562	Hora	exterior T0 (0C)	interior T1 (0C)	exterior T0 (K)	interior T1 (K)	colector Qutil(KW)	Eficiencia	Eficiencia %
Calor especifico del aire Cp		11,15	28,4	34	301,4	307	2,05895423	0,55299918	55,299918
Cp (Kcal/Kg K)	0,24	11,35	29	34,8	302	307,8	2,13248831	0,57274916	57,274916
Calor especifico del aire Cp		11,55	29,8	36	302,8	309	2,279556469	0,61224910	61.224910
Cp (kJ/kg K)	1,0056	12,15	30	36	303	309	2,20602239	0,592499131	59,2499131
Cielo despejado		12,35	32	37,8	305	310,8	2,13248831	0,57274916	57.274916
Irradiacion solar	600-1000	12,55	32	38	305	311	2,20602239	0,59249913	59,249913
Irradiacion solar	global	1,15	30,6	37	303,6	310	2,353090549	0,63199907	63,199907
0,6	1	1,35	28	34	301	307	2,20602239	0,592499131	59,2499131
Calor absorbido Qabs		1,55	29,7	36	302,7	309	2,316323509	0,62212408	62.212408

Qabs	2,99676 2195	2,15	27,4	34	300,4	307	2,426624629	0,651749044	65,1749044
Area del colector		2,35	29,4	36	302,4	309	2,426624629	0,65174904	65,174904
Ac (m2)	3,72325	2,55	29	35,5	302	308,5	2,389857589	0,641874059	64,1874058
Absorbancia	0,9	3,00	33	39,6	306	312,6	2,426624629	0,651749044	65,1749044
Transmitancia	0,88	3,20	30,8	37	303,8	310	2,279556469	61,22491021	61,2249102
Refractancia difusiva para 1 cubierta 0.16		3,35	32	38	305	311	2,20602239	0,59249913	59,2499131
($\tau\alpha$)	0,80487 8049	3,50	31	36,8	304	309,8	2,13248831	0,57274916	57,274916
		10,00	27,4	32,5	300,4	305,5	1,875119031	0,503624261	50,3624261
		10,15	29,1	35	302,1	308	2,16925535	0,582624146	58,2624145
		10,30	29	35	302	308	2,20602239	0,592499131	59,2499131
		11,00	30	36,2	303	309,2	2,279556469	0,612249102	61,2249102
		11,15	27,9	34	300,9	307	2,24278943	0,602374117	60,2374116
		11,30	30,2	36	303,2	309	2,13248831	0,57274916	57,274916
		12,00	30,2	36,5	303,2	309,5	2,316323509	0,622124088	62,2124087
		12,15	30	36,6	303	309,6	2,426624629	0,651749044	65,1749044
		12,30	28,8	35,5	301,8	308,5	2,463391669	0,66162403	66,1624029
		1,00	29,6	36,2	302,6	309,2	2,426624629	0,651749044	65,1749044
		1,15	31,8	38	304,8	311	2,279556469	0,612249102	61,2249102
		1,30	31,4	38	304,4	311	2,426624629	0,651749044	65,1749044

Tabla 3.10: Cálculo de la eficiencia del colector Corrida 2

Flujo masico del aire m			Temperatura exterior	Temperatura interior	Temperatura exterior	Temperatura interior	Ganancia del colector		
m(Kg/s)	0,3656229	Hora	T0 (0C)	T1 (0C)	T0 (K)	T1 (K)	Qutil(KW)	Eficiencia	Eficiencia %
Calor especifico del aire Cp		11,00	31,8	37	304,8	310	1,911886071	0,513499247	51,3499246
Cp (Kcal/Kg K)	0.24	11,15	31	36,5	304	309,5	2,022187191	0,543124203	54,3124203
Calor especifico del aire Cp		11,30	31,6	37	304,6	310	1,985420151	0,533249218	53,3249218
Cp (kJ/kg K)	1.0056	12,00	33	38,8	306	311,8	2,13248831	0,57274916	57,274916
Cielo despejado		12,15	29,8	36	302,8	309	2,279556469	0,612249102	61,2249102
Irradiacion solar	600-1000 W/m ²	12,30	30,5	36,8	303,5	309,8	2,316323509	0,622124088	62,2124087
Irradiacion solar global	KW/m ²	1,00	32	38	305	311	2,20602239	0,592499131	59,2499131
0,6	1	1,15	31,8	38	304,8	311	2,279556469	0,612249102	61,2249102
Calor absorbido Qabs		1,30	33	39,5	306	312,5	2,389857589	0,641874059	64,1874058
Qabs	2,9967	2	30,8	38	303,8	311	2,647226868	0,710998957	71,0998957

Area del colector		2,15	31,4	38	304,4	311	2,426624629	0,651749044	65,1749044
Ac (m2)	3,72325	2,3	30	36,5	303	309,5	2,389857589	0,641874059	64,1874058
Absorbancia	0,9	3	30,4	36,5	303,4	309,5	2,24278943	0,602374117	60,2374116
Transmitancia	0,88	3,15	31	37	304	310	2,20602239	0,592499131	59,2499131
Refractancia difusiva para 1 cubierta 0.16		3,3	30,8		303,8	310	2,279556469	0,612249102	61,2249102
($\tau\alpha$)	0,804878 0	9,15	27	32	300	305	1,838351991	0,493749276	49,3749275
		9,3	27,8	33	300,8	306	1,911886071	0,513499247	51,3499249
		9,45	26,2	32	299,2	305	2,13248831	0,57274916	57,274916
		10,15	28	34	301	307	2,20602239	0,592499131	59,2499131
		10,3	29,1	35	302,1	308	2,16925535	0,582624146	58,2624145
		10,45	28,8	35	301,8	308	2,279556469	0,612249102	61,2249102
		11,15	30,4	36,5	303,4	309,5	2,24278943	0,602374117	60,2374116
		11,3	30,1	36,5	303,1	309,5	2,353090549	0,631999073	63,1999071
		11,45	29,8	36	302,8	309	2,279556469	0,612249102	61,2249102
		12,15	31	37	304	310	2,20602239	0,592499131	59,2499131
		12,3	32,2	38,5	305,2	311,5	2,316323509	0,622124088	62,2124087
		12,45	32,8	39,2	305,8	312,2	2,353090549	0,631999073	63,1999073
		11	31,8	37	304,8	310	1,911886071	0,513499247	51,3499246

Tabla 3.11: Cálculo de la eficiencia del colector Corrida 3

Flujo masico del aire m			Temperatura exterior	Temperatura interior	Temperatura exterior	Temperatura interior	Ganancia del colector		
m(Kg/s)	0,3656229	Hora	T0 (0C)	T1 (0C)	T0 (K)	T1 (K)	Qutil(KW)	Eficiencia	Eficiencia %
Calor especifico del aire Cp		10,10	24,4	29,5	297,4	302,5	1,875119031	0,503624261	50,3624261
Cp (Kcal/Kg K)	0.24	10,25	27,4	33	300,4	306	2,05895423	0,552999189	55,2999189
Calor especifico del aire Cp		10,40	30	36	303	309	2,20602239	0,592499131	59,2499131
Cp (kJ/kg K)	1.0056	11,1	29,4	35,2	302,4	308,2	2,13248831	0,57274916	57,274916
Cielo despejado		11,25	30,2	36,2	303,2	309,2	2,20602239	0,592499131	59,2499131
Irradiacion solar	600-1000 W/m ²	11,40	30,8	37	303,8	310	2,279556469	0,612249102	61,2249102
Irradiacion solar global	KW/m ²	12,10	30,6	37	303,6	310	2,353090549	0,631999073	63,1999073
0,6	1	12,25	31,6	38	304,6	311	2,353090549	0,631999073	63,1999073
Calor absorbido Qabs		12,40	30,4	37	303,4	310	2,426624629	0,651749044	65,1749044
Qabs	2,996762195	1,10	33,6	40,5	306,6	313,5	2,536925748	0,681374001	68,1374000

Area del colector		1,25	32,2	39	305,2	312	2,500158708	0,671499015	67,1499015
Ac (m2)	3,72325	1,40	32,8	39,8	305,8	312,8	2,573692788	0,691248986	69,1248986
Absorbancia	0,9	2,10	34,1	41	307,1	314	2,536925748	0,681374001	68,1374000
Transmitancia	0,88	2,25	33,8	40	306,8	313	2,279556469	0,612249102	61,2249102
Refractancia difusiva para 1 cubierta 0.16		2,40	33,8	40	306,8	313	2,279556469	0,612249102	61,2249102
($\tau\alpha$)	0,804878	9,00	28	33	301	306	1,838351991	0,493749276	49,3749275
		9,15	28,6	34	301,6	307	1,985420151	0,533249218	53,3249218
		9,30	27,4	33	300,4	306	2,05895423	0,552999189	55,2999189
		10,00	27,2	33	300,2	306	2,13248831	0,57274916	57,274916
		10,15	27,4	33,5	300,4	306,5	2,24278943	0,602374117	60,2374116
		10,30	28,8	35	301,8	308	2,279556469	0,612249102	61,2249102
		11,00	29,8	36	302,8	309	2,279556469	0,612249102	61,2249102
		11,15	30,2	36	303,2	309	2,13248831	0,57274916	57,274916
		11,30	30,6	37	303,6	310	2,353090549	0,631999073	63,1999073
		12,00	30,8	37,5	303,8	310,5	2,463391669	0,66162403	66,1624029
		12,15	29,8	36,6	302,8	309,6	2,500158708	0,671499015	67,1499015
		12,30	32	39	305	312	2,573692788	0,691248986	69,1248986

Anexo 5 Tabla 3.1 Temperaturas y cálculo de humedades relativas corrida 1

Hora	Temp.Ent del colector		Humedad relativa (%)		T. salida secadero		Humedad relativa (%)		T.placa cobre		T. interna
	Temp .BH	Temp .BS	Ferrel	Carriel	Temp. BH	Temp. BS	Ferrel	Carriel	Punto 1	Punto 2	secadero
11,15	24,2	28,4	70,58	70,99	24	28,3	69,88	70,29	34	37	32
11,35	23,9	29	65,28	65,75	24,4	29,1	67,82	68,26	34,8	37	32
11,55	25	29,8	67,63	68,07	24,8	29	66,41	66,87	36	38	32
12,15	24,6	30	64,13	64,61	26,2	34,6	51,31	51,92	36	38	34
12,35	24,5	32	53,8	54,4	26,7	35	52,11	52,71	37,8	38	34
12,55	26	32	61,99	62,49	26,8	35,2	51,78	52,39	38	40	35
1,15	25,2	30,6	64,52	65	25,6	35	46,86	47,51	37	39	31
1,35	24,2	28	72,95	73,35	24,2	30	61,76	62,27	34	37	31
1,55	26	29,7	74,48	74,83	26,4	31,8	65,28	65,74	36	39	33
2,15	24,4	27,4	78,08	78,39	25	33	52,02	52,63	34	39	33
2,35	24,6	29,4	67,39	67,83	25,4	33	54,07	54,66	36	39	34
2,55	25	29	72,2	72,58	24,4	30,2	61,9	62,41	35,5	38	34,5
3	24,9	33	51,51	52,12	27	33	62,64	63,13	39,6	42	35
3,2	24,6	30,8	60,02	60,55	27	33	62,64	63,13	37	40	35
3,35	26	32	61,99	62,49	27	33	62,64	63,13	38	41	35
3,5	25	31	61,31	61,82	27	33	62,64	63,13	36,8	39	35
10	23,4	27,4	71,32	71,71	23,9	29,4	63,12	63,62	32,5	35	31
10,15	24	29,1	65,35	65,82	24,2	29,8	62,8	63,3	35	36	31
10,3	23,4	29	62,23	62,74	24,2	31	56,8	57,36	35	34	32
11	23,8	30	59,43	59,97	25	32,8	52,88	53,48	36,2	41	34
11,15	22,8	27,9	64,53	65,01	24	31,4	53,84	54,44	34	39	34
11,3	24,2	30,2	60,74	61,26	24,8	32,6	52,72	53,32	36	40	34
12	25	30,2	65,46	65,92	25,2	33,4	51,33	51,95	36,5	40	35
12,15	24,2	30	61,76	62,27	24,4	32,4	51,52	52,14	36,6	40	35
12,3	23,2	28,8	62,09	62,6	24,6	33	49,99	50,62	35,5	39	35
1	25,6	29,6	72,51	72,89	26,2	33,4	56,46	57,03	36,2	39	36
1,15	26	31,8	62,99	63,48	27,2	35,8	51,28	51,89	38	40	36
1,3	28,6	31,4	80,94	81,21	26,8	35	52,6	53,2	38	41	36

Anexo 5 Tabla 3.2 Temperaturas y cálculo de humedades relativas corrida 2

Hora	Temp.Ent del colector		Humedad relativa (%)		T. salida Colector, Entrada del secadero		Humedad relativa (%)		Temperatura ambiente		Humedad relativa (%)		T. salida secadero		Humedad relativa (%)		T.placa cobre		T. interna
	Temp .BH	Temp p. BS	Ferrel	Carriel	Temp. BH	Temp . BS	Ferrel	Carriel	Temp. BH	Temp . BS	Ferrel	Carriel	Temp .BH	Temp . BS	Ferrel	Carriel	Punto 1	Punto 2	secadero
11	25,8	31,8	61,85	62,36	23,8								26,1	30,9	68,28	68,71	37	40	30
11,15	25,8	31	65,96	66,41	25								26,6	32,4	63,37	63,86	36,5	39	31,5
11,3	26	31,6	64	64,48	25,2								26,8	31	71,98	72,36	37	40	31
12	27,2	33	63,75	64,24	25								28	33,7	64,72	65,19	38,8	42	33
12,15	25,8	29,8	72,61	72,99	25								25,8	30,3	69,76	70,18	36	39	32
12,3	25,4	30,5	66,24	66,7	25,7								25,6	30,5	67,44	67,89	36,8	39	32
1	26,6	32	65,4	65,86	26,8	26,2	31,4	66,2	66,65	26,2	31,6	87,14	26,8	32,9	62,02	62,52	38	44	33,8
1,15	26,4	31,8	65,28	65,74	27,4	26	31,2	66,08	66,54	25,8	30,4	76,95	27	33	62,64	63,13	38	42	33,8
1,3	27,2	33	63,75	64,23	26,8	26,2	31,4	66,2	66,65	26	31,2	80,73	28,2	34,6	61,49	61,99	39,5	44	33,9
2	26,1	30,8	68,82	69,25	28	26,6	31,8	66,44	66,89	26,4	30,2	79,95	25,8	31,2	64,91	65,38	38	43	33,9
2,15	26,4	31,4	67,38	67,82	27	27,2	31,4	72,18	72,56	26,8	29	78,38	26,2	32	63,12	63,61	38	38	33,9
2,3	25,4	30	68,98	69,4	27,2	27	31,2	72,08	72,46	26,6	30	74,98	26,6	32,2	64,38	64,85	36,5	35	33,9
3	26,4	30,4	72,92	73,29	27,6	26,4	31	68,54	69,95	26,2	30	79,8	27	32	67,72	68,15	36,5	38	34
3,15	26,2	31	68,34	68,77	27,4	26,2	31,2	67,26	67,7	26,4	30,2	77,95	27	31,6	69,86	70,27	37	38	34
3,3	26,6	30,8	71,89	72,26	28	26,8	31,2	70,86	71,26	27	31,4	78,46	26,4	30,4	72,92	73,29	37	38	34
9,15	24,7	27	82,83	83,07	24,2	24	28	71,65	72,05	23,8	27,5	79,67	23,4	27,4	71,32	71,71	32	32	28
9,3	24,2	27,8	74,19	74,55	24	23,8	28,6	66,88	67,34	23,6	27,4	82,23	23,6	27,6	71,43	71,83	33	32	28
9,45	23,8	26,2	81,82	82,08	23,8	23	26,8	72,31	72,7	23	26,6	82,44	23,2	27,4	69,99	70,41	32	34	28
10,15	24,2	28	72,97	73,35	25,2	24,2	30,2	60,64	61,26	24,2	28,8	70,73	25	30	66,54	66,99	34	38	29
10,3	26,2	29,1	79,46	79,75	24,2	25,8	30,8	67,02	67,47	25,6	31,4	83,71	25,8	32,4	58,94	59,48	35	41	30
10,45	24,6	28,8	70,81	71,21	24,4	24,2	30,3	60,23	60,76	23,7	28,2	86,46	24	30,6	57,6	58,16	35	38	30
11,15	25,5	30,4	67,38	67,83	24,6	25,4	31,2	62,59	63,09	25,3	31	78,8	26,8	34,2	56,01	56,58	36,5	41	34
11,3	26	30,1	72,14	72,52	25	25,8	32,7	57,54	58,09	26	31,4	73,76	26,2	32,4	61,14	61,65	36,5	42	34
11,45	28	29,8	87,14	87,33	25,6	27	31,6	69,86	70,27	26,2	29,8	75,42	26,4	32,6	61,27	61,79	36	43	34
12,15	26	31	67,14	67,59	26,8	26,4	32,4	62,25	62,75	25,9	31,6	72,26	26,2	33,8	54,69	55,27	37	42	36
12,3	26,8	32,2	65,52	65,98	25,8	26,2	33,4	56,46	57,03	26,2	32	76,78	27,2	36	50,49	51,11	38,5	44	36
12,45	26,6	32,8	61,41	61,92	27	26,2	33,6	55,57	56,14	26,8	31,8	76,7	27,6	34,2	60,17	60,69	39,2	44	36

Anexo 5 Tabla No 3.3 Temperaturas y cálculo de humedades relativas corrida 3

Hora	Temp.Ent del colector		Humedad relativa (%)		T. salida Colector, Entrada del secadero		Humedad relativa (%)		Temperatura ambiente		Humedad relativa (%)		T. salida secadero		Humedad relativa (%)		T.placa cobre		T. interna
	Temp .BH	Tem p. BS	Ferrel	Carrier	Temp. BH	Temp. BS	Ferr	Carrier	Temp .BH	Temp .BS	Ferrel	Carrier	Temp .BH	Temp .BS	Ferrel	Carrier	Punto 1	Punto 2	secadero
10,1	23,2	24,4	90,34	90,48	23,8	26,8	77,81	78,12	23,4	25,1	86,65	86,84	24,2	27,4	76,7	77,03	29,5	38,5	30
10,25	23,4	27,4	71,32	71,71	25	28,2	77,07	77,39	24,5	27,4	78,77	79,07	26	30,4	70,43	70,84	33	39	33,8
10,4	25,4	30	68,98	69,4	25,2	30,4	65,58	66,05	25,8	28,2	82,54	82,78	25,6	30,8	65,83	66,29	36	40	34
11,1	24,8	29,4	68,63	69,06	25	31,8	57,41	57,97	25,4	27,4	85,1	85,32	25,4	31,2	62,59	63,09	35,2	41	32
11,25	24,6	30,2	63,08	63,57	25	30,6	63,35	63,84	24,8	29,6	67,51	67,95	25,6	32,8	56,02	56,59	36,2	41	32
11,4	25,6	30,8	65,83	66,29	25,7	31,2	64,32	64,8	26,2	29,9	74,57	74,92	25,8	31,2	64,91	65,38	37	43	34
12,1	26,8	30,6	74,27	74,62	26,8	34	56,09	57,45	27,2	29	86,95	87,14	27	32,7	64,12	64,6	37	40	34
12,25	26,8	31,6	68,67	69,1	27,4	32,8	65,87	65,33	26,8	30,2	76,63	76,95	27,6	35	56,58	57,14	38	40	35
12,4	26,8	30,4	75,44	75,78	26,8	33,2	60,58	61,1	27,2	30	80,46	80,73	27,8	34	62,18	62,68	37	40	35
1,10	28,4	33,6	67,46	67,89	28	34,2	62,3	62,8	28,4	31,4	79,66	79,95	28	36,2	53,49	54,08	40,5	44	36
1,25	26,8	32,2	65,52	65,98	27	33,6	59,77	60,3	27,4	30,6	78,08	78,38	27,2	34	58,98	59,52	39	43	36
1,40	27	32,8	63,62	64,11	27,2	32,6	65,76	66,22	27,6	31,4	74,63	74,98	27,2	34,2	58,07	58,62	39,8	43	36
2,10	28	34,1	63,78	63,27	27,6	34,2	60,17	60,69	28	31	79,52	79,8	28,4	34,6	62,55	63,04	41	45	36
2,25	27,6	33,8	62,05	62,55	27,4	32,2	69	69,42	27,8	31,1	77,64	77,95	29,2	36	60,28	60,8	40	44	36
2,40	28,2	33,8	65,33	65,8	28	34,6	60,43	60,95	27,6	30,8	78,16	78,46	30	37	59,89	60,41	40	44	36
9,00	24,2	28	72,97	73,35	24,2	27,4	76,7	77,03	24,4	27,2	79,36	79,67	23,6	27,4	72,65	73,03	33	31	31
9,15	23,9	28,6	67,51	67,96	24	28,8	67,01	67,46	24,2	26,6	81,97	82,23	24	28,6	68,15	68,58	34	36	30
9,30	23,4	27,4	71,32	71,71	23,8	28,2	69,18	69,6	24,8	27,2	82,19	82,44	23,2	28	66,49	66,95	33	33	30
10,00	25,4	27,2	86,49	86,68	25,2	31,4	60,45	60,97	25,8	30,2	70,32	70,73	24,6	28,4	73,18	73,55	33	35	31
10,15	24,4	27,4	78,08	78,39	24,2	27,8	74,19	74,55	24,6	26,8	83,48	83,71	24,2	28	72,97	73,35	33,5	32	30
10,30	24,8	28,8	72,09	72,48	24,4	27,8	75,54	75,88	24,6	26,4	86,27	86,46	24,8	29,4	68,63	69,06	35	35	31
11,00	24,6	29,8	65,2	65,67	24,6	30,4	62,04	62,55	25,4	28,4	78,5	78,8	24,8	31	60,17	60,69	36	37	32
11,15	25	30,2	65,46	65,92	25	30,6	63,35	63,84	25	28,8	73,39	73,76	25	31	61,31	61,82	36	38	33
11,30	25,4	30,6	65,71	66,17	25,6	31,4	62,72	63,22	26	29,6	75,07	75,42	25,8	32,8	57,08	57,64	37	40	35
12,00	26,8	30,8	73,11	73,48	26,8	32	66,55	67	26,6	30,8	71,87	72,26	27	34,6	55,28	55,86	37,5	40	35
12,15	25,6	29,8	71,35	71,75	25,8	29	77,42	77,73	26,4	29,8	76,45	76,78	26,8	34	56,9	57,45	36,6	42	35,5
12,30	26,4	32	64,25	64,73	27	31,4	70,96	71,36	26,2	29,6	76,37	76,7	27,2	34,2	58,07	58,62	39	43	36