

CAPÍTULO I
MARCO TEORICO

MARCO TEÓRICO

1.1 SOJA

La soja es un alimento fundamental que debe estar presente en la dieta diaria, debido a que contiene proteína y grasa sustituyendo a la carne, leche, huevos, queso pudiéndose preparar e industrializar infinidad de derivados, es empleada en la alimentación de niños, enfermos, ancianos y toda la familia.

Según Hermoso, M (1994).”La soja es la oleaginosa de mayor producción en el mundo: su alto valor económico radica en la calidad de su aceite y pasta proteica que son industrializados en otros productos de valor agregado. La pasta proteica de soja es considerada como la más nutritiva dentro de las proteínas de origen vegetal”

Figura 1-1 Semilla de Soja



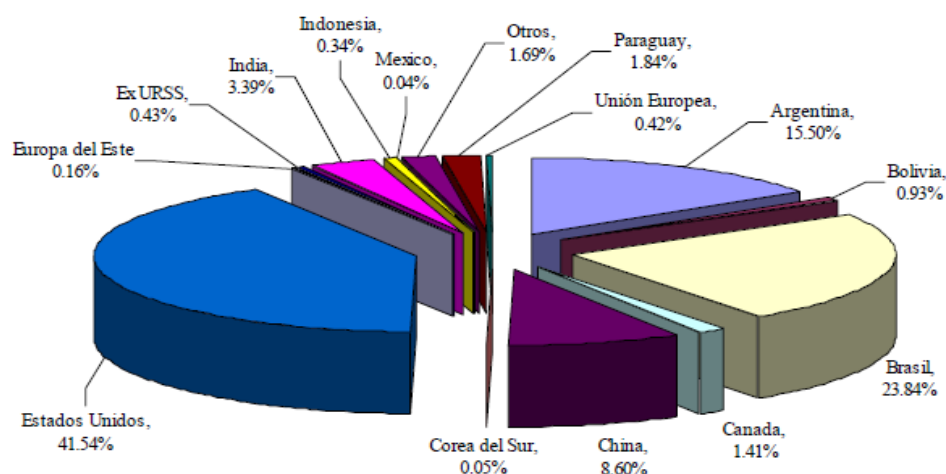
Fuente: Mundi – Prensa (2008)

1.1.1. Producción Mundial de la Soja

Los principales productores mundiales de soja se concentran en pocos países: Estados Unidos, Brasil, Argentina y Paraguay, representando el 80% de la producción mundial. (Plataforma soja Base de datos Bolivia (USDA)).

Bolivia es el octavo productor mundial y el cuarto en Sudamérica, ocupa el 1% de la producción mundial, su amplio crecimiento lo puede llevar a ocupar una mejor posición.

Figura 1-2 Principales productores mundiales



Fuente: Gestión 2009 (USDA)

1.1.2 Producción y comercio exterior de grano de soja en Bolivia

La importancia macroeconómica del sector oleaginoso (soja, girasol y sus productos derivados) en general y de soja en particular, se traduce en su participación en el PIB nacional, en el PIB agropecuario nacional, en sus exportaciones y en su potencial productivo dentro del departamento de Santa Cruz.

De acuerdo a estimaciones de la Asociación de Productores de Oleaginosas y Trigo - ANAPO (2009), el complejo oleaginoso de Bolivia participa con un 11% en el PIB del país, convirtiéndose en uno de los principales sectores del país. Para Santa Cruz representa el 28% del PIB del departamento, siendo el sector más importante en esta región.

1.2 OKARA

Según Cisneros, M (2005) “Okara es el nombre que se le da a la pulpa residual obtenida una vez que se filtra el frijol molido mezclado con agua para obtener la leche de soja”

La okara de soja es de color beige claro, tiene una textura grumosa fina, algunas personas lo visualizan como arena de mar mojada, es sabroso y nutritivo con una gran

cantidad de proteína, absorbe bien los sabores y da cuerpo a los vegetales salteados, sopas, panes y ensaladas además constituye la fibra dietética vegetal de la soja.

Este subproducto no es muy utilizado ya que contiene mucha humedad y esto lo hace perecible, sin tomar en cuenta los beneficios que ofrece por su alto contenido de nutrientes.

Según Benavidez G. y Recalde J. (2007) “la fibra de okara esta constituida por los carbohidratos de las capas externas de la soja, pasa sin cambios a través del aparato digestivo realizando dos funciones principales: provee de mayor parte del bolo necesario para los movimientos intestinales normales, previniendo el estreñimiento y absorbe toxinas (incluyendo contaminantes ambientales), ayudando a su expulsión del organismo”.

1.3 HARINA DE OKARA

Producto principal obtenido en la molienda de las semillas de gramíneas y leguminosas ricas en almidón. La harina puede ser de trigo, centeno, etc.

La harina de okara se obtiene de modo diferente, secando previamente la okara húmeda y moliéndola posteriormente

La harina de okara tiene las siguientes características físico-químicas.

Tabla I-1 Características de la harina de okara

Parámetros	Unidad	Valor
Humedad	%	5.5 – 12.3
Fibra	%	46.5 - 50
Proteína	%	20 – 23.3
Materia grasa	%	6 - 15
Hidratos de carbono	%	7 – 9.8
Calorías	Kcal	202 - 350

Fuente: Empresa SOAREJAPAN INC.

1.4 HUMEDAD

Para estudiar el secado de sólidos es necesario definir las proporciones relativas de agua y sólido seco contenidos en los mismos. Dado que la cantidad de sólido seco no se altera en el proceso, la concentración más útil para los cálculos es la referida al peso de sólido seco: X es la humedad al peso de agua que acompaña a la unidad de peso de sólido seco”.

Al contenido de humedad de un sólido se lo puede expresar a base seca o base húmeda, en los cálculos de secado es más conveniente sugerir la humedad a base seca, debido a que esta permanece constante a lo largo del fenómeno de secado. (Kneule F.,1990))

Contenido de humedad en base seca, es la cantidad de agua referida al sólido seco:

$$X_s = \frac{m_i - SS}{SS} \quad (1-1)$$

Donde:

X_s = Humedad en base seca, (kg H₂O/kg sólido seco).

m_i = Cantidad de masa de okara, (kg).

SS = Cantidad de sólido seco de okara, (kg).

1.4.1 Humedad de equilibrio y humedad libre

Según Mc Cabe W.L., Smith J.C. y Harriot P. (1991). El aire que entra en un secadero no suele estar completamente seco, sino que contiene algo de humedad y posee una humedad relativa definida. Para un aire de humedad relativa definida, el contenido de humedad del sólido que sale del secadero no puede ser inferior al contenido de humedad de equilibrio correspondiente a la humedad del sólido que entra.

La porción de agua del sólido húmedo que no puede ser separada por el aire que entra, debido a la humedad de éste, recibe el nombre de **humedad de equilibrio**.

El agua libre es la diferencia entre el contenido total de agua del sólido y el contenido de agua en el equilibrio. Por tanto, si X_T es el contenido total de humedad y X^* es el contenido de humedad de equilibrio, la humedad libre X viene dada por:

$$X = X_T - X^* \quad (1-2)$$

De acuerdo a Kneule F. (1990) Se denomina humedad de equilibrio del sólido a la humedad alcanzada por el sólido en equilibrio con el aire en las condiciones dadas. La humedad de equilibrio, X^* , es el límite al que puede llevarse el contenido de humedad de una sustancia por contacto con aire de humedad y temperatura determinadas.

Si $X^* >$ Humedad del aire, tenemos que el sólido se seca

Si $X^* <$ Humedad del aire, el sólido se humedece.

1.4.2 Cinética de secado

Se define la velocidad de secado por la pérdida de humedad del sólido húmedo en la unidad de tiempo, y más exactamente por el cociente diferencial $(-dX/dt)$ operando en condiciones constantes de secado, es decir con aire cuyas condiciones (temperatura, presión, humedad y velocidad) permanecen con el tiempo.

Analíticamente, la velocidad de secado se refiere a la unidad de área de superficie de secado, de acuerdo con la ecuación (Ocon J., García T., 1963).

$$W = \frac{SS}{A} \left(-\frac{dX}{dt} \right) \quad (1-3)$$

SS = Peso de sólido seco

A = Área de la superficie expuesta

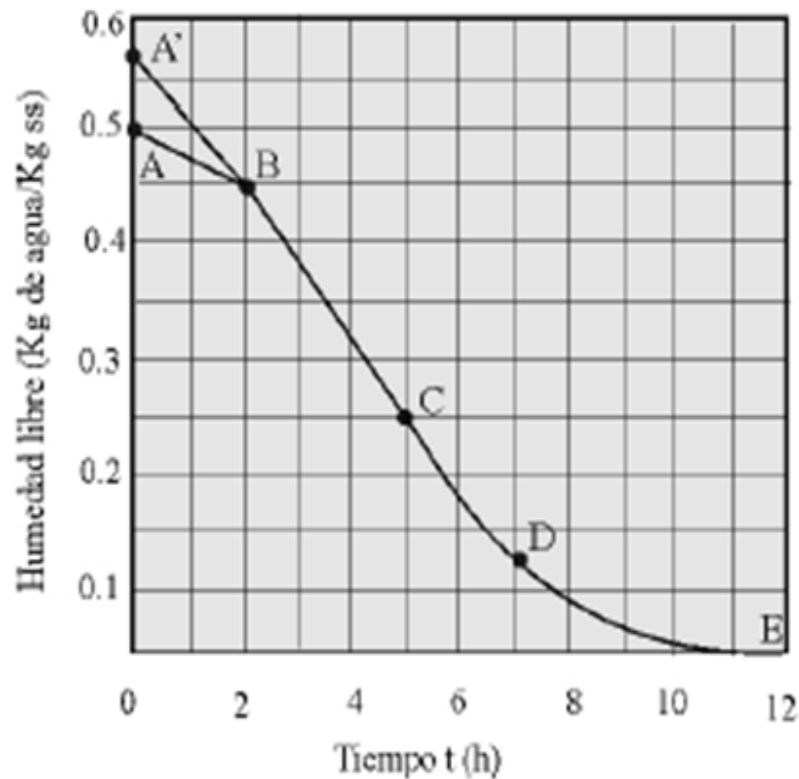
W = Velocidad de secado

1.4.3 Curvas de Secado

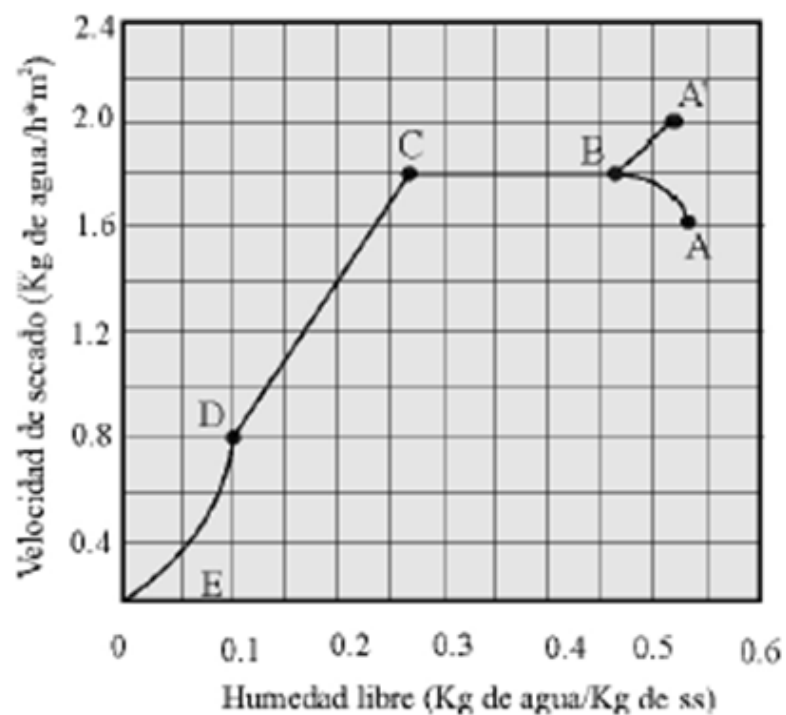
Cuando un sólido se seca experimentalmente, casi siempre se obtienen datos que asocian el contenido de humedad con el tiempo. La grafica 1-1 representa el caso

general en que los sólidos húmedos pierden humedad, primero por evaporación desde la superficie saturada del sólido, después sigue un periodo de evaporación desde una superficie saturada que tiene una área que gradualmente va disminuyendo, y por ultimo cuando el agua del interior del solido se evapora. Esta curva indica que la velocidad de secado es función del tiempo o del contenido de humedad. Esta variación se ilustra con mayor claridad diferenciando grafica o numéricamente la curva y haciendo una representación grafica de la velocidad de secado en función del contenido de humedad., como se ilustra en la grafica 1-2, o como velocidad de secado en función del tiempo (gráfica 1-3). Estas curvas de velocidad demuestran que el secado no es un proceso suave y continuo en el cual existe un solo mecanismo que ejerza el control a lo largo de toda su duración (Perry y Green,1999).

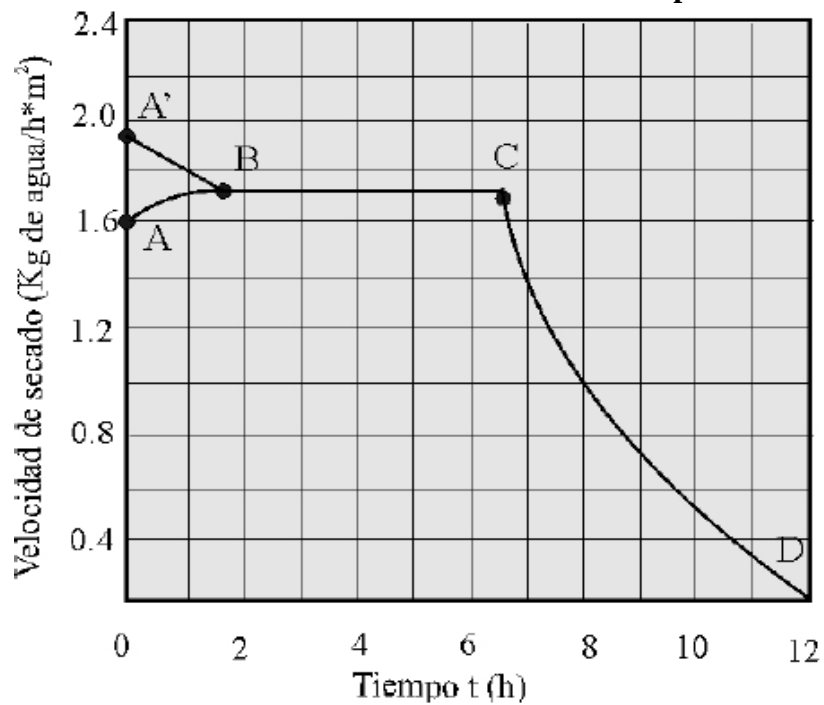
Gráfica 1-1
Contenido de humedad en función del tiempo



Gráfica 1-2
Velocidad de secado en función del contenido de humedad



Gráfica 1-3
Velocidad de secado en función del tiempo



Descripción de las curvas de secado. Las curvas anteriores representan el proceso de secado a condiciones constantes. Empezando en el tiempo cero el contenido inicial de humedad libre corresponde al punto A. Al principio el sólido suele estar a una temperatura inferior de la que tendrá al final y la velocidad de evaporación va en aumento, por el contrario, cuando el alimento está a una temperatura más elevada A', la velocidad de evaporación disminuye hasta llegar al punto B, en el cual, la temperatura de la superficie alcanza su valor de equilibrio. Este periodo inicial de ajuste en estado estacionario suele ser bastante corto y por lo general se pasa por alto en el análisis de los tiempos de secado (Geankoplis, 1998; Treybal, 2001). La recta entre el punto BC tienen una pendiente y velocidad constante. Durante este periodo, la superficie del sólido está muy húmeda al principio y sobre ella hay una película de agua continua. Esta capa de agua, es agua libre y actúa como si el sólido no estuviera presente. La velocidad de evaporación con las condiciones establecidas para el proceso, es independiente del sólido y esencialmente igual a la velocidad que tendría una superficie líquida pura. Si el sólido es poroso, la mayor parte del agua que se evapora durante el periodo de velocidad constante proviene de su interior.

Este periodo continúa mientras el agua siga llegando a la superficie con la misma rapidez con la que se evapora (Geankoplis, 1998).

Los periodos de velocidad decreciente inician en el punto crítico de humedad C, al concluir los procesos de velocidad constante. En este punto no hay suficiente agua en la superficie para mantener una película continua. La superficie ya no está totalmente húmeda, y la porción húmeda comienza a disminuir durante el periodo de velocidad decreciente hasta que la superficie queda seca en su totalidad, punto D. El segundo periodo de velocidad decreciente empieza en el punto D, aquí, el plano de evaporación comienza a desplazarse con lentitud por debajo de la superficie. El agua evaporada atraviesa el sólido para llegar hasta la corriente de aire. Es posible que la cantidad de humedad que se elimine durante este periodo sea bastante pequeña, pero aún así, el tiempo requerido puede ser largo (Geankoplis, 1998).

1.5 CONSERVACIÓN DE ALIMENTOS POR SECADO

El secado es la operación unitaria en la cual el contenido de humedad del material es eliminado hasta alcanzar la humedad de equilibrio mediante evaporación como resultado de la aplicación de calor bajo condiciones controladas.

Las ventajas que representa el secar un producto respecto al manejo del material original son:

Se aumenta el tiempo de vida útil del producto.

Se facilita el manejo del producto.

Se reduce el espacio de almacenamiento del producto.

Se disminuyen los costos de almacenamiento.

Se incrementan los porcentajes de sus componentes nutricionales.

“La operación de deshidratación conlleva además a una apreciable reducción del peso y volumen de los alimentos que se deshidratan, consiguiéndose una importante reducción de los costes de transporte y almacenamiento de estos productos. La máxima reducción es la que se consigue al convertir alimentos líquidos en alimentos en polvo, sobre todo si el polvo obtenido se prensa en bloques o tabletas”

Otro de los objetivos que se persiguen con la deshidratación de alimentos es el de convertir estos en materias primas adecuadas para el mezclado y formación de nuevos productos, como es el caso de las sopas deshidratadas, frutas y cereales para el desayuno, etc. (Maupoei et.al, 2001).

1.5.1 Factores que afectan la velocidad del proceso de secado

De acuerdo a Kneule (1990), cuando un sólido se deseca ocurren dos procesos fundamentales y simultáneos

1) Transferencia de calor para evaporar el líquido

2) Transferencia de masa en forma de líquido o vapor

Los factores que regulan las velocidades de estos procesos determinan la rapidez o el índice de desecación.

Entre las variables de deshidratación tenemos:

a) Temperatura

Cuanto mayor sea la diferencia de temperatura entre el medio de calentamiento y el alimento, mayor será la velocidad de transferencia de calor al alimento, la cual proporciona la fuerza impulsora para la eliminación de humedad.

Cuando más caliente está el aire, más humedad podrá absorber antes de saturarse. (Kneule, 1990).

b) Velocidad de la circulación del aire

El aire caliente recoge más humedad que el aire fresco, pero el aire caliente en movimiento es más efectivo todavía. El aire en movimiento es decir, el aire a alta velocidad, además de recoger humedad, la barre de la superficie del alimento, previniendo la creación de una atmósfera saturada que disminuiría la velocidad de la eliminación subsiguiente de humedad. (Kneule, 1990)

c) Espesor de las bandejas

Una mayor área de superficie proporciona más superficie desde la cual se puede escapar la humedad. Los espesores más delgados reducen la distancia que la humedad en el centro del alimento tiene que recorrer a fin de llegar a la superficie y escaparse. (Kneule, 1990)

d) Tiempo de secado

Ya que todos los métodos importantes de deshidratación de alimentos emplean calor, y que los componentes de los alimentos son sensibles al calor, es preciso encontrar términos medios entre la máxima velocidad del secado y el óptimo mantenimiento de la calidad de los alimentos. (Kneule, 1990)

e) Cambios de calidad durante la deshidratación

“Desde la antigüedad se ha reconocido que los alimentos con mayor contenido en humedad son los más perecederos, de tal manera que el control del contenido de humedad de un alimento es una herramienta para su conservación. Es común pensar que la mayor estabilidad de productos naturales está asociada con contenidos totales de humedad mínimos. Aunque esto puede ser cierto para una gran cantidad de productos, en muchos otros se ha observado que hay un intervalo óptimo de humedad no necesariamente asociado con intervalos mínimos.

Aunque el contenido de humedad puede ser un indicativo de su propensión al deterioro, también se ha observado que diferentes alimentos con el mismo contenido de humedad pueden ser muy diferentes en su estabilidad por lo que el concepto de contenido de humedad es insuficiente para indicar lo perecedero que es un alimento, al no tener en cuenta las interacciones del agua con otros componentes del mismo. Por esta razón el primer objetivo de la operación de secado en cuanto a aumentar la estabilidad del producto se define en términos de depresión de la actividad del agua (a_w) y no en términos de disminución del contenido de humedad puesto que la actividad del agua puede ser una medida indirecta del agua que está disponible en un producto para participar en las reacciones de deterioro. Ajustando la actividad del agua y eligiendo un envase adecuado puede alargarse la vida útil de un alimento sin necesidad de refrigeración durante el almacenamiento. (Maupoei et al, 2001)

Algunos cambios normalmente están asociados con el proceso de deshidratación como ser: cambios en la textura del alimento, ya que al remover el agua ocurre un desordenamiento de los constituyentes polímeros, lo que conlleva a la pérdida de sabor y pérdidas de nutrientes o cambios de calidad. Otros cambios químicos ocurren durante el proceso de deshidratación, particularmente el pardeamiento no enzimático. También el uso de temperaturas elevadas puede afectar la calidad del producto. (Kneule, 1990).

1.5.2 Clasificación de los secadores

En la industria alimentaria el secado puede realizarse en diversos equipos y la selección de uno de ellos dependerá del tipo y naturaleza del alimento, así como de la cantidad de producto que se desee deshidratar. Dentro de los secadores industriales Maupoei et al, (2001), proponen la siguiente clasificación:

1.5.2.1 Secadores indirectos o por conducción

Se caracterizan porque en ellos la transmisión de calor hasta el material húmedo tiene lugar por conducción a través de una pared, generalmente metálica.

La fuente de calor puede ser:

- Vapor que condensa.
- Agua caliente.
- Aceites térmicos.
- Gases de combustión.
- Resistencia eléctrica.

Los secadores indirectos permiten la recuperación del disolvente y son apropiados para la desecación a presiones reducidas y en atmósferas inertes, lo que los hace recomendables para deshidratar productos termolábiles o fácilmente oxidables, pudiendo utilizar métodos de agitación para asegurar una mejor transmisión de calor y eliminar los gradientes de humedad en el producto. Pueden funcionar en régimen continuo o intermitente.

1.5.2.2 Secadores infrarrojos

Se basan en la transferencia de energía radiante para evaporar la humedad del producto. Esta energía se produce eléctricamente (infrarrojos) por medio de refractarios únicamente calentados con gas. El costo de la energía necesaria para este método es de dos a cuatro veces mayor que el costo del combustible que utilizan los otros secadores. (Perry y col., 1992).

1.5.2.3 Secadores de calor dieléctrico

Según Maupoei et al, (2001), estos secadores se caracterizan por generar calor en el interior del propio sólido, en virtud de un campo eléctrico de alta frecuencia que provoca una gran agitación de las moléculas polares, cuya fricción genera el calor necesario para la evaporación. Puesto que el campo eléctrico es uniforme en todo el espesor del dieléctrico el calentamiento es prácticamente uniforme y simultáneo en toda la masa del sólido.

Su campo de aplicación es todavía muy reducido, debido a su alto costo de operación, que puede ser diez veces superior al del combustible necesario en los secadores directos y al elevado costo del equipo auxiliar requerido para generar este tipo de energía.

1.5.2.4 Secadores directos por convección

Se caracterizan por utilizar gases calientes que entran en contacto directo con el sólido húmedo al que transmiten calor por convección fundamentalmente y que arrastran fuera del secador los vapores producidos:

- Aire calentado por vapor de agua.
- Productos de la combustión.
- Gases inertes.
- Vapor recalentado.
- Aire calentado por radiación solar.

En este tipo de secadores el consumo de combustible es tanto mayor cuanto más bajo es el contenido de humedad residual del producto final .”

Estos secadores pueden ser continuos con un costo de funcionamiento bajo o intermitentes para bajas capacidades de producción.

1.5.2.4.1 Tipos de Secadores directos por convección

Son en general aparatos sencillos y de fácil manejo. Los secadores por convección son los más utilizados en las industrias agrícolas y alimenticias, constan de las siguientes partes:

- Recinto.
- Sistema de calefacción: generalmente calorifugado donde se realiza la evaporación.
- Sistema de impulsión del aire.

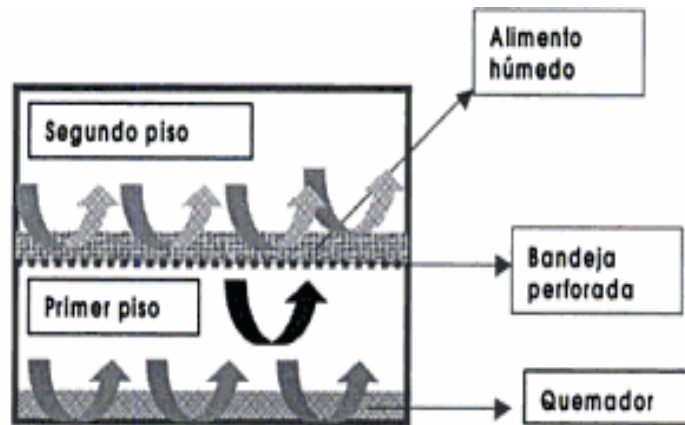
A continuación se describen los tipos de secadores más comunes que se utilizan en procesos de secado.

Secadores de horno o estufa

Es el más simple y consta de un pequeño recinto en forma de paralelepípedo de dos pisos. El aire de secado se calienta en un quemador del piso inferior y atraviesa por convección natural o forzada al segundo piso perforado en el que se asienta el lecho

de producto a secar. Este secador se utiliza más en el secado de manzanas, lúpulo y forrajes verdes. (Fito P., Grau G., Albors A. y Barat J.(2001)).

Figura 1-3 Esquema de un secador de horno o estufa



Fuente: Maupoei et al, (2001)

Secadores de bandejas o de armario

La Figura 1-4 muestra un secador típico de bandejas. Consistente en una cámara rectangular de chapa metálica que contiene dos carretones para soportar los bastidores H. Cada bastidor lleva numerosas bandejas poco profundas, tal vez de forma cuadrada con 76 cm de lado y de 5 a 15 cm de profundidad, que se cargan con el material a secar. Entre las bandejas se hace circular aire con una velocidad de 2.134 a 4.572 m/s por medio del ventilador C y el motor D, pasando sobre los calentadores E. Las placas deflectoras G distribuyen el aire uniformemente sobre el conjunto de bandejas. Parte del aire húmedo se expulsa de forma continua a través del conducto de descarga B, mientras que por A entra la reposición de aire fresco. Los bastidores van montados sobre las ruedas Z, de forma que al final del ciclo de secado se pueden retirar de la cámara y descargar el contenido de las bandejas. Los secaderos de bandejas resultan convenientes cuando la capacidad de producción es pequeña. Prácticamente pueden secar cualquier producto, pero la mano de obra necesaria para la carga y descarga da lugar a costes de operación elevados. Frecuentemente se utilizan en el secado de materiales valiosos tales como colorantes y productos

farmacéuticos. Según Kneule F. (1990), este secador de bandejas es muy utilizado para productos alimenticios como el perejil, manzana, ajo, guisantes, cebollas, etc.

El secado por circulación de aire sobre capas estacionarias de sólidos es lento y, por consiguiente, los ciclos de secado son largos: de 4 a 48 horas por carga. Ocasionalmente se utiliza el secado con circulación transversal, pero esto es poco frecuente ya que no es necesario ni económico en secaderos discontinuos, debido a que el acortamiento del ciclo de secado no reduce la mano de obra necesaria para cada carga. Sin embargo, el ahorro de energía puede ser significativo.

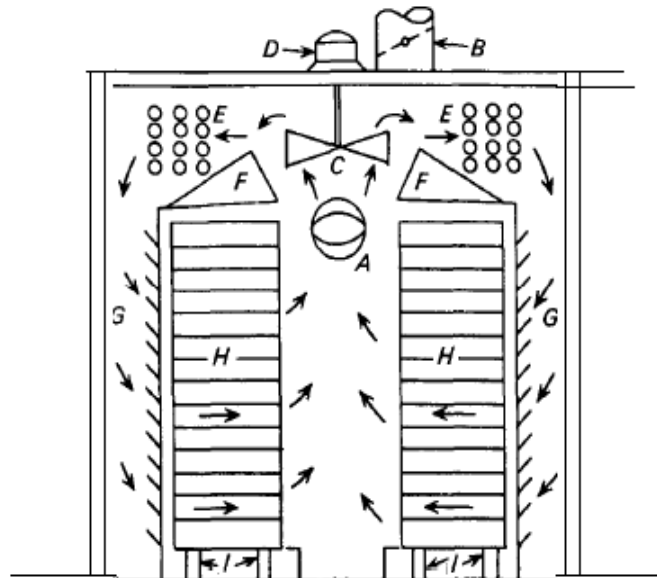
Los secaderos de bandejas (fig. 1-4) pueden operar a vacío, frecuentemente con calentamiento indirecto. Las bandejas pueden estar situadas sobre placas metálicas huecas que se calientan con vapor de agua o con agua caliente, o bien las mismas bandejas pueden estar provistas de una cámara para la circulación de un fluido de calefacción. (Mc Cabe W. L., Smith J.C., Harriet E., 1998)

El secado de este equipo puede ser:

- De flujo horizontal, si el aire circula paralelamente al lecho a secar.
- De flujo transversal, si el aire circula perpendicular al lecho a secar.

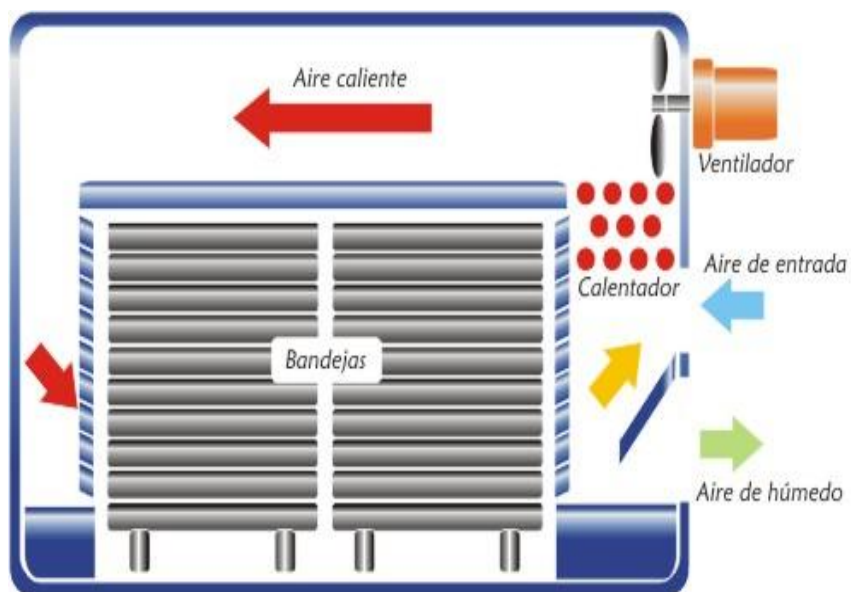
El secador de bandejas es, por lo general, el menos caro de construir, es fácil de mantener y no es pesado a comparación con los demás secadores bastante.

Figura 1-4 Secador de bandejas de circulación vertical



Fuente: Mc Cabe W. L., Smith J.C., Harriot P., (1998)

Figura 1-5 Secador de bandejas vista lateral



Fuente: Industrias CAPERVA (2010)

Partes del secador de bandejas horizontal

- Entrada de aire.
- Salida de aire.
- Ventilador.
- Bandejas.
- Entrada de bandejas.
- Calefactor.

Características

Proceso continuo.

Contacto directo.

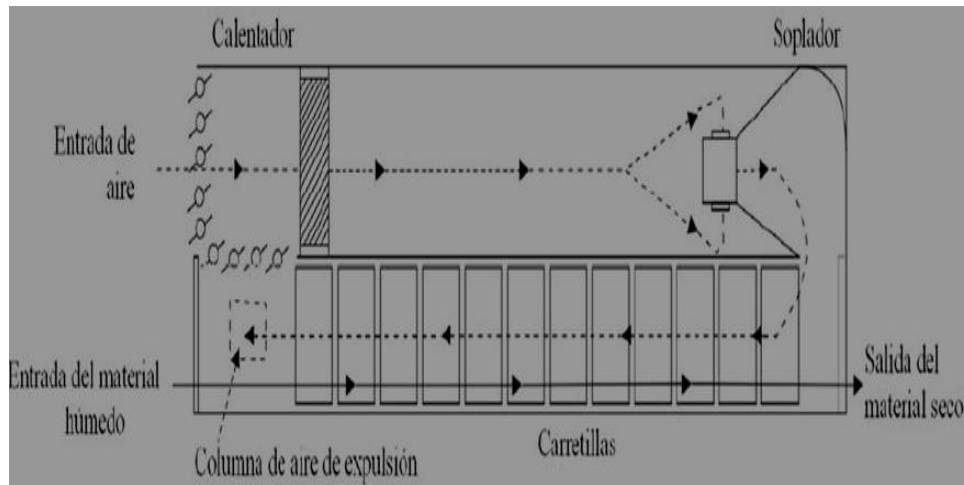
Transferencia de calor por convección.

Fuente de calentamiento alternativa.

Secador de túnel

Estos secadores, figura 1-6, se utilizan para el secado de frutas y hortalizas de forma semicontinua, en instalaciones de gran capacidad de producción y consisten en túneles que pueden tener hasta unos 24 m de longitud. El producto húmedo se extiende en capas uniformes sobre charolas, las cuales se apilan en carretillas dejando espacios entre las bandejas para que pase el aire de secado. Las carretillas cargadas se introducen de una en una, a intervalos adecuados en el túnel. A medida que se introduce una carretilla por el “extremo húmedo” del túnel se retira otra de producto seco por el “extremo seco”. El aire se mueve mediante ventiladores, que lo hacen fluir horizontalmente entre las bandejas, aunque también se produce cierto flujo a través de las mismas. Normalmente se emplean velocidades de aire de entre 2.5 a 6.0 m/s (Brennan y col., 1998).

Figura 1-6 Diagrama esquemático de un secador de túnel a contracorriente



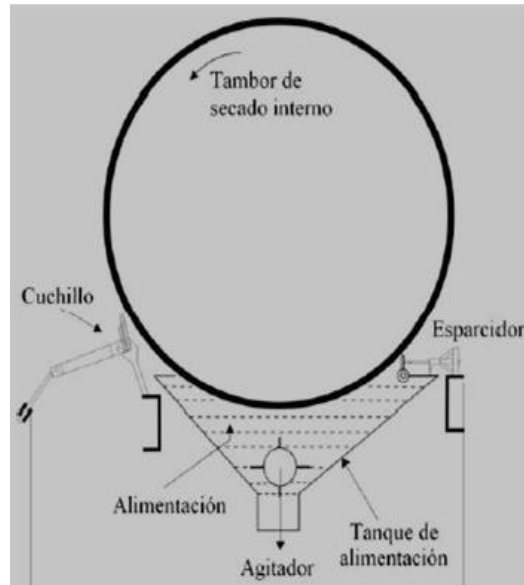
Fuente: Kneule F., 1976

Secador de tambor

Los materiales fluidos y semifluidos, como soluciones, lodos, pastas y suspensiones como leche, sopas, purés de papa, entre otros, pueden secarse en estos equipos. En este tipo de secadores, un tambor metálico giratorio, calentado internamente con vapor se sumerge en un tanque que contiene la sustancia por secar; una película delgada de la sustancia se retiene sobre la superficie del tambor. El espesor de la película se regula mediante un cuchillo repartidor al ir girando el tambor, la humedad se evapora en el aire que lo rodea mediante el calor transferido a través del metal del tambor. El material seco se desprende continuamente de la superficie del tambor mediante este cuchillo. Para un secador de este tipo el factor que controla el proceso de secado es la transferencia de calor por conducción.

Las ventajas del secado en tambor, (figura 1-7), es su alta velocidad de secado y su economía en el uso del calor. La limitación principal que tiene este método es que solo puede aplicarse a alimentos líquidos, o en forma de papilla, capaces de resistir temperaturas relativamente altas (90°C) durante tiempos cortos de 2 a 30 segundos (Brennan y col., 1998).

Figura 1-7 Secador de tambor

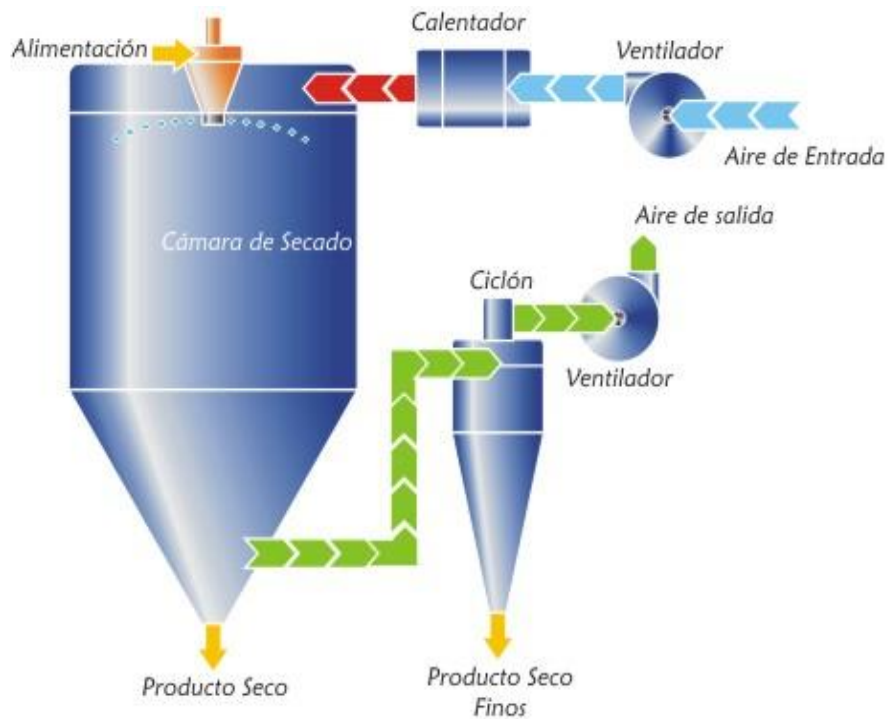


Fuente: (Brennan y col., 1998)

Secador por aspersión

Este tipo de secadores, (figura 1-8), se usa ampliamente en la industria alimentaria para secar soluciones y papillas. El producto se rocía en una corriente de gas caliente para obtener una lluvia de gotas finas. El agua se evapora de dichas gotas con rapidez y se obtienen partículas secas de sólido. El flujo de gas y de líquido de la cámara de aspersión puede ser a contracorriente, en paralelo, o una combinación de ambos. Las principales características de este tipo de secado son unos tiempos de secado muy cortos de 1 a 20 segundos. Las gotas suelen tener diámetros del orden de 10 a 200 μm y por tanto, ofrecen al aire un área superficial por unidad de volumen muy grande, lo que las gotas o partículas húmedas no choquen ni se adhieran a las superficies solidas antes de que se hayan secado. Las partículas que se obtienen son muy ligeras y bastante porosas, (Geankoplis, 1998).

Figura 1-8 Secador por aspersión



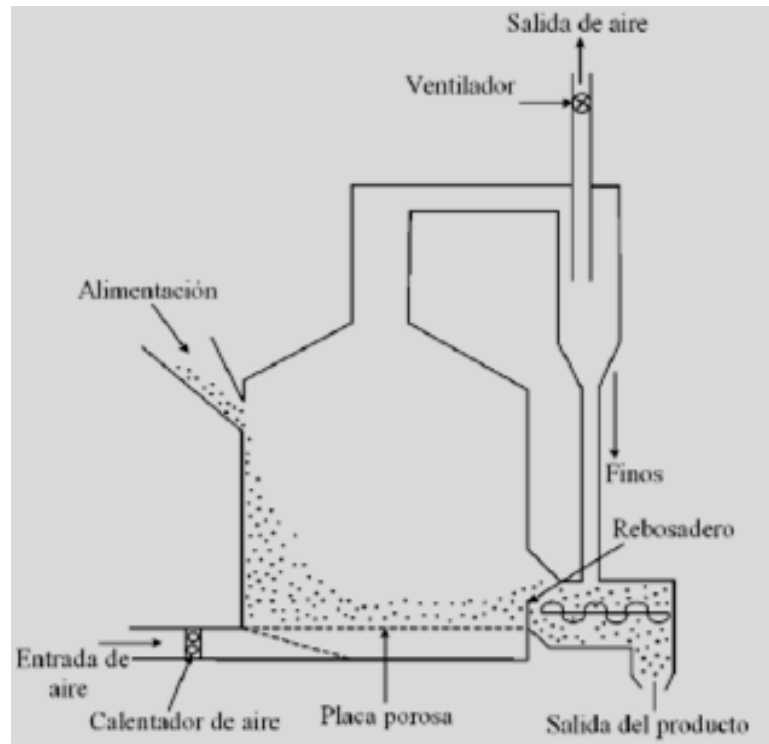
Fuente: Industrias CAPERBA (2010)

Secador de lechos fluidizados

En este tipo de secadores, el aire caliente es forzado a través de un lecho de sólidos, de forma que éstos se mantengan suspendidos en el aire. El aire caliente actúa como medio de fluidización y de secado. Estos secadores pueden operar de forma continua o discontinua, en la figura 1-9, se muestra una unidad simple de funcionamiento continuo. La rejilla que soporta al lecho puede ser una simple placa perforada y algunas unidades poseen bases vibratorias para facilitar el desplazamiento del producto. En el conducto de salida del aire, se incorporan separadores de aire para recoger los sólidos finos. Estos secadores pueden operar a presión superior o inferior a la atmósfera.

El secado en lechos fluidizados se ha aplicado industrialmente o a escala experimental a diversos productos como guisantes, judías, zanahorias, cebollas, gránulos de papa, cubos de carne, harina, cacao, café, sal y azúcar, (Brennan y col., 1998).

Figura 1-9 Secador de lecho fluidizado



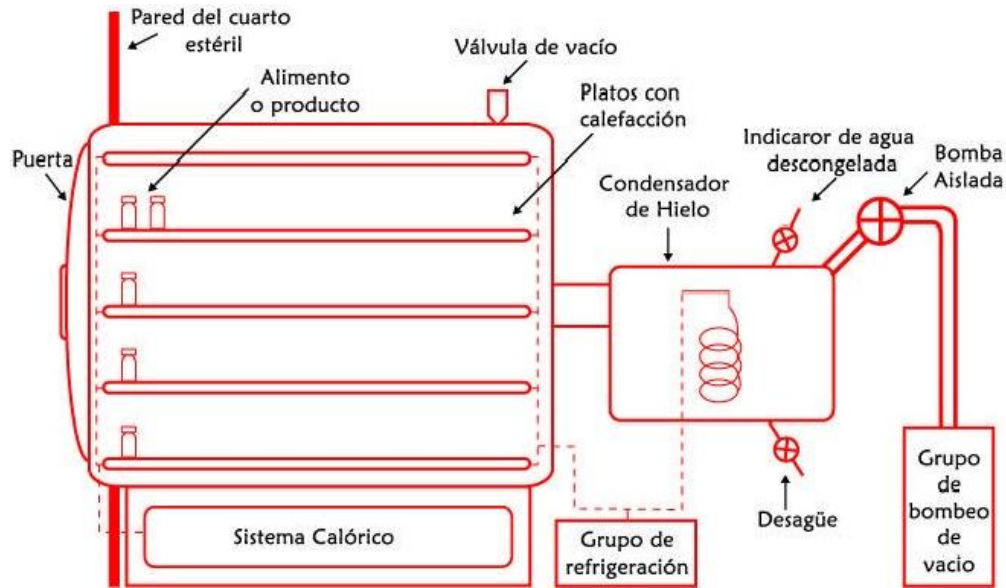
Fuente: (Brennan y col., 1998)

Secadores liofilizadores

Según Maupoei et al, (2001), los secadores por sublimación son secadores de bandejas a vacío en los cuales la eliminación de la humedad (o disolvente) tiene lugar por sublimación del vapor de agua a partir de hielo a alto vacío y temperaturas por debajo de 0°C. Se utilizan en el proceso de liofilización, que comprende dos operaciones fundamentales: congelación y sublimación.

Los liofilizadores consisten en una cámara de vacío, dotada de una bandeja donde se coloca el alimento a liofilizar y de unos calentadores para suministrar el calor latente de sublimación. Para la condensación del vapor de agua generado se dispone de serpentines refrigerantes dotados de un sistema automático de descongelación con objeto de mantenerlos libres de hielo de forma que mantengan su capacidad de condensación.

Figura 1-10 Esquema general de un sistema de liofilizador



Fuente: Ramírez Navas J. S.

1.6 MÉTODOS DE SECADO DE LA OKARA

Existen varios métodos de secado de la okara:

Una investigación sobre la okara, realizado por Martínez P., Ruperez A, Pilar y Redondo Cuenca (2004) para “TOTAL FOOD”, la cual fue publicada en el Congreso Internacional sobre la utilización de subproductos, demostró que, por ser ésta un residuo bastante perecedero, se debe eliminar su alto contenido en agua mediante técnicas de secado. En esta investigación se describen posibles aplicaciones de la okara seca en alimentación humana añadiéndola a la masa de bollería (bollos, pastas, galletas, magdalenas) (patente n° MD206F), o a la masa de panadería (panes ricos en fibra o integrales, pizza, empandas) (patente n° US 5128165) y otros productos.

En el proceso secado por liofilización, la okara se congela primero a -20°C y a continuación se somete al proceso de liofilización (sublimación del agua al vacío) para eliminar el agua.

En el proceso de secado en estufa por convección natural, la okara se seca, a escala de laboratorio, a una temperatura de 60°C . Temperaturas superiores podrían producir

caramelización de los azúcares de la fibra y desnaturalización de las proteínas. (Martínez P., Rupérez A, Pilar y Redondo Cuenca (2004)).

El objetivo de la investigación de Coronel E.y Tobinaga S. (2006) -presentada en la XXVII Reunión de Comunicaciones Científicas y Técnicas de la Facultad de Ciencias Agrarias y Agroindustrias (UNSE) fue estudiar el comportamiento del secado por aspersión en el secado de la okara, esta aplicación permite obtener un polvo fino con características nutricionales y funcionales apropiadas para su aplicación como excelente complemento alimentario humano.

Se realizó un estudio basado en la influencia de la granulometría de la harina del residuo de la leche de soja “okara” en la elaboración de pan de molde, que fue presentado en el XIII Encuentro Científico Internacional de Verano ECI 2006 el objetivo de este trabajo fue estudiar el efecto de dos tamaños de partícula de la harina de “okara” en las características de panificación del pan de molde. El residuo de leche de soja “okara” fue prensado y secado en estufa a 65°C por 4 horas en camadas de 1 cm de espesor hasta llegar a 8 % de humedad, luego fue sometido a un molido en un multiprocesador por 30 segundos a fin de homogenizar los tamaños de las partículas; la mayor cantidad de partículas fue la de 0.250 mm y una gruesa de 0.420 mm. Para la elaboración del pan de molde con 10 % de sustitución de la harina de trigo en la formulación se necesitó: Harina de trigo, fermento biológico instantáneo, sal, mejoradores, azúcar, leche descremada en polvo, manteca y agua. Después de la mezcla de los ingredientes, la masa fue dividida en unidades de 420 g, moldeadas, fermentadas por 60 min y horneadas a 160°C por 25 min. Se caracterizó la harina de “okara” y los panes fueron evaluados en cuanto al volumen específico, pérdida de peso durante 8 días y análisis sensorial con 30 panelistas, utilizando una escala hedónica de 9 puntos. Los resultados indican que la harina de “okara” presentó la composición que se muestra en la tabla I-2: (Paucar L., Hackbart da Silva L., Stell C., Chang. Y.(2006).

Tabla I-2 Características de la harina de okara

Componentes	Composición (%)
Humedad	8.07
Proteínas	19.07
Lípidos	5.00
Carbohidratos	65.53
Cenizas	2.40

Fuente: Paucar L., Hackbart da Silva L., Stell C., Chang. Y,(2006).

1.7 DETERMINACIÓN DE LA TEMPERATURA ÓPTIMA DE SECADO

La determinación de la temperatura óptima de secado, es un parámetro importante, la publicación del encuentro científico internacional en Campinas, Brasil, (2006) informa que en sus investigaciones la temperatura óptima determinada para el secado de la okara fue de 65°C. Además de esta referencia se suma la que se cita en el texto de elaboración de frutas y hortalizas que indica que, generalmente, para el secado de frutas y hortalizas , se emplea una temperatura, máxima de setenta grados centígrados.(F.A.O 1984).

La elección de la temperatura de secado es muy delicada, una elevada temperatura permite aumentar la velocidad de secado, pero conduce a veces a la aparición de una costra en la superficie del producto, fenómeno que dificulta la extracción de humedad, una temperatura demasiado baja aumenta considerablemente el tiempo de operación.

Algunos productos son termos sensibles y no pueden ser secados a temperaturas superiores de las anteriormente citadas.

La temperatura influye mucho en el pardeamiento de los alimentos. Estos fenómenos pueden producir modificaciones del aroma, de color o textura de la harina, por mecanismos químicos y/o bioquímicos. Entre estos pardeamientos debemos considerar el pardeamiento no enzimático o reacción de Maillard, que interviene en diversos procesos industriales, entre los que se encuentra la panificación, en el que el aroma de fermentación inicial se debe a las levaduras o a los procedimientos de acidificación de la masa (Berlitz H.D.,GroschW,(1988) Química de los alimentos. Ed.ACRIBIA, S.A (Zaragoza)).

1.8 MOLIENDA Y TRITURACIÓN

En muchas operaciones de industrialización de alimentos suele ser una necesidad frecuente desmenuzar los sólidos mediante la aplicación de mecanismos de fuerzas.

1.8.1. Fuerzas utilizadas en la reducción de tamaño

Se pueden distinguir tres clases de fuerza, estando en cualquier operación de trituración, en general, presentes más de uno de tales tipos. A continuación en el cuadro I-1 se mencionan los tipos de fuerzas que predominan en algunas trituradoras de uso frecuente en la industria de los alimentos.

Cuadro I-1 Tipos de fuerzas predominantes en trituradoras

Fuerza	Principio	Aparato
Compresión	Compresión (cascanueces)	Rodillos trituradores
Impacto	Impacto (martillo)	Molino de martillos
Cizalla	Frotamiento (piedra de molino)	Molino de discos

Fuente: Ludeña. R. P, Quishpe W. (2008)

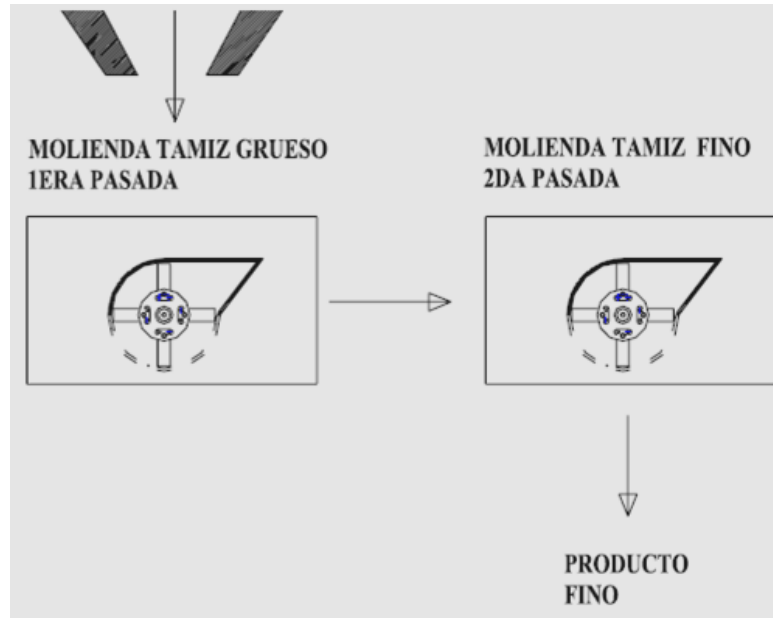
Es necesario hablar de las fuerzas que ven a actuar por ejemplo en la fuerza de compresión se va a utilizar para rupturas de productos duros, las fuerzas de impacto se considera para uso general ya que podemos tener productos de molienda fina y gruesa, sirve para gran variedad de productos, las fuerzas de frotamiento se las utiliza para trituración de sustancias blandas no abrasivas en los tamaños más pequeños por ejemplo en la molienda fina (Ludeña. R. P, Quishpe W., 2008)

1.8.2 Proceso de reducción de grano

Para el proceso de reducción de tamaño es necesario tener en cuenta el tipo de producto deseado, y el tamaño requerido, ya que de eso dependerá el número de pasadas y el número de tamices a utilizar.

En la figura 1-11 se indica un diagrama como ejemplo de cómo se realizará una reducción de tamaño tomando el caso de la pimienta.

Figura 1-11 Diagrama de flujo de reducción de tamaño de la pimienta



Fuente: Ludeña. R. P, Quishpe W. (2008)

1.8.3 Molienda

La molienda es una operación unitaria que reduce el volumen promedio de las partículas de una muestra sólida.

La molienda consiste en la producción de harina a partir del endospermo de los granos de cereal. En la mayoría de los cereales, incluido el maíz, se elimina primero la cubierta de la semilla (bien mediante el machacado manual después de tener el grano a remojo, o bien en una blanqueadora) antes de transformarla en harina. La molienda puede efectuarse mediante trituración manual en un mortero, haciendo pasar el grano entre dos piedras, o utilizando molinos de martillos, de placas o de rodillos mecánicos. (Álvarez Córdova E., 2012).

Molienda seca

El proceso de la molienda seca apunta a una completa separación de las diferentes partes del grano hasta donde sea económicamente factible; produciendo la máxima cantidad de endospermo córneo como trozos discretos; removiendo tanto como sea

posible el germen y pericarpio para dar un producto de baja grasa y baja fibra. (Guarachi G., Quispe R., Mamani M y Bustos J., 2008).

Molienda húmeda

Es un proceso altamente sofisticado que por medios físicos y químicos separa los componentes.

La molienda húmeda es la más utilizada y conduce a la obtención de almidón, aceite y varios subproductos.

Por otro lado, hay una diferencia fundamental en cada uno de estos tipos de molienda. En la molienda seca lo que se pretende es la separación de partes anatómicas del grano (endospermo, germen, y pericarpio), su objetivo es obtener la mayor cantidad de harina que contiene el endospermo el cual a su vez tiene almidón, gluten y algo de fibra. Por el contrario, en la molienda húmeda lo que se quiere es la separación de componentes químicos de los granos de cereales tales como el almidón, proteína, fibra por separado, lo más puras posibles. (Guarachi G., Quispe R., Mamani M y Bustos J., 2008).

1.8.4 Tipos de molinos

Como se mencionó anteriormente el equipo de molienda se basa en los siguientes principios (Ludeña. R. P, Quishpe W., 2008)

1. Frotamiento
2. Comprensión
3. Impacto

Estos principios han sido desarrollados para ejercer varios tipos de molienda ya sea fina, media o gruesa.

Los molinos más utilizados en la industria para la molienda de los alimentos son los siguientes:

- Molino de martillos
- Molinos de discos de frotamiento
- Molinos gravitatorios

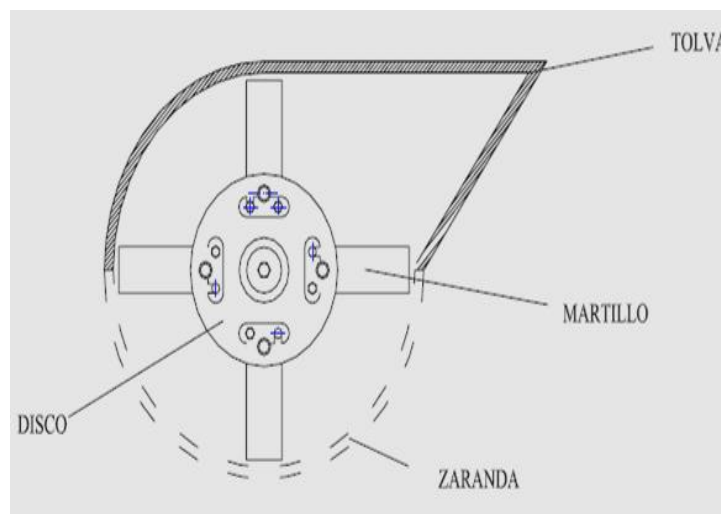
Molino de martillos

Este tipo de molino es muy utilizado en la industria de los alimentos, sirven para pulverizar y desintegrar, funcionan a altas velocidades (Figura 1-10). El eje del rotor puede ser vertical u horizontal, aunque predomina esta última modalidad. El eje sostiene a los martillos, llamados a veces agitadores y pueden ser elementos en forma de T, de estribo, barras o anillos fijos o pivotados al eje o a los discos fijos que van sobre el eje. El rotor funciona dentro de un recipiente que contiene placas o revestimiento de molienda. El espacio abierto que se conserva entre los revestimientos y el rotor es importante en cuanto a la finura del producto.

La finura del producto se regula cambiando la velocidad del rotor, la velocidad de alimentación o la abertura entre los martillos y la placa de molienda, así como cambiando la cantidad y el tipo de martillos utilizados y el tamaño de las aberturas de descarga.

El proceso de molienda se basa en que el material destinado a ser molido se alimenta directamente en la cámara en la cual están girando los martillos. Estos martillos golpean al material con tal violencia que lo revientan materialmente. El material choca contra la carcasa del molino hasta que es triturado con la suficiente finura para poder pasar a través de los orificios de la misma. (Ludeña. R. P, Quishpe W.(2008)).

Figura 1-12 Molino de martillos



Fuente: Ludeña. R. P, Quishpe W. (2008)

Los molinos de martillos pueden tratar casi cualquier producto: sólidos fibrosos como cortezas o cuero, virutas de acero, pastas blandas y húmedas, arcilla plástica o una roca dura. Para obtener una molienda fina están limitados a los materiales más blandos.

Tanto la capacidad como el consumo de energía de un molino de martillos varían mucho con la naturaleza de la alimentación y no se pueden estimar con confianza a partir de consideraciones teóricas, sino que es preferible obtener estos valores a partir de la información publicada, o todavía mejor a partir de ensayos a pequeña o gran escala realizados en el molino con una muestra real del material a tratar. Los molinos comerciales típicamente tratan 100 a 400 lb de sólido por Hp-h (60 a 240 kg/kWh) de energía consumida. (Mc Cabe W. L., Smith J.C., Harriot P., 1998).

Molino de discos de frotamiento

Los molinos que utilizan las fuerzas de frotamiento o cizalla para reducir el tamaño juegan un papel primordial en la molienda fina. Como la mayoría de la molienda que se lleva a cabo en la industria de los alimentos es para producir partículas de tamaño muy pequeño, esta clase de molinos encuentran una amplia aplicación. La molienda se lleva a cabo entre las placas que pueden operar en el plano vertical u horizontal. En la figura 1-12 se indican dos tipos de molinos de discos. (Ludeña. R. P, Quishpe W., 2008).

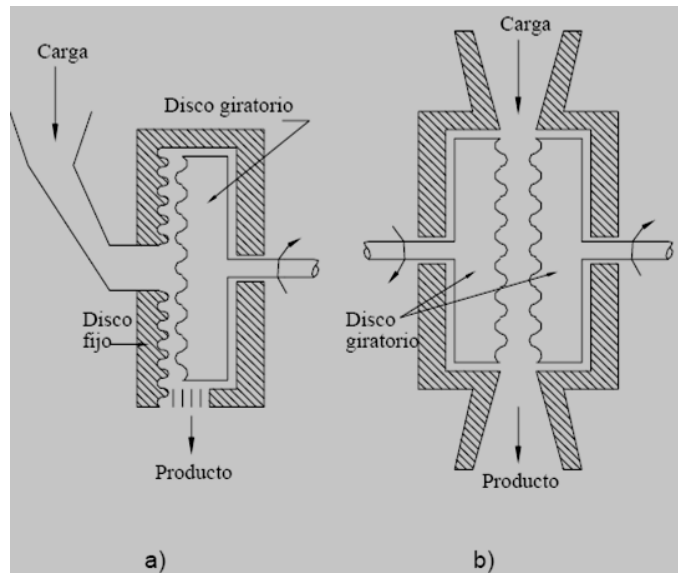
Molino de disco único

La materia prima pasa a través de la separación que existe entre un disco fijo, que es parte de la armadura, y un disco estriado que gira a gran velocidad. Como consecuencia de la intensa acción cizallante se produce la trituración de la carga. La separación se puede variar según cuáles sean el tamaño de las materias de partida y las exigencias del producto. (Balcázar M. E. y Guamba J. P., 2009).

Molino de doble disco

En esta trituración la armadura contiene dos discos que giran en dirección opuesta proporcionando un grado mayor de cizallamiento que el que se puede conseguir con los molinos de disco único. (Balcazar M. E. y Guamba J. P., 2009).

Figura 1-13 Molinos de discos



a) molino de disco sencillo; b) molino de disco doble

Fuente: Ludeña. R. P, Quishpe W. (2008)

En estos molinos los discos son de piedra esmeril para la reducción de sólidos tales como talco y yeso, o bien discos metálicos para sólidos tales como madera, almidón, polvos de insecticida y cera de carnauba. Los discos de los molinos de rotación simple tienen de 10 a 54 pulg de diámetro (250 a 1370 mm) y giran de 350 a 700 rpm. Los discos de los molinos de rotación doble giran a más velocidad, entre 1200 y 7000 rpm. La alimentación se tritura previamente hasta un tamaño máximo de partícula de aproximadamente 1/2 pulg (12 mm) y debe entrar con una velocidad uniforme controlada.

Los molinos de frotación tratan de 1/2 a 8 t/h para dar productos que pasan a través de un tamiz de 200 mallas. La energía que se requiere depende en gran medida de la naturaleza de la alimentación y del grado de reducción alcanzado, y es mucho mayor que en los molinos y quebrantadores descritos hasta ahora. Los valores típicos están comprendidos entre 10 y 100 CV-h (8 a 80 kWh) por toneladas de producto. (McCabe W. L., Smith J.C., Harriot P., 1998).

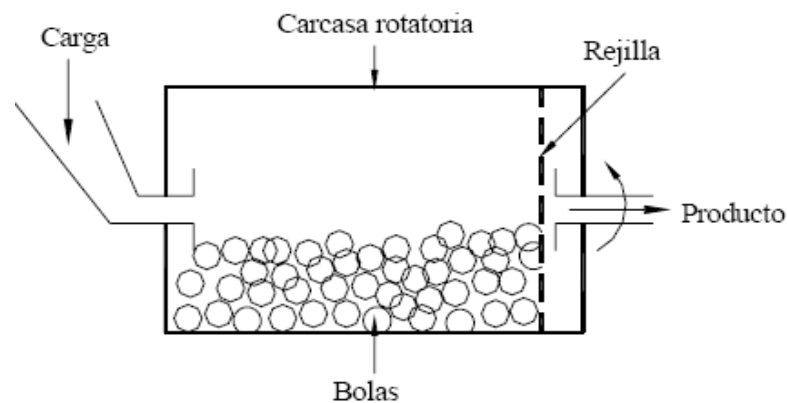
Molinos Gravitatorios

Esta clase de molinos se utiliza ampliamente en muchas industrias de proceso de los alimentos para producir molienda fina. Existen dos tipos básicos el de bolas y el de barras.

Molino de bolas

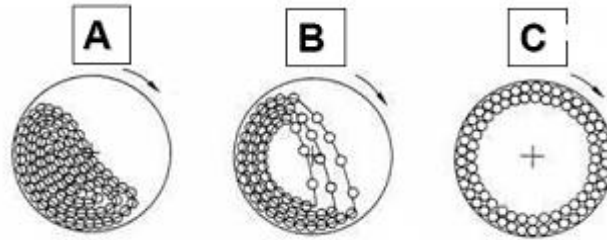
En este tipo de molino (Figura 1-14), se utilizan a la vez fuerzas de cizalla e impacto para la reducción de tamaño. Este aparato está formado por un cilindro giratorio horizontal que se mueve a pequeña velocidad con cierto número de bolas o piedras duras. A medida que gira el cilindro las piedras se elevan por las paredes del cilindro y caen sobre los productos a triturar que está llenando el espacio libre entre las bolas. Las bolas rebasan a su vez entre sí produciendo el cizallamiento de la materia de partida. Esta combinación de fuerzas de impacto y cizalla produce una reducción de tamaño muy efectiva. Balcazar M. E. y Guamba J. P. (2009).

Figura 1-14 Molino de bolas



Fuente: Balcazar M. E. y Guamba J. P. (2009).

Fig. 1-15 Factores que afectan la eficacia del proceso
Velocidad de rotación del cilindro



A. Velocidad reducida Rotación en la parte inferior del cilindro de bolas con el material

B. Aumento de velocidad Las bolas ascienden adheridas al cilindro hasta una altura en la cual su peso sobrepasa la fuerza centrífuga y caen al fondo de la cámara sobre el material

C. Velocidad crítica Las bolas giran a la vez que el recipiente cilíndrico

Molino de barras

Estos molinos son una variante de los molinos de bolas, ya que en ellos se reemplazan las bolas por barras de acero. Las fuerzas de impacto y fricción juegan todavía su papel, pero el efecto de las de impacto es menos pronunciado. Se recomienda utilizar molinos de barras con sustancias pegajosas con las que las bolas pueden quedar adheridas a la masa de la carga. Las barras tienen la longitud del molino, y como en el caso de las bolas ocupan un 50 % del volumen del molino.

De todos estos molinos, los más utilizados en el ámbito industrial de los alimentos son: los de bolas, martillos y los de rodillos. Esquemáticamente pueden concebirse como un cilindro horizontal que gira y en su interior se encuentran los elementos molidores, los cuales se mueven libremente; el material a moler ingresa por un extremo del cilindro, es molido por fricción y percusión de los elementos molidores y sale por el extremo opuesto, (Ludeña R. P, Quishpe W., 2008).

Elementos importantes en la Molienda

Existe una serie de elementos importantes que influyen en la molienda de los materiales los cuales son:

- Velocidad critica
- Tamaño máximo de los elementos moledores
- Volumen de carga
- Potencia
- Tipos de molienda: húmeda y seca.

Velocidad Crítica

La velocidad crítica para un molino y sus elementos moledores es aquella que hace que la fuerza centrífuga que actúe sobre los elementos moledores, equilibre el peso de los mismos en cada instante. Cuando esto ocurre, los elementos moledores quedan “pegados” a las paredes internas del molino y no ejercen la fuerza de rozamiento necesaria sobre el material para producir la molienda, ni la de percusión. (Alcántara Valladares J.R., 2008).

Tamaño Máximo de los Elementos Moledores

En los molinos de barras y bolas, los elementos moledores no tiene todos el mismo tamaño, sino que a partir de un diámetro máximo se hace una distribución de los mismos en tamaños inferiores.

Para determinar el diámetro máximo se aplica la siguiente fórmula:

$$M = \sqrt{\frac{F(\mu)W_i}{KC_S}} * \sqrt{\frac{S}{\sqrt{D}}} \quad (1-4)$$

Donde:

M: Diámetro máximo

F: Tamaño de alimentación del 80% de la carga

Wi: Work Index, es una constante adimensional función de la naturaleza del material molido

K: Constante adimensional que vale: bolas 200 y barras 300

Cs: Porcentaje de la velocidad crítica (%)

S: Peso específico del material a moler (ton/m^3)

D: diámetro interno del Molino (ft)

Volumen de Carga

Los molinos de bolas y barras no trabajan totalmente llenos, el volumen ocupado por los elementos moledores y el material a moler referido al total del cilindro del molino, es lo que se denomina Volumen de Carga.

$$V(\%) = \frac{(V \text{ material a moler} + V \text{ elementos moledores}) \times 100}{V \text{ interior del cilindro}} \quad (1-5)$$

Habitualmente es del 30% al 40%, y de este volumen, el material a moler ocupa entre una 30% a un 40%.

Potencia

La máxima es desarrollada cuando el volumen de carga es del 50% aproximadamente.

Generalmente se trabaja entre un 30 % y un 40% ya que como la curva es bastante plana, el % de potencia entregado es similar al del 50%. (Alcántara Valladares J.R., 2008).

Contrariamente a los molinos considerados anteriormente, todos los cuales requieren una alimentación continua, los molinos de volteo pueden operar tanto de forma continua como discontinua. En una máquina discontinua, se introduce en el molino, a través de una abertura situada en la carcasa, una determinada cantidad de sólido que ha de ser molido. Se cierra entonces la abertura y el molino se mantiene girando durante varias horas, después de lo cual se para y se descarga el producto. En un molino continuo el sólido circula estacionariamente a través de la carcasa giratoria, entrando por un extremo a través de un muñón hueco y sale por el otro extremo, bien a través del correspondiente muñón o de aberturas periféricas existentes en la carcasa.

Capacidad y consumo de energía de los molinos de volteo. La máxima cantidad de energía que se puede suministrar al sólido sometido a molienda se puede calcular a partir de la masa del medio de molienda, la velocidad de rotación y la máxima distancia de caída. En un molino real, la energía utilizada es mucho menor que ésta, mientras que la energía mecánica total suministrada al molino es mucho mayor. Se requiere energía para hacer girar la carcasa en los cojinetes de soporte. Mucha de la energía suministrada al medio de molienda es consumida en moler más las partículas que ya son suficientemente finas y en levantar bolas o guijarros que caen que realizan poca o ninguna molienda. Por supuesto que un buen diseño minimiza la cantidad de esta energía consumida. Un análisis teórico completo de las principales variables interrelacionadas es virtualmente imposible y el funcionamiento de los molinos de volteo se predice mejor a partir de simulaciones en ordenador basadas en ensayos de planta piloto. Los molinos de barras producen de 5 a 200 t/h de un producto de 10 mallas; los molinos de bolas producen de 1 a 50 t/h de polvo que tal vez del 70 al 90 por 100 pasa por un tamiz de 200 mallas. El consumo total de energía para un molino de barras típico operando con un material duro es del orden de 5 CV-h/ton (4 kWh/ton); para un molino de bolas es del orden de 20 CV-h/ton (16 kWh/ton). (McCabe W. L., Smith J.C., Harriot P., 1998).

1.9 TAMIZADO

El Tamizado es un método físico para separar mezclas, consiste en hacer pasar una mezcla de partículas sólidas de diferentes tamaños por un tamiz. Las partículas de menor tamaño pasan por los poros del tamiz atravesándolo y las grandes quedan retenidas por el mismo. (Alcántara Valladares J.R., 2008).

La separación de materiales sólidos por su tamaño es importante para la producción de diferentes productos. Además de lo anterior, se utiliza para el análisis granulométrico de los productos de los molinos para observar la eficiencia de éstos y para control de molienda de diversos productos o materias primas. El tamiz consiste de una superficie con perforaciones uniformes por donde pasará parte del material y el resto será retenido por él. Para llevar a cabo el tamizado es requisito que exista

vibración para permitir que el material más fino traspase el tamiz. Los tipos de tamices que vibran rápidamente con pequeñas amplitudes se denominan "Tamices Vibratorios"(Álvarez Córdova E., 2012).

1.10 SELECCIÓN DEL SECADOR Y DEL MOLINO A EMPLEAR

Haciendo un análisis de los secadores empleados para la okara, se puede concluir que para plantas industriales a escala piloto el secador más apropiado es el de bandejas porque es de tipo intermitente o discontinuo y trabaja con bajos volúmenes de producción, el coste puede ser mayor por la necesidad de mano de obra pero en una planta a escala piloto no se ha de requerir mucho personal.

La tabla I-3 muestra las características más importantes de los molinos utilizados comúnmente en la industria de alimentos.

Tabla I-3 Características de los molinos de la industria de alimentos

Tipos de molinos	Capacidad	Tipo de material	Potencia consumida
Molino de martillos	60 a 240 kg	Sólidos fibrosos como cortezas o cuero, virutas de acero, pastas blandas y húmedas, arcilla plástica o una roca dura. Para obtener una molienda fina están limitados a los materiales más blandos.	1 kWh/kg
Molino de frotación	0.5 a 8 t/h	Madera, almidón, polvos de insecticida, cera de carnauba, cereales,etc.	8-80 kWh/t
Molinos de Bolas	1a 50 t/h	Alimentos de modos general	16 kWh/t
Molino de barras	5 a 200 t/h	Sustancias viscosas.	4 kWh/t

Fuente: Mc Cabe W. L., Smith J.C., Harriot P., (1998)

Analizando la tabla I-3 puede verse que tanto los molinos de frotación o discos como los de bolas podrían ser adecuados para la planta piloto. Se buscará en el mercado cuál de los 2 molinos puede conseguirse para la capacidad de producción de la empresa “NUTRIR” la misma que obtiene de su proceso de producción de leche de soja 8 kg/día de okara húmeda de acuerdo a la información proporcionada por el empresario, Ing. Mario Gutiérrez, quien tendrá la última palabra en la selección del molino pues él realizará la inversión.

CAPÍTULO II
PARTE EXPERIMENTAL

PARTE EXPERIMENTAL

2.1 INTRODUCCIÓN

El desarrollo del presente proyecto de investigación se llevó a cabo en instalaciones del Laboratorio de Operaciones Unitarias (LOU) de la Carrera de Ingeniería Química y en el Laboratorio de Secado de la Carrera de Ingeniería de Alimentos de la Universidad Autónoma “Juan Misael Saracho”.

2.2 DISEÑO EXPERIMENTAL

Para el proceso de secado de harina de Okara se plantea un diseño factorial, 2^2 de 2 variables, temperatura y espesor del material a secar y 2 niveles, se realizarán 2 repeticiones siendo la variable respuesta el contenido de humedad de cada muestra secada. Por lo tanto se tiene:

Número de experimentos: $2^2 = 2 \times 2 = 4 \times 2$ repeticiones = 8 experimentos

La tabla II-1 muestra las variables seleccionadas para el proceso y los niveles definidos de acuerdo a las secciones 1.6 y 1.7 del capítulo I.

Tabla II-1 Variables y niveles para el proceso de secado de okara

Niveles	Variables	
	Temperatura (°C)	Espesor (cm)
Nivel superior	75	1
Nivel inferior	65	0.5

Fuente: elaboración propia

Hipótesis

La temperatura y el espesor del material uniformemente distribuido influyen apreciablemente en el secado de okara.

Hipótesis nula:

Ho: $t_{11}=t_{22}=0$

Ho: $e_{11}=e_{21}=0$

Ho: $(te)_{11}=(te)_{22}= (te)_{12}=(te)_{21}=0$

Hipótesis experimental:

$$H1: t_{11} \neq t_{12} \neq 0$$

$$H1: (te)_{11} \neq (te)_{22} \neq (te)_{12} \neq (te)_{21} \neq \text{o no todas las } (te)_{ij} \text{ son cero}$$

Donde:

t= Temperatura de secado

e = Espesor de las bandejas

i = nivel

j = réplica

El subíndice (1) indica el nivel más bajo y el subíndice (2) indica el nivel más alto para cada variable.

Tabla II-2 Diseño factorial

N° de muestras	Variables		H _{i1} (%) Base seca	H _{i2} (%) Base seca
	t(° C)	e(cm)		
1	–	–	t ₁₁ e ₁₁	t ₁₂ e ₁₂
2	–	+	t ₁₁ e ₂₁	t ₁₂ e ₂₂
3	+	–	t ₂₁ e ₁₁	t ₂₂ e ₁₂
4	+	+	t ₂₁ e ₂₁	t ₂₂ e ₂₂

Fuente: Elaboración propia

2.2.1 Conceptualización de las variables de secado

Temperatura (t)

Se trabajó con las temperaturas de 65°C y 75°C, en base a la información bibliográfica (ver sección 1.7) ya que a elevadas temperaturas se produce el pardeamiento a causa de la caramelización de los azúcares de la fibra y se desnaturalizan las proteínas, a temperaturas inferiores de 65°C porque esto aumentaría el tiempo de secado, lo cual redundaría en el costo energético.

Espesor de la bandeja (cm)

El espesor de la materia prima es una variable importante que se toma en cuenta cuando se deshidrata cualquier producto alimenticio. Se trabajó con el espesor de 1 cm y 0.5 cm.

2.3 MATERIALES Y MÉTODOS

Secador de bandeja

Se utilizó el secador de bandejas que se encuentra en el laboratorio de secado de la carrera de Ingeniería de Alimentos (ver figura 2-1) al cual se le añadió un generador de aire para circulación uniforme del mismo con convección forzada.

Componentes secador de bandejas

Extractor de aire húmedo

Potencia: 0.1 Hp

Rango de temperatura: 40 - 140°C

Capacidad: 5 bandejas de 60x60 cm² = 0.36m²

Figura 2-1 Secador de bandejas



Generador de aire con boquilla

Se utilizó el generador de aire con boquilla para el ingreso de aire adaptado en la parte lateral inferior del secador (ver figura 2-2), proporcionado gentilmente por el laboratorio de física la Facultad de Ciencias y Tecnología cuyas especificaciones son:

Voltaje: 220V

Frecuencia: 50-60 Hz

Velocidad de aire: 12 m/s máxima

Intensidad de corriente: 0.45 A

Abertura de salida $h = 75 \text{ mm} = 0.075 \text{ m}$

Dimensiones: $L = 0.140 \text{ m}$ y $\phi = 0.130 \text{ m}$

Figura 2-2 Generador de aire



Anemómetro

Se empleó para medir la velocidad de circulación de aire caliente en el secador realizándose la lectura con este instrumento en la parte lateral inferior del secador junto a la boquilla del generador de aire el instrumento pertenece al laboratorio de física dependiente de la Facultad de Ciencias y Tecnología sus especificaciones son:

Marca: Georg Rosemmuller

Tipo: 6 a

Escala 7.2 - 360 m/min

Medición: Analógica

Figura 2-3 Anemómetro



Psicrómetro (PSYCHROMETR LAMBRECHT)

Un psicrómetro se compone de dos termómetros, uno de ellos envuelto en una tela constantemente humedecida (termómetro de bulbo húmedo) y otro, al lado del primero, en simple equilibrio térmico con el aire atmosférico (termómetro bulbo seco).

Después de humedecer la mecha del termómetro húmedo introduciéndolo en un tubo que contiene agua destilada, se espera unos minutos y se toma la lectura del termómetro sumergido en el agua (bulbo húmedo) y la del otro termómetro, se toma una carta psicrométrica a continuación, preferentemente con corrección de presión y se lee la humedad relativa en la misma (ver anexo C).

El psicrómetro empleado en el presente trabajo de investigación pertenece al Laboratorio de Operaciones Unitarias de la Carrera de Ingeniería Química; a continuación se muestran sus especificaciones técnicas.

Marca: LAMBRECHT

Escala termómetro bulbo seco: -5°C hasta 60°C

Escala termómetro bulbo húmedo: -5°C hasta 60°C

Divididos en $1/5$ K; límites de error de los termómetros: ± 0.2 K

Dimensiones: aprox. 305 x 60 x 20 mm. (Altura x anchura con mango plegable x profundidad).

Peso: aprox. 0.26 Kg.

Figura 2-4 Psicrómetro



Balanza analítica digital

La balanza analítica es el instrumento con el cual fue posible controlar los pesos de las muestras durante cada etapa del proceso de secado de la okara. La balanza empleada (figura 2-5), se encuentra en el Laboratorio de Secado de la Carrera de Ingeniería de Alimentos y sus especificaciones son las siguientes:

Industria: Switzerland

Marca: Mettler Toledo

Capacidad máxima: 1510g

Capacidad min: 0.5g

$e = 0.1g$

Potencia: 220 W

Figura 2-5 Balanza Analítica digital



Molino de bolas

El molino de bolas está compuesto por cilindros de acero macizo, recubiertos de resistente material elástico rectificado, aptos para el empleo de jarros de porcelana, acero inoxidable, plástico, etc. Los cilindros se montan sobre rodamientos a bolas, que garantizan un funcionamiento altamente duradero.

El molino de bolas produce el fraccionado por golpeteo de las bolas contra la muestra al describir una órbita semi-circular por arrastre del jarro por el cilindro motor. Jarros aislados que impiden la contaminación de las muestras. Su diseño y función lo hacen apropiado para trabajos de molienda en laboratorios de molturación de materias primas para la fabricación de productos farmacéuticos, alimenticios. El molino utilizado se encuentra en el Laboratorio de Operaciones Unitarias (LOU) de la carrera de Ingeniería Química y sus especificaciones son las siguientes:

Marca: ORTO ALRESA

Capacidad máxima: 200 g

Velocidad: 227 rpm

Potencia: 250 W

Frecuencia: 50 Hz

Figura 2-6 Molino de bolas



Zaranda vibratoria

Especialmente concebida para realizar análisis granulométrico en laboratorio de análisis de alimentos, para separar piedras trituradas, para clasificar materiales granulares o polvos. Es un equipo de gran estabilidad sin necesidad de sujeción a la mesa de trabajo, posee controles eléctricos de fácil manejo y un brazo de sujeción que permite el trabajo con una parte o toda la serie de tamices los cuales están diseñados bajo la Norma UNE.

Este equipo fue utilizado para determinar la granulometría de la harina de okara, la serie de tamices empleada posee mallas de acero inoxidable de 5, 4, 2, 1, 0.5, 0.25 y 0.063 mm y se realizó el tamizado durante un tiempo programado de 10 min. La equivalencia con el tamaño de malla de las series Tyler y ASTM-Tyler se muestra en la tabla II-3.

Tabla II- 3 Equivalencias serie de tamices UNE con ASTM y Tyler

Designación y abertura en mm UNE	Serie Tyler N° tamiz	Abertura en mm ASTM y Tyler
5	4	4.75
4	5	4
2	9	2
1	16	1
0.5	32	0.5
0.25	60	0.25
0.063	260	0.062

Fuente: Márquez José Javier (Universidad de Córdoba. Cordoba) .2006;
Universidad de Antofagasta. Facultad de Ingeniería

La zaranda vibratoria empleada se encuentra en el Laboratorio de Operaciones Unitarias (LOU) de la carrera de Ingeniería Química y sus especificaciones son las siguientes:

Marca: ORTO ALRESA

Tiempo de programación: 5-60 min

RPM: 2500

Potencia: 92W

Frecuencia: 50Hz

Figura 2-7 Zaranda vibratoria



Envasadora al vacío

El objetivo principal del envasado al vacío es generar una atmósfera libre de oxígeno para retardar la acción de las bacterias y hongos que de forma natural contiene el producto a envasar, y para mantener sus propiedades organolépticas tales como color, sabor y aroma por largo tiempo además, el envasado al vacío mantiene la higiene del producto desde el momento del envasado hasta el consumidor final.

Otros beneficios del envasado al vacío son: Al ser un envasado hermético, se evita la pérdida de peso por pérdida de líquidos o grasas, se evita que los productos se humedezcan o pierdan humedad, muy útil para productos de panificación, pastas, etc. La envasadora de vacío empleada para el presente proyecto se encuentra en el Laboratorio Taller de Alimentos (LTA) de la carrera de Ingeniería de Alimentos y sus especificaciones son las siguientes:

Marca: ORIÓN

Frecuencia: 50Hz

Potencia: 0.75kW

Voltaje: 220v

Motor: 1500/2800 rpm

Amperaje: 6A

Figura 2-8 Envasadora al vacío



Selladora

Este equipo se utiliza para sellar herméticamente las bolsas de polietileno, polipropileno, PVC, bolsas de embalaje masivo continuo, todas ellas comúnmente empleadas en la industria de alimentos, químico farmacéutica. etc.

La selladora de bolsas electrónica empleada para envasar la harina de okara obtenida durante la ejecución del presente proyecto de grado, se encuentra en el Laboratorio Taller de Alimentos (LTA) de la carrera de Ingeniería de Alimentos y sus especificaciones son las siguientes:

Marca: Electrónica 2001

Potencia: 250W

Frecuencia: 50Hz

Amperaje: 5 Amperios

Tiempo: 0.2 a 1.5 seg

Figura 2-9 Selladora Electrónica



2.3.1 Descripción de materiales

La lista de los materiales empleados y sus características se muestran en el cuadro II-1 a continuación:

Cuadro II-1 Materiales empleados

Materiales	Cantidad	Capacidad	Tipo de material
Fuente	1	Grande	Plástico
Espátula	1	Mediana	Acero inoxidable
Wernier Caliper Industria USA	1	Escala: 200x0.02 mm	Acero inoxidable
Pinza	1	Mediana	Acero inoxidable
Recipientes	12	Pequeños y medianos	Plástico
Termómetro	2	0-100°C	Mercurio
Bandejas	2	16x16 cm ² ; e=0.5 cm	Malla milimétrica
Bandejas	2	8x8 cm ² ; e=1 cm	Malla milimétrica
Tamices serie UNE	7	Abertura de malla N°: 4, 3, 2, 1, 0.5, 0.25, 0.063 mm y base	Acero inoxidable

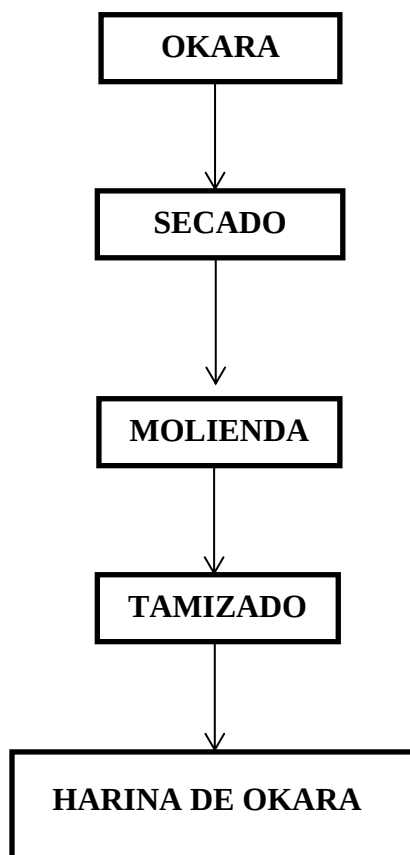
Fuente: Elaboración propia.

2.4 OBTENCIÓN DE HARINA DE OKARA

Para el secado o deshidratación de la okara se seleccionó un secador de bandejas, (ver sección 1.10), y se utilizó para la parte experimental el equipo del laboratorio de secado de la carrera de Ingeniería de Alimentos dependiente de la Facultad de Ciencias y Tecnología descrito en la sección anterior. El uso de este secador permitió determinar los parámetros óptimos de operación para el secado de la okara y su conversión en harina.

Las diferentes etapas del proceso de elaboración de la harina de okara se muestran en el diagrama de bloques de la figura 2-10.

Figura 2-10
Diagrama de bloques del proceso de elaboración de harina de Okara



A continuación se describe cada etapa del proceso empleado para obtener la harina de okara.

2.4.1 Acondicionamiento de la materia prima

La okara es una masa de sólidos que se obtiene al filtrar la leche de soja, tiene bastante humedad lo cual es un problema para su conservación, tiene forma de una pasta cuyo color varía de blanco a perla oscuro, tiene una textura grumosa fina.

La okara se obtiene después de la primera filtración de la leche de soja y normalmente en nuestro medio se desecha. Es por ello que los ejecutivos de la empresa NUTRIR Tarija, aceptaron proveer la misma para emplearla como materia prima en el proceso de obtención de harina de okara a escala piloto.

Al momento de realizar el muestreo de la materia prima es importante el uso de guantes desechables, paletas para la toma de muestra y tomar la muestra lo más rápido posible para evitar la exposición de las mismas a la atmósfera ya que la okara es bastante higroscópica.

En la figura 2-11 se muestra que la okara que se obtiene del proceso de elaboración de leche de soja en la empresa NUTRIR, tiene un color crema, sabor neutro, suave y de textura agradable.

Figura 2-11 Okara



Características fisicoquímicas de la okara

Las características fisicoquímicas de la okara fueron determinadas en el Centro de Análisis de Investigación y Desarrollo (CEANID), los resultados certificados se encuentran en el anexo C, la tabla II-4 muestran los mismos.

Tabla II-4 Propiedades fisicoquímicas de la okara

Parámetros	Valor (%)
Humedad	83.12
Fibra	0.53
Proteína	7.59
Materia grasa	3.72

Fuente: Centro de Análisis Investigación y Desarrollo (CEANID).

De acuerdo a la tabla II-4 se puede observar que la okara tiene un contenido de humedad alto, razón por la cual es un producto bastante perecedero por lo que se necesita de un proceso de secado para la eliminación del agua.

2.4.2 Secado de la okara

Para secar la okara se instaló en la parte lateral del secador un ventilador para introducir aire caliente al mismo, con la finalidad de mejorar las condiciones de circulación del aire en el secador para que su distribución sea uniforme en todo el equipo. Para lograr esto, se ajustó la velocidad de circulación de aire caliente con el anemómetro a un valor constante de 3 m/s.

En la parte superior del secador se adaptó también una balanza analítica, con un soporte sujetado en el interior del secador, sosteniendo la bandeja, cuyas dimensiones se muestran en el cuadro II-1, en la cual se ponía la muestra a secar, para registrar cada 10 minutos la pérdida de peso durante el proceso de secado. Para comprobar que el procedimiento era adecuado se taraba previamente la bandeja en otra balanza analítica y se pesaba la misma cantidad de muestra inicial y en todos los casos hubo coincidencia en la medida.

A continuación se describe el procedimiento empleado para el manejo del equipo durante el secado de cada una de las muestras:

En primer lugar se enchufó y se encendió el equipo de secado, luego se reguló la temperatura con la perilla de control, empleando para cada muestra el valor asignado a esta variable en el diseño factorial (65°C o 75°C).

Se esperó al menos 1.5 a 2 horas (dependiendo del contenido de humedad del medio ambiente) hasta que el secador alcance la temperatura deseada.

Antes de poner la bandeja con la muestra se tara la bandeja para que la balanza sólo determine la pérdida de peso de la muestra (ver figura 2-12, 2-13 y 2-14).

Figura 2- Balanza acondicionada en la parte superior del secador



Figura 2-13 Balanza acondicionada en vista frontal



Figura 2-14 Bandeja con la okara dentro del secador



Se midieron las temperaturas de bulbo seco (t_{bs}) y la temperatura de bulbo húmedo (t_{bh}) en la entrada del aire caliente para esto se instalaron los dos termómetros, a la salida del aire también se tomaron los datos de estas temperaturas, para lo cual se instaló un psicrómetro justo a la salida del aire, (figuras 2-15 y 2-16).

Figura 2-15 Medición del aire a la entrada del secador



Figura 2-16 Medición del aire a la salida



2.4.2.1 Pérdida de peso durante el secado de la okara

Para registrar la pérdida de peso de la okara, los datos se registraron con intervalos de 10 minutos de tiempo, para cada muestra se fijaron las variables: temperatura y espesor de la muestra, de acuerdo al diseño factorial propuesto en la sección 2.2, manteniendo constante la velocidad de circulación del aire para el proceso de secado de la okara.

Se tiene dos tipos de bandejas, una de 1cm y otra de 0.5cm de altura, para cada prueba se colocaron 82.32 gramos de okara en la bandeja, al momento de ponerla, se debe utilizar guantes estériles y espátula para repartir la muestra de forma uniforme y no contaminarla, también se debe tener cuidado de colocar rápidamente la muestra en las bandejas para evitar la exposición de la misma a la atmósfera, para evitar que adquiera humedad del medio ambiente, en caso de que la humedad relativa de este sea muy elevada, porque esta alteraría eficazmente el peso de la muestra inicial ya que esta absorbería humedad del medio ambiente. Se seca la muestra hasta peso constante para generar las curvas de secado.

En la tabla II-5 se observa la pérdida de peso de la okara durante su secado a las temperaturas fijadas en el diseño factorial usando un espesor de muestra de 0.5 cm

manteniendo constante la velocidad del aire que entra en el secador a 3 m/s, se realizaron dos repeticiones.

Tabla II-5 Pérdida de peso en el secado de la okara a 65 y75°C, espesor 0.5 cm

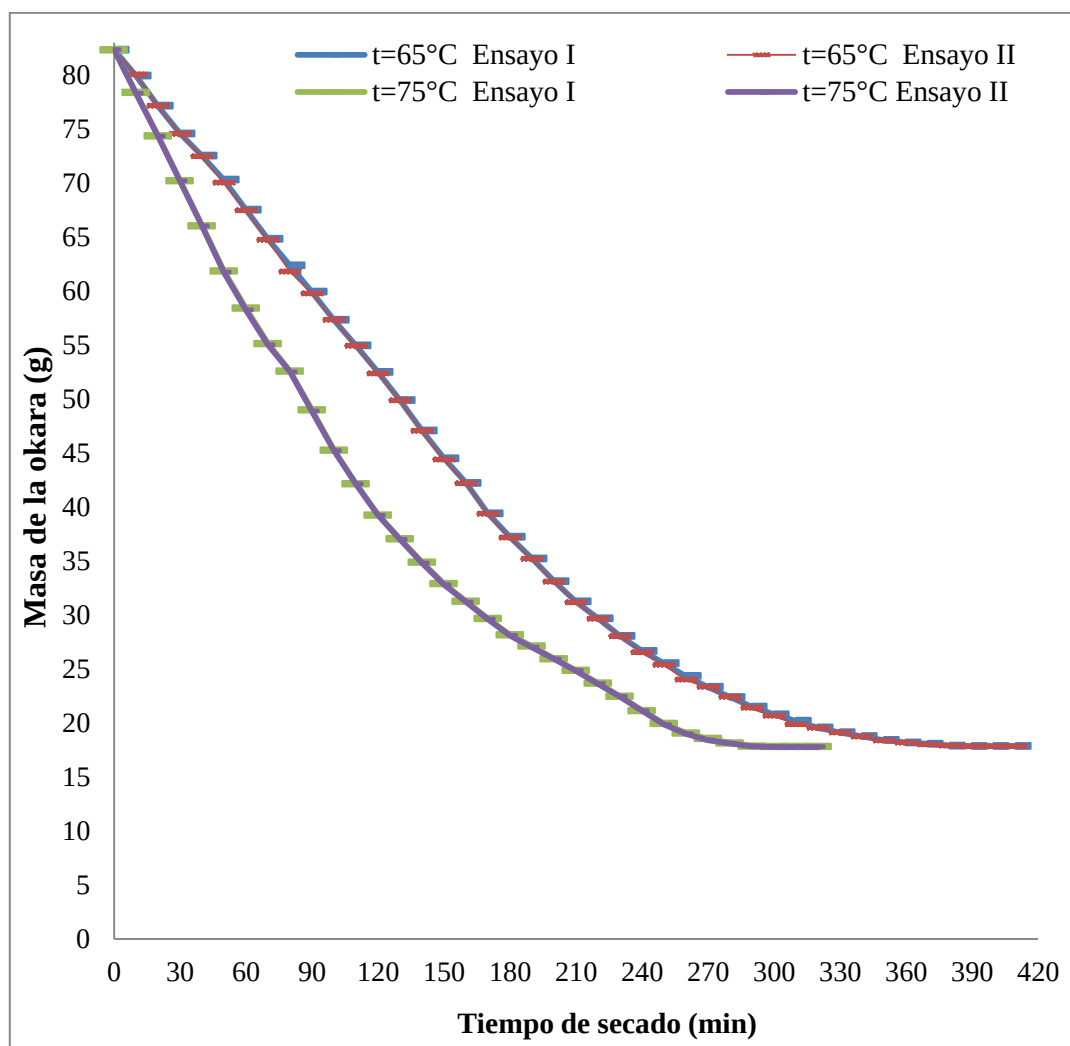
Tiempo (min)	T 65°C		T 75°C	
	Ensayo I (g)	Ensayo II(g)	Ensayo I(g)	Ensayo II(g)
0	82.32	82.32	82.32	82.32
10	79.92	80.02	78.37	78.30
20	77.12	77.09	74.36	74.33
30	74.57	74.51	70.21	70.17
40	72.50	72.46	66.03	65.98
50	70.29	69.98	61.86	61.72
60	67.52	67.44	58.41	58.22
70	64.80	64.69	55.13	55.00
80	62.34	61.76	52.57	52.49
90	59.92	59.75	48.99	48.86
100	57.31	57.27	45.27	45.20
110	54.93	54.88	42.14	42.11
120	52.48	52.34	39.25	39.22
130	49.89	49.84	37.06	36.99
140	47.07	47.00	34.89	34.80
150	44.50	44.38	32.89	32.79
160	42.21	42.17	31.27	31.19
170	39.39	39.33	29.68	29.60
180	37.22	37.13	28.16	28.10
190	35.22	35.14	27.11	27.00
200	33.11	33.05	25.95	25.91
210	31.24	31.16	24.87	24.83
220	29.68	29.60	23.69	23.62
230	28.05	28.00	22.47	22.44
240	26.66	26.54	21.14	21.11
250	25.52	25.36	19.94	19.84
260	24.33	23.98	19.08	18.99
270	23.32	23.29	18.56	18.40
280	22.39	22.37	18.16	18.10
290	21.49	21.37	17.86	17.84
300	20.79	20.64	17.82	17.79
310	20.18	19.87	17.82	17.79
320	19.56	19.50	17.82	17.79
330	19.12	19.09		
340	18.76	18.71		
350	18.40	18.36		
360	18.19	18.16		
370	18.07	18.00		

Tiempo (min)	T 65°C		T 75°C	
	Ensayo I (g)	Ensayo II(g)	Ensayo I(g)	Ensayo II(g)
380	17.89	17.87		
390	17.86	17.83		
400	17.86	17.83		
410	17.86	17.83		

Fuente: Elaboración propia

La figura 2-17 muestra las curvas obtenidas en base a estos resultados.

Figura 2-17 Pérdida de peso de la okara espesor de 0.5 cm



En la tabla II-6 se observa la pérdida de peso de la okara a 65 y 75°C con un espesor de 1 cm, el tiempo que tardo en secar la okara a temperatura de 65°C con 1cm de espesor es de 520 minutos y de 75°C es de 420 minutos.

Tabla II-6 Temperatura de secado: 65 y 75°C, 1 cm

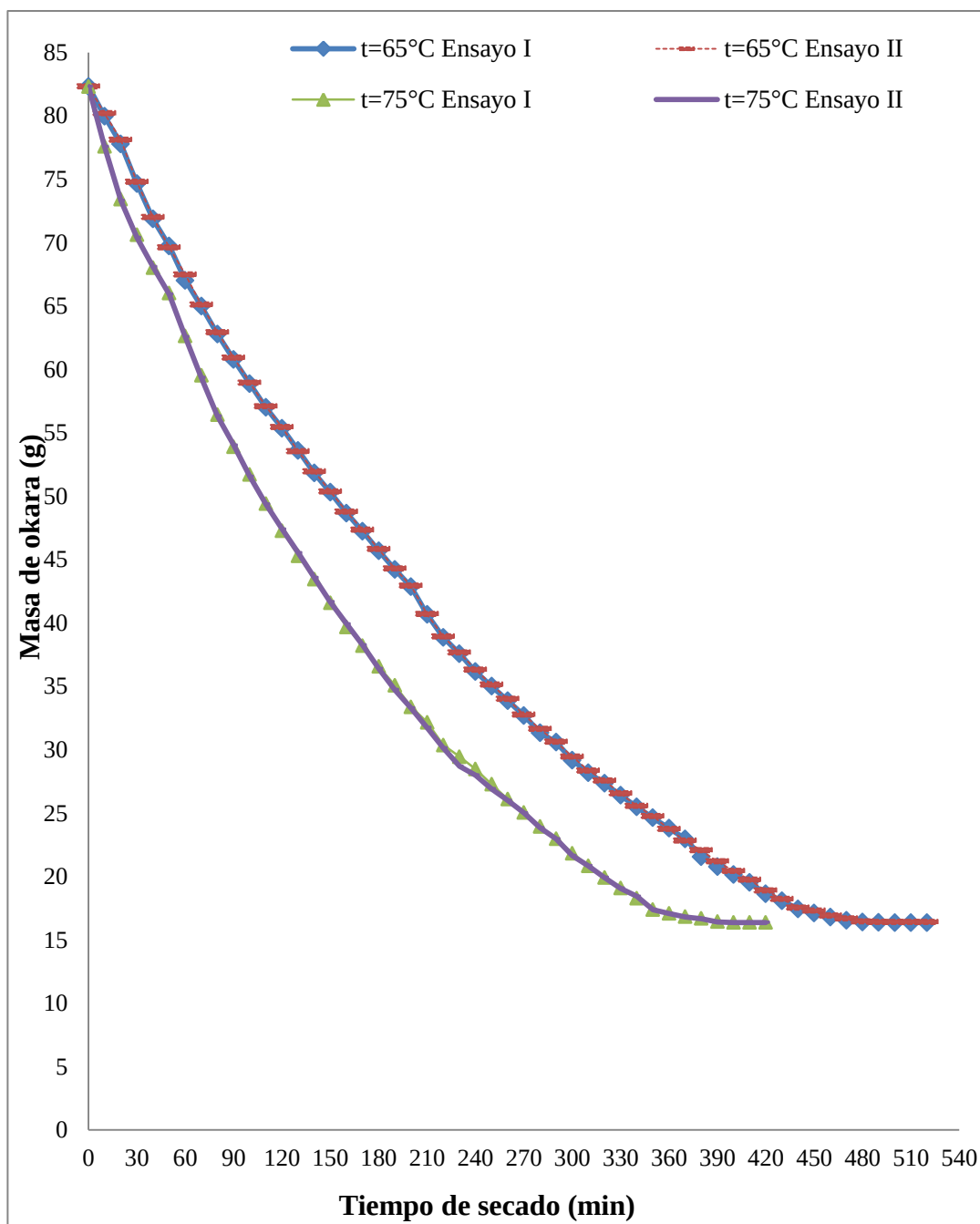
Tiempo (min)	65°C		75°C	
	Ensayo I(g)	Ensayo II(g)	Ensayo I (g)	Ensayo II(g)
0	82.32	82.32	82.32	82.32
10	79.98	80.20	77.60	77.58
20	77.79	78.11	73.44	73.33
30	74.66	74.79	70.63	70.40
40	71.86	72.02	68.03	68.10
50	69.74	69.62	66.02	65.93
60	67.02	67.48	62.64	62.57
70	64.98	65.10	59.53	59.35
80	62.79	62.93	56.44	56.32
90	60.77	60.92	53.90	54.02
100	58.88	58.94	51.72	51.56
110	57.00	57.08	49.41	49.37
120	55.35	55.44	47.28	47.39
130	53.60	53.52	45.30	45.53
140	51.82	51.95	43.46	43.57
150	50.30	50.36	41.58	41.65
160	48.66	48.77	39.68	39.91
170	47.22	47.34	38.20	38.25
180	45.69	45.82	36.57	36.39
190	44.22	44.29	35.08	34.73
200	42.85	42.92	33.38	33.28
210	40.66	40.69	32.16	31.73
220	38.86	38.92	30.36	30.13
230	37.57	37.65	29.44	28.69
240	36.15	36.30	28.47	27.98
250	35.00	35.12	27.27	26.90
260	33.86	33.99	26.10	25.99
270	32.69	32.75	25.04	25.00
280	31.33	31.62	23.93	23.83
290	30.58	30.61	22.98	22.96
300	29.17	29.44	21.83	21.63
310	28.17	28.34	20.84	20.83
320	27.34	27.56	19.90	19.91
330	26.39	26.53	19.08	19.05
340	25.48	25.55	18.28	18.42
350	24.62	24.75	17.38	17.38
360	23.80	23.73	17.08	17.06
370	22.96	22.81	16.82	16.80
380	21.55	22.05	16.68	16.66
390	20.77	21.17	16.43	16.41

Tiempo (min)	65°C		75°C	
	Ensayo I(g)	Ensayo II(g)	Ensayo I (g)	Ensayo II(g)
400	20.15	20.42	16.37	16.36
410	19.52	19.72	16.37	16.36
420	18.62	18.87	16.37	16.36
430	18.06	18.22		
440	17.43	17.52		
450	17.11	17.28		
460	16.78	16.89		
470	16.54	16.66		
480	16.40	16.43		
490	16.37	16.40		
500	16.35	16.38		
510	16.35	16.38		
520	16.35	16.38		

Fuente: Elaboración propia.

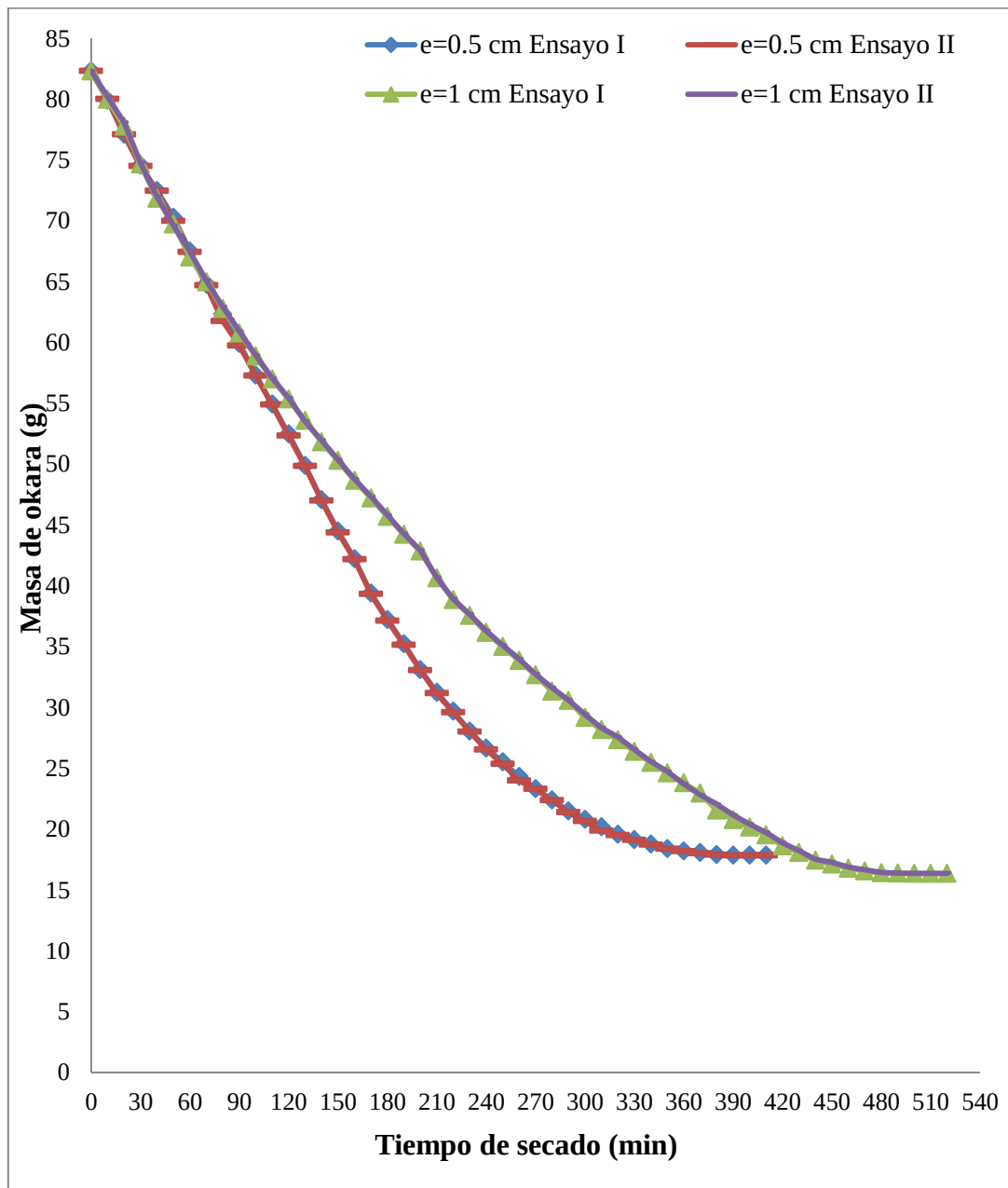
La figura 2-18 muestra estos resultados:

Figura 2-18 Pérdida de peso de la okara espesor de 1 cm



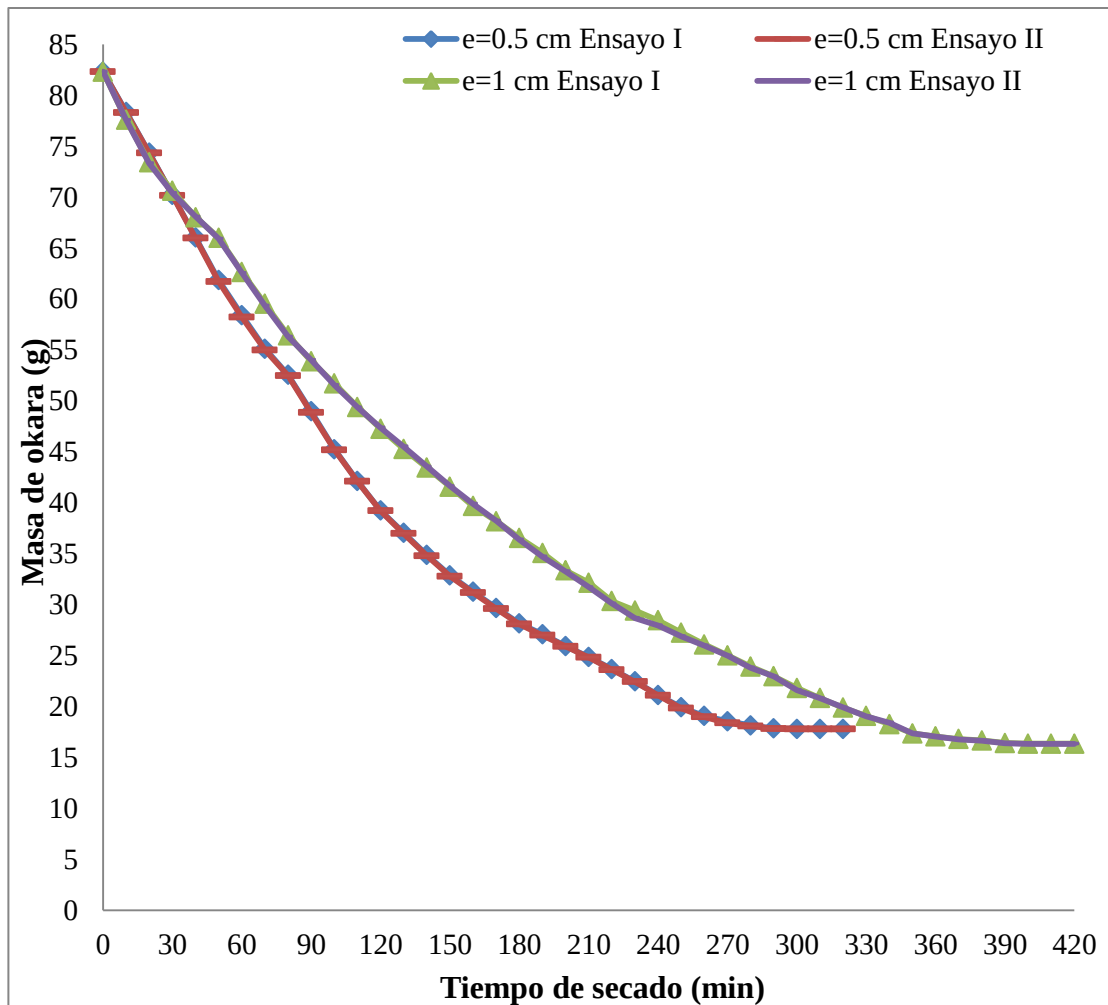
Las figuras 2-19 y 2-20 muestran una comparación de la pérdida de peso a diferentes espesores de los 4 ensayos realizados a las temperaturas de 65 y 75 °C respectivamente.

Figura 2-19 Pérdida de peso de la okara a 65°C y diferentes espesores



En esta figura se observa que en un tiempo de 0 a 100 minutos las curvas se superponen, lo cual nos indica que en este tiempo recién las muestras se están empezando a calentar por lo cual no se evapora rápido el agua, después de haber pasado este tiempo se nota que las curvas se separan por lo que el agua se está evaporando más rápido a medida que pasa el tiempo.

Figura 2-20 Pérdida de peso de la okara a 75°C y diferentes espesores



En esta figura ocurre el mismo caso de la figura anterior, pero con la condición que la etapa de calentamiento es de 0 a 30 minutos por lo que se demuestra que a mayor temperatura el agua se va evaporando más rápido.

2.4.2.2 Variación de la humedad relativa ambiente

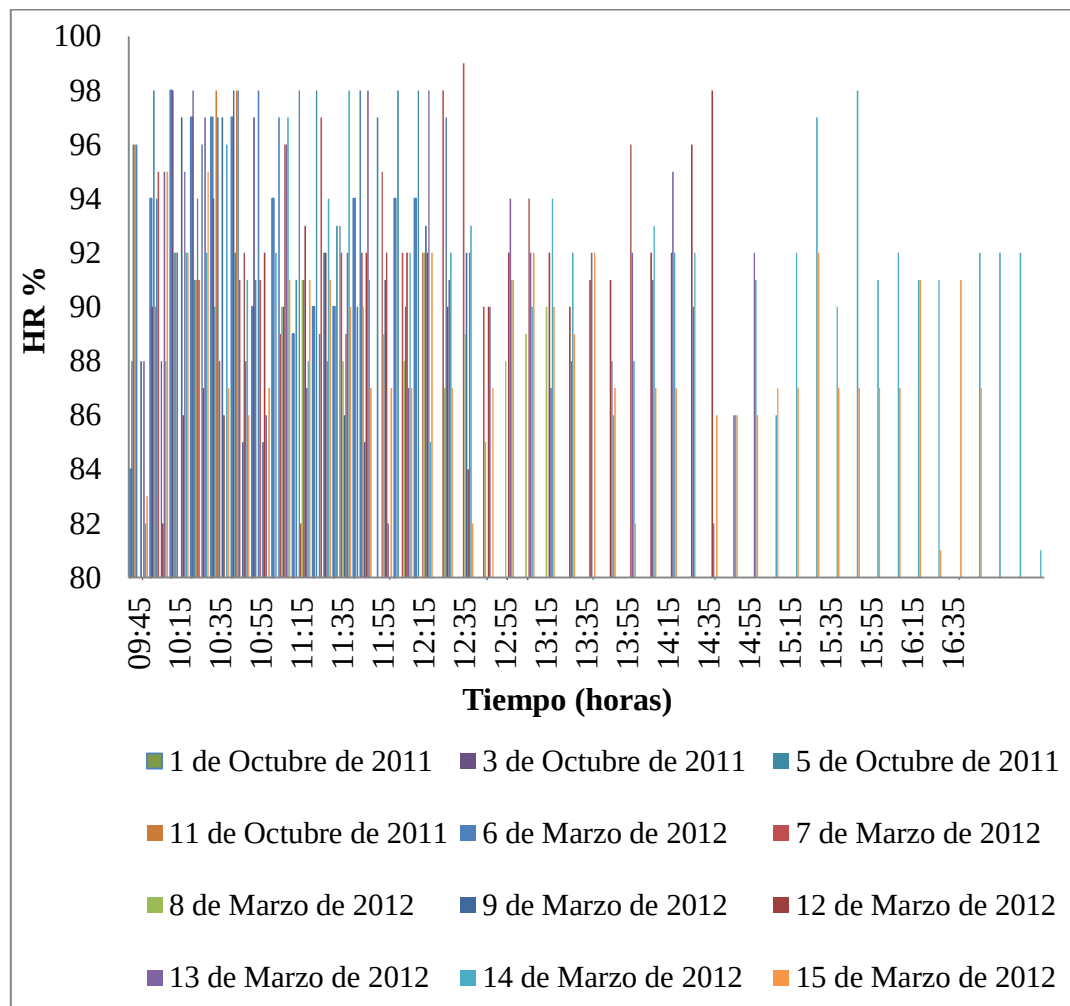
La lectura de la humedad relativa del ambiente se realizó a través del diagrama psicrométrica elaborado para la ciudad de Tarija (ver Anexo C) (**Ing. Zenteno Luis Fernando** “*Carta Psicrométrica para la ciudad de Tarija*”. Tarija, Universidad Autónoma Juan Misael Saracho, Carrera de Ingeniería de Alimentos. 1992), en el

cual se introdujo datos de temperatura de bulbo seco y bulbo húmedo medidos por psicrómetro LAMBRECHT (ver figura 2-4).

En la figura 2-21 se muestra un resumen de los datos obtenidos de la humedad relativa del ambiente, en la cual se puede observar que la humedad del ambiente es inestable, cambia de acuerdo a la temperatura de bulbo seco y bulbo húmedo que hay en el momento de tomar los datos.

Para mayor detalles las tablas y figuras de los datos tomados de la humedad relativa del ambiente, de la entrada y salida del secador se encuentran en el Anexo B.

Figura 2-21 Resumen de datos obtenidos de la humedad relativa del ambiente



Como se muestra en la figura se puede observar la variación de la humedad relativa que tiene el ambiente en los días medidos, los datos van cambiando de acuerdo a la época del año no solo depende de la misma sino también del cambio de clima que haya en un mismo día, se debe de tener un especial cuidado en esta medición porque al saber con qué humedad está el ambiente nos podemos dar cuenta si el ambiente tiene mucha humedad o poca ya que esto nos permite establecer que la muestra no adquiera humedad del ambiente por lo cual obtendremos malos resultados en el momento del secado de la okara ya que es un alimento muy higroscópico.

Tabla II-7 Condiciones de Humedad relativa de entrada y salida del secador

Prueba	Entrada			Salida		
	T _{bs} (°C)	T _{bh} (C°)	HR %	T _{bs} (°C)	T _{bh} (C°)	HR %
1	28	23	63	29	28	91
2	32	27	78	31	30	93
3	29	24	69	31	30	93
4	29	25	72	29	28	89
5	32	21	43	29	28	88
6	32	21	41	29	26	83
Promedio	30.3	23.5	61	29.7	28.3	89.5

Fuente: Elaboración propia

Esta tabla presenta un resumen de los datos de la humedad relativa de entrada y de salida del secador, los datos más detallados se encuentran en el anexo B.

2.5 MOLIENDA

Esta operación se llevó a cabo en un molino de bolas.

Funcionamiento del equipo

Se sitúan los jarros con el producto a moler y sus bolas. En el jarro de molienda se introducen las bolas en una cantidad no superior a una cuarta parte, añadiendo el producto a moler que es la okara deshidratada. Tapar el jarro y depositarlo en sentido horizontal encima de los cilindros ya regulados.

Se conectó y encendió el equipo de molino de bolas. La muestra de okara seca fue colocada en el molino trabajando con una velocidad de 227 rpm y durante un tiempo de 30 minutos.

Figura 2-22 Okara molida en el molino de bola



Figura 2-23 Okara en el interior del molino



Al hacer la fuerza de gravedad de las bolas con la okara deshidratada se lleva a cabo la molienda de la misma, la cual nos da la harina de okara.

2.6 TAMIZADO

Después de la molienda de la okara, se puso al tamizador para obtener la clasificación de la harina de okara. Se realizó el control de granulometría utilizando tamices con diferentes aberturas de mallas de 4, 2, 1, 0.5, 0.25 y 0.063 mm.

Se programó 30 minutos de tamizado con una velocidad de 5 rpm.

Transcurrido el tiempo seleccionado el equipo se para automáticamente teniendo la granulometría deseada de la harina.

Tabla II-8 Pruebas realizadas en el tamizado

No de Tamiz	Masa (g)
4	0
2	2.6
1	90.9
0.5	200.0
0.25	134.9
0.063	57.6
0	9.6

La mayor cantidad de harina retenida después del tamizado se encuentra en la malla 0.5 mm.

Figura 2-24

Tamizado de la harina de okara malla 0.5 mm



Figura 2-25

Tamizado de la harina de okara malla 0.25 mm



Figura 2-26

Tamizado de la harina de okara malla 0.063 mm



Figura 2-27

Tamizado de la harina de okara base del tamiz



2.7 ENVASADO DE LA HARINA DE OKARA

El envase es muy importante en la conservación de alimentos. y se debe tomar en cuenta para ello, la naturaleza del producto a conservar de acuerdo a su proceso de elaboración y su distribución.

Para seleccionar la forma adecuada del tipo de envase que reúna las condiciones aceptables para su uso se asumieron los siguientes criterios:

- El envase seleccionado debe ser compatible con el producto en cuestión, garantizando que el mismo no aporte aromas ni malos olores al producto.
- La sensibilidad del producto, debe ser evaluada tomando en cuenta los cambios o alteraciones referidas a las cualidades del mismo como son la humedad, grasas, etc.
- Las bolsas de polipropilenos suelen ser muy vistas también para guardar alimentos que necesiten mantenerse a determinadas temperaturas.

La harina de okara es envasada al vacío para que pueda mantener sus propiedades organolépticas tales como color, sabor y aroma por largo tiempo además el envasado al vacío mantiene la higiene del producto.

Figura 2-28 Harina de Okara



Fuente: Elaboración propia

CAPÍTULO III

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1 RESULTADOS Y DISCUSIÓN PARTE EXPERIMENTAL

3.1.1 Análisis fisicoquímico de la okara

En la tabla III-1 a continuación se muestra el análisis fisicoquímico de la okara proveniente de la empresa NUTRIR comparado con los de la bibliografía.

Tabla III-1: Comparación del análisis fisicoquímico de la okara de NUTRIR con las que se tiene como referencia bibliográfica

Parámetros	% (P/P) okara húmeda	g/100 g m s	% (P/P)
Fibra	0.53	55.48 +/- 0.34	No informa
Materia grasa	3.72	8.47 +/- 0.21	10-15
Humedad	83.12	No informa	70-80
Proteína	7.59	36.36 +/- 0.32	20

Fuente: CEANID (2011), Mateos y col. (2008), Martínez y col. (2004)

Como puede verse hay coincidencia entre los análisis de la okara de la empresa y los de la bibliografía con excepción del contenido de fibra y de proteína que lamentablemente no se puede explicar dado que los análisis fueron encargados a un laboratorio certificado cuyo informe se encuentra en el anexo C del presente proyecto.

3.1.2 Secado

En el análisis de la pérdida de peso de la okara a diferentes espesores y temperaturas, tal como se muestra en las figuras 2-19 y 2-20 de la sección 2.4.2, se observa que en las 2 repeticiones experimentales a 65°C con espesores de 0.5 y 1 cm y de 75 °C con 0.5 y 1 cm de espesor respectivamente (ver tablas II-5 y II-6), por lo que en las repeticiones realizadas, los resultados del ensayo I son bastante similares a las del ensayo II, razón por la cual las curvas de secado resultantes se superponen, esto demuestra la reproducibilidad de los datos y se corrobora que cuando se llevan adelante ensayos en las mismas condiciones, existe correlación en los resultados obtenidos.

En la tabla III-2 se muestra los datos de pérdida de peso del promedio de los 2 ensayos a las temperaturas y espesores determinados en el diseño factorial.

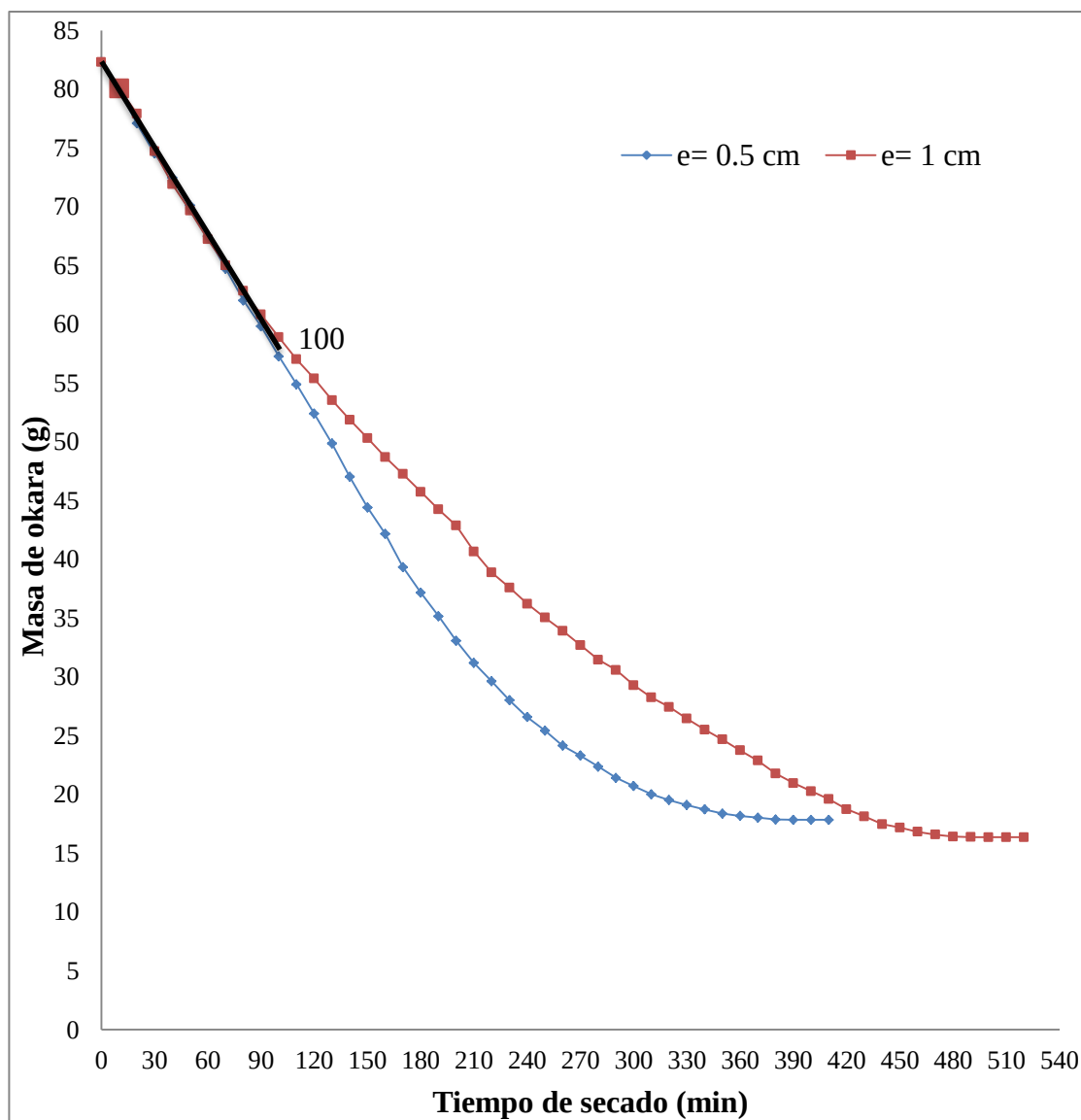
Tabla III-2 Promedio pérdida de peso en el secado de la okara

Tiempo (min)	t=65°C		t=75°C	
	e=1cm	e=0.5cm	e=1cm	e=0.5cm
	Promedio(g)	Promedio(g)	Promedio(g)	Promedio(g)
0	82.32	82.32	82.32	82.32
10	80.09	79.97	77.59	78.34
20	77.95	77.11	73.39	74.35
30	74.73	74.54	70.52	70.19
40	71.94	72.48	68.07	66.01
50	69.68	70.14	65.98	61.79
60	67.25	67.48	62.61	58.32
70	65.04	64.75	59.44	55.07
80	62.86	62.05	56.38	52.53
90	60.85	59.84	53.96	48.93
100	58.91	57.29	51.64	45.24
110	57.04	54.91	49.39	42.13
120	55.40	52.41	47.34	39.24
130	53.56	49.87	45.42	37.03
140	51.89	47.04	43.52	34.85
150	50.33	44.44	41.62	32.84
160	48.72	42.19	39.80	31.23
170	47.28	39.36	38.23	29.64
180	45.76	37.18	36.48	28.13
190	44.26	35.18	34.91	27.06
200	42.89	33.08	33.33	25.93
210	40.68	31.2	31.95	24.85
220	38.89	29.64	30.25	23.66
230	37.61	28.03	29.07	22.46
240	36.23	26.60	28.23	21.13
250	35.06	25.44	27.09	19.89
260	33.93	24.16	26.05	19.04
270	32.72	23.31	25.02	18.48
280	31.48	22.38	23.88	18.13
290	30.60	21.43	22.97	17.85
300	29.31	20.72	21.73	17.81
310	28.26	20.03	20.84	17.81
320	27.45	19.53	19.91	17.81

Tiempo (min)	t=65°C		t=75°C	
	e=1cm	e=0.5cm	e=1cm	e=0.5cm
	Promedio(g)	Promedio(g)	Promedio(g)	Promedio(g)
330	26.46	19.11	19.07	
340	25.52	18.74	18.35	
350	24.69	18.38	17.38	
360	23.77	18.18	17.07	
370	22.89	18.04	16.81	
380	21.80	17.88	16.67	
390	20.97	17.85	16.42	
400	20.29	17.85	16.37	
410	19.62	17.85	16.37	
420	18.75		16.37	
430	18.14			
440	17.48			
450	17.20			
460	16.84			
470	16.60			
480	16.42			
490	16.39			
500	16.37			
510	16.37			
520	16.37			

Fuente: Elaboración propia

Figura 3-1 Pérdida de peso de la okara a 65°C y diferentes espesores

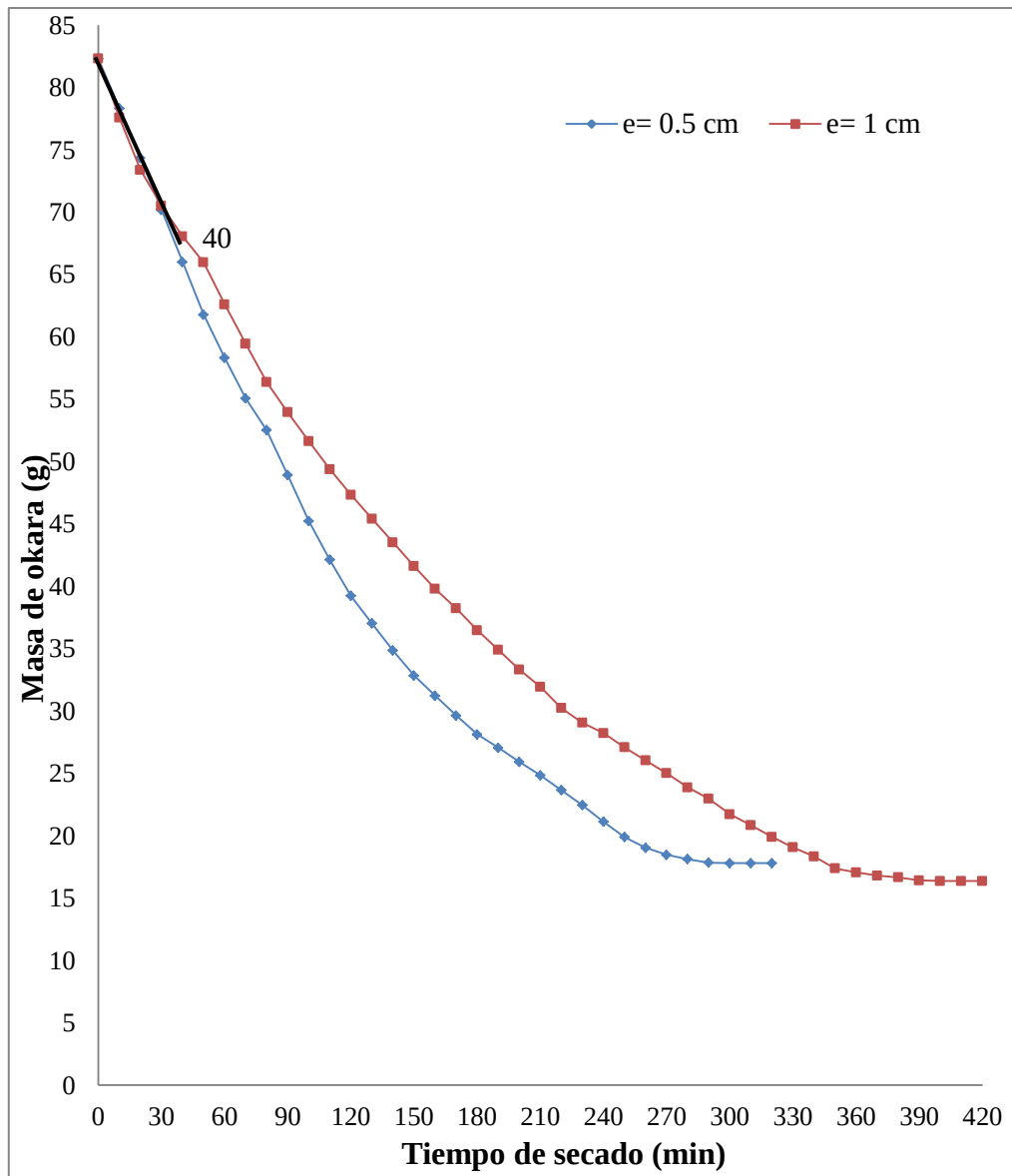


Si comparamos las curvas que operan a dos diferentes espesores de esta figura se puede apreciar que en el transcurso del inicio del secado hasta los 100 minutos las curvas de pérdida de peso disminuyen linealmente con el tiempo de secado formando una sola pendiente recta donde la velocidad de secado permanece constante, procediendo que se esta eliminando el agua libre que se encuentra en la muestra, que es el exceso de humedad que tiene la okara en la superficie cual es la más facil de eliminar, después de este tiempo las curvas se separan proporcionando distintas

velocidades de secado de acuerdo al comportamiento que tienen cada muestra con relación a sus espesores. La curva de 0.5 cm de espesor de la muestra va alcanzando, mayor pendiente proporcionando así una mayor velocidad de secado que la de 1 cm. Mientras más pequeño sea el espesor de la muestra el tiempo de secado será más rápido por lo que reduce la distancia que el calor tiene que recorrer hacia el centro a fin de llegar a la superficie y escaparse en forma de vapor de agua, o más conocido como evaporación del agua, por lo que se observa es mejor trabajar con espesores pequeños a fin de acelerar la velocidad de secado, tratándose así de exponer una mayor área superficial con lo que se facilitaría la transferencia de masa y de calor.

El espesor de la muestra influye considerablemente en el tiempo de secado, la muestra de okara que se seco 0.5 cm de espesor el tiempo que tarda en secar es de 410 minutos y con 1 cm de espesor es de 510 minutos, lo cual nos da una diferencia de 100 minutos lo que significa un gasto innecesario de energía. A parte de esto se observa que a 1 cm de espesor la okara se va endureciendo a medida que pasa el tiempo, debido a que la transferencia de calor está concentrada en el centro de la muestra lo que tarda más en secar.

Figura 3-2 Pérdida de peso de la okara a 75°C y diferentes espesores



En esta figura se observa en el tiempo que se inicia el secado hasta los 40 minutos se produce una sola pendiente recta, lo cual significa que las dos curvas en ese tiempo tienen una misma velocidad de secado, después de este tiempo las dos curvas se separan obteniendo cada curva una distinta velocidad de secado la de 0.5 cm tiene una velocidad de secado más rápida que la de 1 cm.

Se considera que la temperatura influye en el tiempo de secado y en la velocidad de la misma, sin embargo se puede producir la formación de endurecimiento (costras) y la reducción del volumen del producto por lo que al momento de retirar la okara seca de la bandeja se observa que en el centro de la muestra quedando húmeda.

El espesor de la muestra y la superficie de la bandeja influyen en el tiempo de secado, porque para una misma cantidad de masa las muestras que se colocaron en bandejas de mayor superficie y menor espesor secaron más rápido que las muestras colocadas en bandejas de menor superficie y mayor espesor porque se puede eliminar la humedad más fácilmente cuando hay mayor superficie de contacto y menor espesor, otra de las razones es que el espesor más delgado reduce la distancia en que el calor tiene que recorrer hasta el centro de la muestra a fin de llegar a la superficie y evaporarse.

Si usáramos una misma superficie con un espesor distinto, la cantidad de muestra para cada caso tendría que ser diferente y eso amerita otro estudio tomando el tamaño de muestra como variable.

Se ha observado que durante el secado de la okara a la temperatura de 75°C manifiestan cambios físicos y químicos en la superficie de la muestra a secar que conducen a la formación de una capa superficial dura e impenetrable. Este fenómeno, se denomina “acortezamiento”, reduce la velocidad de deshidratación y da lugar a que la okara se encuentre seca en la superficie y húmeda en su interior.

La profundidad que alcanza el calor debe de ser mínima para que alcance la penetración del calor hacia la okara, se llama la capacidad conductora de calor de la okara. Cuando más alta es la capacidad conductora más rápida y homogénea es el secado de la misma.

Por esta razón la okara tiene que estar bien esparcida y proporcionalmente a la bandeja. Por esto es que la altura o espesor óptimo para el secado de la okara es de 0.5 cm, de lo contrario, se produce un secado incompleto, tiempos de medición largos con es el de 1 cm de espesor y cuando es a menores espesores produce encostramiento, calcinaciones y resultados de análisis no reproducibles.

Mediante encostramiento poca, o bien, sin pérdida de humedad durante el proceso de secado, debido a que el espesor es pequeño la evaporación del agua es más rápido a mayor superficie.

A consecuencia de estas pruebas realizadas se puede llegar a decir que no se puede trabajar a temperaturas elevadas como 75°C ya que provoca la desnaturalización de las proteínas que tiene la misma, además que no se puede trabajar a un espesor de la muestra de 1 cm por lo que dificulta la eliminación del agua y tampoco a espesores más pequeños que de 0,5 cm porque provoca endurecimiento en la muestra formando costras en las mismas dificultando el levantamiento de la okara deshidratada, en la siguiente sección se verá con más detalle las observaciones que se realizaron durante las pruebas experimentales.

3.1.3 Observaciones en las pruebas de secado

Durante el secado de la okara se produjeron diversos cambios físicos y químicos. Uno de los cambios físicos importantes es la variación del volumen que experimenta la materia prima en el proceso de secado por convección forzada.

En el momento del secado sufre contracción de su masa lo cual varía su forma e influye mucho en su dureza, esta dureza es más notoria en el secado a 75°C de temperatura.

La contracción que se tiene en el secado no es perfectamente homogénea, al principio del secado, la okara mantiene su geometría original en la bandeja conforme avanza el tiempo de secado la contracción va siendo acompañada por deformaciones, lo cual influye en el volumen de la muestra.

En las pruebas que se realizaron se obtuvieron distintas pruebas con las distintas temperaturas de 65°C y 75°C, se advirtió que durante el secado de la okara a mayor temperatura el tiempo es más rápido, la eliminación del agua es más rápido que a la temperatura de 65°C.

Figura 3-3 Diferencia de color en el secado a diferentes temperaturas



Fuente: Elaboración propia

Se observa en esta figura la diferencia que existe entre la de 65°C y la de 75°C de temperatura, en la de menor temperatura la okara seca tiene un color crema, textura consistente a diferencia a la de mayor temperatura que tiene un color más oscuro, de textura quebradiza y se genera la formación de una capa dura e impenetrable durante el secado lo que dificulta la penetración del calor hacia el centro de la muestra dando lugar a que la okara este seco en la superficie y húmedo en su interior.

Figura 3-4 Secado de la okara a $t = 65^{\circ}\text{C}$



Fuente: Elaboración propia

Textura

La textura de los productos secados es un factor importante en la aceptación y rechazo de estos alimentos. La temperatura de secado tiene un efecto significativo sobre la textura.

En este caso en el secado de la okara, al trabajar con estas dos temperaturas de operación de secado (65°C y 75°C), se notaron que existen diferencias, a 65°C de temperatura se observó que la textura es consistente, se puede retirar fácilmente de la bandeja, sin que haya pérdidas y no genera costras, en cambio a mayor temperatura (75°C) se generó la formación de costras en la parte inferior y superior de la okara seca, haciendo más difícil retirarlo de las bandejas generando pérdidas en la misma y la textura es quebradizo.

Figura 3-5 Secado de la okara a $t = 75^{\circ}\text{C}$



Fuente: Elaboración propia

Color

Uno de los principales problemas que se presentan durante el secado es el oscurecimiento no enzimático.

El color que presenta la de menor temperatura es un color crema, en cambio el de mayor temperatura el color más oscuro, ya que a trabajar con esta temperatura provoca la caramelización de los azúcares, de la fibra, desnaturalización de proteínas y oxidación de los ácidos grasos insaturados, además a temperaturas menores las células son capaces de incrementar la proporción de ácidos grasos insaturados, los cuales son esenciales para el correcto funcionamiento de nuestro cuerpo y su falta se asocia con las enfermedades coronarias y un elevado nivel de colesterol.

Esto quiere decir que el producto más aceptable o más apto para el consumo es el de 65°C de temperatura, porque conserva mayor cantidad de proteínas y ácidos insaturados al momento de la deshidratación, su textura es más aceptable que el otro producto, también ya que la okara contiene azúcar y esta puede producirse durante el secado una formación de costra que impermeabiliza la superficie haciendo más difícil la penetración del calor hacia la muestra.

3.1.4 Humedad de la okara

Para el cálculo de la humedad de la okara se realiza la siguiente ecuación.

$$\text{Humedad} = \frac{m_i - SS}{m_i} * 100\% \quad (3-1)$$

Donde:

SS=Sólido seco

m_i = Masa inicial

Por ejemplo:

Para $t = 65^\circ$ y $e = 1$ cm, se tiene:

SS = 16.37 g

$m_i = 82.32$ para $t=0$

$$\text{Humedad} = \frac{82.32 - 16.37}{82.32} * 100 = 80.11\%$$

Este cálculo de porcentaje de humedad nos indica con cuando de humedad contenía la muestra al momento de iniciar el secado y la humedad que tiene al final del mismo.

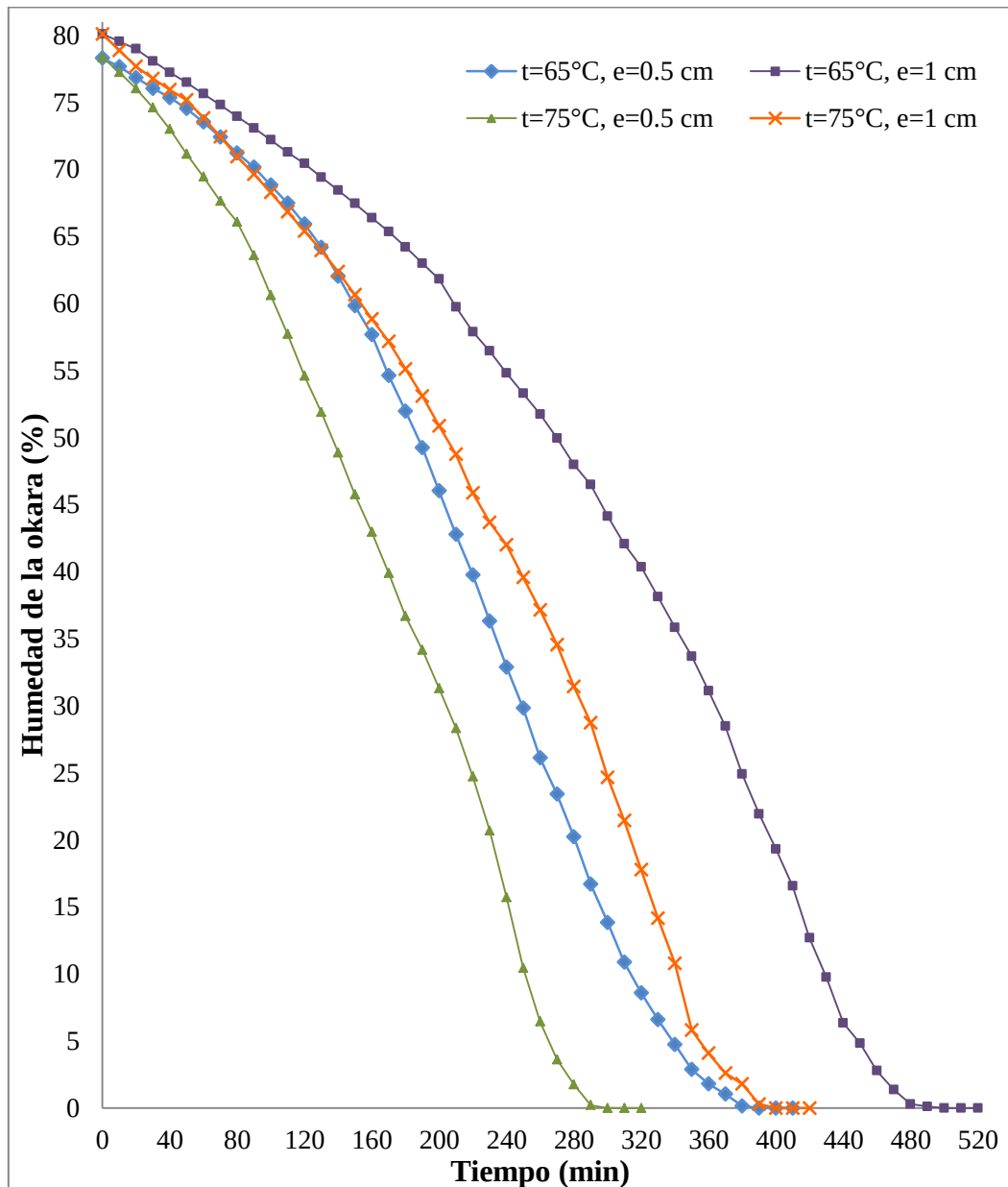
Tabla III-3 Porcentaje de humedad de la okara

Tiempo (min)	t=65°C		t=75°C	
	e=1cm	e=0.5cm	e=1cm	e=0.5cm
	H%	H%	H%	H%
0	80.11	78.32	80.11	78.36
10	79.56	77.68	78.90	77.27
20	79.00	76.85	77.69	76.05
30	78.09	76.05	76.79	74.63
40	77.24	75.37	75.95	73.02
50	76.51	74.55	75.19	71.18
60	75.66	73.55	73.85	69.46
70	74.83	72.43	72.46	67.66
80	73.96	71.23	70.96	66.10
90	73.10	70.17	69.66	63.60
100	72.21	68.84	68.30	60.63
110	71.30	67.49	66.86	57.73
120	70.45	65.94	65.42	54.61
130	69.44	64.21	63.96	51.90
140	68.45	62.05	62.39	48.90
150	67.47	59.83	60.67	45.77
160	66.40	57.69	58.87	42.97
170	65.38	54.65	57.18	39.91
180	64.23	51.99	55.13	36.69
190	63.01	49.26	53.11	34.18
200	61.83	46.04	50.89	31.32
210	59.76	42.79	48.76	28.33
220	57.91	39.78	45.88	24.73
230	56.47	36.32	43.69	20.70
240	54.82	32.89	42.01	15.71
250	53.31	29.83	39.57	10.46
260	51.75	26.12	37.16	6.46
270	49.97	23.42	34.57	3.63
280	48.00	20.24	31.45	1.77
290	46.50	16.71	28.73	0.22
300	44.15	13.85	24.67	0.00
310	42.07	10.88	21.45	0.00
320	40.36	8.60	17.78	0.00
330	38.13	6.59	14.16	
340	35.85	4.75	10.79	
350	33.70	2.88	5.81	
360	31.13	1.82	4.10	
370	28.48	1.05	2.62	
380	24.91	0.17	1.80	
390	21.94	0.00	0.30	
400	19.32	0.00	0.00	
410	16.56	0.00	0.00	
420	12.69		0.00	
430	9.76			
440	6.35			
450	4.83			

Tiempo (min)	t=65°C		t=75°C	
	e=1cm	e=0.5cm	e=1cm	e=0.5cm
	H%	H%	H%	H%
460	2.79			
470	1.39			
480	0.30			
490	0.12			
500	0.00			
510	0.00			
520	0.00			

Fuente: Elaboración propia

Figura 3-6 Porcentaje de Humedad durante el secado de la okara



En esta figura se observa que la humedad de la muestra va disminuyendo conforme se va secando la okara hasta alcanzar un equilibrio donde ya no puede perder más humedad de la que contiene la muestra esta es la humedad de equilibrio, la curva de 75°C con 1 cm de espesor es similar a la de 65°C con 0.5 cm de espesor desde el inicio del secado hasta los 150 minutos.

Los datos de humedad inicial y final que tiene cada prueba se puede ver en la tabla III-4.

Tabla III-4 Valores de peso inicial, peso final, humedad inicial y humedad final a diferentes espesores con temperaturas de 65 y 75°C

Temperatura	Espesor (cm)	Peso inicial (g)	Peso final (g)	Humedad inicial (%)	Humedad final (%)
65°C	0.5	82.32	17.85	78.32	0.17
	1	82.32	16.37	80.11	0.12
75°C	0.5	82.32	17.81	78.36	0.22
	1	82.32	16.37	80.11	0.30

Fuente: Elaboración propia

En esta tabla se tienen los datos de humedad inicial que tiene la okara y la humedad con la que sale después del secado de la misma a diferentes temperaturas y espesores.

Se encuentra variación en la humedad inicial de las muestras ya que algunas de las muestras se realizó en días en que la humedad relativa del ambiente era bastante alto (ver anexo B) ya que la okara es muy higroscópica.

3.1.5 Contenido de humedad en base seca

Cálculo de humedad

Para la caracterización de las variables de proceso de secado de okara se tomaron en cuenta los resultados obtenidos en laboratorio de la pérdida de peso de okara seca de la tabla III-2, determinando el contenido de humedad en base seca según ec, (1-1) y en base al diseño experimental planteado.

$$X_s = \frac{m_i - SS}{SS} \quad (1-1)$$

$$X_s = \frac{0.8232 - 0.1637}{0.1637} = 4.02871 \text{ kgH}_2\text{O/kgSS}$$

Por ejemplo:

Para $T = 65^\circ$ y $e = 1$ cm, se tiene

X_s = Humedad en base seca, (kg H_2O /kg sólido seco)

$m_i = 0.8232$ kg para $t=0$

$SS = 0.1637$ kg para $t = 420$ min

Se utiliza los datos de la tabla III-2 donde se representan los promedios de pérdida de peso en el secado de la okara de las distintas pruebas que se hicieron, ya que estos datos se encuentran expresados en gramos (g) también sirven para reemplazar en esta ecuación por lo que nos da lo mismo si trabajamos con gramos o kilogramos ya que nos sale el mismo resultado, pero esta ecuación está expresada en kilogramos para realizar la cinética del secado.

Tabla III-5 Contenido de humedad en base seca

Tiempo (hora)	T= 65°C e = 1 cm	T= 65°C e = 0.5 cm	T=75°C° e = 1 cm	T=75°C e = 0.5 cm
	X(kgH ₂ O/ kgSS)	X(kgH ₂ O/k gSS)	X(kgH ₂ O/k gSS)	X(kgH ₂ O/k gSS)
0.0000	4.02871	3.61176	4.02871	3.62212
0.1667	3.89249	3.48011	3.73977	3.39865
0.3333	3.76176	3.31989	3.48320	3.17462
0.5000	3.56506	3.17591	3.30788	2.94104
0.6667	3.39462	3.06050	3.15822	2.70634
0.8333	3.25657	2.92941	3.03054	2.46940
1.0000	3.10812	2.78039	2.82468	2.27456
1.1667	2.97312	2.62745	2.63103	2.09208
1.3333	2.83995	2.47619	2.44411	1.94947
1.5000	2.71717	2.35238	2.29627	1.74733
1.6667	2.59866	2.20952	2.15455	1.54015
1.8333	2.48442	2.07619	2.01710	1.36552
2.0000	2.38424	1.93613	1.89188	1.20326
2.1667	2.27184	1.79384	1.77459	1.07917
2.3333	2.16982	1.63529	1.65852	0.95677
2.5000	2.07453	1.48964	1.54246	0.84391
2.6667	1.97618	1.36359	1.43128	0.75351
2.8333	1.88821	1.20504	1.33537	0.66423
3.0000	1.79536	1.08291	1.22847	0.57945
3.1667	1.70373	0.97087	1.13256	0.51937
3.3333	1.62004	0.85322	1.03604	0.45592
3.5000	1.48503	0.74790	0.95174	0.39528
3.6667	1.37569	0.66050	0.84789	0.32847
3.8333	1.29750	0.57031	0.77581	0.26109
4.0000	1.21319	0.49020	0.72450	0.18641
4.1667	1.14172	0.42521	0.65486	0.11679
4.3333	1.07269	0.35350	0.59133	0.06906
4.5000	0.99878	0.30588	0.52841	0.03762
4.6667	0.92303	0.25378	0.45877	0.01797
4.8333	0.86927	0.20056	0.40318	0.00225
5.0000	0.79047	0.16078	0.32743	0.00000
5.1667	0.72633	0.12213	0.27306	0.00000
5.3333	0.67685	0.09412	0.21625	0.00000
5.5000	0.61637	0.07059	0.16494	
5.6667	0.55895	0.04986	0.12095	
5.8333	0.50825	0.02969	0.06170	
6.0000	0.45205	0.01849	0.04276	
6.1667	0.39829	0.01064	0.02688	
6.3333	0.33170	0.00168	0.01833	

Tiempo (hora)	T= 65°C e = 1 cm	T= 65°C e = 0.5 cm	T=75°C e = 1 cm	T=75°C e = 0.5 cm
	X(kgH ₂ O/ kgSS)	X(kgH ₂ O/k gSS)	X(kgH ₂ O/k gSS)	X(kgH ₂ O/k gSS)
6.5000	0.28100	0.00000	0.00305	
6.6667	0.23946	0.00000	0.00000	
6.8333	0.19853	0.00000	0.00000	
7.0000	0.14539		0.00000	
7.1667	0.10812			
7.3333	0.06781			
7.5000	0.05070			
7.6667	0.02871			
7.8333	0.01405			
8.0000	0.00305			
8.1667	0.00122			
8.3333	0.0000			
8.5000	0.0000			
8.6667	0.0000			

Fuente: Elaboración propia

Agua evaporada durante el secado de la okara

La evaporación es un proceso endotérmico donde nos presenta la pérdida del agua de la okara que se va eliminado en el transcurso del secado se demuestra la eliminación del agua aplicando la siguiente ecuación:

$$\text{Masa de agua evaporada} = m_i - m_j \quad (3-2)$$

Donde:

m_i =Masa inicial de la okara

m_j =Masa final de la okara

Para realizar este cálculo se toma los datos de la tabla III-2

por ejemplo para 65°C 1 cm de espesor.

Masa de agua evaporada = 82.32 g–80.09 g = 2.23 gramos de agua que se evapora en un tiempo de 10 minutos.

En tabla se observa la eliminación de agua que sucede en el proceso de secado de la okara en cada 10 minutos de tiempo. Como es de suponer en la prueba que se realizó a 75°C de temperatura se evaporó más rápido el agua que la de 65°C de temperatura.

En la tabla III-6 se registra la pérdida de agua que se va evaporando o eliminando en el transcurso del secado de la okara, se observa que a medida que avanza el tiempo la eliminación de agua es mayor dependiendo de las condiciones de temperatura y espesor a las que se está secando.

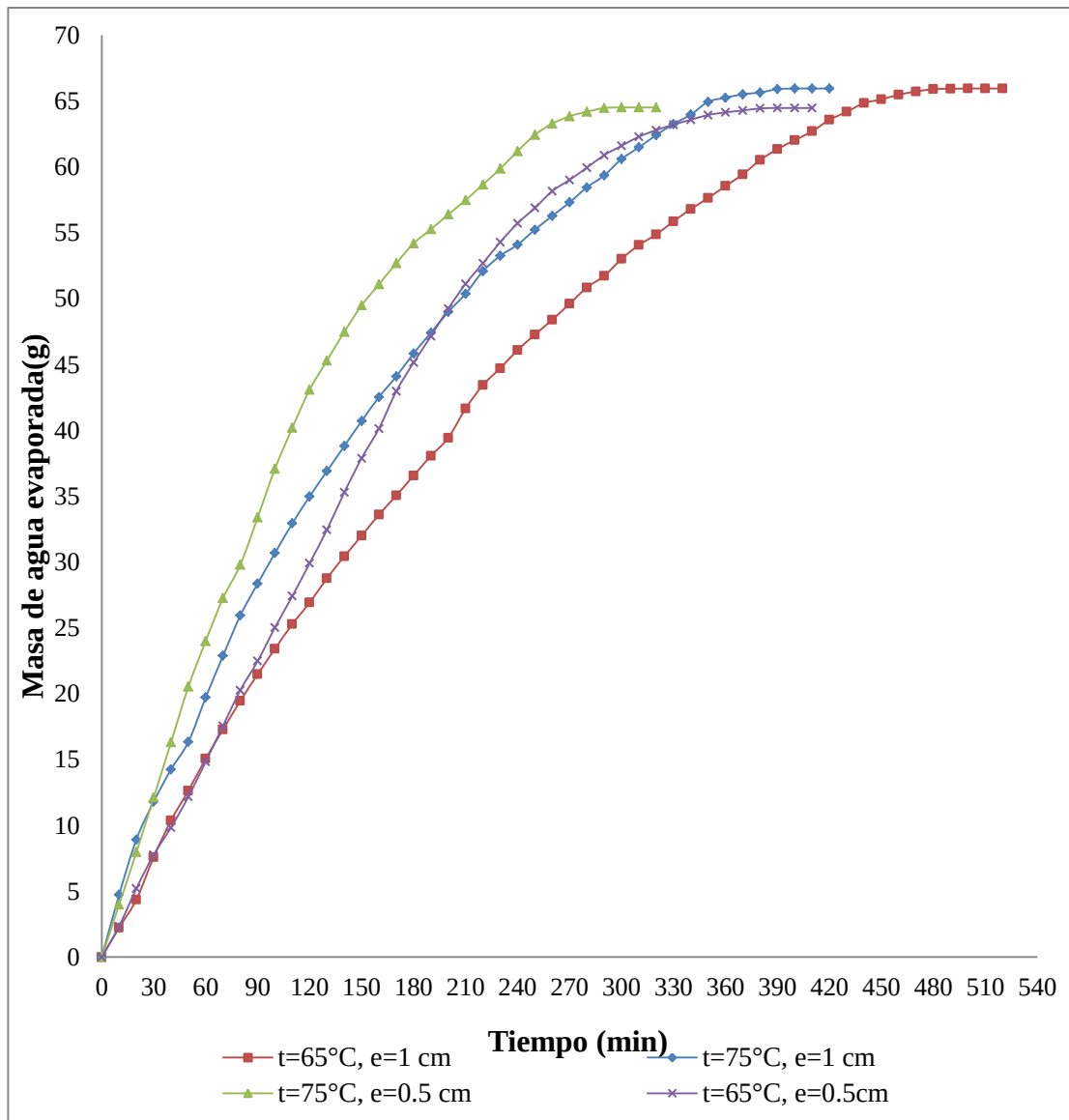
Tabla III-6 Agua evaporada

Tiempo (min)	Masa de agua evaporada (g)			
	T=65°C e= 1cm	T=65°C e= 0.5cm	T=75°C e= 1cm	T=75°C e= 0.5cm
0	0.000	0.000	0.000	0.000
10	2.230	2.350	4.730	3.985
20	4.370	5.215	8.935	7.975
30	7.595	7.780	11.805	12.130
40	10.380	9.840	14.255	16.315
50	12.640	12.185	16.345	20.530
60	15.070	14.840	19.715	24.005
70	17.280	17.575	22.880	27.255
80	19.460	20.270	25.940	29.790
90	21.475	22.485	28.360	33.395
100	23.410	25.030	30.680	37.085
110	25.280	27.415	32.930	40.195
120	26.925	29.910	34.985	43.085
130	28.760	32.455	36.905	45.295
140	30.435	35.285	38.805	47.475
150	31.990	37.880	40.705	49.480
160	33.605	40.130	42.525	51.090
170	35.040	42.960	44.095	52.680
180	36.565	45.145	45.840	54.190
190	38.065	47.140	47.415	55.265
200	39.435	49.240	48.990	56.390
210	41.645	51.120	50.375	57.470
220	43.430	52.680	52.075	58.665
230	44.710	54.295	53.255	59.865
240	46.095	55.720	54.095	61.195
250	47.260	56.880	55.235	62.430
260	48.395	58.165	56.275	63.285
270	49.600	59.015	57.300	63.840

Tiempo (min)	Masa de agua evaporada (g)			
	T=65°C e= 1cm	T=65°C e= 0.5cm	T=75°C e= 1cm	T=75°C e= 0.5cm
280	50.845	59.940	58.440	64.190
290	51.725	60.890	59.350	64.470
300	53.015	61.605	60.590	64.515
310	54.065	62.295	61.485	64.515
320	54.870	62.790	62.415	64.515
330	55.860	63.215	63.255	
340	56.805	63.585	63.970	
350	57.635	63.940	64.940	
360	58.555	64.145	65.250	
370	59.435	64.285	65.510	
380	60.520	64.440	65.650	
390	61.350	64.475	65.900	
400	62.035	64.475	65.955	
410	62.700	64.475	65.955	
420	63.575		65.955	
430	64.180			
440	64.845			
450	65.125			
460	65.485			
470	65.720			
480	65.905			
490	65.935			
500	65.955			
510	65.955			
520	65.955			

Fuente: Elaboración propia

Figura 3-7 Agua evaporada de la okara



En la figura 3-7 se observa la evaporación o eliminación de agua a medida que transcurre el tiempo, se nota que al inicio de la curva no se evapora gran cantidad de agua ya que en esta etapa recién se está calentando la muestra, pero a medida que pasa el tiempo se va eliminando cada vez más cantidad de agua, hasta alcanzar un punto de equilibrio donde ya no hay agua que eliminar.

En las distintas pruebas que se realizó, se comprueba que a mayor temperatura de secado es más rápida la evaporación y más cuando los espesores son pequeños.

Si se compara la figura 3-6 con la 3-7, se percibe que estas dos figuras son muy diferentes por lo que una es de humedad que tiene la okara y la otra la eliminación del agua de la misma por eso es al revés la figura, en la de la humedad de la okara va disminuyendo con el tiempo esta va aumentando a medida que pasa el tiempo la eliminación del agua, esto demuestra que con el secado se puede observar todos los fenómenos que ocurre durante el mismo como la humedad que tiene y su eliminación del agua.

Al analizar con detalle la pérdida de agua de la muestra se puede observar que en un tiempo prolongado solo se pierde pequeñas cantidades de masa de agua, al ver esta situación se puede despreciar este tiempo inútil.

Al despreciar ese tiempo podemos hallar un tiempo óptimo de secado para que no haya una pérdida de gasto energético inútil en el diseño del secador.

Tabla III-7 Datos de tiempo de secado

Temperatura	Espesor (cm)	Tiempo real (min)	Tiempo optimo (min)	Humedad relativa inicial (%)	Humedad relativa final (%)
65°C	0.5	410	340	78.32	4.75
	1	520	450	80.11	4.83
75°C	0.5	330	260	78.36	6.46
	1	420	350	80.11	5.81

Fuente: Elaboración propia

En esta tabla se encuentran los datos para encontrar la cinética de secado

En esta tabla nos muestra que hay una diferencia entre el tiempo real el cual obtuvimos al realizar las pruebas de secado para cada condición con la que obtuvimos al realizar la ec (3-2) la cual nos indica la evaporación del agua. Obtenemos nuevos resultados en el tiempo de secado de cada prueba que se realizó para el secado de la okara a 65°C con 0.5 cm de espesor con los datos obtenidos experimentales se reduce a un tiempo de 340 minutos en lo que solo se pierde 0.89 gramos de agua, para el secado a 65°C con 1 cm, un tiempo de 450 minutos el cual la pérdida de masa de agua es de 0.83 gramos, a 75°C con 0.5 cm la pérdida de masa de agua de 1.23 gramos y

para 75°C con 1 cm de espesor una pérdida de masa de agua de 1.015 gramos. Se utiliza este tiempo óptimo porque se muestra que en este tiempo no se pierde. Con estos nuevos datos trabajamos para hallar la cinética de secado de la okara una apreciable cantidad de masa de agua eliminada.

3.2 DETERMINACIÓN DE LA CINÉTICA DE SECADO

Para la determinación de la cinética se tomaron los valores de la prueba de 65°C y 0.5 cm para el diseño del equipo.

Se define la velocidad de secado por la pérdida de humedad del sólido húmedo en una unidad de tiempo, y más exactamente por el cociente diferencial ($-\frac{dX}{dt}$) operando en condiciones constantes de secado, es decir con aire cuyas condiciones (temperaturas, presión, humedad y velocidad) permanecen constantes con el tiempo.

$$W = \frac{SS}{A} \left(-\frac{dX}{dt} \right) \quad (1-3)$$

Donde:

SS = Peso de sólido seco, (kg)

A = Área de la superficie expuesta, (m²)

W = Velocidad de secado, (kg/m²*h)

X = Humedad en base seca, (kg H₂O/kg sólido seco)

Método de tres puntos:

Para hallar la función a través de la cual se encuentre una correlación de los datos que representa la variación de la humedad en función al tiempo, se plantea un modelo potencial en el cual se relaciona la velocidad de secado con la humedad del sólido en una ecuación de la forma:

$$y = ax^n$$

Para determinar la velocidad de secado en base a los datos de humedad Vs. Tiempo obtenidos en las experiencias de laboratorio, se utilizó el método de los tres puntos, el mismo que sirve para encontrar la pendiente en cada uno de los puntos observados, por lo que para determinar la cinética de secado se plantea la ecuación (3-4).

$$-\frac{dX}{dt} = k X^n \quad (3-4)$$

Donde:

k = Constante para la cinética

n = Número de orden de la cinética

h = Intervalo de tiempo, h

y_0, y_1, y_2 = datos tomados de las tablas.

$h = 0.1667$ h

$$y_a = \frac{-3y_0 + 4y_1 - y_2}{2h} \quad (3-5)$$

$$y_b = \frac{-y_0 + y_2}{2h} \quad (3-6)$$

$$y_c = \frac{y_0 - 4y_1 + 3y_2}{2h} \quad (3-7)$$

Con los datos de la tabla III-5 se reemplazan las ecuaciones, (3-5), (3-6) y (3-7), para hallar los cálculos de la cinética de secado con el método de los tres puntos, con estos con un intervalo de tiempo de 0.1667 horas.

Los demás cálculos que se realizaron para obtener la cinética de secado se encuentran en el anexo E.

Posteriormente las pendientes deben correlacionarse con la variación de la humedad, linealizando la ecuación potencial planteada, de la siguiente forma:

$$\ln -\frac{dX}{dt} = \ln k + n \ln X$$

$$y = a + bX$$

Donde:

$$n = a$$

$$K = e^b$$

De donde se obtienen los datos de K y el orden n de la ecuación cinética.

Se realizó solo los cálculos para hallar la cinética de secado con el ensayo a 65°C y 0.5 cm de espesor, lo demás cálculos para las demás pruebas que se realizaron se encuentran en el anexo E.

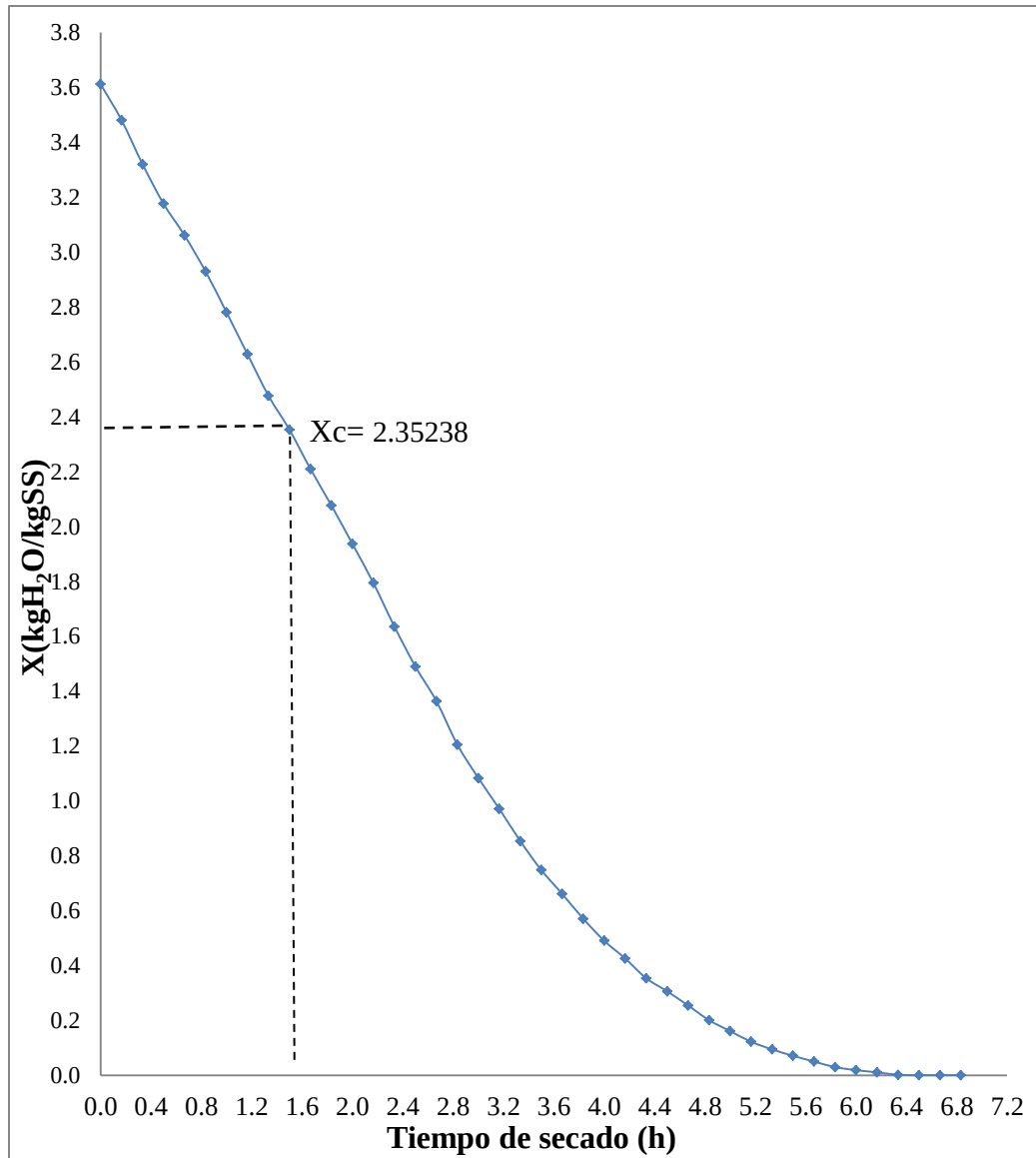
Tabla III-8 Datos del contenido de humedad a t= 65°C e= 0.5 cm

Tiempo (horas)	X(kgH₂O/kgSS)	-(dX/dt)	Ln X	Ln (-(dX/dt))
0.1667	3.48011	1.00983	1.24706	0.00978
0.3333	3.31989	0.93091	1.19993	-0.07159
0.5000	3.17591	0.81499	1.15559	-0.20458
0.6667	3.0605	0.73598	1.11858	-0.30656
0.8333	2.47619	0.68557	0.90672	-0.37750
1.0000	2.35238	0.66038	0.85543	-0.41494
1.1667	1.48964	0.65867	0.39853	-0.41754
1.3333	1.08291	0.63934	0.07965	-0.44732
1.5000	0.74790	0.58643	-0.29049	-0.53371
1.6667	0.66050	0.55198	-0.41476	-0.59425
1.8333	0.57031	0.51836	-0.56158	-0.65709
2.0000	0.49020	0.44277	-0.71294	-0.81470
2.1667	0.42521	0.41002	-0.85517	-0.89156
2.3333	0.35350	0.35792	-1.03987	-1.02745
2.5000	0.30588	0.30444	-1.18456	-1.18928
2.6667	0.20056	0.27894	-1.60664	-1.27676
2.8333	0.16078	0.24950	-1.82772	-1.38830
3.0000	0.12213	0.20330	-2.10267	-1.59307
3.1667	0.09412	0.14675	-2.36318	-1.91902
3.3333	0.07059	0.12883	-2.65087	-2.04926
3.5000	0.04986	0.11932	-2.99854	-2.12598

Fuente: Elaboración propia

Con estos datos donde sacamos el logaritmo natural del contenido de humedad en base seca y de la velocidad de secado se linealiza y se encuentra la velocidad de secado antecrítica y poscrítica.

Figura 3-8 Contenido de humedad en función del tiempo



La figura 3-8 pertenece a los datos obtenidos en la tabla III-5 a una temperatura de 65°C con 0.5 cm de espesor, sólido comienza a calentarse y con ello crece la velocidad de evaporación.

Se puede observar que al principio la humedad del sólido disminuye linealmente con el tiempo de secado porque en esta etapa es donde el sólido comienza a calentarse eliminando la humedad libre y por ello crece la velocidad de evaporación del agua, eventualmente el calor penetra hasta el centro de la muestra y durante este periodo la

velocidad de secado permanece constante. La velocidad es máxima porque los mecanismos de transporte de agua del interior del sólido a la superficie son lo suficientemente rápidos para compensar la evaporación, el agua se elimina conforme llega a la superficie, el calor es lo suficiente para vaporizarla hasta que alcanza un valor de humedad crítica.

La humedad desciende por debajo humedad crítica X_c , es porque ya no llega suficiente agua a la superficie para mantener la máxima evaporación. En este momento puede que se empiece a eliminar el agua ligada. El sólido aumenta de temperatura y la velocidad de secado desciende tendiendo a hacerse cero conforme se acerca a la humedad de equilibrio.

Con los datos obtenidos por los métodos de los tres puntos se obtiene:

$$y = 0.88731 - 1.13555X$$

$$a = 0.88731$$

$$b = -1.13555$$

Donde: $n = a = 0.88731$ $k = e^b = e^{-1.13555} = 0.321245$ se reemplaza los datos en la siguiente ecuación:

Anticrítica

$$\frac{dX}{dt} = 0.88731 X^{0.321245} \quad (3-8)$$

$$y = 0.51887 - 0.52353X$$

$$a = 0.51887$$

$$b = -0.52353$$

$$n = 0.51887 \quad k = 0.59243$$

Poscrítica

$$\frac{dX}{dt} = 0.51887 X^{0.59243} \quad (3-9)$$

Con estos datos se encuentra los valores de velocidad de secado.

X_c = humedad crítica

$$X_c = 2.35238$$

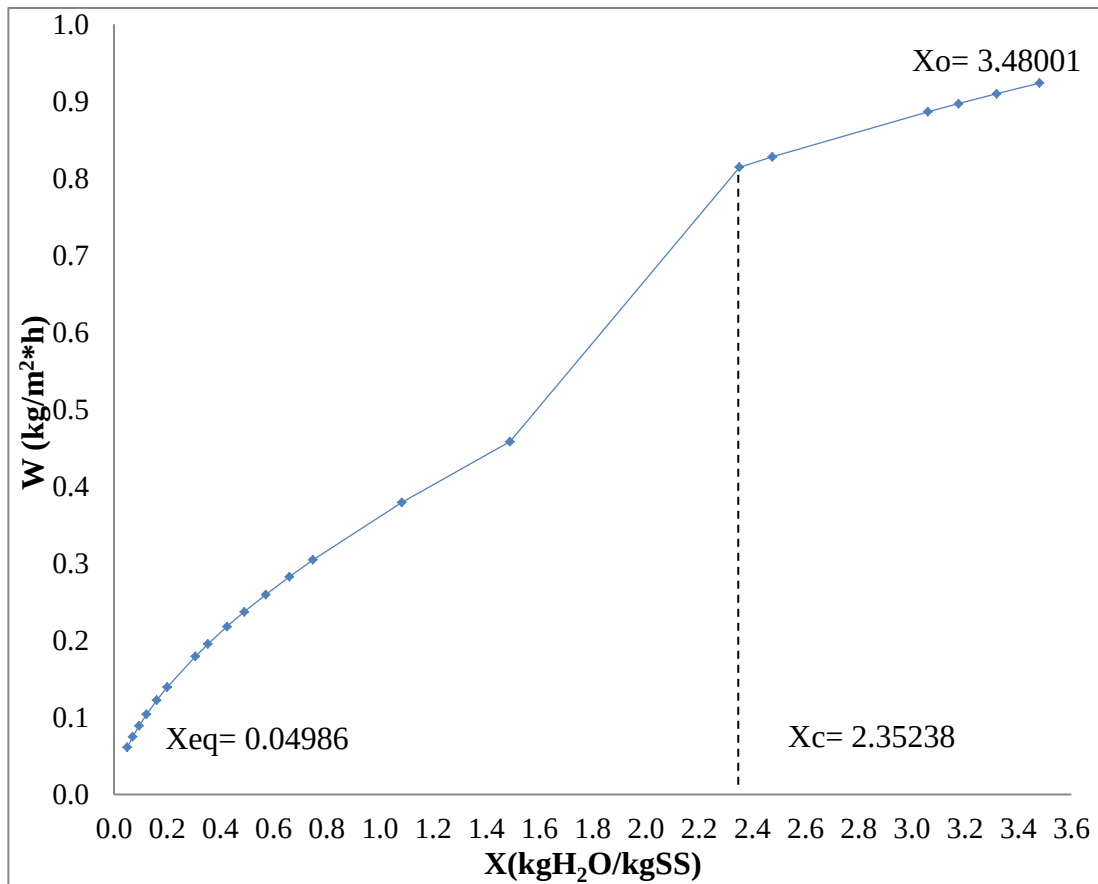
Sustituyendo los datos de contenido de humedad que se encuentra en la tabla III-9 en la ecuación (3-8) hasta llegar a la humedad crítica después de este punto se reemplaza en la ecuación (3-9) para encontrar $(-dX/dt)$, obteniendo estos datos se los reemplaza en la ec. (3-3) con se obtiene la velocidad de secado (W) que se observa en la misma tabla.

Tabla III-9 Datos de la velocidad de secado

Tiempo (horas)	X(kgH₂O/kgSS)	-dX/dt	W(kg/m²*h)
0.1667	3.48011	1.32452	0.92354
0.3333	3.31989	1.30462	0.90967
0.5000	3.17591	1.28617	0.89680
0.6667	3.0605	1.27097	0.88620
0.8333	2.47619	1.18734	0.82789
1.0000	2.35238	1.16794	0.81436
1.1667	1.48964	0.65705	0.45814
1.3333	1.08291	0.54394	0.37927
1.5000	0.74790	0.43684	0.30459
1.6667	0.66050	0.40583	0.28297
1.8333	0.57031	0.37202	0.25940
2.0000	0.49020	0.34012	0.23715
2.1667	0.42521	0.31263	0.21799
2.3333	0.35350	0.28023	0.19539
2.5000	0.30588	0.25721	0.17934
2.6667	0.20056	0.20030	0.13966
2.8333	0.16078	0.17571	0.12252
3.0000	0.12213	0.14930	0.10410
3.1667	0.09412	0.12795	0.08921
3.3333	0.07059	0.10790	0.07523
3.5000	0.04986	0.08781	0.06123

Fuente: Elaboración propia

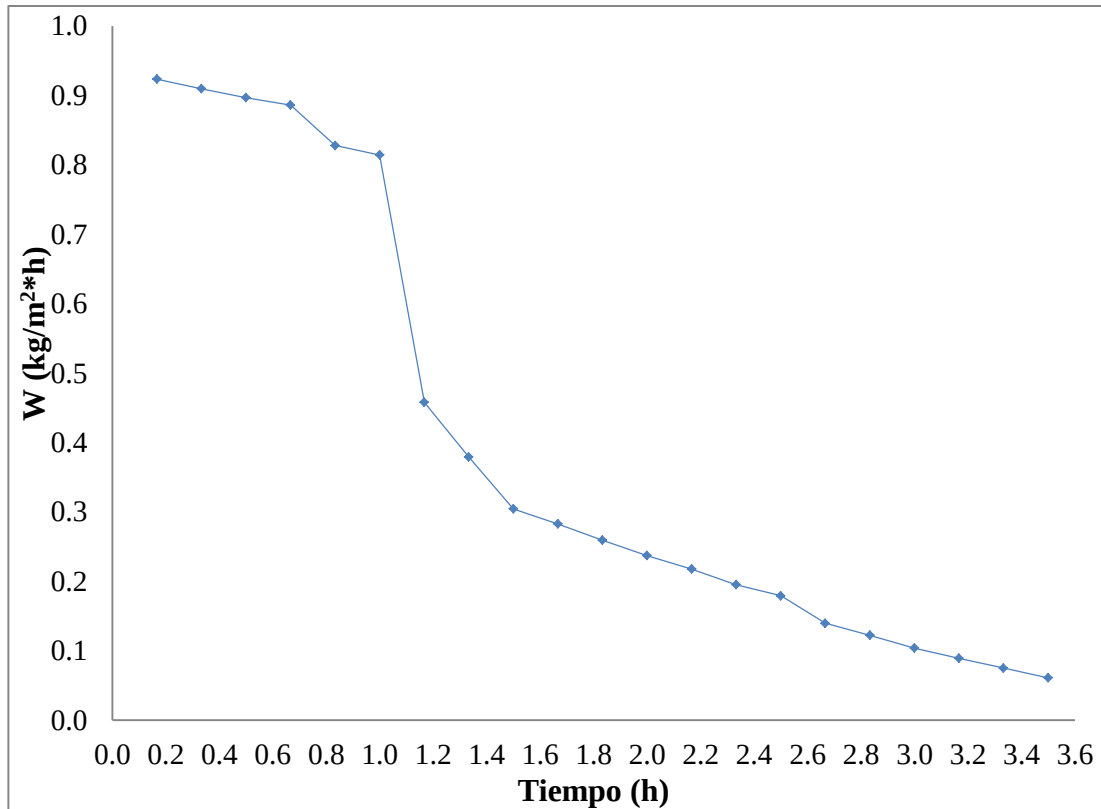
Figura 3-9 Velocidad de secado en función del contenido de humedad



Se muestra el comportamiento de la velocidad de secado que se tiene en función del contenido de humedad en base seca, desde el inicio la humedad del sólido disminuye linealmente con el tiempo de secado donde la velocidad de secado permanece constante en esta etapa, donde se evapora la humedad libre que tiene la okara en este tiempo la temperatura del sólido se mantiene igual a la temperatura del gas húmedo que es el aire que se encuentra en el secador, ya que se mantiene el equilibrio alcanzado al final en la etapa de calentamiento

Cuando la humedad desciende por debajo de un nivel determinado, denominado humedad crítica X_c , ya no llega suficiente agua a la superficie para mantener la máxima evaporación. En este momento empieza a eliminar el agua ligada. El sólido aumenta de temperatura y la velocidad de secado desciende tendiendo a hacerse cero conforme se acerca a la humedad de equilibrio, X_{eq} .

Figura 3-10 Velocidad de secado en función del tiempo



En esta figura se observó la misma situación que se tiene en la figura 3-10, solo que en esta figura está en función del tiempo, solo es otra forma de mostrar el comportamiento de la velocidad de secado en función del tiempo ya, que se va disminuyendo a medida que pasa el tiempo.

Velocidad anticrítica o constante

Para encontrar la velocidad crítica de la cinética se utilizó la siguiente ecuación:

$$W_c = \frac{SS}{A} \left(-\frac{dX}{dt} \right) \quad (3-10)$$

$$W_c = \frac{SS}{A} \left(\frac{X_i - X_c}{\Delta \theta} \right) \quad (3-11)$$

Donde:

W_c = Velocidad de secado constante

A = Superficie expuesta al secado

SS=Sólido seco

X_i = Humedad en base seca inicial

X_c = Humedad en base seca crítica

Datos:

$$A = 0.0256 \text{ m}^2$$

$$SS = 0.01785 \text{ kg}$$

$$X_i = 3.48011 \text{ kgH}_2\text{O/Kg SS}$$

$$X_c = 2.35238 \text{ kgH}_2\text{O/Kg SS}$$

$$t_i = 0.1667 \text{ h}$$

$$t_c = 1 \text{ h}$$

$$W_c = \frac{0.01785}{0.0256} \left(\frac{3.48011 - 2.35238}{1 - 0.1667} \right)$$

$$W_c = 0.69727(1.3533)$$

$$W_c = 0.94362 \text{ kg/m}^2\text{h}$$

$$W_c = 0.94 \text{ kg/m}^2\text{h}$$

Tiempo anticrítico

$$\theta_a = \frac{SS}{A} \frac{X_i - X_c}{W_c} \quad (3-12)$$

Donde:

θ_a = Tiempo de secado del período antecrítico

SS = Peso del sólido seco

A = Área de la superficie expuesta

X_i = Humedad inicial

X_c = Humedad crítica

W_c = Velocidad de secado constante

X_{eq} = Humedad de equilibrio o final.

Datos:

$$SS = 0.01785 \text{ kg}$$

$$A = 0.0256 \text{ m}^2$$

$$X_i = 3.48011$$

$$X_c = 2.35238$$

$$W_c = 0.94362 \text{ kg/m}^2\text{h}$$

Solución

$$\theta_a = \frac{0.01785}{0.0256} \left(\frac{3.48011 - 2.35238}{0.94362} \right)$$

$$\theta_a = 0.69727(1.195110)$$

$$\theta_a = 0.83331 \text{ h}$$

Velocidad proscritico o decreciente

$$W_D = \frac{SS}{A} \left(\frac{X_c - X_{eq}}{dt} \right) \quad (3-13)$$

Donde:

W_D = Velocidad de secado decreciente

Datos:

$$SS = 0.01785 \text{ kg}$$

$$A = 0.0256 \text{ m}^2$$

$$X_c = 2.35238$$

$$X_{eq} = 0.04986$$

$$t_{eq} = 3.5 \text{ h}$$

$$t_c = 1 \text{ h}$$

$$W_D = \frac{0.01785}{0.0256} \left(\frac{2.35238 - 0.04986}{3.5 - 1} \right)$$

$$W_D = 0.69727(0.92101)$$

$$W_D = 0.64219 \text{ kg/m}^2\text{h}$$

$$W_D = 0.64 \text{ kg/m}^2\text{h}$$

Velocidad promedio

$$\bar{W} = \frac{W_c + W_D}{2} \quad (3-14)$$

Donde:

W_c = Velocidad antecritica

W_D = Velocidad poscritica

$\bar{W}$ = Velocidad promedio

Datos:

$$W_c = 0.94362 \text{ kg/m}^2\text{h}$$

$$W_D = 0.64219 \text{ kg/m}^2\text{h}$$

$$\bar{W} = \frac{0.94362 + 0.64219}{2}$$

$$\bar{W} = 0.79291 \text{ kg/m}^2\text{h}$$

$$\bar{W} = 0.79 \text{ kg/m}^2\text{h}$$

Tiempo de secado proscritico

$$\theta_p = \frac{SS}{A} \left(\frac{X_c - X_{eq}}{W_c - W_D} \right) \ln \left(\frac{W_c}{W_D} \right) \quad (3-15)$$

Donde:

SS = Peso del sólido seco

A = Área de la superficie expuesta

X_c= Humedad crítica

W_c= Velocidad de secado crítica

W_D= Velocidad de secado final

Datos:

$$SS = 0.01785 \text{ kg}$$

$$A = 0.0256 \text{ m}^2$$

$$X_c = 2.35238$$

$$X_{eq} = 0.04986$$

$$W_c = 0.94362 \text{ kg/m}^2 \text{ h}$$

$$W_D = 0.64219 \text{ kg/m}^2 \text{ h}$$

$$\theta_p = \frac{0.01785}{0.0256} \left(\frac{2.35238 - 0.04986}{0.94362 - 0.64219} \right) \ln \left(\frac{0.94362}{0.64219} \right)$$

$$\theta_p = 0.69727(7.63866)0.38484$$

$$\theta_p = 2.04974 \text{ h}$$

Tiempo total

$$\theta_t = \theta_a + \theta_p$$

$$\theta_t = 0.83331 \text{ h} + 2.04974 \text{ h}$$

$$\theta_t = 2.88305 \text{ h} = 2.88 \text{ h}$$

La velocidad de secado promedio es de 0.79 kg/m²h con un tiempo óptimo de 2.88 h.

El tiempo de secado que se encontró en forma experimental en las pruebas realizadas en el laboratorio de secado es de 340 minutos que son 5.67 h y el tiempo que se obtuvo mediante el cálculo de la misma por la cinética de secado es de 2.88 h con una diferencia de 2.79 h, esto quiere decir que encontrando la cinética se acorta el tiempo de secado, el cual da el tiempo óptimo en que debe secarse la okara a 65°C de temperatura con 0.5 cm de espesor despreciando el tiempo inútil.

El tiempo en que tarda para secar la misma cantidad de okara a una temperatura de 75°C con un espesor de 0.5 cm es de 2.45 h esto se observa en el anexo E del presente trabajo.

Los valores que se tienen del tiempo de secado, se debe de llevar a cabo la selección de la temperatura con la que debe trabajar el secador de bandejas.

Se tiene que tomar en cuenta las propiedades fisicoquímicas con las que se obtiene la harina de okara realizada con las dos temperaturas de secado, cuando se trabaja con 65°C de temperatura no se altera las propiedades nutricionales que tiene la misma, ya que a mayor temperatura estas sufrirían cambios importantes en la proteína, fibra, grasas y se formaría el encostramiento a causa de que el agua que está dentro de la okara, aunque el secado es más rápido; pero la diferencia de tiempos en que tienen al trabajar con estas temperaturas la diferencia de los tiempos de secado es de 0.45 h, que son 2.7 minutos ya que esta diferencia no es muy grande y para que la okara no sufra ninguna alteración en el momento de secado es que se eligió trabajar con una temperatura de secado de 65°C.

3.3 ANÁLISIS ESTADÍSTICO DEL DISEÑO EXPERIMENTAL

Se realizó el análisis estadístico del diseño experimental propuesto en la tabla 2-2 de las variables que influyen el proceso de secado.

En la tabla III-10 se observa los valores experimentales obtenidos del arreglo matricial de los datos de laboratorio del contenido final en base de las variables que se plantearon en el diseño experimental.

Los datos de humedad en base seca de los ensayos I y II de las pruebas realizadas experimentalmente se encuentran en el anexo B.

Tabla III-10 Valores experimentales de tiempo y contenido de humedad

Espesor (cm)	Temperatura (°C)	Contenido de humedad en base seca (kg H ₂ O/kgSS)	
		Ensayo I	Ensayo II
0.5	65	0.05039	0.04936
1	65	0.04648	0.00122
0.5	75	0.07071	0.00281
1	75	0.06170	0.00306

Fuente: Elaboración propia

Estos datos se analizaron mediante un análisis estadístico ANOVA, utilizando un interpreté estadístico SPSS versión 17.0 para la interpretación de la variable contenido de humedad en base seca de las muestras de okara seca.

Tabla III-11 Pruebas de los efectos inter-sujetos

Variable dependiente: Humedad

Origen	Suma de cuadrados tipo III	gl	Media cuadrática	F	Sig.
Modelo corregido	0.000 ^a	3	8.601E-5	0.000	0.000
Intersección	0.013	1	0.013	0.000	0.000
Temperatura	9.657E-6	1	9.657E-6	0.000	0.000
Espesor	0.000	1	0.000	0.000	0.000
Temperatura*Espesor	1.558E-5	1	1.558E-5	0.000	0.000
Error	0.000	0			
Total	0.014	4			
Total corregida	0.000	3			

a. R cuadrado = 1.000

Tabla III-12 ANOVA

Modelo		Suma de cuadrados	gl	Media cuadrática	F	Sig.
1	Regresión	0.000	3	0.000	0.000	0.000
	Residual	0.000	0	0.000		
	Total	0.000	3			

- a. Variables predictoras: (Constante), Espesor*Temperatura, Espesor, Temperatura
- b. Variable dependiente: Humedad

Tabla III-13 Coeficientes

Análisis de Varianza de la variable del contenido de humedad

Modelo	Coeficientes no estandarizados		Coeficientes tipificados	t	Sig.	Intervalo de confianza de 95.0% para B	
	B	Error típ.	Beta			Límite inferior	Límite superior
Constante	0.058	0.000		0.000	0.000	0.000	0.058
Temperatura	-0.002	0.000	-0.193	0.000	0.000	0.000	-0.002
Espesor	0.008	0.000	0.950	0.000	0.000	0.000	0.008
Espesor*Temperatura	-0.002	0.000	-0.246	0.000	0.000	0.000	-0.002

Variable dependiente: Humedad

En la tabla III-11 se puede observar la variable independiente más significativa es el espesor y temperatura con una significancia de 0.000%. Cuya relación matemática de la variable dependiente (Contenido de humedad experimental) es:

$$H = 0.058 - 0.002 * \text{Temperatura} + 0.008 * \text{Espesor} - 0.002 * (\text{Espesor} * \text{Temperatura})$$

H = Humedad, (%)

La humedad depende significativamente del espesor de las bandejas y de la temperatura de secado.

3.4 MOLIENDA

La molienda que se realizó en el molino de bolas dio óptimos resultados por lo que se obtuvo distintos tipos de molienda: gruesa, semi gruesa y fina, ya que la okara seca no es un material muy duro, también es posible utilizar otro tipo de molino para la molienda de la okara seca, como el molino de frotación o de discos que también es utilizado en la molienda de los alimentos, en especial para la molienda de los cereales.

3.5 TAMIZADO

Se realizó el tamizado después de la molienda, el cual se obtuvo distintos tamaños de partículas entre ellas la de 1, 0.5, 0.25 y 0.063 mm estos datos se pueden observar con más detalles en la tabla II-8 del capítulo II. De estos datos se seleccionó al que obtuvo mayor cantidad de harina en su malla, la de 0.5 mm de abertura en el sistema ASTM y Tyler, la cual es la granulometría que se necesita para obtener la harina de okara.

Prueba para hallar el índice de bond para la harina de okara

Para hallar el índice de bond se tienen los siguientes datos:

Tabla III-14 Datos para el tamizado

Tamizado	Tiempo tamizado	de	Alimentación
Tamizado # 1	30 minutos		500 gramos
Tamizado # 2	30 minutos		495.6 gramos

Fuente: Elaboración propia

Tabla III-15 Datos de las pruebas de tamizado

No de Tamiz	Tamiz vacío (g)	Prueba 1		Prueba 2	
		Tamiz lleno (g)	Masa (g)	Tamiz lleno (g)	Masa (g)
4	423.0	488.0	40.0	423.0	0
2	437.5	699.5	287.0	440.1	2.6
1	434.5	551.5	117.0	525.4	90.9
0.5	443.5	486.9	43.1	643.5	200.0
0.25	418.1	428.1	10.0	553.0	134.9
0.063	388.5	391.4	2.9	446.1	57.6
0	464.0	464.0	0.0	473.6	9.6

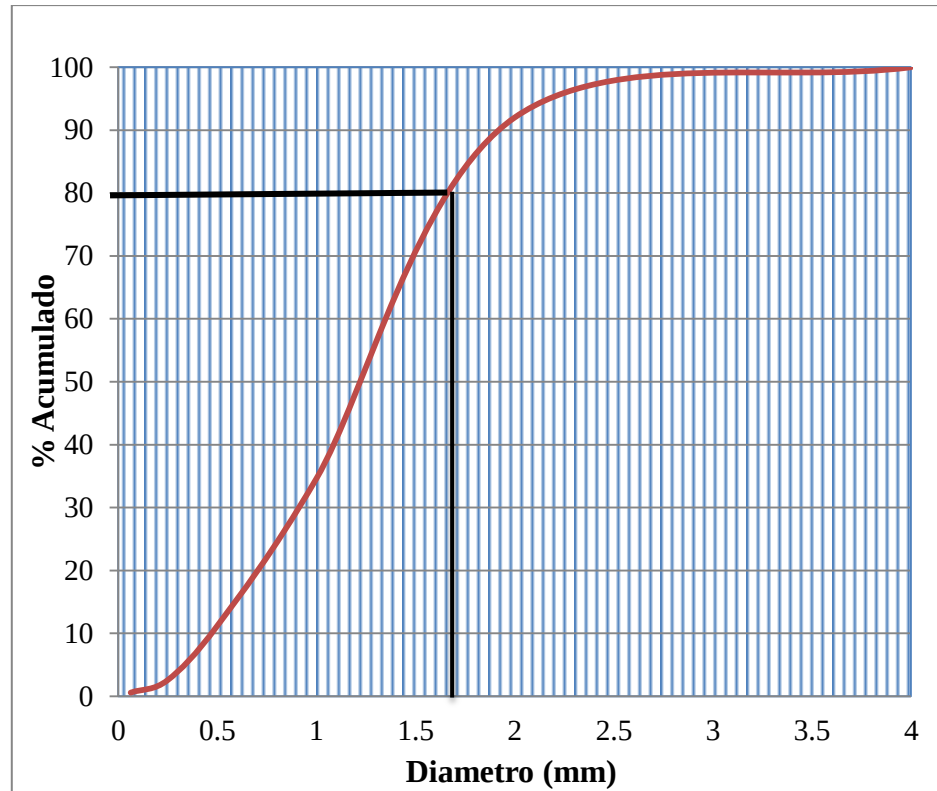
Fuente: Elaboración propia

Tabla III-16 Primer tamizado (Alimentación)

No de malla (mm)	%	% Acumulado
4	8.0	100
2	57.4	92.0
1	23.4	34.6
0.5	8.6	11.2
0.25	2.0	2.6
0.063	0.6	0.6
0	0	
Total	100	

Fuente: Elaboración propia

Figura 3-11 Porcentaje acumulado primer tamizado



De esta figura encontramos el diámetro final, con el valor de 80% de alimentación acumulado hasta que choque con la curva y se obtiene el dato de:

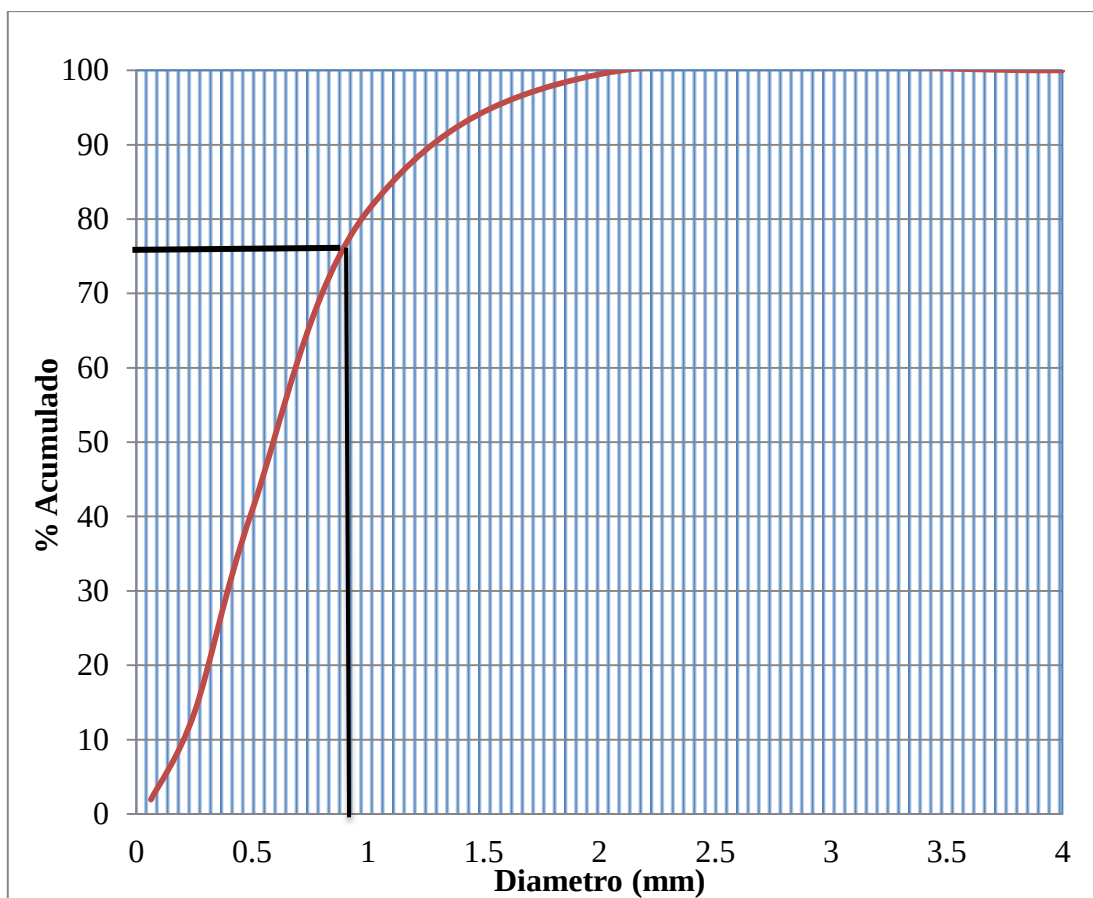
Df = 1.64

Tabla III-17 Segundo tamizado (Producto)

No de malla (mm)	%	% Acumulado
4	0	100
2	0.5	99.5
1	18.3	81.1
0.5	40.4	40.8
0.25	27.2	13.6
0.063	11.6	1.9
0	1.9	
Total	100	

Fuente: Elaboración propia

Figura 3-12 Porcentaje acumulado segundo tamizado



Dp=0.96

Con estos datos obtenemos:

$$N \text{ (rpm)} = 20 \cdot 58 \text{ rpm} = 1160 \text{ rpm}$$

$$\text{Alimentación} = 12.86 \text{ g}$$

$$\text{Producto} = 202.06 \text{ g}$$

$$PN = 202.06 \text{ g} - 12.86 \text{ g} = 189.2 \text{ g}$$

$$BPM = \frac{PN}{1160} = \frac{189.2 \text{ g}}{1160} = 0.163$$

$$\text{Prueba del tamiz } 0.25 \cdot 1000 = 250 \mu\text{m}$$

Abertura del tamiz que pasa 80% Alimentación

$$D_f = 1.64 * 1000 = 1640 \mu m$$

Abertura del tamiz que pasa 80% Producto

$$D_p = 0.96 * 1000 = 960 \mu m$$

Índice de Bond

$$W_i = \frac{44.5}{P_i^{0.23} B P^{0.82} \left(\frac{10}{\sqrt{D_p}} - \frac{10}{\sqrt{D_f}} \right)} \quad (3-16)$$

Donde:

W_i = Índice de trabajo para molienda, kW/ton

P_i = es la abertura del tamiz de referencia

$B P$ = Molturabilidad del material en el molino de bolas

Se reemplaza todos los valores a la ecuación (3-16).

$$W_i = \frac{44.5}{250^{0.23} 0.163^{0.82} \left(\frac{10}{\sqrt{960}} - \frac{10}{\sqrt{1640}} \right)}$$

$$W_i = 730.706 \text{ kWh/ton}$$

La molturabilidad de la harina de okara es de 730.71 kWh/ton, se necesita este dato para realizar el diseño del molino de bolas, que se realizará en el capítulo IV.

3.6 ALMACENAMIENTO

En la siguiente tabla mostramos los datos de los análisis fisicoquímicos realizados en el CEANID de la harina de okara que obtuvimos experimentalmente.

Tabla III-18 Análisis fisicoquímicas de la Harina de okara

Parámetros	Unidad	Valor
Cenizas	%	3.06
Fibra	%	4.56
Hidratos de carbono	%	26.24
Materia grasa	%	28.11
Humedad	%	4.99
Proteína	%	33.04
Calorías	kcal/100g	490.11

Fuente: Centro de Análisis Investigación y Desarrollo (CEANID).

Para estos datos la muestra de la harina fue obtenida el 25 de Noviembre del 2011, cuando se realizó el envasado de la misma.

Figura 3-13 Harina de okara obtenida experimentalmente



Fuente: Elaboración propia

Los resultados de los análisis que se hicieron en el CEANID se encuentran en el anexo C. Para hallar el valor energético de la harina se utiliza la siguiente ecuación:

Valor energético = 4*% Proteína + 4*% Hidratos de carbono + 9*% Grasa

Valor energético = 4*33.04 + 4*26.24+ 9*28.11 = 490.11kcal/100g

El 15 de Diciembre de 2011, se realizo el envasado y almacenamiento del producto, se envasó en bolsas de polipropileno una vez colocada la harina en los envases, los mismos fueron sellados herméticamente con una selladora térmica. Las bolsas de harina de okara fueron almacenadas, en ambientes cerrados pero ventilados a humedad ambiente y conservando que no recibieran la influencia directa de la luz solar, por lo cual se colocaron en bolsas oscuras. La harina de okara estuvo almacenada 137 días, después de estos días se saco una muestra para que se realice los análisis fisicoquímicos y microbiológicos de la misma, la cual se puede observar en la tabla III-19.

Tabla III-19 Análisis fisicoquímico de la harina de okara

Parámetros	Unidad	Valor
Cenizas	%	4.38
Fibra	%	6.72
Hidratos de carbono	%	28.04
Materia grasa	%	18.87
Humedad	%	7.11
Proteína	%	34.88
Calorías	kcal/100g	421.51
Bacterias aerobias mesófilas	ufc/g	4.6x10 ⁶
Mohos y levaduras	ufc/g	1.3x10 ³

Fuente:Centro de Análisis Investigación y Desarrollo (CEANID).

En los días en el que la harina de okara estuvo en almacenamiento no se observaron cambios importantes en el producto, ya que las muestras mantenían su color original, y su textura y no se observó presencia de formación de grumos en el mismo.

En los análisis realizados se muestra que la harina adquirió humedad del ambiente en los días en que estuvo almacenada, la proteína, fibra, grasa e hidratos de carbono no sufrieron grandes cambios en este tiempo.

Para los análisis microbiológicos que se realizaron de la harina tienen que estar dentro de las especificaciones del INVIMA para harinas precocidas de cereales el cual nos da un máximo de 20000 ufc/g para las bacterias aerobias mesofilas, para mohos y levaduras un máximo de 3000 ufc/g. El único valor que exceden las especificaciones es de las bacterias aerobias mesófilas según los datos que se obtuvo por referencia del laboratorio TECNIMICRO que se encuentra ubicado en Colombia.

Esto puede deber a que las bolsas de polipropileno no son las más apropiadas para la conservación de la harina de okara o que el tiempo de vida útil de la harina sea poco, por lo que se recomienda que debe de usarse con un tiempo de conservación menos de 3 meses, en los cuales se formarían los microorganismos.

Por esto se recomienda la utilización de otros tipos de bolsas para la conservación de la harina.

Figura 3-14 Harina de okara (Okara seca pulpa de soja)



Fuente: SOAREJAPAN INC(Japón).

En esta figura se muestra la harina de okara que la empresa SOAREAJAPAN expende en el Japón, se puede observar que esta harina tiene un color similar a la que se obtuvo en el presente proyecto, lo cual indica que este es el color característico de esta harina.

1.7 EVALUACIÓN DEL PRODUCTO

La evaluación del producto, harina de okara se realizó tomando en cuenta los parámetros asumidos para este efecto por la empresa SOAREJAPAN mostrados en las tablas i-2 e i-3, la cual empleó el método de secado flash, también se tiene como referencia la investigación que hizo en Colombia la Dra. Elizabeth Ocampo para su tesis doctoral en la universidad, los resultados obtenidos por ellos contrastados con los experimentales del presente proyecto se muestran en la tabla III-20.

Tabla III-20 Comparación de los análisis fisicoquímicos de la harina de okara

Parámetros	Unidad	Tesis de harina de okara, Dr. Elizabeth Ocampo	Datos experimentales (CEANID)	Empresa SOAREJAPAN INC (Japón)
Fibra	%	31.52	6.72	46.5-50
Hidratos de carbono	%	33.04	28.04	5.9-9.8
Materia grasa	%	12.78	18.87	9.8-15.6
Humedad	%	14.25	7.11	5.5-12.3
Proteína	%	37.42	34.88	21.3-23.3
Calorías	kcal/100g	396.86	421.51	202-350

Fuente: Elaboración propia

Se puede observar que la harina de okara que se obtuvo experimentalmente, comparada con la referencia bibliográfica, contiene mayor porcentaje de materia grasa, menor porcentaje de fibra y mayor cantidad de calorías. Estos resultados fueron obtenidos por el Centro de Análisis Investigación y Desarrollo (CEANID), (ver anexo C), dicho laboratorio emplea técnicas de análisis certificadas y realiza el control de calidad de alimentos naturales y procesados en la región.

Además de todo hay que tomar en cuenta que la harina obtenida en cada lugar depende de las propiedades fisicoquímicas originales del grano de soja del lugar, del método empleado para la obtención de harina y de la temperatura de secado se conoce el método de secado empleado por SOAREJAPAN pero se desconocen las

condiciones de temperatura y el tiempo de secado con la que ellos trabajaron, que posiblemente sea más apropiado que el utilizado para el presente proyecto.

Tabla III-21 Comparación de los análisis fisicoquímicos de la harina de okara con otras harinas

Parámetros	Unidad	Harina de okara	Harina de sorgo	Harina de trigo	Harina de quinua
Fibra	%	6.72	2.33	0.70	4.5
Hidratos de carbono	%	28.04	71.10	69.78	76.2
Materia grasa	%	18.87	4.02	1.46	4.7
Humedad	%	7.11	12.36	14.04	10.04
Proteína	%	34.88	10.42	13.74	16.3
Calorías	kcal/100g	421.51	366.87	352.90	399

Fuente: Revista Boliviana de Química (La Paz, agosto 2010)

En esta se puede notar que la harina de okara tiene un mayor porcentaje de fibra, proteína, grasa y calorías, de acuerdo a estos datos se puede indicar que la harina de okara posee características nutricionales muy importantes para la alimentación humana.

Otro de los beneficios de la harina de okara es la ausencia de gluten creando una gran ventaja para las personas celiacas quienes ven una dificultad en el consumo de panes, galletas, embutidos y otros por la presencia de harinas con altos contenidos de gluten.

Se puede decir que la harina de okara obtenida, durante la elaboración de este proyecto de grado, es aceptable para suplemento alimentario dado que tiene excelentes propiedades nutritivas (proteína especialmente) comparada con las otras harinas.

CAPÍTULO IV

DISEÑO DEL PROCESO PRODUCTIVO

DISEÑO DEL PROCESO PRODUCTIVO

4.1 DISEÑO DEL PROCESO PARA LA PRODUCCIÓN DE HARINA DE OKARA

El proceso productivo que se propone para la obtención de harina de okara a escala laboratorio se explican en las siguientes etapas del proceso:

4.1.1 Recepción y Acondicionamiento

La cantidad de okara que se obtiene de la elaboración de la leche de soja es de 16 kg por día que es igual a un flujo másico de 0.67 kg/h, durante esta etapa de recepción y acondicionamiento de la materia prima no existen pérdidas, ya que sólo se almacena en cámaras de frío a 5°C para evitar su pardeamiento, conservando su humedad y luego pasar a la siguiente etapa que es el secado de la misma.

4.1.2 Secado

El secado de la okara permite a eliminar el agua que contiene la muestra para evitar que el producto sea perecedero, además con este proceso se incrementan los porcentajes nutricionales de la muestra de okara original.

Para el secado de la okara se eligió el secador de bandejas con aire forzado para que el aire sea uniforme durante el secado, la temperatura con la cual se seca la okara a una temperatura de 65°C y con un espesor de 0.5 cm, para que el secado sea más rápido; pero sin alterar las propiedades nutricionales que tiene la misma, ya que a mayor temperatura estas sufrirían cambios importantes y se formaría el encostramiento a causa de que el agua que está dentro de la okara no puede salir debido a la velocidad con que se ha secado la superficie y se produciría pardeamiento causado por las reacciones químicas ocasionadas por el sobrecalentamiento (descomposición proteica, desnaturalización de azúcares, etc).

Con estas condiciones previas se realizará el secado de la okara en un secador de bandejas a gas, ya que es un combustible más barato y accesible. En esta etapa cual se disminuirá el contenido de humedad de 78.32% a 4.75%, el tiempo de secado es de 40.23 horas para secar 0.4 kg/h de okara.

4.1.3 Molienda

La molienda se realiza con el fin de obtener un producto homogéneo en tamaño, que sea digestible.

Para la molienda de la okara se recomienda la utilización de los molinos de bola y de discos que también se lo puede utilizar, en esta operación los trabajadores deben protegerse con caretas, para evitar respirar el polvo que se genera en la manipulación de la harina.

La harina obtenida debe ser lo más fina posible y estar lo más exenta de humedad, para mejorar su conservación.

4.1.4 Tamizado

Para lograr un tamaño homogéneo de partícula en la harina, se recomienda pasarla por un tamiz de mesh No 0.5 mm (ASTM). El material que no pasa esta malla puede ser devuelto a la operación de molienda.

4.1.5 Empaque y almacenamiento

El empaque de la harina se puede realizar en sacos de polipropileno por 50 kilogramos, cuando se trate de ventas con destino a la industria, o en bolsas transparentes de polipropileno en presentaciones de 250 gramos, 500 gramos ó de 1 kilogramo, para ventas al menudeo, con destino al uso doméstico.

Los sacos y/o bolsas se deben sellar bien y almacenar en bodegas, con buenas condiciones de ventilación, secas y protegidas de la luz y de la lluvia. No se debe almacenar junto a productos agroquímicos o químicos, ni a productos alimenticios con olores penetrantes pues estos pueden ser transmitidos a la harina. También se debe de cuidar que la harina no se haga rancia ya que contiene un alto porcentaje de grasa.

Se debe de controlar el tiempo de vida útil de la harina de okara.

Además de estos procesos que se explicaron para la obtención de la harina de okara también se puede adicionar el siguiente proceso para que la okara tenga menor porcentaje de humedad y sea más rápido el secado.

Prensado

Después de la filtración de la leche de soja el residuo (okara) puede someterse a un proceso de prensado, con esta operación se separa la fase sólida (okara) de la fase líquida remanente para que el secado sea más rápido. Esta operación se la puede realizar con una prensa de banda, para evitar la formación de pasta ya que al caer del cilindro a las bandejas de recepción la okara quedará suelta con un tamaño de poro tal que pueda evitarse que durante el secado se formen costras en las bandejas, lo cual dificultaría su molienda. Sin embargo esta etapa puede ser opcional y en lugar de la prensa de banda, después de la filtración se puede someter la okara a un movimiento de vibración para separar la pasta y aumentar el tamaño del poro para el secado.

En la siguiente tabla se encuentran los datos que se obtuvieron del balance de materia y energía, los datos más detallados de estos balances se encuentran en el anexo D.

4.2 BALANCE DE MATERIA Y ENERGÍA

El balance de materia y energía del proceso se encuentra resumido en la tabla IV-1 donde se pueden observar que cada valor se encuentra de acuerdo al flujo del proceso que se presenta en la figura 4-1.

En el anexo D del presente trabajo se encuentra el procedimiento de los balances de materia que se realizó para cada proceso de la obtención de la harina de okara.

La cantidad de okara que entra en el proceso de recepción y almacenamiento es de 16 kg, como se tiene que trabajar en flujo másico entonces la cantidad de okara es de 0.4 kg/h, ya que el tiempo de secado de la okara es de 40.23 horas.

Figura 4-1 Balance de materia

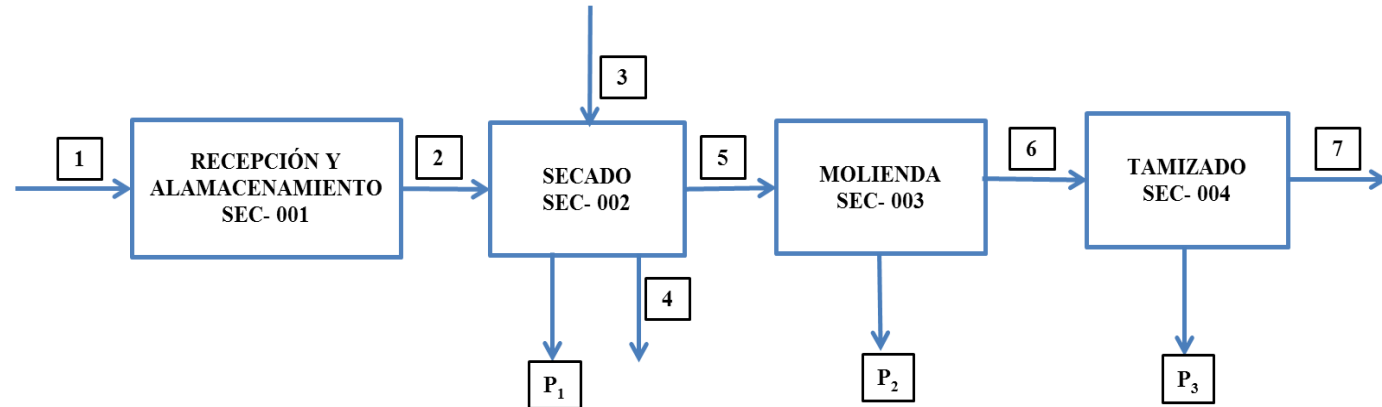


Tabla IV-1 Balance de materia y energía

ITEM	Unidades	1	2	3	4	P ₁	5	P ₂	6	P ₃	7
Flujo de pasta de okara	kg/h	0.400	0.400			0.032	0.071	0.006	0.066	0.003	0.063
Flujo de Okara seca	kg/h	0.087	0.087			0.019	0.068				0.060
Flujo de agua	kg/h	0.313	0.313	0.478	0.775	0.013	0.003				0.003
Flujo de aire	kg/h			23.925	24.222						
Agua evaporada	kg/h					0.297					
Contenido de agua pasta	kg agua/kg sólido húmedo	0.783	0.783			0.415	0.048				0.050
Contenido de sólido seco pasta	kg sólido seco/kg sólido húmedo	0.217	0.217	0.000	0.000	0.585	0.953				0.950
Humedad absoluta	kg de vapor/kg de aire seco			0.020	0.032						
Temperatura bulbo húmedo	°C			23.50	28.3						
Temperatura bulbo seco	°C		30.30	30.30	29.7		65				
Humedad relativa	%			58	91.0						
Entalpia	kcal/kg		30.32	10	15.02		65				
Calor suministrado	kcal/h			134.857							

Volumen del aire en el secador

El volumen del aire (V_H) se calcula en base a la ecuación matemática citada por Valiente Barderas.

Asumiendo que el aire ambiente es un gas ideal, calculamos el volumen del aire que entra al secador mediante la siguiente

$$V_H = \left(\frac{1}{29} + \frac{Y_3}{18} \right) * \frac{RT}{P} \quad (4-1)$$

Donde:

V_H =Volumen del gas (aire) húmedo, m^3/kg aire seco

R = Constante de los gases ideales, 0.082 atm l/molK

T = Temperatura expresada en °K, temperatura de bulbo seco a la entrada del secador.

P = Presión (de Tarija) expresada en atm, 610.05 mmHg = 0.803 atm

$$V_H = \left(\frac{1}{29} + \frac{0.020}{18} \right) * \frac{0.082 * (30.3 + 273)}{0.803}$$

$V_H = 1.102 m^3 \text{aire}/kg \text{aire seco}$

Velocidad volumétrica del aire, m^3/h

$$V_e = V_H * F_3 \quad (4-2)$$

$$V_e = \frac{1.102 m^3 \text{aire}}{kg \text{aire seco}} * 23.925 kg/h$$

$V_e = 26.37 m^3 \text{aire}/h$

La velocidad que debe de tener es de $26.37 m^3 \text{aire}/h$ para secar 16 kg de okara húmeda.

La cantidad de calor requerido en el proceso de secado es de 134.86 kcal/h, igual a 156.78 Watts = 0.16 kW.

4.2.1 Determinación del consumo de combustible

El cálculo de consumo de combustible, se basa en la utilización de gas natural, ya que este combustible en nuestra región es abundante y su utilización se proyecta hacia el área industrial debido a su bajo costo en comparación a otros carburantes. La cantidad de calor que es necesario para secar la okara se obtiene del balance que se realizó en el anexo D.

$$C_g = \frac{Q}{C_c} \quad (4-3)$$

C_c = Poder calorífico del gas natural (kcal/ft³)

C_g = Consumo de gas natural (ft³)

Como:

$$C_c = 1104 \text{ Btu/ft}^3 = 124.05 \text{ kcal/m}^3 \text{ (Fuente: EMTAGAS)}$$

$$Q = 168.6 \text{ kcal/h}$$

Entonces:

$$C_g = \frac{168.6 \text{ kcal/h}}{124.05 \text{ kcal/m}^3}$$

$$C_g = 1.36 \text{ m}^3/\text{h}$$

El consumo de gas que necesita para secar 0.4 kg/h de okara es de 1.36 m³/h.

4.2.2 Dimensionamiento del Secador de bandejas

Una vez realizado el análisis de las propiedades fisicoquímicas de la okara húmeda, efectuando las pruebas de secado correspondientes que ayudan a determinar las variables de proceso con las que se realizan la operación de deshidratación se llega a elegir un secador que se adapte a dichas especificaciones, siendo el secador de bandejas con circulación de aire el más adecuado, empleando gas natural como combustible.

Los datos que se obtuvieron realizando la parte experimental del presente trabajo, permiten dimensionar el secador de bandejas que se requiere para el secado de la okara.

El secador de bandejas debe de tener las siguientes condiciones:

Se tiene que llevar a cabo el secado de la okara a una temperatura de 65°C. El aire empleado para el secado debe poseer una velocidad de 26.37 m³/h, con un flujo másico de 23.93 kg/h, necesarios para evaporar 0.29 kg de agua/h. El secador de bandejas debe tener por lo menos 14 bandejas para que así se puedan secar los 16 kg de okara, ya que en cada bandeja entra 1.15 kg de okara, la relación de (peso/área es) 3.97 kg/m².

La potencia que debe de tener el secador es de 0.20 kW, el cual consume 1.36 m³/h de gas licuado. En la siguiente tabla se puede observar más detallado las dimensiones que debe tener el secador de bandejas.

Tabla IV-2 Dimensiones y especificaciones del secador de bandejas

Especificaciones	Datos
Temperatura de secado	65°C
Velocidad del aire	26.37 m ³ /h
Flujo másico de aire de entrada	23.93 kg/h
Potencia	0.20 kW
Consumo de gas licuado	1.36 m ³ /h
Tiempo de secado	40.23 h
Dimensiones de las bandejas	460*640*5mm
Cantidad de bandejas	14
Peso/área capacidad de cada bandeja	3.97 kg/m ²

Fuente: Elaboración propia

Se ha elegido un secador de bandejas con condiciones similares para que se lleve a cabo el secado de la okara, aunque el uso de este secador se plantea sólo como una referencia para el fabricante quien posee el derecho de usarlo o no.

El equipo elegido cuenta con las siguientes características:

Cámara de secado

Fuente de calor a base de gas natural

Ventilador

Control de temperatura automático

La cámara de secado tiene un área de 20 m^2 , de 2 carros que contiene 48 bandejas rectangulares de dimensiones de $460*640*5 \text{ mm}$, un rango de temperatura de 50 a 180°C .

El tiempo de secado es de 40.23 h

Las bandejas están construidas de acero inoxidable.

La eficacia del calor es alta y se ahorra energía. Usando ventilación forzada, hay placas ajustables de la distribución del aire dentro del horno. Los materiales se pueden secar uniformemente. El equipo trabaja con poco ruido, opera en condiciones de equilibrio. La temperatura se controla automáticamente, la instalación y el mantenimiento son fáciles.

El control automático de la circulación del sistema de calor, asegura la distribución del calor a lo largo de la cámara. La característica más notable del secador es que la mayor parte del aire caliente retorna en ciclos de aire, lo que aumenta el calor transferido compensando la pérdida de energía.

Figura 4-2 Secador de bandejas



Fuente: Henangongli.en.alibaba.com

Tabla IV-3 Dimensiones del secador

Kyorichi (Henan) Industries Co., Ltd.										
Ellen Yu										
WET: http://henangongli.en.alibaba.com										
TM: cn220305869										
Email: gonglishiyi3@hotmail.com										
Tel:0086-015617588844										
office tel :0086-0371-63752859										
Industry standard model	Technical parameters specifications	Each dry quantity kg	Contact power kw	Heigher steam kg/h	Cooling area m2	Airflow m3 / h	Upper and lower temperature °C	With the baking plate	Supporting baked car	Equipment weight kg
RXH-14-B	CT-I	100	1.1	20	20	1400 ±2		49	2430×1200×2375	2
RXH-27-B	CT-II	200	1.1	40	40	5200 ±2		96	2430×2200×2433	4
RXH-41-B	CT-III	300	2.2	60	80	9800 ±2		144	3430×2200×2620	6
RXH-54-B	CT-IV	400	2.2	80	100	9800 ±2		192	4460×2200×2620	8
RXH-5-C	CT-C-O	25	0.45	5	5	3450	0	8	1200×1000×1750	0
RXH-7-C	CT-C-IA	50	0.45	10	10	3450 ±2		24	1400×1200×2000	1
RXH-14-C	CT-C-I	100	0.45	18	20	3450 ±2		48	2300×1200×2000	2
RXH-27-C	CT-C-II	200	0.9	36	40	6900 ±2		96	2300×2200×2000	4
RXH-27A-C	CT-C-IIA	200	0.9	36	40	6900 ±2		96	4460×1200×2290	4
RXH-41-C	CT-C-III	300	1.35	54	80	10350 ±2		144	2300×3220×2000	6
RXH-41A-C	CT-C-IIIA	300	1.35	54	80	10350 ±2		144	3430×2200×2000	6
RXH-54-C	CT-C-IV	400	1.8	72	100	13800 ±2		192	4460×2200×2290	8

Fuente: Henangongli.en.alibaba.com

El secador de bandejas seleccionado tiene una potencia de 1.1 kW con un flujo de aire de 1400 m³/h, los datos que se obtiene de los balances realizados para el diseño del secador, debe tener una velocidad de aire de 26.37 m³/h y una potencia de 0.20 kW, como se observa estos datos no coinciden con este secador, como se mencionó anteriormente este secador se utiliza como una referencia al secador que necesitamos. Con los datos que se obtuvieron en el secado de la okara se puede dar todo esta

información al fabricante quien se encargara de construir el equipo con las especificaciones que se izó en la tabla IV-2.

4.3 DISEÑO DEL MOLINO DE BOLAS

Cálculo de capacidad

Datos básicos

El diseño del molino se realizará con una capacidad de okara seca de: 25 kg/día para que no sea muy pequeño el molino y tenga una mayor capacidad para el futuro

Base de cálculo: 25 kg/día

25 kg/día con un 10% de producción extra

$$25 * 10\% = 2.5 \text{ kg}$$

$$25 + 2.5 = 27.5 \text{ kg/día}$$

$$27.5 \frac{\text{kg}}{\text{día}} * \frac{1 \text{ día}}{6 \text{ horas}} = 4.58 \frac{\text{kg}}{\text{h}}$$

El tiempo de trabajo del molino será de 6 horas al día. La producción del molino es de 4.58 kg/h.

Se realizó una prueba experimental para determinar la molturabilidad de la harina de okara que se muestra en el capítulo III.

$$\text{Molturabilidad de la harina de okara} = 730.706 \text{ kWh/ton} = 0.719 \text{ kWh/kg}$$

Cálculo de potencia del motor

$$\text{Potencia del motor del molino} = 0.719 \text{ kWh/kg} * 4.58 \text{ kg/h} = 3.294 \text{ kW}$$

De donde: Usando un factor de conversión = 1.341

$$\text{Potencia del motor} = 3.294 \text{ kW} * 1.341 = 4.417 \text{ Hp}$$

Expresión de DAWN para dimensionamiento del molino

Usando la expresión DAWN: kW netos = 0.284 DAWN

En donde kW netos es la potencia solamente requerida por el molino, sin tomar en cuenta perdidas en el motor y en la transmisión.

En donde:

D = Es el diámetro del molino, adentro del emplacado (m),

A = Es la fracción de carga del volumen del molino

W = Es el peso de la bola en toneladas

N = Es la velocidad del molino en rpm

$A = (1.073 - J)$

Sustituyendo estos valores en la formula o expresión se tiene:

$$kW = 0.284D (1.073 - J) WN$$

Para obtener las dimensiones del molino, todos los parámetros deben ser expresados en términos de “D”.

Cálculo de velocidad del molino

La velocidad del molino normalmente se calcula como un porcentaje de la velocidad crítica (Nc), la cual se define como la velocidad en la que la carga de bola empieza a centrifugar.

La velocidad crítica se puede calcular como una función del diámetro del molino.

$$N_c = \frac{42.2}{\sqrt{D}}$$

El rango normal de la velocidad del molino varía entre 70 y 80 % de la velocidad crítica por lo que tomando la expresión:

$$N = 75 \% N_c = \frac{31.65}{\sqrt{D}}$$

La forma del molino de bolas se expresa en términos de la relación longitud a diámetro L/D, usando la longitud efectiva del molino y el diámetro dentro del emplacado para efecto del cálculo, por lo que tomaremos una relación de 2.35:1.

El kW neto es la potencia a la entrada del molino y se calcula a partir de la potencia a la entrada del motor incluyendo perdidas en el motor y transmisión.

Si este dato no se tiene disponible, un factor seguro para convertir potencia de alto a neto es de 0.9.

De donde:

$$\text{kW neto} = 0.9 * 4.42 * 0.746 = 2.97 \text{ kW}$$

Por lo tanto:

$$\text{kW netos} = 0.284D(1.073-0.28)2.315 D^3 * \frac{31.65}{\sqrt{D}}$$

Sustituyendo el valor

kW netos en esta expresión se obtiene:

$$2.97 \text{ kW} = 16.501D^{3.5}$$

En donde:

$$D^{3.5} = \frac{2.97}{16.501} = 0.180$$

$D^{3.5} = 0.180$; sacando la 3.5 raíz a ambos términos:

$$D = \sqrt[3.5]{0.180} = 0.613 \text{ m} \text{ . Entre emplacado.}$$

El diámetro entre paredes es de 0.7 m dejando 65 mm. Como espesor del emplacado en cada pared.

Para obtener la longitud del molino de la relación $L/D = 2.35$ despejamos a L y se tiene:

$L = 2.35 * D$ sustituyendo el valor de D:

$$L = 2.35 * 0.613 = 1.44 \text{ m}$$

$$N = \frac{31.65}{\sqrt{D}} = \frac{31.65}{\sqrt{1.44}} = 26.38$$

$$N = 26.38 \text{ rpm}$$

Por lo que:

$$\text{kW netos} = 0.284 * 0.613 (1.073 - 0.28) 2.315 * 0.613^3 \frac{31.65}{\sqrt{0.613}} \quad (4-4)$$

kW netos = 2.98 kW netos es la energía neta consumida en el molino, 5 % del kW neto correspondiente a causa de pérdidas en el motor, cojinetes, reductor, en general:

$$2.98 * 0.05 = 0.149 \text{ kW}$$

De donde kW bruto = 2.98 + 0.149 = 3.129 kW = 4.2 Hp, lo cual está en el rango con el cálculo.

Velocidad crítica de rotación

La velocidad crítica está dada por la ecuación

$$n = \frac{K}{\sqrt{D}} \quad (4-5)$$

Donde:

D = diámetro libre del molino, para este caso D = 0.613 m

K = 76.6 cuando está expresado en pies y 42.3 cuando está en m.

Entonces:

$$n = \frac{42.3}{\sqrt{0.613}} = \frac{42.3}{0.783} = 54 \text{ rpm}$$

Este valor de la velocidad de rotación crítica en rpm, en el cual las bolas no realizan ningún trabajo útil.

Para saber la velocidad real óptima del molino en rpm que práctica se aplica de modo general, está comprendida entre el 45 – 80 % de la velocidad crítica, para el diseño se tomara el 48 % entonces se tiene que la velocidad real óptima del molino es:

$$\text{Velocidad real óptima} = \text{velocidad crítica} * 0.48$$

$$\text{Velocidad real óptima} = 54 * 0.48 = 26 \text{ rpm}$$

Se diseñó un molino de bolas con una capacidad de molienda de 25 kg/día pensando en que la producción sea mayor en el futuro.

4.3.1 Dimensionamiento del Molino de bolas

El molino utilizado para la molienda de la harina de okara es el molino de bolas, mediante el cálculo del diseño del molino se obtiene los siguientes resultados:

Tabla IV-4 Dimensiones y especificaciones del molino de bolas

Especificaciones	Datos
Longitud	1.44 m
Diámetro	0.61 m
Molturabilidad de la harina	730.706 kWh/ton
Potencia	3.13 kW – 4.2 Hp
Velocidad del molino	26 rpm

Fuente: Elaboración propia

Por similitud se encontró en el mercado un molino con las características similares con los cálculos realizados para el molino, en la siguiente figura se puede observar el molino de bolas que se obtuvo las especificaciones de la empresa ESSA.

Figura 4-3 Molino de bolas



Fuente: <http://www.essa.com.au/EssaProductsCatalogue.aspx>

Tabla IV-5 Dimensiones del molino

Item Code	Description	UOM	Length	Width	Height	Weight	Request for Quote
140480	<u>BALL MILL 200x200 MS + CHARGE</u>	EA	1.490 m	0.840 m	1.520 m	245.000 kg	[Add]
140481	<u>BALL MILL 200x200 SS+ CHARGE</u>	EA	1.490 m	0.840 m	1.520 m	245.000 kg	[Add]
140844	<u>BALL MILL 250x250 MS + CHARGE</u>	EA	1.500 m	0.850 m	1.550 m	260.000 kg	[Add]
140846	<u>BALL MILL 250x250 SS + CHARGE</u>	EA					[Add]
102096	<u>BALL MILL 300 X 300 460V 60HZ</u>	EA					[Add]
102094	<u>BALL MILL 300 X 300 MS+CHARGE</u>	EA	1.490 m	0.840 m	1.520 m	280.000 kg	[Add]
140845	<u>BALL MILL 300x300 MS + CHARGE</u>	EA					[Add]
140847	<u>BALL MILL 300x300 SS + CHARGE</u>	EA					[Add]
140482	<u>BALL MILL MS 200 X 200 380V 5</u>	EA	1.490 m	0.840 m	1.520 m	245.000 kg	[Add]
140483	<u>BALL MILL SS 200 X 200 380V 5</u>	EA	1.490 m	0.840 m	1.520 m	245.000 kg	[Add]

Fuente: <http://www.essa.com.au/EsseProductsCatalogue.aspx>.

Se seleccionó este molino de bolas de acuerdo a los datos obtenidos en el diseño del equipo, el cual tiene un diámetro de 0.61 m y con una longitud de 1.44 m, el que más se asemeja a estos datos es el de código 140480 que tiene una longitud de 1.49 m, diámetro de 0.84 m y con una altura de 1.52 m.

Este molino es usado para la molienda de alimentos ya que se utilizan bolas que son formadas con materiales especiales las cuales tienen un coeficiente de desgaste bastante reducido, por lo que pueden emplearse para el proceso que se sigue por cuanto su desgaste es similar al de otro tipo de molinos, también se puede utilizar otros molinos para la molienda de la okara, ya que esto no es tan restringible como el secador de bandejas, por lo que se puede utilizar cualquier molino para molienda de alimentos, como el molino de discos que sería también un equipo adecuado para la molienda de la okara.

CAPÍTULO V

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

CONCLUSIONES

- Los resultados alcanzados en los análisis fisicoquímicos realizados en el CEANID para determinar las propiedades fisicoquímicas de la okara procedente de la empresa NUTRIR, son los siguientes: contenido nutricional y de humedad: fibra, 0.53%; grasa 3.72%, y proteína 7.59% y un contenido de humedad de 83.12%.
- Las variables que se determinaron para las condiciones de operación en el proceso productivo, son aquellas obtenidos de acuerdo al diseño experimental para el proceso de secado, habiéndose llegado a la conclusión que la temperatura de operación es de 65°C y el espesor en las bandejas sea de 0.5 cm, con lo que alcanza un secado en un tiempo óptimo y se obtiene una harina de mejor aspecto, con pequeñas pérdidas en el momento del secado ya que a elevadas temperaturas se forman costras en las bandejas lo que dificulta la recolección de la misma. Si se tiene un mayor espesor el tiempo de secado aumenta y puede reducir la rentabilidad de la operación.
- Según el análisis de varianza que se realizó en el proceso de secado, los factores de temperatura y espesor son significativos para un nivel de confianza de 95%. La humedad depende exclusivamente de la temperatura y del espesor de las bandejas.
- No se lograron realizar los análisis fisicoquímicos de la harina de okara que se obtuvo por el secado de la okara a una temperatura de 75°C, debido a que no se obtuvo la cantidad mínima de okara requerida por el laboratorio para realizar las determinaciones, por esta razón no se realizó la comparación de resultados para saber cuál es de mejor calidad; pero según Martínez P., Rupérez A, Pilar y Redondo Cuenca, quienes concluyen que a temperaturas superiores podrían producir caramelización de los azúcares de la fibra y desnaturalización de las proteínas que tiene la okara.
- Al realizar el análisis comparativo de textura y color entre las muestras obtenidas en el secado de la okara a temperaturas de 65°C y 75°C, se observó que a 75°C de temperatura, se presenta la caramelización de los azúcares de la fibra, lo cual puede

causar la desnaturalización de proteínas y oxidación de los ácidos grasos insaturados, lo que genera un pardeamiento de la muestra, originando un color más oscuro que la de menor temperatura de secado y que tenga una textura quebradiza, por otro lado la de 65°C de temperatura tiene un color beige claro y una textura consistente.

- A partir del balance de masa se determinó que para secar 16 kg de okara se requiere un caudal de aire de 23.93 kg/h con una velocidad de 26.37 m³ aire/h, necesarios para que se alcance una humedad en el producto final de 4.75% y obtener 0.071 kg/h de okara deshidratada con un consumo de de gas natural de 1.36 m³/h. La energía requerida para la obtención de harina de okara es de 0.63 kW.

- El dimensionamiento del equipo de secado se realizó con los datos experimentales obtenidos en el laboratorio: Temperatura de secado de 65°C, las bandejas deben de tener las siguientes dimensiones 460*640*5 mm, para introducir 1.15 kg de okara en cada bandeja, lo que significa que entran una cantidad de 3.97 kg/m², se deben construir 14 bandejas para el equipo de secado.

- Con estas especificaciones detalladas para la capacidad del secador, se buscó en el mercado un equipo similar y se encontró uno con las siguientes características:

El secador de bandejas existente en el mercado consiste esencialmente una cámara aislada que contiene un ventilador para circular el aire, haciendo pasar el mismo a través de un calentador, posee 2 carros que contienen 24 bandejas cada carro, las dimensiones de las mismas son: de 460*640*5 mm, la cámara de secado tiene un área de 20 m², tiene un rango de temperatura de 50 a 180°C.

- El tamizado de la okara se realizó en una serie de tamices UNE, lo que dio como mejor resultado una harina de 0.5 mm de tamaño, equivalente a 0.5 mm de la serie ASTM con las siguientes características: La harina de okara contiene las siguientes propiedades fisicoquímicas: 4.99% de humedad, 33.04% proteína, 4.56% de fibra, 28.11% de materia grasa, 26.24% de hidratos de carbono, 3.06% de cenizas y 490.11kcal/100g, con estos datos obtenidos se determina que la harina de okara cuenta con importantes nutrientes que se necesita para tener una buena alimentación.

- Con las características obtenidas de la harina de okara se realizó el dimensionamiento del molino de bolas. Con estas especificaciones previas se buscó

en el mercado un molino de bolas que tenga similares características y se encontró lo siguiente: un molino de bolas con la longitud de 1.49 m, diámetro de 0.84 m y una altura de 1.52 m.

- El rendimiento que se consigue de la obtención de harina de okara es muy bajo ya que de 0.4 kg/h de okara se obtiene solamente 0.063 kg/h de harina, debido a que la materia prima contiene una gran cantidad de agua la cual alcanza a 78.32%, misma se evapora en el secado de la misma hasta alcanzar 4.75% de humedad.
- El producto obtenido se envasó al vacío en bolsas medianas de polipropileno las cuales se almacenaron en un lugar fresco y seco a temperatura ambiente en bolsas oscuras para evitar el paso de la luz durante 137 días, al cabo de este tiempo se realizó un análisis fisicoquímico de las muestras. Por los resultados alcanzados, se concluye que en las condiciones de almacenamiento que tuvieron las muestras, solo pueden alcanzar a 60 días de almacenamiento. Para mayor tiempo de almacenamiento debería estudiarse otro tipo de envase menos permeable al aire.

RECOMENDACIONES

- Antes de realizar el proceso de secado se recomienda, realizar el proceso de prensado a la okara para disminuir su humedad, de manera que se acelere el proceso de secado, una vez que se realiza la extrusión se debe de realizar la disgregación de la okara para que vuelva a tener las mismas características que tenía anteriormente, lo cual es recomendable para que en el momento del secado no forme costras en las bandejas y que la okara deshidratada tenga mayor dureza que la que se realizó experimentalmente.
- Se recomienda abrir y cerrar el secado la menor cantidad de veces posible, para evitar las pérdidas de calor y la humidificación de la muestra, lo cual influye en los resultados del proceso de secado.
- Debido a las canalizaciones o desvíos en el flujo del aire, algunas áreas de la muestra de okara dispuesta sobre las bandejas, pueden tostarse en mayor medida que otras, debido a que la energía que está concentrada en el centro del secador debido al flujo de aire, por lo que se recomienda que se esparza uniformemente en las bandejas y que no tenga espesores mayores por que ofrecen mayor resistencia al flujo de aire y disminuyen la velocidad de secado, o que tengan menor espesor porque se formaría costras en las bandejas por la caramelización que se genera, lo que dificultaría el sustraído del mismo generando pérdidas.
- El molino de bolas no es el único molino que se puede utilizar para la molienda de la okara, se puede emplear otros molinos, como el molino de discos que es muy utilizado para la molienda de cereales.
- Se recomienda que el lugar de almacenamiento de la harina de okara, sea en un lugar limpio, fresco, oscuro, con aire seco, evitando que le dé la luz directa del sol y separadas de otros productos que se tengan con las que puedan intercambiar olores.
- Para las condiciones de almacenamiento propuestas en el trabajo, solo se recomienda el almacenamiento por 2 meses de conservación de la harina de okara, ya que después de este tiempo se tiene la presencia de las bacterias aerobias mesófilas.

- Se recomienda realizar pruebas de conservación de la harina de okara con distintos tipos de envases para observar cuál de estos es el mejor para su conservación y que cambios se puede llegar a ver con las propiedades nutricionales de la harina.
- Es importante que la empresa NUTRIR cuando aumente la producción de leche de soja, piense en instalar un equipo de secado con mayor capacidad, para dar valor agregado a este importante alimento.
- Es importante que se realice un proyecto de factibilidad referido a la producción de harina de okara, en el cual se incluya un estudio detallado de los indicadores económicos para la implementación de una pequeña planta piloto industrial.
- Investigar la utilización de la harina de okara como insumo suplementario para productos alimenticios como en pastelería, panificación, producto balanceados; debido a sus beneficios nutricionales, ya que contribuyen a mejorar la calidad nutricional de los productos que la contengan.
- El aprovechamiento de los subproductos de la harina de okara puede proporcionar una fuente potencial de ingredientes funcionales, sobre todo de fibra alimentaria y de proteínas.
- Sería recomendable realizar el secado de la okara en otros equipos como el secador de spray y de vacío para observar la calidad del alimento seco y las variables que se tienen que controlar.