



**Escuela Superior Politécnica del Litoral**

**Facultad de Ciencias Naturales y Matemáticas**

**Departamento de Ciencias Químicas y Ambientales**

**PROYECTO DE GRADUACIÓN**

**Diseño, construcción y puesta en marcha de un Secador tipo Batch de Lecho Fluidizado para el Laboratorio de Operaciones Unitarias.**

**Previo a la obtención del título de:**

**INGENIERO QUÍMICO**

**Preparado por:**

**María Natalia González González**

**Guayaquil – Ecuador**

**2015**

## **Dedicatoria**

Este proyecto de graduación lo dedico a Dios, el todo en mi vida, quien me da la fuerza necesaria para seguir adelante, respaldándome en todo momento y ayudándome a superar los obstáculos presentados en el camino.

Natalia González

## **Agradecimiento**

Brindo mi más sincero agradecimiento a Dios, y a las personas que ayudaron a la realización de este proyecto a mis padres, mis hermanos, Andrés y al Ing. Pablo Tejada; a todos agradezco por el apoyo, comprensión, tiempo, guía, y su ayuda incondicional durante las actividades realizadas indispensables para el desarrollo del proyecto de graduación presente.

Natalia González

## TRIBUNAL DE GRADUACIÓN

---

**Ing. Oswaldo Valle**  
**Decano FCNM**

---

**Ing. Pablo Tejada**  
**DIRECTOR DE TESIS**

---

**Ing. Carlos Balladares**  
**VOCAL PRINCIPAL**

---

**Dra. Patricia Manzano**  
**VOCAL ALTERNO**

### **Declaración Expresa**

La responsabilidad del contenido de este Proyecto de Graduación, nos corresponde exclusivamente y el patrimonio intelectual de la misma a la ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL.

(Reglamento de Graduación de la ESPOL)

María Natalia González González

---

Guayaquil, 19 de Mayo del 2015

## RESUMEN

El presente proyecto de tesis consiste en el diseño y posterior construcción de un Secador de Lecho Fluidizado para el Laboratorio de Operaciones Unitarias de la ESPOL, con la finalidad de que los estudiantes de la carrera puedan realizar prácticas que complementen su estudio teórico.

Este proyecto se basa en que el secado por fluidización es óptimo con respecto a otros secadores de granos, basándonos en el tiempo de secado para una determinada cantidad de granos, y en el porcentaje de humedad a retirarle, para ello, se analizará de manera práctica varias de las alternativas de secado existentes en el mercado.

Para lograrlo se realizó el estudio de los diversos parámetros presentes en los fenómenos de la fluidización y secado, así como la investigación de las propiedades de los granos que se va a utilizar en el secador.

El primer paso fue seleccionar los granos, basándonos en su forma, (preferencia circular), diámetro y/o altura (preferencia tamaño pequeño), con suficiente dureza para que no se parta al momento de la fluidización (1), también, estos granos debían ser granos que se puedan secar (no todos se

pueden), que sean de consumo humano y que se consigan fácilmente en Guayaquil - Ecuador.

Una vez seleccionados se realizó varios análisis como, contenido de humedad, y determinación de factores necesarios para los cálculos de fluidización y secado en función del fenómeno de transferencia masa que se produce en esta operación. Sin embargo cabe recalcar que en esta Operación Unitaria de Secado por Fluidización también se producen los fenómenos de transporte de energía y cantidad de movimiento.

Con los datos y cálculos correspondientes se procedió a realizar el diseño que tendría el secador, el cual consta de una columna en la que se colocará el grano a secar, formando un lecho. El fluido utilizado para que el fenómeno de la fluidización ocurra será el aire proveniente de un soplador de 1745 RPM cuyo motor es de 1,5 KW y 10,5 Amperios, este aire pasará por tres resistencias eléctricas, de las cuales dos de ellas son de 1,2 KW y 5,7 Amperios, la otra es de 3 KW y 14,5 Amperios, para aumentar su temperatura, seguido de esto ingresará a la columna de manera ascendente.

De esta manera el aire caliente secará parte de la humedad que posee el grano y gracias a que el flujo es turbulento y el movimiento de los granos es variado el secado se realizará de una forma óptima.

El detalle de las condiciones del aire y granos, se detalla en el Capítulo 3



2.5. FUNDAMENTOS DE LA FLUIDIZACIÓN .....	28
2.5.1. Fluidización .....	28
2.5.2. Características del proceso. ....	28
2.5.3. Aplicaciones de la fluidización. ....	29
2.5.4. El fenómeno de la fluidización. ....	30
2.6. Sistema de lecho fluidizado. ....	33
3.1. PROCEDIMIENTO DE LOS ANÁLISIS DE LA MUESTRA.....	35
3.1.1. Contenido de humedad Protocolo #CBE-PROT-BP-30.....	36
3.1.2. Diámetro equivalente de granos .....	36
3.1.3. Porosidad de lecho.....	36
3.2. RESULTADO DE LOS ANÁLISIS DE LAS MUESTRAS .....	37
3.3. Secado preliminar .....	38
3.4. Parámetros del aire.....	41
CAPÍTULO 4.    DISEÑO DEL SECADOR DE LECHO FLUIDIZADO .....	42
4.1. CÁLCULOS DE FLUIDIZACIÓN .....	42
4.2. TABLA DE RESULTADOS.....	53
4.3. MEDIDAS FINALES PARA EL DISEÑO DEL FLUIDIZADOR.....	55
4.4.1. RECURSOS HUMANOS.....	56
4.4.2. RECURSOS MATERIALES.....	56
4.4.3. RECURSOS TOTALES .....	57
4.4.4. MATERIALES USADOS PARA LA CONSTRUCCIÓN DEL EQUIPO .....	58
4.5. CÁLCULOS DEL PROCESO DE SECADO .....	59
4.5.1. PERIODO CONSTANTE.....	59
En Secador de Lecho Fluidizado:.....	65
4.5.2. RESULTADOS DE TIEMPO EN PERIODO DE VELOCIDAD CONSTANTE .....	67
4.5.3. PERIODO DECRECIENTE.....	67
4.5.4. RESULTADOS DE TIEMPO TOTAL .....	81
4.5.5. RESULTADOS DE HUMEDAD EN EQUILIBRIO .....	81
4.6. BALANCE DE MATERIA PARA EL SECADOR DE LECHO FLUIDIZADO.....	82
4.7. EFICIENCIA.....	83

4.8. ANÁLISIS DE RESULTADOS .....	83
CAPÍTULO 5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	85
5.1. CONCLUSIONES.....	85
5.2. RECOMENDACIONES.....	86
BIBLIOGRAFÍA.....	87
ANEXOS .....	89

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 Resultado de análisis de muestras .....	37
Tabla 2 Resultado de análisis luego del secado al sol.....	39
Tabla 3 Parámetros del frijol de palo (arveja) .....	39
Tabla 4 Parámetros del maíz morocho .....	39
Tabla 5 Parámetros del cacao .....	40
Tabla 6 Parámetros del aire.....	41
Tabla 7 Resultados de fluidización para cada grano .....	53
Tabla 8 Límites permisibles .....	54
Tabla 9 Medidas para el diseño del fluidizador .....	55
Tabla 10 Recursos Humanos.....	56
Tabla 11 Recursos Materiales .....	56
Tabla 12 Recursos Totales .....	57
Tabla 13 Materiales usados para la construcción del secador por fluidización .....	58
Tabla 14 Datos de Ensayo experimental en la estufa.....	62
Tabla 15 Datos de Ensayo experimental en Secador de Lecho Fluidizado ..	62
Tabla 16 Tiempo en llegar a la Humedad crítica.....	67
Tabla 17 Humedad y Velocidad de secado teóricos para la Arveja en la Estufa.....	67
Tabla 18 Área bajo la curva (Tiempo en periodo decreciente) para la Arveja en la Estufa.....	68

Tabla 19 Humedad y Velocidad de secado teórico para Cacao en la Estufa	69
Tabla 20 Área bajo la curva (Tiempo en periodo decreciente) para Cacao en la Estufa.....	70
Tabla 21 Humedad y Velocidad de Secado para Maíz en la Estufa .....	71
Tabla 22 Área bajo la curva (Tiempo en periodo decreciente) para Maíz en la Estufa.....	72
Tabla 23 Humedad y Velocidad de secado para Arveja en secador de lecho fluidizado.....	74
Tabla 24 Área bajo la curva (Tiempo en periodo decreciente) para Arveja en Secador de lecho fluidizado.....	75
Tabla 25 Humedad y Velocidad de secado para Cacao en Secador de lecho fluidizado.....	77
Tabla 26 Área bajo la curva (tiempo en periodo decreciente) para Cacao en Secador de lecho fluidizado.....	78
Tabla 27 Humedad y Velocidad de secado para Maíz en Secador de lecho fluidizado.....	79
Tabla 28 Área bajo la curva (tiempo en periodo decreciente) para Maíz en Secador de lecho fluidizado.....	80
Tabla 29 Tiempo total de secado.....	81
Tabla 30 Humedad de equilibrio de cada grano en diferentes secadores ....	81
Tabla 31 Humedad Removida de cada grano .....	82

Tabla 32 Eficiencia de Secador de Lecho Fluidizado respecto al tiempo de secado por cada grano. ....	83
--	----

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 Recomendaciones nutricionales del consumo de granos en la dieta diaria de las personas.....	11
Figura 2 Secador de Bandejas.....	17
Figura 3 Secador Rotatorio.....	18
Figura 4 Secador de Lecho Fluidizado.....	19
Figura 5 Secador de Banda Continua.....	20
Figura 6 Secador de tambor.....	21
Figura 7 Secador por Liofilización.....	22
Figura 8 Curva de pérdida de peso.....	24
Figura 9 Curva de Velocidad de secado.....	25
Figura 10 Fenómeno de la fluidización.....	32
Figura 11 Diagrama de flujo de Secador de lecho fluidizado.....	33
Figura 12 Límites permisibles.....	55
Figura 13 Curva de Humedad del cacao.....	1

## ÍNDICE DE GRAFICAS

Gráfica 1 Curva de Pérdida de peso para Arveja en estufa.....	63
Gráfica 2 Curva de Pérdida de peso para Cacao en estufa.....	64
Gráfica 3 Curva de Pérdida de peso para Maíz en estufa .....	64
Gráfica 4 Curva de Pérdida de peso para Arveja en Secador Lecho Fluidizado .....	65
Gráfica 5 Curva de Pérdida de peso para Cacao en Secador Lecho Fluidizado .....	66
Gráfica 6 Curva de Pérdida de peso para Maíz en Secador Lecho Fluidizado .....	66
Gráfica 7 Velocidad de secado para Arveja en Estufa.....	68
Gráfica 8 Periodo de Velocidad decreciente para Arveja en Estufa.....	69
Gráfica 9 Velocidad de Secado para Cacao en Estufa .....	70
Gráfica 10 Periodo de Velocidad decreciente para Cacao .....	71
Gráfica 11 Velocidad de Secado para Maíz en Estufa.....	72
Gráfica 12 Periodo de Velocidad decreciente para Maíz en Estufa .....	73
Gráfica 13 Velocidad de Secado para Arveja en Secador Lecho Fluidizado	75
Gráfica 14 Periodo de Velocidad decreciente para Arveja en Secador de Lecho Fluidizado.....	76
Gráfica 15 Velocidad de Secado para Cacao en Secador de lecho fluidizado .....	77

Gráfica 16 Período de Velocidad decreciente para Cacao en secador de lecho fluidizado .....	78
Gráfica 17 Velocidad de secado para Maíz en secador de lecho fluidizado .	79
Gráfica 18 Periodo de Velocidad decreciente para Maíz en secador de lecho fluidizado.....	80

## ABREVIATURAS

V	Volumen	m <sup>3</sup>
ε	Porosidad del lecho	[Adimensional]
s	Factor forma	[Adimensional]
L	Altura de fluidización	m
D <sub>p</sub>	Diámetro equivalente	m
V <sub>mf</sub>	Velocidad mínima de fluidización	m/s
ρ	Densidad	Kg/m <sup>3</sup>
μ	Viscosidad dinámica	Pa.s
k	Constante	[Adimensional]
Re	Reynolds	[Adimensional]
Δp	Caída de presión	psi
R:	Velocidad de secado	Kg Ss/h-m <sup>2</sup>
A	Superficie de secado	m <sup>2</sup>
T <sub>t</sub>	Tiempo total	h
T <sub>c</sub>	Tiempo en periodo constante	h
T <sub>d</sub>	Tiempo en periodo decreciente	h
X	Humedad libre	KgH <sub>2</sub> O / Kg Ss
X*	Humedad en equilibrio.	KgH <sub>2</sub> O / Kg Ss

## INTRODUCCIÓN

El consumo de granos en la actualidad constituye la dieta básica del diario vivir, debido principalmente a su contenido proteico ; el uso de estos va dirigido tanto a humanos como a animales y es por esta razón que se comercializan de distintas maneras, sean estas como harina, balanceado o el grano como tal.

Lo cierto es que para cada una de estas presentaciones el grano debe presentar un contenido de humedad (agua) relativamente bajo; de esta manera se conserva mejor, y también se obtiene mayor porcentaje de materia seca, lo cual permite aprovechar de mejor manera sus propiedades.

(2). Además, el sólido, al poseer un bajo contenido de agua, implica que su actividad de agua ( $a_w$ ) será pequeña favoreciendo el control bacteriano en estos alimentos.

Entre los métodos más comunes que se usan para secar los granos están, el secado al sol que como su nombre lo dice, consiste en exponer los granos al sol por largas horas hasta que éstos se sequen con ayuda del aire atmosférico; Secado por bandejas, secado de túnel, que consisten en poner los granos en anaqueles e ingresar corrientes de aire caliente en

contracorriente la diferencia entre ellos radica en el área superficial es indistinto puesto que la velocidad con la que entra el aire y el tiempo de estadía pueden variar en un rango muy rápido.

También existe el secado por lecho fluidizado el cual consiste en mantener los granos flotando, provocado por la presión y velocidad con la que entra el aire esta fuerza debe superar a la fuerza de la gravedad.

En el presente proyecto hablaremos sobre el secado por fluidización, debido a que se demostrará que es la opción más óptima, además de que uno de los objetivos de este proyecto es dotar el equipo al Laboratorio de Operaciones Unitarias para que los futuros estudiantes contemplen las operaciones de fluidización y secado en su estudio experimental.

El diseño y la construcción del equipo tomarán en cuenta los parámetros del grano, los parámetros del aire que se utilizará, las temperaturas a la que se someterá el grano y si esto cambiara, la calidad del mismo.

# **CAPÍTULO 1. GENERALIDADES**

## **1.1. ANTECEDENTES**

Desde la antigüedad al referirnos de alimentos, el secado es de mucha importancia, es fundamental en la conservación de éstos mediante la reducción de la humedad, lo cual inhibe la proliferación de microorganismos y la germinación de las semillas hasta un nivel que impida el crecimiento de hongos.

Cuando se habla de granos es necesario saber cuándo se debe secar debido a que los granos tienen un contenido máximo de materia seca al llegar a la maduración, por esto, es conveniente que se cosechen en ese momento, para obtener un rendimiento óptimo en su producción. Sin embargo, el alto contenido de humedad de los granos limita su cosecha y hay que mantenerlos

en el campo hasta que el contenido de humedad permita cosecharlos o hasta que alcancen un contenido de humedad apropiado para su almacenamiento, no obstante, se recomienda cosechar los granos húmedos tan pronto como sea posible. (2)

Para ello, existen varios métodos para el secado entre los cuales podemos mencionar:

- Al sol
- De bandejas a presión
- Rotatorio
- Entre otros
- Lecho Fluidizado
- Banda Continua
- Pulverizador

Pero, ¿Por qué se debe secar? Se debe secar por las siguientes razones:

- Obtener mayor porcentaje de materia seca
- Reducir pérdidas provocadas por depredadores
- Buena calidad para el almacenamiento
- Disminuir la proliferación bacteriana

En la mayoría de los países de América Latina, el contenido de humedad de los granos para un almacenamiento seguro comprende un rango de 11 a 13 por ciento, base húmeda, para los principales tipos de granos. (3)

## 1.2. EL PROBLEMA

En el ámbito académico, la teoría y práctica son dos realidades diferentes, éstos constituyen conocimientos de igual importancia, pero que se desenvuelven en distintos contextos, (refiriéndonos a nivel estudiantil y laboral), generando de esta manera una situación tensa al no estar preparados, a pesar de ser una situación justificable, constantemente se ignoran la una de la otra, y ésta es una de las principales fuentes que generan problemas en el proceso de enseñanza – aprendizaje. Es necesaria la combinación de la teoría con la práctica, cuando esto no sucede, ocurre desequilibrio. (4)

En este proyecto se pretende compensar esta necesidad en un tema determinado, pero de mucha importancia a nivel profesional-laboral referente a la conservación de alimentos, el proceso al que nos referimos es el secado, sin embargo al existir diversos tipos de secado es necesario saber elegir, y/o considerar cuál es adecuado para el tipo de alimento que se quiere secar. Así también el saber manejar el equipo a construir, de esta manera el estudiante que tiene presente la teoría, va a estar preparado y a tener la noción de lo que está sucediendo.

A su vez tendrá las bases suficientes no solo para el trabajo sino para la optimización del mismo. Si no se tiene buena base teórica - experimental se dificulta tener un buen criterio ingenieril, que haga frente a los problemas reales en la industria.

### **1.3. JUSTIFICACIÓN**

Es grato poder poner en práctica el conocimiento teórico proporcionado durante el estudio de la carrera, es por ello que se quiere contribuir con un secador de lecho fluidizado, en el cual se desarrolla y pone a prueba mi criterio como futura ingeniera química.

Al mismo tiempo se da la oportunidad a los nuevos estudiantes a que amplíen su conocimiento mediante pruebas experimentales y ya no únicamente conocimientos teóricos.

Lo que se quiere realizar a través de ensayos experimentales es reforzar la teoría aprendida, que se pueda ver de cerca el proceso de secado, poder detallar el comportamiento de la materia a secar, y obtener excelentes conclusiones no solo a nivel estudiantil sino proyectándose a un nivel profesional en el ámbito laboral.

## **1.4. OBJETIVOS**

### **1.4.1. Objetivo general**

- Diseñar, Construir y poner en marcha un Secador Batch piloto de lecho fluidizado.

### **1.4.2. Objetivos específicos**

- Construir un equipo piloto que valide el conocimiento y corroborar ecuaciones teóricas.
- Calcular las dimensiones del secador para una capacidad teórica de 10 Kg/lote.
- Determinar tiempos óptimos de secado hasta llegar a la humedad crítica para tres variedades de granos.
- Analizar el comportamiento de la materia fluidizada.
- Determinar la eficiencia del Secador de Lecho Fluidizado, en función de los tiempos de secado en comparación de otro tipo de Secador.

## **1.5. ALCANCE**

Con el proyecto de tesis a realizar se pretende desarrollar un mecanismo de estudio detallado complementando la teoría con la práctica. No obstante se construirá un equipo a nivel de laboratorio, el cual será para uso exclusivo de prácticas, constará con un instructivo para manejar el equipo, el producto analizado no podrá ser consumido.

## **CAPÍTULO 2. MARCO TEÓRICO**

### **2.1. VARIEDADES DE GRANO**

Los granos desde la antigüedad han sido un alimento de primera necesidad para los seres humanos, siendo distintas las maneras de consumirlo, los granos más usados para una dieta balanceada en las personas son:

- Frijol
  - Frijol de palo
  - Frijol canario
  - Frijol panamito

- Maíz
- Cacao
- Café
- Cereales
- Maní
- Semillas

De manera específica hablaremos de los tres primeros tipos de granos.

Edad	Niñas y Mujeres		Niños y Hombres	
	Granos Enteros (g)	Granos Totales (g)	Granos Enteros (g)	Granos Totales (g)
2 - 3	1.5	3	1.5	3
4 - 8	2	4	2.5	5
9 - 13	3	5	3	6
14 - 18	3	6	3.5	7
19 - 30	3	6	4	8
31 - 50	3	6	3.5	7
51+	3	5	3	6

**Figura 1** Recomendaciones nutricionales del consumo de granos en la dieta diaria de las personas

**Fuente:** Referencia (5)

### **2.1.1. Frijol de palo (arveja)**

Es una planta herbácea trepadora de la familia del guisante, de hojas compuestas y flores blanquecinas o violetas, entre sus características podemos destacar lo siguiente:

- Su altura es menor de 0.4 m.
- Las arvejas se encuentran en vainas que contienen entre 4 y 10 unidades.

#### Propiedades nutricionales:

Las arvejas se pueden consumir frescas o secas pero varían respecto a su contenido en nutrientes. Las frescas son mucho más dulces y sabrosas, contienen mucha más agua que las secas, pero menos proteínas.

- Contiene fibra lo cual ayuda a reducir los niveles de colesterol
- Fuente compacta de proteínas y vegetales.
- Contiene hidratos de carbono complejos lo cual llenan más y proporcionan energía por más tiempo.

### Requerimientos climáticos:

Es un cultivo de clima templado algo húmedo, se adapta al frío, por lo que en el Ecuador específicamente se da en la sierra en las provincias de Bolívar, Chimborazo, Loja, Cañar, Carchi, Imbabura, Pichincha, Azuay y Tungurahua, tanto para cosecharlo en grano tierno o seco.

Su ciclo vegetativo corto entre siembra y cosecha es de 4 y 5 meses respectivamente. (6)

### **2.1.2. Maíz**

El maíz es un cereal con mayor volumen de producción mundial, es usado para el consumo humano y consumo animal en cuanto a la fabricación de balanceado.

Existe una gran variedad de granos de maíz entre ellos están:

- Maíz amarillo
- Canguil
- Maíz dulce
- Maíz negro
- Morocho

Los granos del maíz se encuentran en mazorcas, es un cereal de crecimiento rápido, sin embargo la cosecha más alta se da en ciclo de invierno.

#### Propiedades nutricionales:

- Contiene un nutriente similar a la vitamina B3 llamado inositol, el cual ayuda a metaboliza las grasas, reduciendo así el colesterol.
- Contiene beta caroteno el cual es un antioxidante.
- Recomendado para problemas intestinales puesto que es rico en fibra.
- Recomendado para personas con alergias al gluten.
- Es muy energético, se recomienda para deportistas o personas que estén en constante actividad física.

#### Requerimientos climáticos:

- El cultivo es sensible a bajas temperaturas
- En el Ecuador se da en las provincias de: Manabí, Esmeraldas y Guayas.
- Sensible a la salinidad del suelo (7)

- La temporada de cosecha más alta se da en ciclo de invierno (Abril - Julio).

### **2.1.3. Cacao**

El grano de cacao es la semilla fermentada y secada del *Theobroma cacao* (nombre científico de esta especie vegetal), se encuentra mayormente en el Litoral y en la Amazonía, es un árbol con flores pequeñas y producen una mazorca que contiene granos cubiertos de una pulpa rica en azúcar, generalmente las semillas son blancas, y se tornan color marrón durante el proceso de secado, del cacao se extraen los sólidos y la manteca, estos granos son la base del chocolate.

Este grano tiene gran acogida en el mercado mundial no solo por rico sabor y aroma sino también por las propiedades que este contiene:

#### Propiedades Nutricionales:

- Acción estimulante sobre el sistema nervioso
- Estimula tanto el sistema digestivo como los intestinos
- Actúa en caso de estreñimiento
- Es un buen liberador de endorfinas, por ello favorece el buen estado de ánimo

- Contiene teobromina, un alcaloide semejante a la cafeína
- Es rico en poli fenoles, ayudando a proteger nuestra salud cardiovascular.

Requerimientos climáticos:

- Se da en zonas de climas cálidos y húmedos.
  - Su crecimiento se desarrolla bajo sombra, por lo cual es recomendable hacer sembríos de otros cultivos alrededor del cacao.
  - Sensible a la escasez de agua, pero también al encharcamiento.
- (8)
- El ciclo vegetativo del cacao se produce a lo largo de todo el año, en dos ciclos de 6 meses, en los que miles de flores cubren tronco y ramas.

## **2.2. FUNDAMENTOS DEL SECADO**

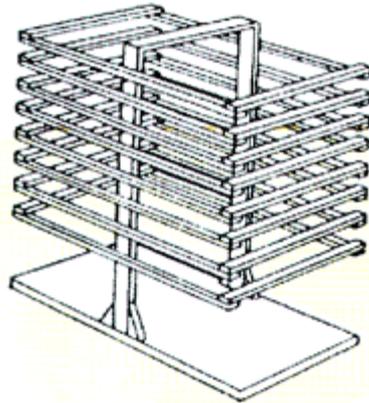
El secado es una operación que permite eliminar la humedad de una sustancia por medios térmicos, esto facilita la manipulación y el transporte, disminuye el peso, el volumen, a su vez incrementa el valor económico del producto, permite una buena conservación de alimentos y medicamentos en general. (3).

Generalmente se utiliza la palabra secado para referirnos a la eliminación de cantidades “pequeñas” de agua de sólidos porosos o no porosos.

Existen dos tipos de secadores los directos (aire) y los indirectos (fuente térmica) a su vez estos se clasifican en continuos y discontinuos como se detalla a continuación:

### 2.2.1. Directos – Discontinuos

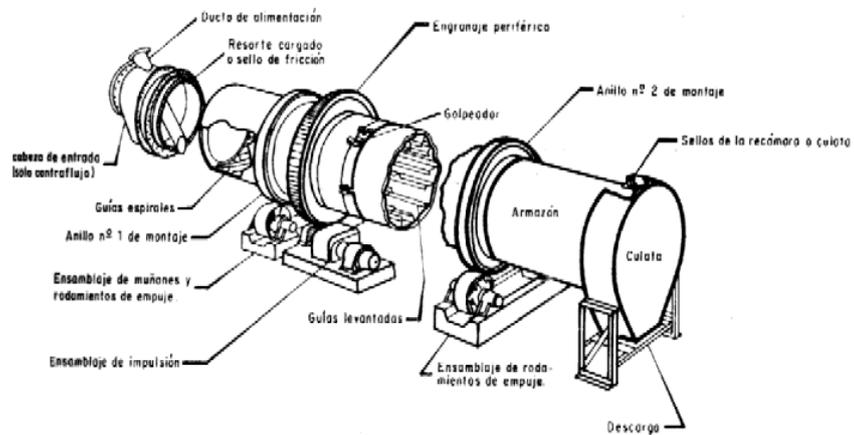
- **De bandejas a presión atmosférica o al vacío.-** El secado se produce por la circulación de aire caliente sobre bandejas que contienen material húmedo.



**Figura 2** Secador de Bandejas

**Fuente:** Referencia (3)

- **Discontinuo agitado a presión atmosférica o al vacío.-** Es diseñado para la industria farmacéutica, en su diseño lleva incorporado unas palas que pueden tratar cualquier tipo de sólido.
- **Rotatorio a presión atmosférica o al vacío.-** Tiene mayor eficiencia, el aire se homogeniza al girar.



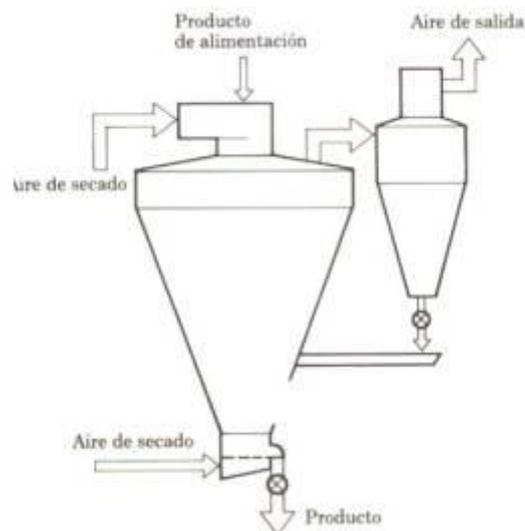
**Figura 3** Secador Rotatorio

**Fuente:** Referencia (9)

### 2.2.2. Directo – Continuo

- **Lecho fluidizado.-** En este secador las partículas se fluidizan con aire en una unidad de lecho hirviente, da lugar a la formación de partículas fluidizadas hasta que vuelven a caer en el lecho fluidificado debido a su peso. La mezcla y transferencia de calor son muy rápidas.

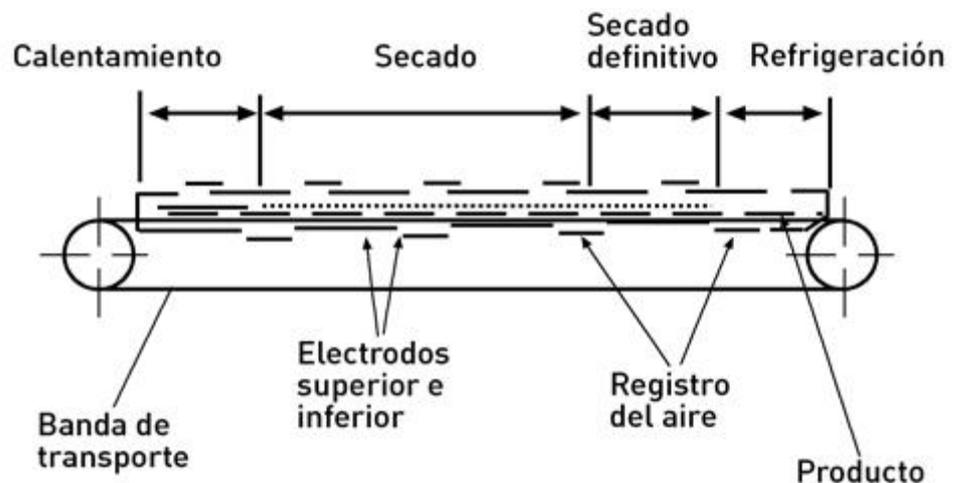
Este tipo de secador también puede estar dentro de los secadores discontinuos.



**Figura 4** Secador de Lecho Fluidizado

Fuente: Referencia (10)

- **Banda continua con circulación transversal.**- Puede usarse con cualquier material que disponga forma de partícula con un tamaño entre 3y 15 mm, se controla variando la temperatura y la velocidad de la banda.



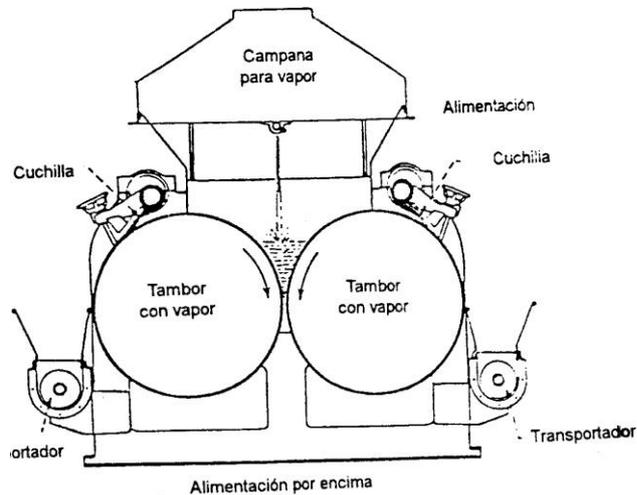
**Figura 5** Secador de Banda Continua

**Fuente:** Referencia (11)

### 2.2.3. Indirectos

- **Tambor.**- Consta de un tambor de metal calentado, en las paredes se evapora el líquido, mientras una cuchilla metálica, raspa lentamente el sólido, para que descienda por el tambor, hasta la salida, por lo general este tipo de secadores se usan en

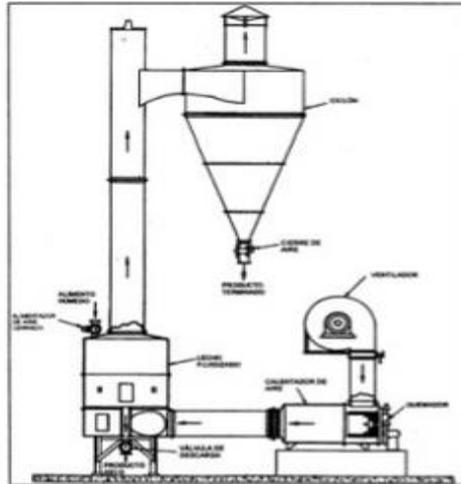
trabajos con pastas, suspensiones y soluciones. Este secador es una mezcla entre secador y evaporador. (12)



**Figura 6** Secador de tambor

**Fuente:** Referencia (8)

- **Secado por Liofilización.-** Este es un proceso utilizado para la conservación mediante la sublimación, se utiliza con el fin de reducir las pérdidas de componentes volátiles, este proceso es más usado para la conservación de productos biológico, no altera la estructura fisicoquímica del material, y permite su conserva indefinida sin cadena de frío, manteniendo sus características nutricionales intactas. (13)



**Figura 7** Secador por Liofilización

**Fuente:** Referencia (10)

### 2.3. SECADO EN SOLIDOS

Cuando se refiere a secado no solo hablamos de los tipos de secadores que intervienen, sino también el comportamiento de la materia a secar en dicho equipo.

De manera general, el secado significa la remoción de cantidades de agua relativamente pequeñas. La evaporación se refiere a la eliminación de cantidades bastantes grandes de agua y ésta se elimina en forma de vapor a su punto de ebullición; En el secado, el agua casi siempre se elimina en forma de vapor con aire.

El contenido de humedad del producto seco final varía ya que depende del tipo de sólido. (14)

Se debe tener presente la humedad que está implicada para este caso humedad implicada en los granos. (15)

Tipos de Humedad en el sólido:

- Humedad en equilibrio: Es la porción de humedad que no puede ser removida por el aire de secado.
- Agua Libre: Es el excedente de la humedad de equilibrio del sólido. Se divide en agua no ligada y agua ligada.
- Agua no Ligada: Se encuentra en los huecos de los sólidos conformados por partículas grandes y no porosas.
- Agua ligada: Es el agua que esta retenida por el sólido
- Humedad libre: Es la diferencia entre el contenido de agua total del sólido y el contenido de agua en equilibrio:

### **2.3.1. Contenido de Humedad del sólido**

El contenido de humedad de un sólido se puede expresar de dos formas:

- Base Húmeda:  $\text{Masa del agua} / \text{Masa total del sólido}$
- Base Seca:  $\text{Masa del agua} / \text{Masa del sólido seco}$

En el fenómeno de secado se utiliza de preferencia "base seca", ya que es la cantidad de agua que tiene el grano en relación solamente a la cantidad de materia seca.

### 2.3.2. Cinética del Secado

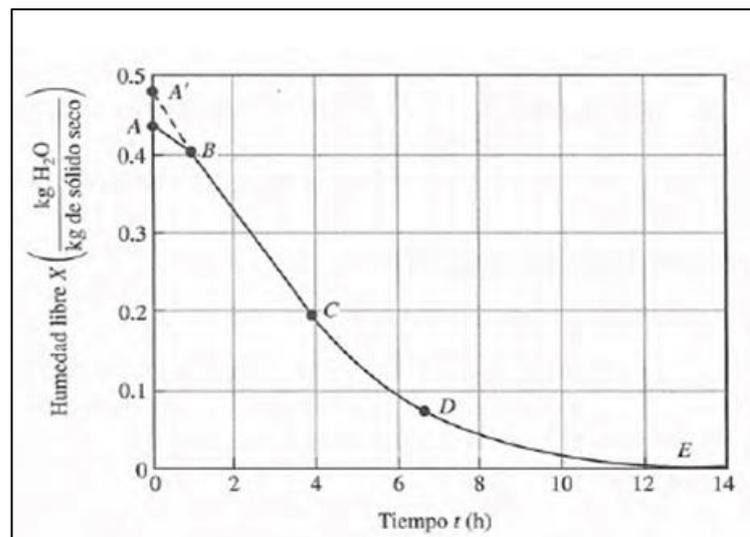
La cinética de secado es establecer la capacidad de secado de un equipo mediante la velocidad y tiempo de secado.

Para establecer la velocidad de secado el procedimiento consta de dos pasos:

- Curva de pérdida de peso.
- Curva de Velocidad de secado.

Estas curvas indican el comportamiento del sólido a medida que se seca, es importante notar que van a existir dos periodos de velocidad en el cual uno será constante y el otro será decreciente. (15)

**Figura 8** Curva de pérdida de peso



**Fuente:** Referencia (15)



Es importante recalcar que en algunos casos el tramo CD no va a existir ó va a constituir la totalidad del periodo de velocidad decreciente. (15)

En la gráfica adjunta, que constituye un ejemplo de las velocidades de secado, la humedad de equilibrio llega a ser cero; normalmente en la mayoría de sólidos la humedad de equilibrio será mayor a cero en función de la curva de equilibrio.

### **2.3.3. Tiempo de Secado**

Para determinar el tiempo de secado se lo puede hacer mediante el uso de las gráficas anteriores y de manera experimental, de manera que:

$$T_t = T_1 + T_2$$

T<sub>t</sub>: Tiempo total de secado.

T<sub>1</sub>: Tiempo de secado para R cte.

T<sub>2</sub>: Tiempo de secado para R decreciente.

### 2.3.4. Método experimental

Tanto la velocidad como el tiempo de secado se pueden calcular de manera experimental. (15)

$$R = -\frac{Ls}{A} \frac{dx}{dt}$$

Dónde:

$R$ : Velocidad de secado

$A$ : Superficie de secado

$\frac{dx}{dt}$ : Derivada de la humedad en el periodo constante o decreciente respecto al tiempo.

Tiempo de secado

$$T_t = T_c + T_d$$

$$T_c = \frac{Ls (X_b - X_c)}{AR}$$

$$T_d = \frac{Ls}{A} \int_{x_1}^{x_2} \frac{dx}{R}$$

La determinación del tiempo de secado en el período de velocidad decreciente, se puede realizar integrando de manera gráfica (área bajo la curva de un diagrama  $(1/R)$  vs  $X$  o de manera analítica si se conoce la relación entre velocidad de secado en este período y la humedad del sólido correspondiente.

## **2.5. FUNDAMENTOS DE LA FLUIDIZACIÓN**

### **2.5.1. Fluidización**

La fluidización es uno de los métodos más utilizados para producir un contacto entre sólidos y fluidos y generando una mayor transferencia de materia entre ambos.

La fluidización ocurre cuando partículas sólidas son suspendidas mediante un flujo ascendente de fluido (líquido o gaseoso) que pasa a través de un lecho formado por el sólido, este lecho adquiere propiedades similares a la de los fluidos. Este método permite que el fluido tenga un contacto total con la superficie del sólido, logrando un favorecimiento en los mecanismos de transferencia.

### **2.5.2. Características del proceso.**

Para la Fluidización generalmente se hace circular un fluido de forma ascendente a través de un lecho de material sólido, a medida de que el fluido atraviesa los huecos del lecho, la fuerza ejercida por el fluido no logra vencer la fuerza de gravedad, por lo tanto el fluido pasa por los diferentes huecos que posee el lecho.

Cuando la velocidad del fluido aumenta, ocurre un reordenamiento de las partículas en el lecho, lo que produce que poco a poco el lecho vaya ganando volumen a tal punto de que comienza una vibración de las partículas y adquiere propiedades del fluido, este estado se conoce como fluidización incipiente y tiene una velocidad de mínima fluidización.

A medida de que la velocidad del fluido aumenta, la caída de presión incrementa hasta un punto en que el fluido tiene suficiente velocidad para levantar el grano y lograr un lecho expandido. (16)

### **2.5.3. Aplicaciones de la fluidización.**

La fluidización se utiliza en varias operaciones y estas son:

- Secado
- Transporte de partículas
- Reacciones catalíticas heterogéneas
- Cristalización
- Lavado o lixiviación
- Adsorción e intercambio iónico. (17)

#### 2.5.4. El fenómeno de la fluidización.

Si se considera un lecho de forma vertical, se pueden producir los siguientes fenómenos:

- Si la velocidad del fluido es baja, no puede vencer el peso de las partículas y el lecho será fijo (a)
- Cuando el lecho empieza a tomar propiedades del fluido, la velocidad es denominada velocidad mínima de fluidización (b)
- Al aumentar la velocidad se produce una expansión del lecho y se puede dar una fluidización homogénea (c)
- En los lechos gas-sólido se presentan burbujas y canalización cuando la velocidad aumenta por encima de la velocidad mínima de fluidización, esto puede producir zonas en las que predominan burbujas y que el lecho deje de expandirse (d)
- Las burbujas pueden coalescer (unirse entre sí) y crecer a medida que ascienden por el lecho. Si se trata de partículas pequeñas, ellas fluyen hacia abajo en las cercanías de la pared, alrededor de los paquetes de gas que ascienden (e). Si las partículas son más grandes, el lecho que queda debajo de una burbuja es empujado como con un pistón. Los sólidos se reintegran al lecho porque “llueven” a través de los paquetes de gas (f).
- Cuando se fluidiza a altas velocidades, las partículas del lecho pueden superarse y la superficie superior del lecho se desdibuja.

En este momento se observa un movimiento turbulento y se observan espacios llenos de gas de varias formas y tamaños (g).

- Si la velocidad aumenta aún más, las partículas son apartadas fuera del lecho (h). (16)

Para que ocurra el fenómeno de la fluidización es necesario determinar las condiciones y parámetros a las que se va a operar tales como:

### **Velocidad mínima de fluidización (Vmf)**

$$\frac{1.75(D_p)^2(V'_{mf})^2(\rho)^2}{\rho_s(\epsilon_{mf})^3(\mu)^2} + \frac{150(1 - \epsilon_{mf})D_p(V'_{mf})(\rho)}{(\rho_s)^2(\epsilon_{mf})^3(\mu)} - \frac{(D_p)^3(\rho)(\rho_p - \rho)g}{(\mu)^2}$$

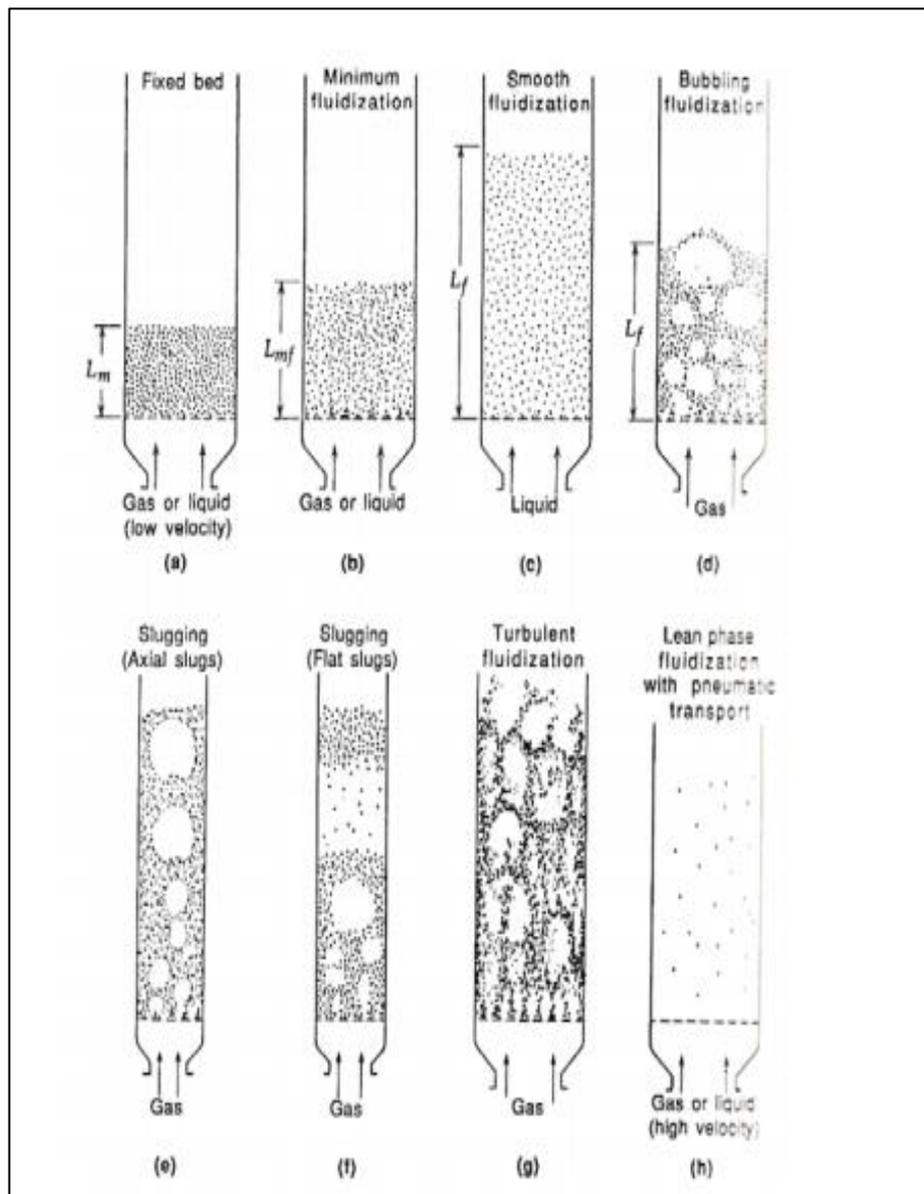
### **Velocidad de operación**

$$V_{op} = 3V_{mf}$$

### Altura de fluidización

$$\frac{L1}{L2} = \frac{1 - \epsilon_2}{1 - \epsilon_1}$$

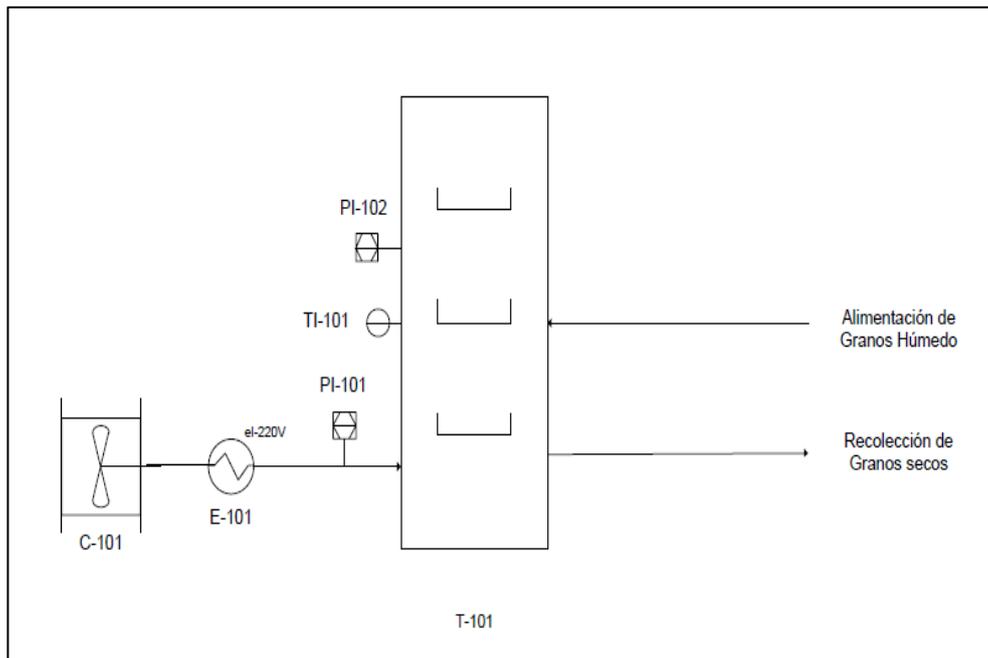
**Figura 10** Fenómeno de la fluidización



**Fuente:** Referencia (16)

## 2.6. Sistema de lecho fluidizado.

**Figura 11** Diagrama de flujo de Secador de lecho fluidizado



**Fuente:** Autor, 2015

1. Soplador: Provee del fluido que entrara de forma ascendente en la columna.
2. Intercambiador de calor: Depende de las características que queremos del fluido, este puede ser calentado.
3. Columna de fluidización: consiste en un tubo de forma cilíndrica donde se colocan las partículas que forman el lecho.

Además de estos componentes principales, se debe colocar sistemas de mediciones, los más necesarios son medidores de caudal, temperatura, presión y velocidad de flujo.

## **CAPÍTULO 3. ANÁLISIS DE LOS GRANOS EN LABORATORIO**

### **3.1. PROCEDIMIENTO DE LOS ANÁLISIS DE LA MUESTRA**

Cuando se habla de análisis en una muestra, se refiere a los procedimientos estándar, usados en el laboratorio para determinar parámetros que son necesarios al momento de realizar los cálculos previos al diseño de un equipo, en este caso equipo de secado ; entre los análisis realizados en los granos tenemos:

### 3.1.1. Contenido de humedad Protocolo #CBE-PROT-BP-30

- Obtener el peso de un crisol limpio, seco y registrar valor.
- Introducir la muestra de granos húmedos ( 2 – 5 gramos ) en el crisol y registrar valor.
- Colocar el crisol con la muestra en el horno a temperatura de 105°C durante 3 horas.
- Si se desea hacer curva de humedad tomar peso de la muestra cada 20 minutos.
- Retirar el crisol con la muestra e introducirlo a un desecador hasta que llegue a temperatura ambiente y pesarlo.
- Restar el valor obtenido del peso inicial del crisol sin muestra.
- Calcular el porcentaje de humedad del sólido (base húmeda)  
$$\% \text{Humedad} = \frac{P_i - P_f}{P_i}$$
- Convertir esta humedad en base húmeda a base seca, que será el valor a emplearse en los cálculos posteriores,

### 3.1.2. Diámetro equivalente de granos

- Separa los granos de uno en uno.
- Con un calibrador Vernier medir el diámetro y registrar valor.

### 3.1.3. Porosidad de lecho

- Colocar un volumen determinado de agua en una probeta.
- Colocar los granos en la probeta.

- Anotar el nuevo volumen que aumentó al colocar los granos.

Estos tres procedimientos se realizan para el frijol de palo (conocido también como arveja), maíz morocho y cacao.

### 3.2. RESULTADO DE LOS ANÁLISIS DE LAS MUESTRAS

**Tabla 1** Resultado de análisis de muestras

<b>Grano</b>	<b>Humedad inicial, base húmeda (%)</b>	<b>Diámetro Equivalente (m)</b>	<b>Porosidad mínima</b>
<b>Frijol de palo</b>	77.63%	0.014	0.42
<b>Cacao</b>	77,00%	0.019	0.21
<b>Maíz morocho</b>	25,00%	0.007	0.35

**Fuente:** Autor, 2015

Como se puede observar el contenido de humedad es muy alto, especialmente para dos granos, esto se debe a que el análisis se realizó

en granos que recién han sido cosechados, y tomados directamente de la mazorca en los tres casos.

Si introducimos estos granos al secador de lecho fluidizado, será casi imposible secarlos puesto que se va a formar una sola masa, sin formar el lecho poroso que se requiere para la transferencia de masa que se desea; además la Operación Unitaria de Secado consiste en eliminar cantidades “pequeñas” de agua de sólidos con humedades iniciales moderadas.

Por esta razón se debe calcular nuevamente el contenido de humedad, pero, en un grano que haya sido previamente secado (al sol), de esta manera su humedad inicial será menor y da paso a formar un lecho poroso, que permita realizar el fenómeno de la fluidización.

### **3.3. Secado preliminar**

#### **Secado al sol**

- Retirar la cáscara del grano.
- Tender los granos sobre una superficie plana, al aire libre.
- Los granos deben permanecer al sol, hasta que su humedad llegue aproximadamente a valores razonables según el tipo de grano, pueden ser entre 10% y 30% (3).

**Tabla 2** Resultado de análisis luego del secado al sol

<b>Grano</b>	<b>Humedad (%)</b> <b>Base Seca</b>	<b>Diámetro (m)</b>	<b>Porosidad (min)</b>
<b>Frijol de palo</b>	63,00	0.014	0.42
<b>Cacao</b>	9,00	0.019	0.21
<b>Maíz morocho</b>	9.71	0.007	0.35

**Fuente:** Autor, 2015

### **PARÁMETROS DE LOS GRANOS**

**Tabla 3** Parámetros del frijol de palo (arveja)

<b>Frijol de palo</b>			
<b>Parámetro</b>	<b>Símbolo</b>	<b>Valor</b>	<b>Unidad</b>
<b>Tamaño (Diámetro equivalente)</b>	D	0.01	<i>m</i>
<b>Factor Forma</b>	$\phi$	0.89	-
<b>Densidad</b>	P	433.33	$\frac{Kg}{m^3}$
<b>Porosidad mínima</b>	$\epsilon_0$	0.42	-
<b>Porosidad del lecho a mínima fluidización</b>	$\epsilon_{vmf}$	0.43	-

**Fuente:** Autor, 2015

**Tabla 4** Parámetros del maíz morocho

<b>Maíz morocho</b>			
<b>Parámetro</b>	<b>Símbolo</b>	<b>Valor</b>	<b>Unidad</b>
<b>Tamaño</b>	D	0.007	<i>m</i>
<b>Factor Forma</b>	$\phi$	0.62	-
<b>Densidad</b>	P	1922	$\frac{Kg}{m^3}$
<b>Porosidad mínima</b>	$\epsilon_0$	0.35	-
<b>Porosidad del lecho a mínima fluidización</b>	$\epsilon_{vmf}$	0.48	-

Fuente: Autor, 2015

**Tabla 5** Parámetros del cacao

<b>Cacao</b>			
<b>Parámetro</b>	<b>Símbolo</b>	<b>Valor</b>	<b>Unidad</b>
<b>Tamaño</b>	D	0.01	<i>m</i>
<b>Factor Forma</b>	$\phi$	0.55	-
<b>Densidad</b>	P	888.45	$\frac{Kg}{m^3}$
<b>Porosidad mínima</b>	$\epsilon_0$	0.21	-
<b>Porosidad del lecho a mínima fluidización</b>	$\epsilon_{vmf}$	0.50	-

Fuente: Autor, 2015

### 3.4. Parámetros del aire.

En el proceso de secado, el aire debe cumplir parámetros importantes, debido a que el fluido predomina en las dos operaciones involucradas como son la fluidización y el secado. Dependiendo de estos factores influye directamente en el tiempo de secado y la calidad del secado.

Esos factores son:

**Tabla 6** Parámetros del aire

<b>Parámetros del aire</b>			
<b>Parámetro</b>	<b>Símbolo</b>	<b>Valor</b>	<b>Unidad</b>
<b>Presión</b>	P		Atm
<b>Temperatura ambiente</b>	T	25	°C
<b>Viscosidad dinámica</b>	$\mu$	$1.82 \times 10^{-5}$	Pa.s
<b>Densidad</b>	P	1.29	$\frac{Kg}{m^3}$
<b>Temperatura Bulbo seco</b>	Tbs	35	°C
<b>Temperatura bulbo húmedo</b>	Tbh	26	°C
<b>Humedad relativa</b>	HR	50	%

**Fuente:** Autor, 2015

## **CAPÍTULO 4. DISEÑO DEL SECADOR DE LECHO FLUIDIZADO**

### **4.1. CÁLCULOS DE FLUIDIZACIÓN**

El diseño de un secador va a depender de muchos factores, como el sólido que se va a secar y la cantidad.

Se realizaron los siguientes cálculos para el secado por fluidización. (18)

$$V = \frac{m}{\rho}$$

$$\varepsilon = 1 - \frac{V_{\text{grano}}}{V_{\text{total}}}$$

$$\kappa(\epsilon_{mf})^3 = \frac{1}{14}$$

$$\frac{L1}{L2} = \frac{1 - \epsilon_2}{1 - \epsilon_1}$$

$$\frac{1.75(D_p)^2(V'_{mf})^2(\rho)^2}{\kappa(\epsilon_{mf})^3(\mu)^2} + \frac{150(1 - \epsilon_{mf})D_p(V'_{mf})(\rho)}{(\kappa)^2(\epsilon_{mf})^3(\mu)} - \frac{(D_p)^3(\rho)(\rho_p - \rho)g}{(\mu)^2} = 0$$

$$K \frac{(\epsilon)^3}{(1 - \epsilon)} = V_{mf}$$

$$Re = \frac{\mu D v}{\rho}$$

$$\Delta p = L \rho (1 - \epsilon) (\rho_p - \rho) g \quad \text{Para } Re > 1000$$

Dónde:

V: Volumen

$\epsilon$ : Porosidad del lecho

$\kappa$ : Factor forma

L: Altura de fluidización

$D_p$ : Diámetro equivalente

$V'_{mf}$ : Velocidad mínima de fluidización

$\rho$  : Densidad

$\mu$  : Viscosidad dinámica

k: Constante

Re: Reynolds

$\Delta p$ : Caída de presión

**Solución:**

#### 4.1.1. FRIJOL DE PALO

Datos:

$$m = 10 \text{ Kg}$$

$$D_{eq} = 0.014 \text{ m}$$

$$\rho = 433.3 \frac{\text{Kg}}{\text{m}^3}$$

$$\phi = 0.89$$

$$\varepsilon = 0.42$$

## POROSIDAD DE LECHO

Se refiere a la cantidad de espacio libre, está formado por partículas contiguas que dejan entre ellas huecos o espacios libres y a través de ellos circula el fluido en este caso aire

$$V = \frac{10 \text{ Kg}}{433.3 \frac{\text{Kg}}{\text{m}^3}}$$

$$V = 0.023 \text{ m}^3$$

$$\varepsilon = 1 - \frac{V_{\text{grano}}}{V_{\text{total}}}$$

$$0.042 = 1 - \frac{0.023}{V_{\text{total}}}$$

$$V_{\text{total}} = 0.039 \text{ m}^3$$

$$V_{\text{total}} = \pi(r)^2(h)$$

$$H = 0.55 \text{ m (Altura de lecho)}$$

## ALTURA MÍNIMA DE FLUIDIZACIÓN

Se considera altura mínima de fluidización a la altura mínima que se van a levantar (fluidizar) los granos.

$$\frac{L1}{L2} = \frac{1 - \epsilon_2}{1 - \epsilon_1}$$

$$\frac{0.55}{L2} = \frac{1 - 0.43}{1 - 0.42}$$

$L2 = 0.56 = L_{mf}$  (Altura mínima de fluidización)

$$(14)(0.89) = \frac{1}{(\epsilon_{mf})^3}$$

$$(\epsilon_{mf}) = 0.43$$

### VELOCIDAD MÍNIMA DE FLUIDIZACIÓN

Se refiere a la mínima velocidad que se va a requerir para levantar el lecho de granos que están estacionarios.

$$\frac{1,75 (Dp)^2 (V'mf)^2 (\rho)^2}{\rho s (\epsilon mf)^2 (\mu)^2} + \frac{150 (1-\epsilon mf)^2 Dp (V'mf) (\rho)}{(\rho s)^2 (\epsilon mf)^3 (\mu)} - \frac{(Dp)^3 (\rho) (\rho p - \rho) g}{(\mu)^2} = 0$$

$$\frac{1,75 (0,014)^2 (V'mf)^2 (1,29)^2}{(0,89)(0,43)^2 (1,82E-5)^2} + \frac{150 (1-0,43)^2 (0,014) (V'mf) (1,29)}{(\rho s)^2 (\epsilon mf)^3 (\mu)} - \frac{(0,014)^3 (1,29) (433,3-1,29) (9,8)}{(1,82E-5)^2} = 0$$

$$V'mf = 1.34 \frac{m}{s}$$

$$K \frac{(\epsilon)^3}{(1-\epsilon)} = Vmf$$

$$K = 8.38$$

### VELOCIDAD DE OPERACIÓN

Se refiere a la velocidad que se debe mantener, mientras dure el proceso, de esta manera los granos están en constante movimiento.

$$V_{op} = 3V'_{mf}$$

$$V_{op} = 3.51 \frac{m}{s}$$

$$K \frac{(\epsilon)^3}{(1 - \epsilon)} = V_{op}$$

$$\epsilon_{op} = 0.56$$

$$\frac{L_1}{L_2} = \frac{1 - \epsilon_2}{1 - \epsilon_1}$$

$$\frac{0.56}{L_2} = \frac{1 - 0.56}{1 - 0.43}$$

### **ALTURA DE OPERACIÓN**

Esta es la altura máxima a la que van a llegar los granos durante el proceso de fluidización, es de vital importancia obtener esta altura puesto que va a ayudar a tener un buen criterio en la construcción del fluidizador.

$$L_2 = L_{op} = 0.72m$$

$$Re = \frac{\mu D v}{\rho}$$

$$Re = 6698.37$$

$$\Delta p = L \rho (1 - \epsilon) (\rho_p - \rho) (g)$$

### CAÍDA DE PRESIÓN

Se refiere a la diferencia de presión que va a existir en el fluidizador.

$$\Delta p = (0.72)(1 - 0.42)(433.3 - 1.29)(9.8)$$

$$\Delta p = 1767.99 \text{ Pa} \quad \text{ó} \quad 0.25 \text{ psi}$$

#### 4.1.2. MAÍZ MOROCHO

De la misma forma que en el caso anterior usamos las ecuaciones de velocidad mínima de fluidización, de operación, altura de lecho , mínima y de operación.

Datos:

$$m = 10 \text{ Kg}$$

$$D_{eq} = 0.00725 \text{ m}$$

$$\rho = 1922.75 \frac{\text{Kg}}{\text{m}^3}$$

$$\phi = 0.62$$

$$\epsilon = 0.35$$

**ALTURA MÍNIMA DE FLUIDIZACIÓN**

$$\frac{L1}{L2} = \frac{1 - \varepsilon 2}{1 - \varepsilon 1}$$

$$L2=Lmf= 0.1413 \text{ m}$$

$$\varepsilon(\varepsilon mf)^3 = \frac{1}{14}$$

$$\varepsilon mf = 0.48$$

**VELOCIDAD MÍNIMA DE FLUIDIZACIÓN**

$$\frac{1,75 (Dp)^2 (V' mf)^2 (\rho)^2}{\varepsilon s (\varepsilon mf)^2 (\mu)^2} + \frac{150 (1-\varepsilon mf)^2 Dp (V' mf) (\rho)}{(\varepsilon s)^2 (\varepsilon mf)^3 (\mu)} - \frac{(Dp)^3 (\rho) (\rho p - \rho) g}{(\mu)^2} = 0$$

$$V' mf = 1.96 \frac{m}{s}$$

**VELOCIDAD DE OPERACIÓN**

$$Vop = 3V' mf$$

$$Vop = 5.90 \frac{m}{s}$$

$$K \frac{(\varepsilon)^3}{(1 - \varepsilon)} = Vop$$

$$\varepsilon_{op} = 0.622$$

$$\frac{L1}{L2} = \frac{1 - \varepsilon2}{1 - \varepsilon1}$$

### ALTURA DE OPERACIÓN

$$L2 = L_{op} = 0.19m$$

$$Re = \frac{\mu D v}{\rho}$$

$$Re = 1803.69 \text{ (flujo turbulento)}$$

### CAÍDA DE PRESIÓN

$$\Delta p = L_{op}(1 - \varepsilon)(\rho_p - \rho)(g)$$

$$\Delta p = 1359.54 \text{ Pa } \text{ ó } 0.2 \text{ psi}$$

#### 4.1.3. CACAO

Datos:

$$m = 10 \text{ Kg}$$

$$D_{eq} = 0.0196m$$

$$\rho = 888.45 \frac{\text{Kg}}{\text{m}^3}$$

$$\alpha = 0.55$$

$$\varepsilon = 0.2142$$

### ALTURA MÍNIMA DE FLUIDIZACIÓN

$$\frac{L1}{L2} = \frac{1 - \varepsilon2}{1 - \varepsilon1}$$

$$L2=Lmf= 0.3168 \text{ m}$$

$$\alpha(\varepsilon mf)^3 = \frac{1}{14}$$

$$\varepsilon mf = 0.50$$

### VELOCIDAD MÍNIMA DE FLUIDIZACIÓN

$$\frac{1,75 (Dp)^2 (V' mf)^2 (\rho)^2}{\alpha s (\varepsilon mf)^2 (\mu)^2} + \frac{150 (1-\varepsilon mf)^2 Dp (V' mf) (\rho)}{(\alpha s)^2 (\varepsilon mf)^3 (\mu)} - \frac{(Dp)^3 (\rho)(\rho p - \rho)g}{(\mu)^2} = 0$$

$$V' mf = 2.25 \frac{m}{s}$$

### VELOCIDAD DE OPERACIÓN

$$V_{op} = 3V'_{mf}$$

$$V_{op} = 6.75 \frac{m}{s}$$

$$K \frac{\varepsilon(\varepsilon)^3}{(1 - \varepsilon)} = V_{op}$$

$$\varepsilon_{op} = 0.64$$

### ALTURA DE OPERACIÓN

$$\frac{L1}{L2} = \frac{1 - \varepsilon2}{1 - \varepsilon1}$$

$$L2 = L_{op} = 0.44m$$

$$Re = \frac{\mu D v}{\rho}$$

$$Re = 6698.37 \text{ (flujo turbulento)}$$

### CAÍDA DE PRESIÓN

$$\Delta p = L_{op}(1 - \varepsilon)(\rho_p - \rho)(g)$$

$$\Delta p = 1377.15 \text{ Pa } \text{ ó } 0.20 \text{ psi}$$

## 4.2. TABLA DE RESULTADOS

**Tabla 7** Resultados de fluidización para cada grano

	$V_{mf}$ (m/s)	$V_{op}$ (m/s)	H(m)
<b>ARVEJA/FRIJOL DE PALO</b>	1.17	3.51	0.72
<b>MAIZ MOROCHO</b>	1.96	5.90	0.19
<b>CACAO</b>	2.25	6.75	0.44

**Fuente:** Autor, 2015

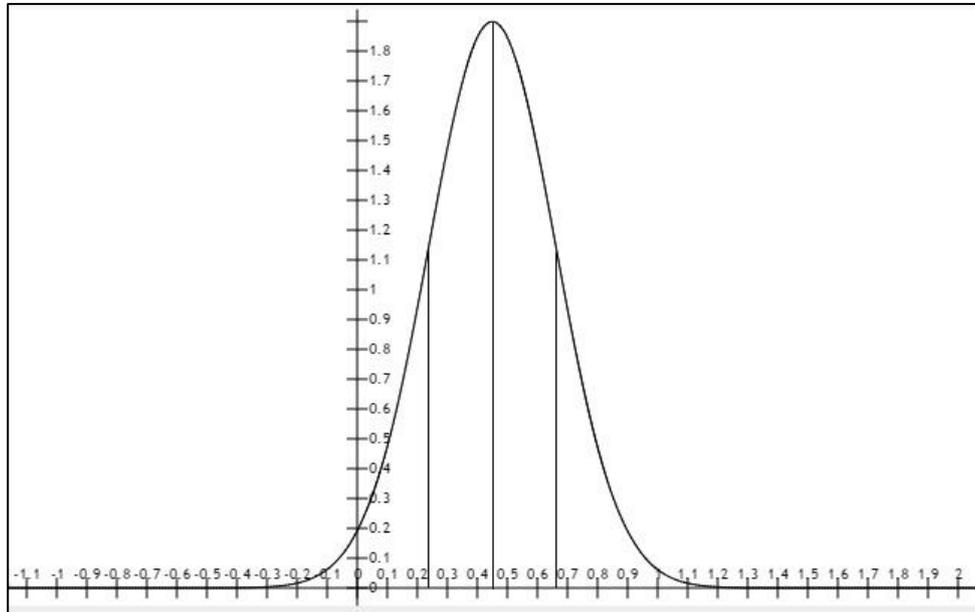
### TABLA ESTADÍSTICA

Esta tabla nos permite evidenciar los límites dentro de los cuales se debe trabajar.

**Tabla 8** Límites permisibles

	$V_{mf}$	$V_{op}$	H
<b>X</b>	1.79	5.38	0.45
$\sigma$	0.45	1.37	0.21
$\sigma^2$	0.20	0.20	0.40

**Fuente:** Autor, 2015

**Figura 12** Límites permisibles

**Fuente:** Autor, 2015

### 4.3. MEDIDAS FINALES PARA EL DISEÑO DEL FLUIDIZADOR

Uniando los datos para el fluidizador por cada grano, se calcula una media aritmética de los valores que necesitamos para los requerimientos del diseño del secador (16) así obtenemos:

**Tabla 9** Medidas para el diseño del fluidizador

<b>Fluidizador</b>		
<b>Parámetros</b>	<b>Unidad</b>	<b>Valor</b>
Altura	M	1.30
Diámetro	M	0.30
Caída de presión	Psi	0.22

**Fuente:** Autor, 2015

#### 4.4. COSTOS

##### 4.4.1. RECURSOS HUMANOS

**Tabla 10 Recursos Humanos**

<b>Denominación</b>	<b>Costos (Dólares)</b>
Mano de Obra en construcción y ensamblado	300
Mano de Obra en conexión del sistema	100
<b>TOTAL</b>	<b>400</b>

**Fuente:** Autor, 2015

##### 4.4.2. RECURSOS MATERIALES

**Tabla 11 Recursos Materiales**

<b>Denominación</b>	<b>Costos (Dólares)</b>
Análisis de los granos	100
Materiales para construcción del equipo: <ul style="list-style-type: none"> <li>- Láminas de Hierro Galvanizado</li> <li>- Manómetros</li> <li>- Blower</li> <li>- Resistencias eléctricas</li> </ul>	1530
Varios	400
<b>Total</b>	<b>2030</b>

**Fuente:** Autor, 2015

### 4.4.3. RECURSOS TOTALES

**Tabla 12** Recursos Totales

<b>Denominación</b>	<b>Costos (Dólares)</b>
Recursos Humanos	400
Recursos Materiales	2030
<b>Subtotal</b>	<b>2430</b>
Imprevistos (20%)	486
<ul style="list-style-type: none"> <li>- Cambios de manómetros debido a su capacidad de medición.</li> <li>- Compra de Silicón</li> <li>- Compra de Masilla etc.</li> </ul>	
<b>TOTAL</b>	<b>2916</b>

**Fuente:** Autor, 2015

#### 4.4.4. MATERIALES USADOS PARA LA CONSTRUCCIÓN DEL EQUIPO

**Tabla 13** Materiales usados para la construcción del secador por fluidización

<b>Materia</b>	<b>Cantidad</b>	<b>Precio Unitario (Dólares)</b>	<b>Precio Total (Dólares)</b>
Hierro Galvanizado	2	40	80
Blower	1	700	700
Termómetro	1	50	50
Manómetros	2	30	60
Resistencias	3	150	450
Tablero de Control	1	50	50
Criba de acero	1	40	40
Termostato de control temperatura	1	100	100
<b>TOTAL</b>			<b>1530</b>

**Fuente:** Autor, 2015

## 4.5. CÁLCULOS DEL PROCESO DE SECADO

### 4.5.1. PERIODO CONSTANTE

Para la estufa:

En el periodo de velocidad constante se tiene:

#### Arveja

$$N = \frac{(0,0018 - 0,0013)(0,38 - 0,28)}{(0,39 * 0,39)(0,33)}$$

$$N = 9,96 \times 10^{-4} \frac{Kg \ Ss}{h - m^2}$$

$$T_c = \frac{(0,0018 - 0,0013)(0,38 - 0,28)}{(0,39 * 0,39)(9,96 \times 10^{-4})}$$

$$T_c = 0,32 \text{ h } \text{ ó } 19,7 \text{ min}$$

#### Cacao

$$N = \frac{(0,003079 - 0,0030314)(0,9 - 0,037)}{(0,39 * 0,39)(0,33)}$$

$$N = 5,02 \times 10^{-4} \frac{Kg \ Ss}{h - m^2}$$

$$T_c = \frac{(0,003079 - 0,0030314)(0,09 - 0,037)}{(0,39 * 0,39)(5,02 \times 10^{-4})}$$

$$T_c = 0,33 \text{ h ó 20 min}$$

### Maíz

$$N = \frac{(0,0033727 - 0,0032632)(0,09 - 0,0336)}{(0,39 * 0,39)(0,33)}$$

$$N = 1,23 \times 10^{-4} \frac{\text{Kg Ss}}{\text{h-m}^2}$$

$$T_c = \frac{(0,0033727 - 0,0032632)(0,09 - 0,0336)}{(0,39 * 0,39)(1,23 \times 10^{-4})}$$

$$T_c = 0,33 \text{ h ó 20 min}$$

### Para la Secador de lecho fluidizado:

En el periodo de velocidad constante se tiene:

### Arveja

$$N = \frac{(0,00247 - 0,00206)(0,28 - 0,20)}{(0,071)(0,25)}$$

$$N = 1,84 \times 10^{-3} \frac{\text{Kg Ss}}{\text{h-m}^2}$$

$$T_c = \frac{(0,00247 - 0,00206)(0,28 - 0,20)}{(0,071)(1,84 \times 10^{-3})}$$

$$T_c = 0,25 \text{ h ó } 15 \text{ min}$$

### Cacao

$$N = \frac{(0,00308 - 0,00307)(0,09 - 0,0031)}{(0,071)(0,25)}$$

$$N = 4,89 \times 10^{-5} \frac{\text{Kg Ss}}{\text{h-m}^2}$$

$$T_c = \frac{(0,00308 - 0,00307)(0,09 - 0,0031)}{(0,071)(4,89 \times 10^{-5})}$$

$$T_c = 0,25 \text{ h ó } 15 \text{ min}$$

### Maíz

$$N = \frac{(0,00319 - 0,00317)(0,097 - 0,0032)}{(0,071)(0,25)}$$

$$N = 1,06 \times 10^{-4} \frac{\text{Kg Ss}}{\text{h-m}^2}$$

$$T_c = \frac{(0,00319 - 0,00317)(0,097 - 0,0032)}{(0,071)(1,06 \times 10^{-4})}$$

$$T_c = 0,17 \text{ h ó } 10,2 \text{ min}$$

Estos cálculos, son demostrativos y corresponden a un ensayo experimental, se realizaron 10 ensayos experimentales cuyos datos se detallan en la tabla 14 y 15.

**Tabla 14** Datos de Ensayo experimental en la estufa

Tipo de Grano	Tiempo de Secado en Estufa (minutos)									
	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8	P9	P10
Arveja	19,00	19,20	18,90	19,00	19,00	19,10	19,00	19,20	19,00	19,00
Cacao	30,00	29,30	30,33	30,00	31,00	30,00	30,00	30,00	30,00	30,00
Maíz	29,98	30,00	30,00	30,00	29,55	30,33	30,00	30,00	30,00	30,00

Fuente: Autor, 2015

**Tabla 15** Datos de Ensayo experimental en Secador de Lecho Fluidizado

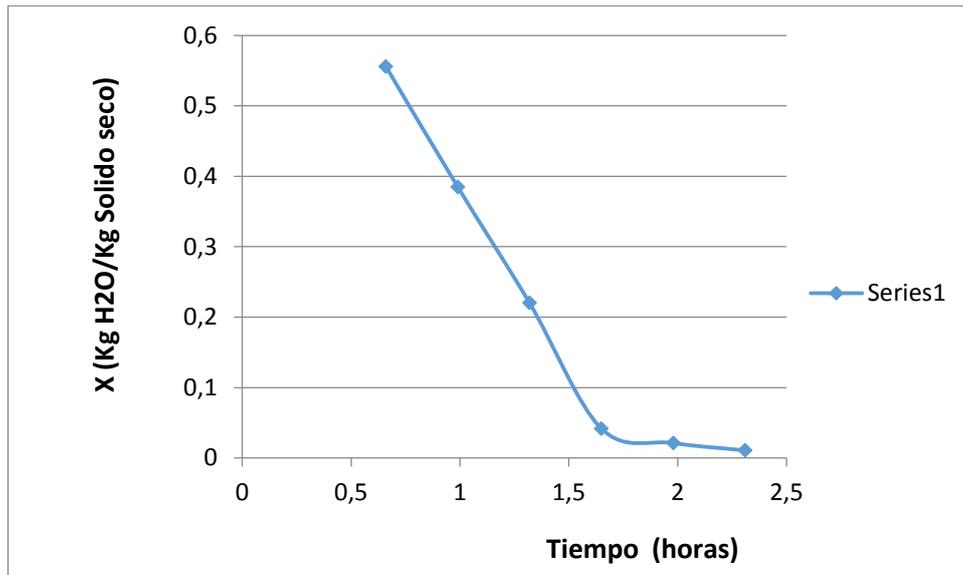
Tipo de Grano	Tiempo de Secado en Secador Lecho Fluidizado (minutos)									
	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8	P9	P10
Arveja	15,00	15,00	15,30	14,50	15,00	15,00	15,00	15,00	15,00	15,00
Cacao	15,00	15,45	15,00	15,00	14,90	14,89	15,00	15,00	15,00	15,00
Maíz	10,00	9,70	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00	11,00	10,00	10,00

Fuente: Autor, 2015

## GRÁFICAS DE PERDIDA DE PESO

En la Estufa:

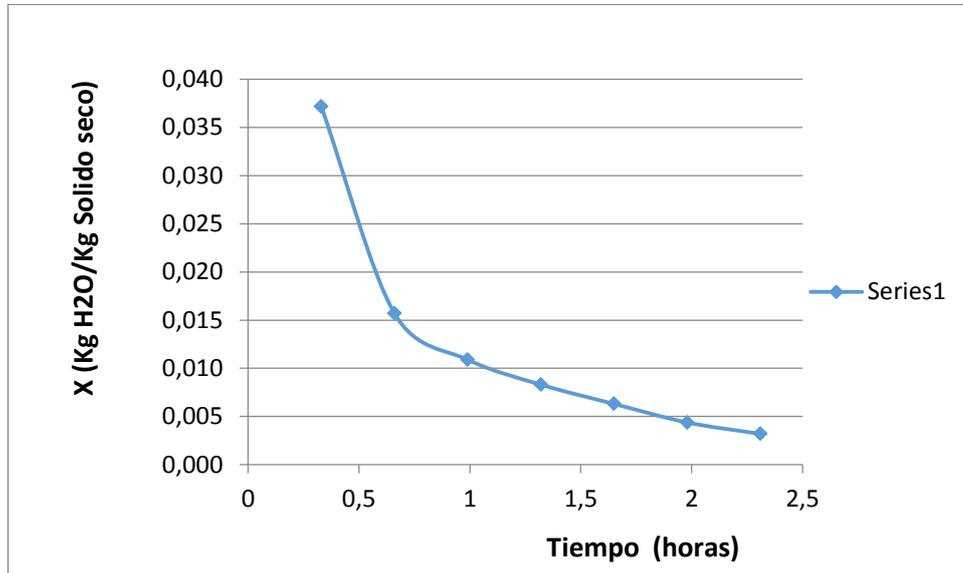
Arveja



**Gráfica 1** Curva de Pérdida de peso para Arveja en estufa

**Fuente:** Autor, 2015

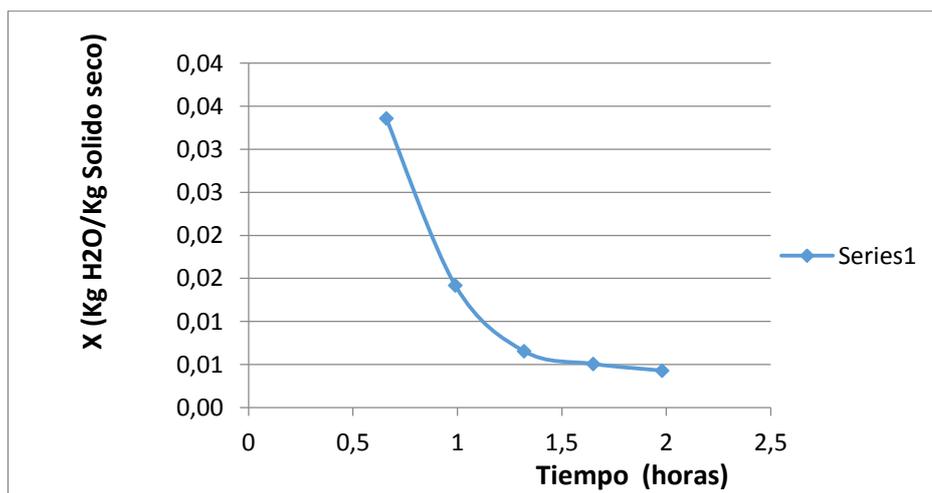
## Cacao



Gráfica 2 Curva de Pérdida de peso para Cacao en estufa

Fuente: Autor, 2015

## Maíz

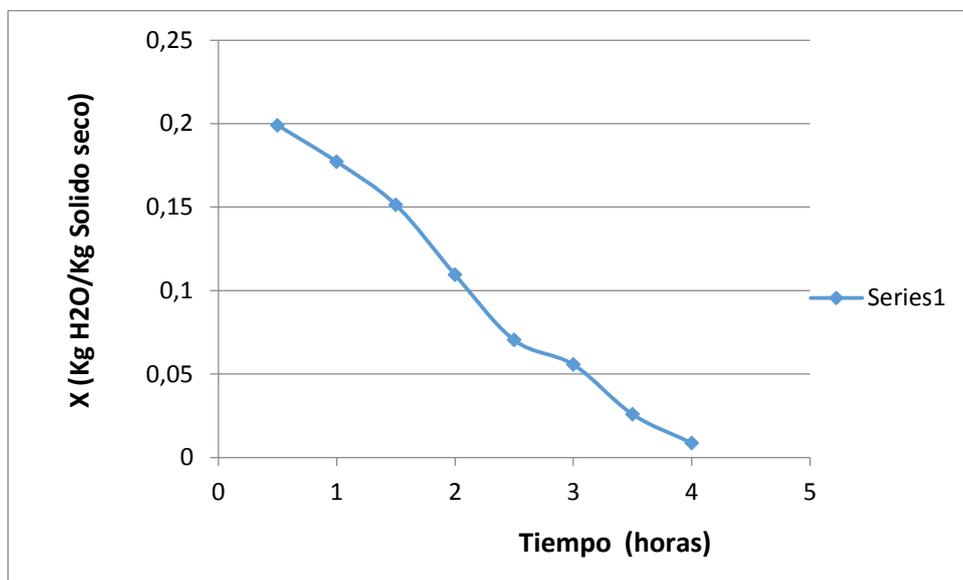


Gráfica 3 Curva de Pérdida de peso para Maíz en estufa

Fuente: Autor, 2015

## En Secador de Lecho Fluidizado:

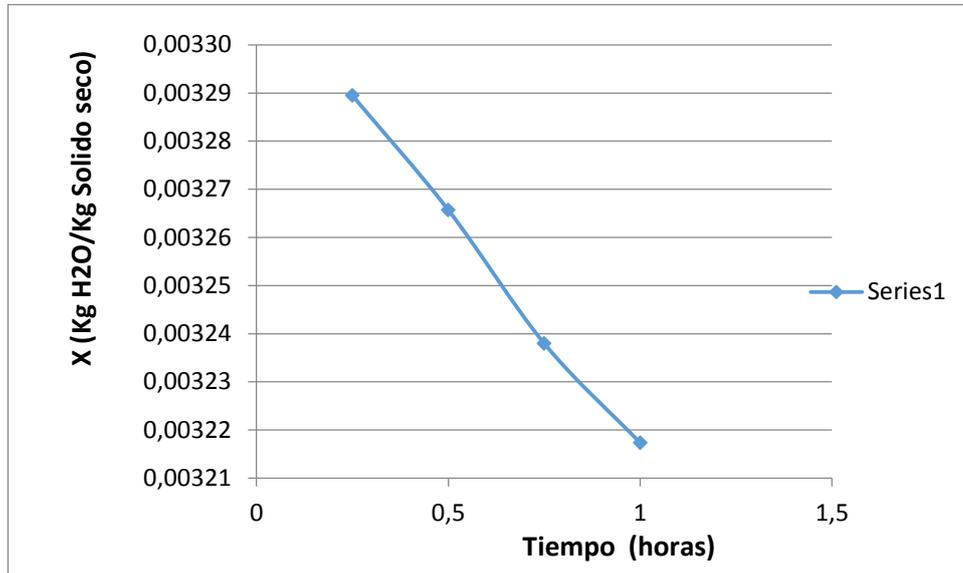
### Arveja



**Gráfica 4** Curva de Pérdida de peso para Arveja en Secador Lecho Fluidizado

**Fuente:** Autor, 2015

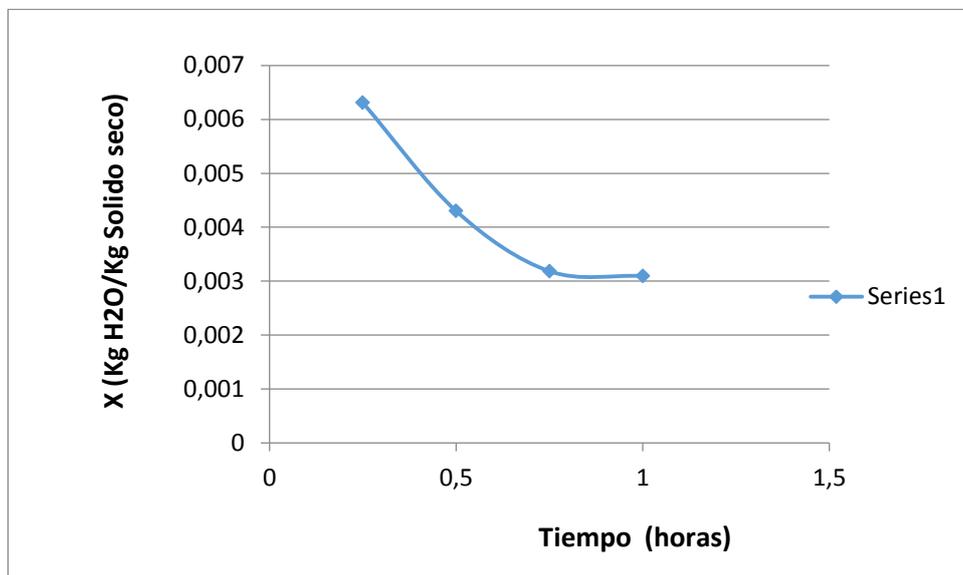
## Cacao



**Gráfica 5** Curva de Pérdida de peso para Cacao en Secador Lecho Fluidizado

**Fuente:** Autor, 2015

## Maíz



**Gráfica 6** Curva de Pérdida de peso para Maíz en Secador Lecho Fluidizado

**Fuente:** Autor, 2015

#### 4.5.2. RESULTADOS DE TIEMPO EN PERIODO DE VELOCIDAD CONSTANTE

Tabla 16 Tiempo en llegar a la Humedad crítica

Tipo de Grano	Tiempo de secado en periodo constante (estufa) minutos	Tiempo de secado en periodo constante (Secador lecho fluidizado) minutos
Frijol de palo (arveja)	19	15
Cacao	30	15
Maíz	30	10

Fuente: Autor, 2015

#### 4.5.3. PERIODO DECRECIENTE

##### Para la estufa:

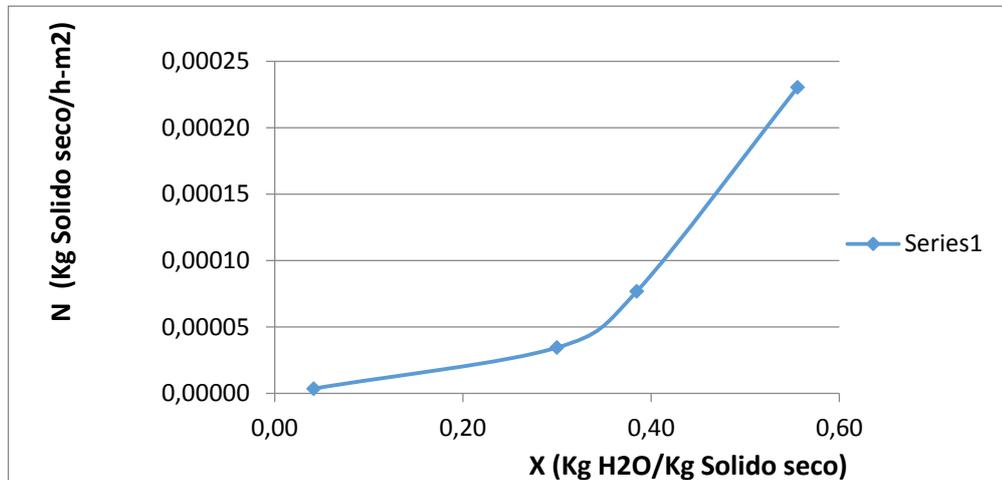
Los cálculos teóricos que se presentan a continuación fueron obtenidos mediante secado en una estufa a 105 °C.

##### ARVEJA

Tabla 17 Humedad y Velocidad de secado teóricos para la Arveja en la Estufa

Masa inicial	Masa final	X BH	XBS	Nsecado
0,0028	1,8E-03	0,36	0,56	2,30E-04
0,0018	1,3 E-03	0,28	0,38	7,68E-05
0,0013	1,0 E-03	0,23	0,30	3,45E-05
0,001	9,6E-04	0,04	0,04	3,68E-06
0,00096	9,4 E-04	0,02	0,02	1,53E-06
0,00094	9,3 E-04	0,01	0,01	6,58E-07
0,00093	9,3 E-04	0,00	0,00	0,00

Fuente: Autor, 2015



**Gráfica 7** Velocidad de secado para Arveja en Estufa

Fuente: Autor, 2015

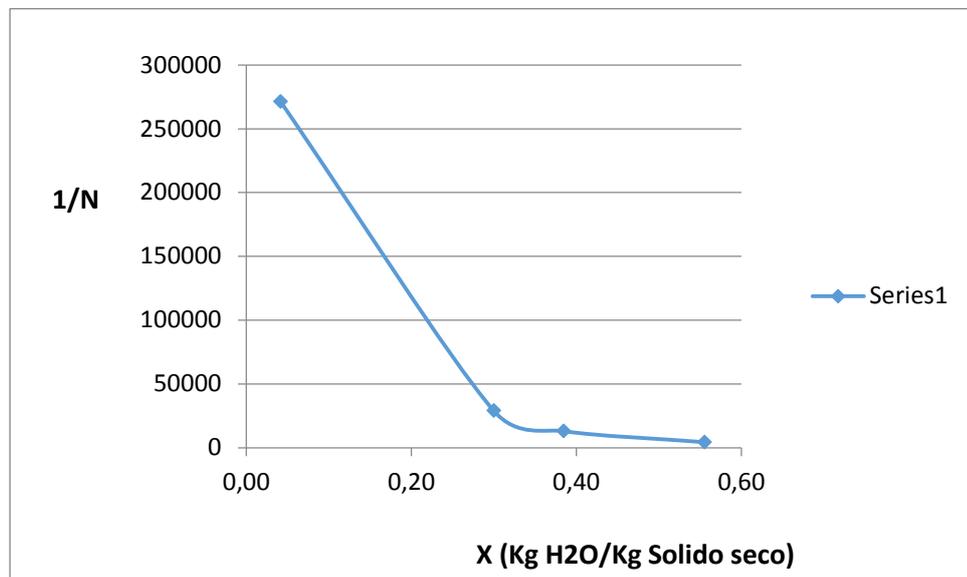
Para calcular el tiempo en el periodo de Velocidad decreciente se determina el área bajo la curva de la gráfica 1/N vs Xlibre.

**Tabla 18** Área bajo la curva (Tiempo en periodo decreciente) para la Arveja en la Estufa

XBS	Nsecado	1/N	Delta X	(1/N)PROM	(DeltaX)(1/N)PROM
0,56	0,00023045	4339,25049	0,00	8678,500986	1,33
0,38	7,6818E-05	13017,7515	0,00	20973,04405	0,89
0,30	3,4568E-05	28928,3366	0,00	150065,7462	4,63
0,04	3,6873E-06	271203,156	0,00	461045,3649	0,99
0,02	1,5364E-06	650887,574	0,00	1084812,623	0,95
0,01	6,5844E-07	1518737,67	0,00		0
0	0			Total horas	8,80

Fuente: Autor, 2015

$$T_t = 0,32 + 8,48 = 8,80 \text{ horas}$$



**Gráfica 8** Periodo de Velocidad decreciente para Arveja en Estufa

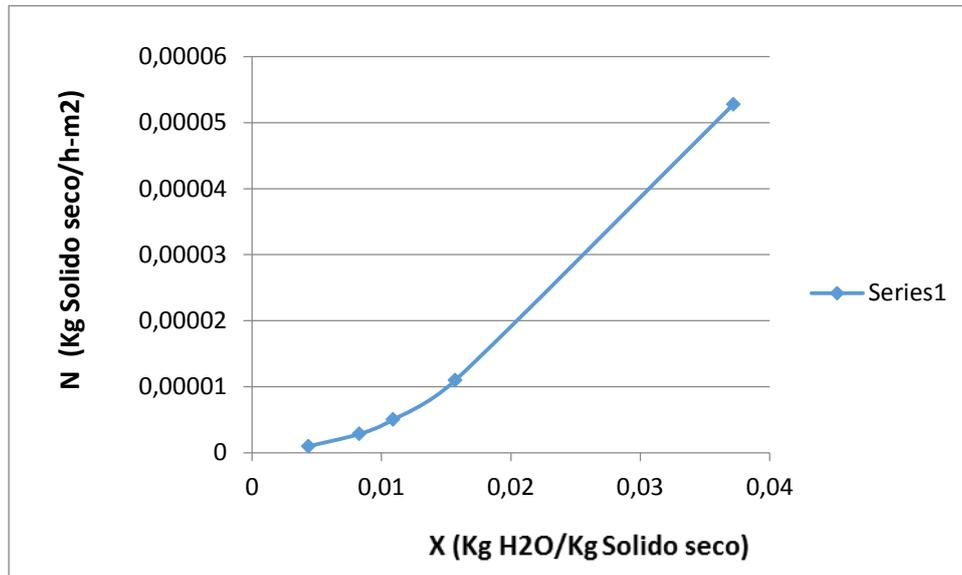
**Fuente:** Autor, 2015

### **CACAO**

**Tabla 19** Humedad y Velocidad de secado teórico para Cacao en la Estufa

<b>Masa inicial</b>	<b>Masa final</b>	<b>X BH</b>	<b>XBS</b>	<b>Nsecado</b>
3,19E-03	3,08E-03	35,85E-03	37,18E-03	5,27E-05
3,07E-03	3,03E-03	15,45E-03	15,70E-03	1,09E-05
3,03E-03	3,00E-03	10,78E-03	10,90E-03	5,02E-06
2,99E-03	2,97E-03	8,23E-03	8,30E-03	2,84E-06
2,97E-03	2,93E-03	12,81E-03	12,97E-03	3,51E-06
2,93E-03	2,92E-03	4,35E-03	4,37E-03	9,83E-07
2,92E-03	2,92E-03	0,00	0,00	0,00

**Fuente:** Autor, 2015



**Gráfica 9** Velocidad de Secado para Cacao en Estufa

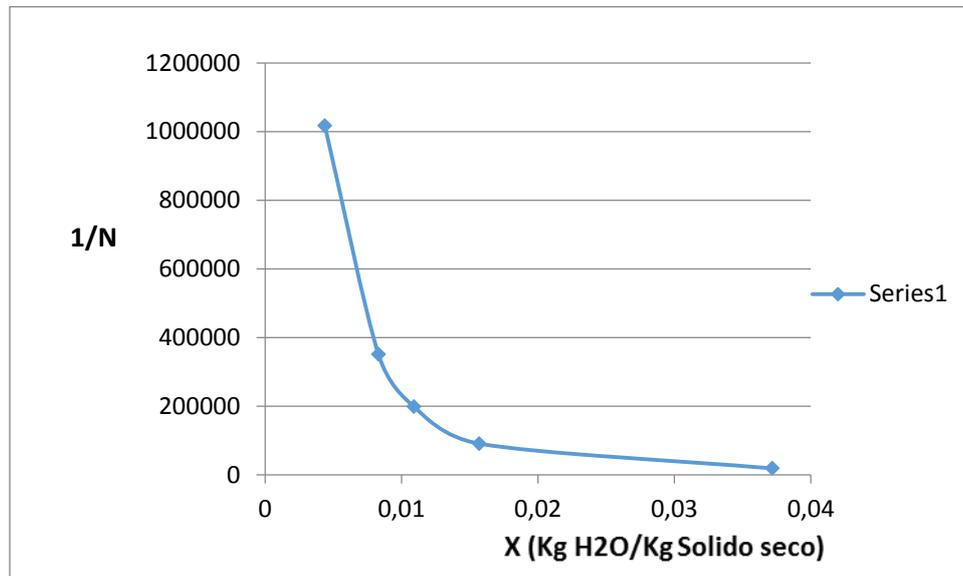
**Fuente:** Autor, 2015

**Tabla 20** Área bajo la curva (Tiempo en periodo decreciente) para Cacao en la Estufa

XBS	Nsecado	1/N	Delta X	(1/N)PROM	(DeltaX)(1/N)PROM
0,037	5,27E-05	18950,34	4,18E-05	55055,53	2,30
0,015	1,09E-05	91160,72	5,94E-06	145104,45	0,86
0,010	5,02E-06	199048,18	2,17E-06	275202,25	0,60
0,008	2,84E-06	351356,31	6,66E-07	318042,01	0,21
0,012	3,51E-06	284727,72	2,52E-06	650869,77	1,65
0,004	9,83E-07	1017011,83	3,70E-07	1325031,55	0,49
0,000	0,000	-	-	Total horas	6,11

**Fuente:** Autor, 2015

$$Tt = 6,11 + 0,50 = 6,61 \text{ horas}$$



**Gráfica 10** Periodo de Velocidad decreciente para Cacao

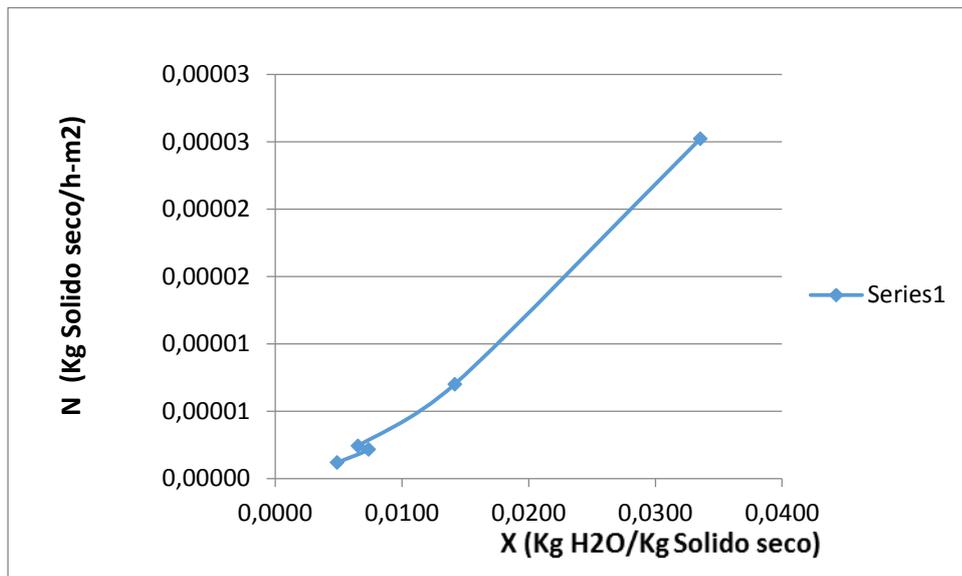
**Fuente:** Autor, 2015

## MAÍZ

**Tabla 21** Humedad y Velocidad de Secado para Maíz en la Estufa

Masa inicial	Masa final	X BH	XBS	Nsecado
3,46 E-03	3,37 E-03	0,03	0,027	4,00E-05
3,37 E-03	3,26 E-03	0,03	0,033	3,00 E-05
3,26 E-03	3,21 E-03	0,01	0,014	1,00 E-05
3,21 E-03	3,19 E-03	0,01	0,006	2,00E-06
3,19 E-03	3,16 E-03	0,01	0,007	2,16 E-06
3,16 E-03	3,14 E-03	0,00	0,004	1,00 E-06
3,14 E-03	3,14 E-03	0,00	0,000	0,000

**Fuente:** Autor, 2015



**Gráfica 11** Velocidad de Secado para Maíz en Estufa

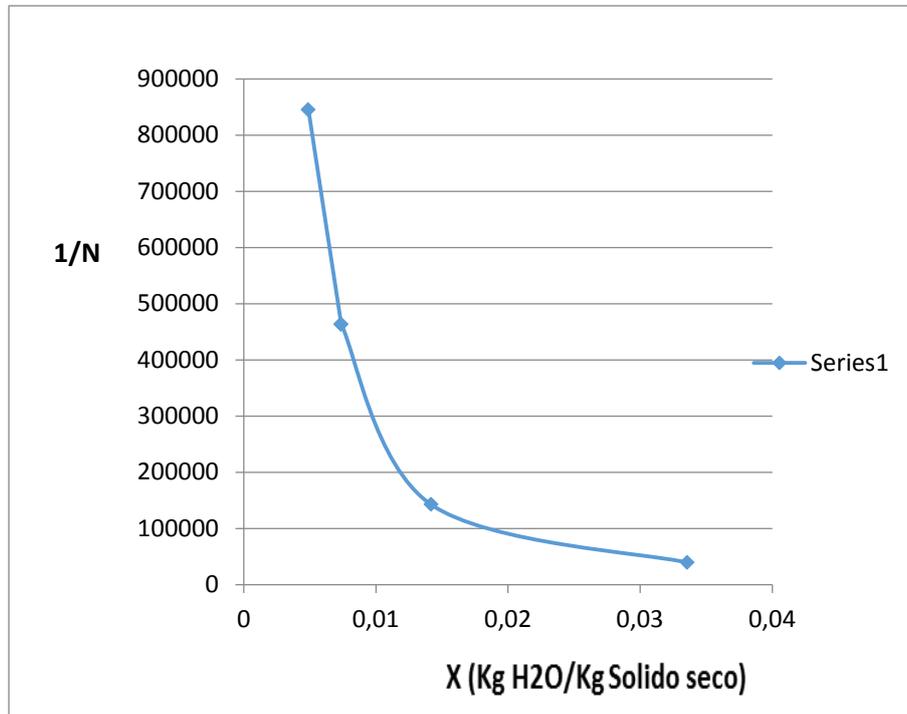
**Fuente:** Autor, 2015

**Tabla 22** Área bajo la curva (Tiempo en periodo decreciente) para Maíz en la Estufa

XBS	Nsecado	1/N	Delta X	(1/N)PROM	(DeltaX)(1/N)PROM
0,0271	4,00E-05	23711,75	2,00E-05	31669,80	0,54
0,0336	3,00 E-05	39627,86	2,00E-05	91183,18	1,66
0,0142	1,00 E-05	142738,50	2,00E-05	278988,89	1,28
0,0065	2,00E-06	415239,28	3,00E-07	439417,21	0,11
0,0074	2,16 E-06	463595,14	1,00E-06	654451,83	0,64
0,0048	1,00 E-06	845308,54	1,18E-06	422654,26	0,50
0,0000	0,0000			Total horas	4,73

**Fuente:** Autor, 2015

$$T_t = 4,73 + 0,50 = 5,23 \text{ horas}$$



**Gráfica 12** Período de Velocidad decreciente para Maíz en Estufa

**Fuente:** Autor, 2015

### Para el secador de lecho fluidizado

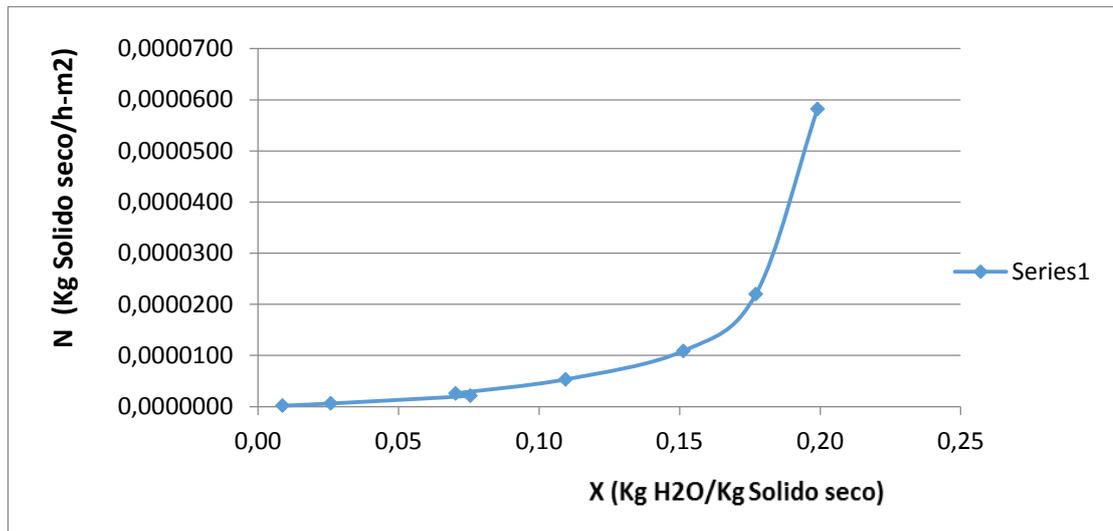
Los cálculos experimentales que se presentan a continuación fueron obtenidos en el Secador de lecho fluidizado a temperatura de 40°C para una humedad relativa del aire del 50 % (según carta psicométrica).

### Arveja

**Tabla 23** Humedad y Velocidad de secado para Arveja en secador de lecho fluidizado

Masa inicial	Masa final	X BH	XBS	Nsecado
0,00247	0,00206	0,17	0,20	0,0000582
0,00206	0,00175	0,15	0,18	0,0000220
0,00175	0,00152	0,13	0,15	0,0000109
0,00152	0,00137	0,10	0,11	0,0000053
0,00137	0,00128	0,07	0,07	0,0000026
0,00128	0,00119	0,07	0,08	0,0000021
0,00119	0,00116	0,03	0,03	0,0000006
0,00116	0,00115	0,008	0,01	0,0000002
0,00115	0,00115	0	0	0,0000000

**Fuente:** Autor, 2015



**Gráfica 13** Velocidad de Secado para Arveja en Secador Lecho Fluidizado

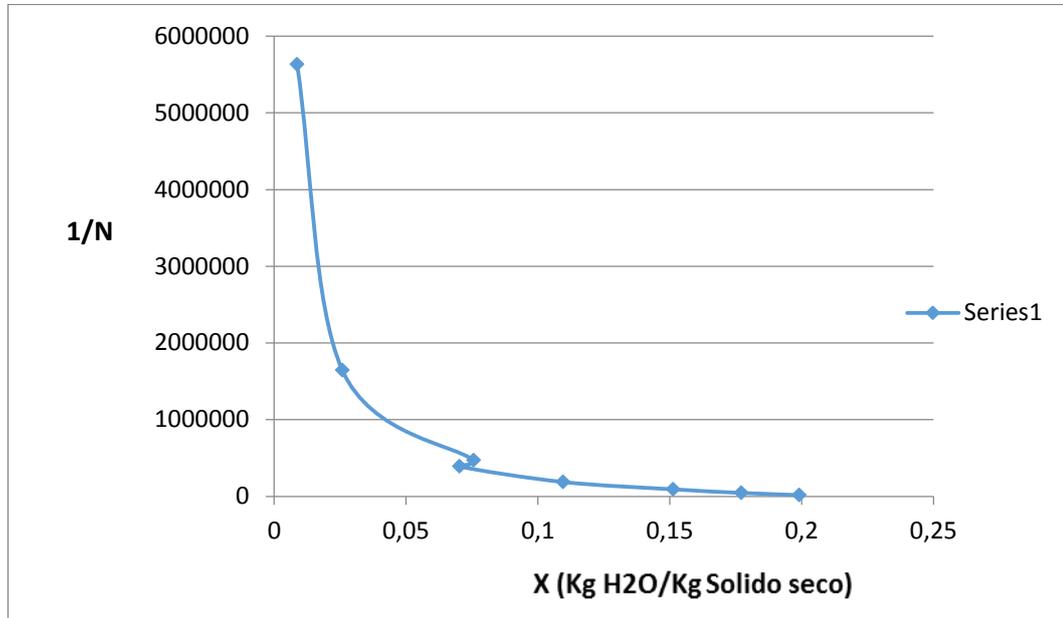
**Fuente:** Autor, 2015

**Tabla 24** Área bajo la curva (Tiempo en periodo decreciente) para Arveja en Secador de lecho fluidizado

XBS	Nsecado	1/N	Delta X	(1/N)PROM	(DeltaX)(1/N)PROM
0,20	0,0000582	17176,2281	0,00004	31305,0609	1,13
0,18	0,0000220	45433,8937	0,00001	68644,6872	0,76
0,15	0,0000109	91855,4807	0,00001	139824,454	0,78
0,11	0,0000053	187793,427	0,00000	289514,867	0,80
0,07	0,0000026	391236,307	0,00000	430359,937	0,18
0,08	0,0000021	469483,568	0,00000	1056338,03	1,61
0,03	0,0000006	1643192,49	0,00000	3638497,65	1,57
0,01	0,0000002	5633802,82	0,00000	2816901,41	0,50
0	0,0000000			TOTAL	7,33

**Fuente:** Autor, 2015

**Tt= 0,25 + 7,33= 7,73 horas**



**Gráfica 14** Periodo de Velocidad decreciente para Arveja en Secador de Lecho Fluidizado

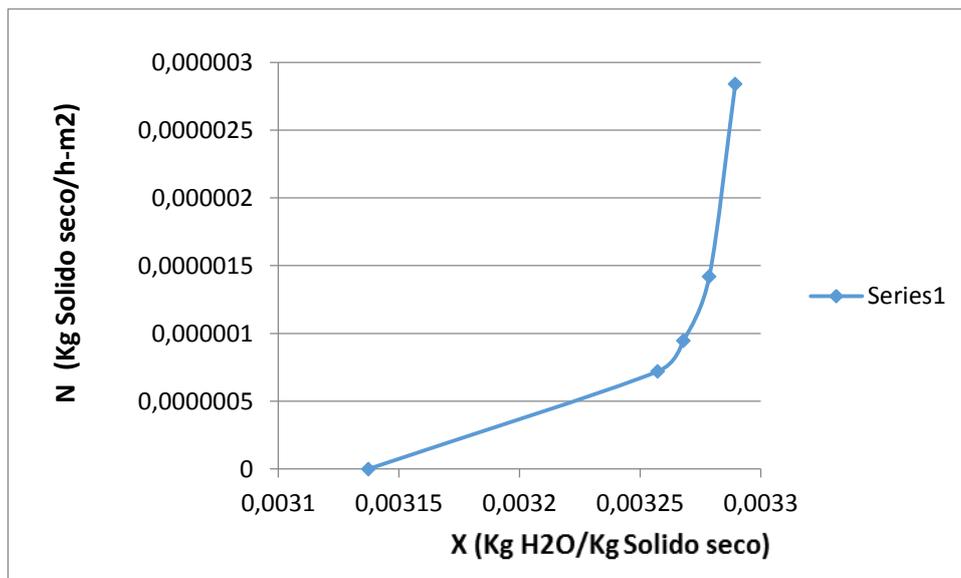
**Fuente:** Autor, 2015

## CACAO

**Tabla 25 Humedad y Velocidad de secado para Cacao en Secador de lecho fluidizado**

Masa inicial	Masa final	X BH	XBS	Nsecado
0,00308	0,00307	0,003247	0,00326	0,0000028
0,00307	0,00306	0,003257	0,00327	0,0000014
0,00306	0,00305	0,003268	0,00328	0,0000009
0,00305	0,00304	0,003279	0,00329	0,0000007
0,00304	0,00304	0,0000	0,00000	0,0000000

**Fuente:** Autor, 2015



**Gráfica 15** Velocidad de Secado para Cacao en Secador de lecho fluidizado

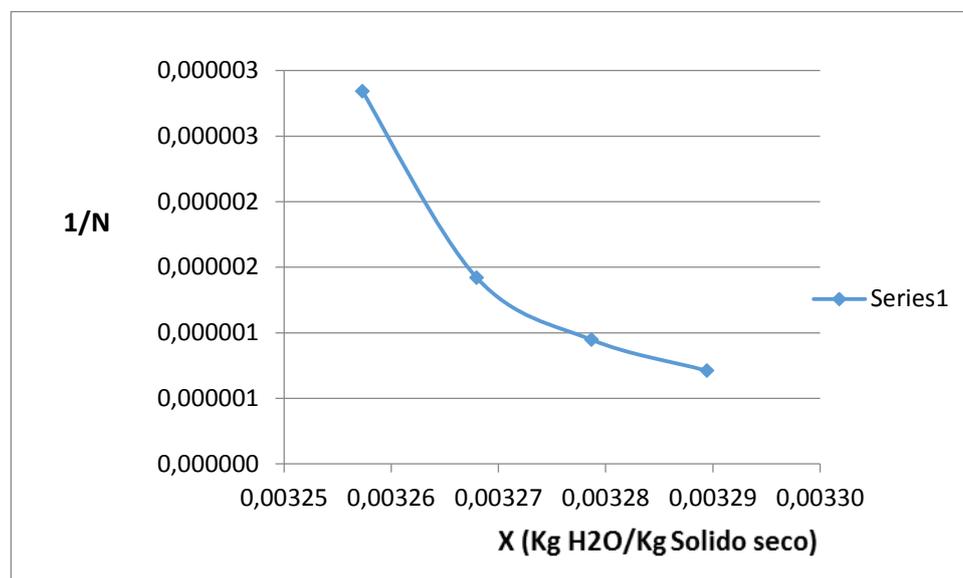
**Fuente:** Autor, 2015

**Tabla 26** Área bajo la curva (tiempo en periodo decreciente) para Cacao en Secador de lecho fluidizado

XBS	Nsecado	1/N	Delta X	(1/N)PROM	(DeltaX)(1/N)PROM
0,00326	0,0000028	352112,676	0,00000142	528169,014	0,75
0,00327	0,0000014	704225,352	0,00000047	880281,69	0,42
0,00328	0,0000009	1056338,03	0,00000024	1232394,37	0,29
0,00329	0,0000007	1408450,70	0,00000071	704225,352	0,50
0,00000	0,0000000			Total horas	1,96

Fuente: Autor, 2015

$$T_t = 1,96 + 0,25 = 2,21 \text{ horas}$$



**Gráfica 16** Período de Velocidad decreciente para Cacao en secador de lecho fluidizado

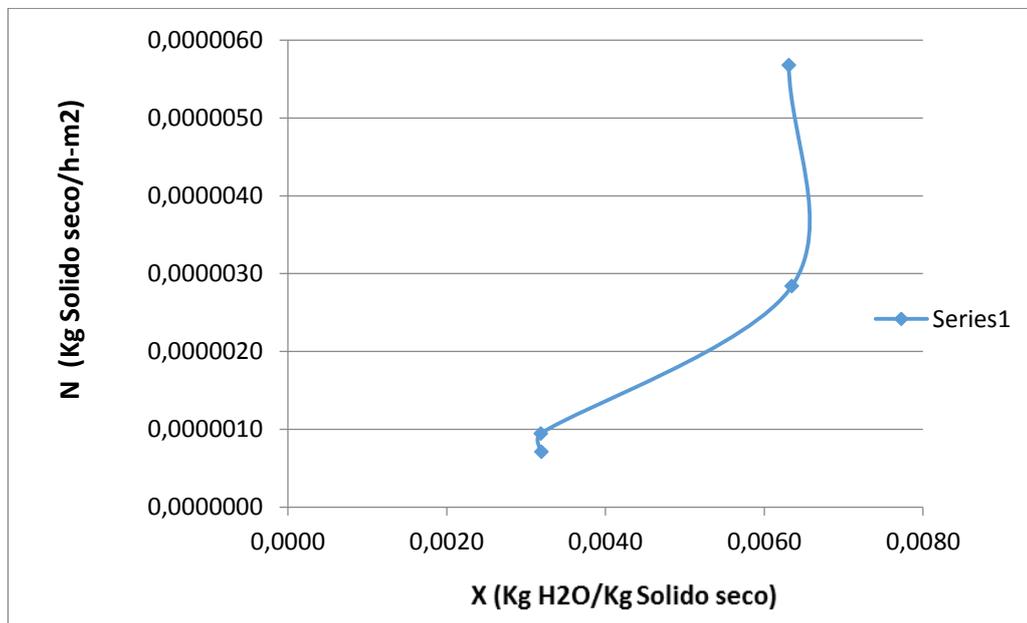
Fuente: Autor, 2015

## MAÍZ

**Tabla 27** Humedad y Velocidad de secado para Maíz en Secador de lecho fluidizado

Masa inicial	Masa final	X BH	XBS	Nsecado
0,00319	0,00317	0,0063	0,0063	0,0000028
0,00317	0,00315	0,0063	0,0063	0,0000014
0,00315	0,00314	0,0032	0,0032	0,0000005
0,00314	0,00313	0,0032	0,0032	0,0000004
0,00313	0,00313	0,0000	0,0000	0,00000000

Fuente: Autor, 2015



**Gráfica 17** Velocidad de secado para Maíz en secador de lecho fluidizado

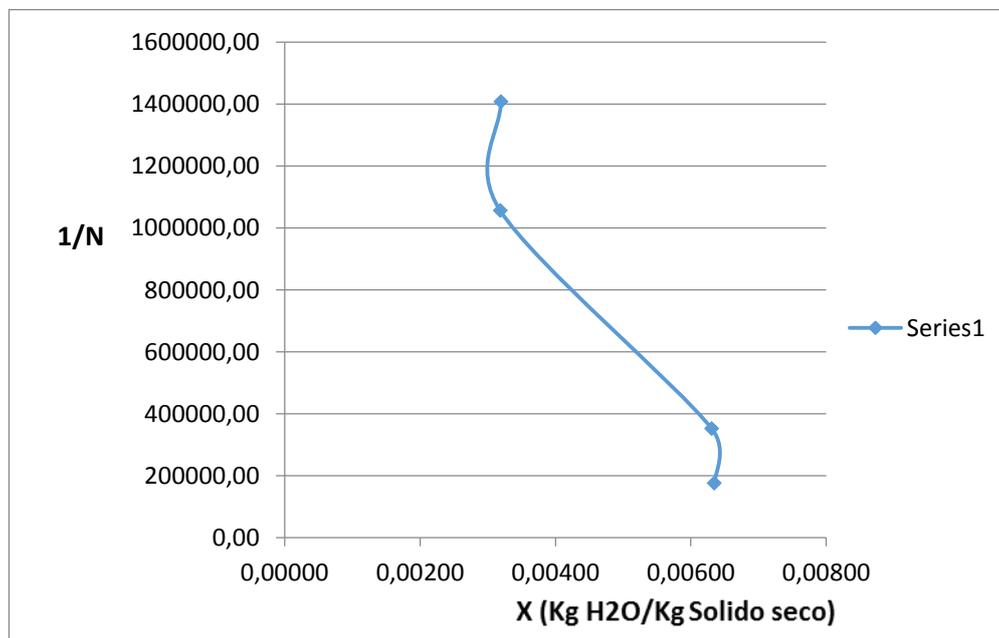
Fuente: Autor, 2015

**Tabla 28** Área bajo la curva (tiempo en periodo decreciente) para Maíz en Secador de lecho fluidizado

XBS	Nsecado	1/N	Delta X	(1/N)PROM	(DeltaX)(1/N)PROM
0,0063	0,0000028	352112,676	0,0000014	528169,014	0,75
0,0063	0,0000014	704225,352	0,0000009	1408450,7	1,33
0,0032	0,0000005	2112676,06	0,0000001	2464788,73	0,29
0,0032	0,0000004	2816901,41	0,0000004	Total horas	2,38

**Fuente:** Autor, 2015

$$T_t = 2,38 + 0,17 = 2,55 \text{ horas}$$



**Gráfica 18** Periodo de Velocidad decreciente para Maíz en secador de lecho fluidizado

**Fuente:** Autor, 2015

#### 4.5.4. RESULTADOS DE TIEMPO TOTAL

**Tabla 29** Tiempo total de secado

<b>Tipo de Grano</b>	<b>Tiempo total de secado (estufa) horas</b>	<b>Tiempo total de secado (Secador lecho fluidizado) horas</b>
<b>Frijol de palo (arveja)</b>	9,11	7,73
<b>Cacao</b>	6,61	2,21
<b>Maíz</b>	5,23	2,55

**Fuente:** Autor, 2015

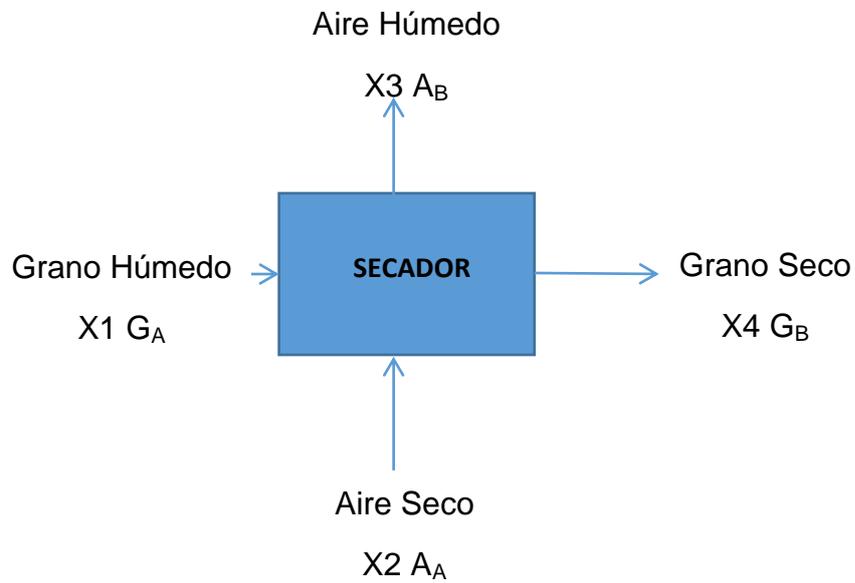
#### 4.5.5. RESULTADOS DE HUMEDAD EN EQUILIBRIO

**Tabla 30** Humedad de equilibrio de cada grano en diferentes secadores

<b>Tipo de Grano</b>	<b>Xe BS(%) Estufa</b>	<b>Xe BS(%) Secador lecho fluidizado</b>
Frijol de palo (arveja)	<b>1,00</b>	<b>1,00</b>
Maíz (morocho)	<b>0,31</b>	<b>0,32</b>
Cacao	<b>0,32</b>	<b>0,31</b>

**Fuente:** Autor, 2015

#### 4.6. BALANCE DE MATERIA PARA EL SECADOR DE LECHO FLUIDIZADO



$$G_A + A_A = A_B + G_B$$

$$X1G_A + X2A_A = X3A_B + X4G_B$$

**Tabla 31 Humedad Removida de cada grano**

Tipo de Grano	Humedad removida (%)
Arveja	18,00
Maíz	8,70
Cacao	9,39

**Fuente:** Autor, 2015

#### 4.7. EFICIENCIA

**Tabla 32** Eficiencia de Secador de Lecho Fluidizado respecto al tiempo de secado por cada grano.

<b>Tipo de Grano</b>	<b>Eficiencia (%)</b>
<b>Arveja</b>	84,85
<b>Cacao</b>	33,43
<b>Maíz</b>	48,75

**Fuente:** Autor, 2015

#### 4.8. ANÁLISIS DE RESULTADOS

- Los parámetros requeridos para la fluidización ( $V_{mf}$ ;  $V_{op}$ ;  $H$ ) , tienen una varianza de 0,208 la cual no es significativa (Tabla 8) , al ser la variabilidad tan pequeña indica que las condiciones iniciales entre cada uno de estos granos son similares.(Tabla 7)
- Se observa que la humedad en equilibrio es la misma para cada grano independientemente del tipo de secado.(Tabla 26)
- Se observa que en las tres variedades de grano la humedad en equilibrio es muy baja, esto se debe al tipo de sólidos escogidos, sin embargo no es recomendable llegar a una humedad tan baja, ya que a

valores más altos de humedad (12%) se conserva la calidad del sólido.

- El tiempo total de secado va a variar dependiendo el tipo de secador que se use.(Tabla 25)
- En el secador de lecho fluidizado a pesar de usar una temperatura menor que en la estufa (40 – 105) °C, el secado del grano hasta llegar a la humedad en equilibrio requiere un tiempo menor (diferencia promedio de 3 horas), debido a los dos tipos de transferencias presentes en el proceso; la transferencia de masa y calor, y a que el sólido está en constante movimiento. En el caso de la estufa solo está presente la transferencia de calor por conducción, en el cual el sólido permanece estacionario.
- Respecto a la eficiencia del Secador de Lecho Fluidizado por tipo de grano resulta ventajosa en comparación al secado en una estufa, cabe recalcar que el Secador de lecho fluidizado es para un lote óptimo de 6 Kg, en comparación con la estufa en el que se introducen muestras pequeñas menores a 1 Kg.

## **CAPÍTULO 5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES**

### **5.1. CONCLUSIONES**

- Gracias al diseño del Secador de Lecho Fluidizado, se pudo realizar la construcción, seguido de la puesta en marcha del equipo piloto.
- Mediante las ecuaciones de Fluidización y Secado se pudo corroborar el conocimiento teórico con la práctica, una vez que el equipo fue puesto en marcha.
- El equipo fue diseñado para una capacidad teórica de 10 Kg/lote, sin embargo en la práctica se determinó que la capacidad óptima a secar es de 6Kg/lote.
- Se determinó los tiempos óptimos de secado durante el periodo constante hasta llegar a la Humedad crítica de cada grano.
- Se analizó el comportamiento del sólido fluidizado, mediante cálculos de secado en periodo constante y decreciente.
- Se determinó la eficiencia del secador de Lecho Fluidizado.

## 5.2. RECOMENDACIONES

- Se recomienda mantener el equipo en un lugar abierto, para evitar sobrecalentamiento del motor del Blower.
- No es recomendable sobrepasar los parámetros de diseño para el proceso de secado (masa, temperatura).
- Es necesario seguir el procedimiento del manual tal cual se indica para evitar posibles problemas en el equipo y deterioro en la materia a secar.

## BIBLIOGRAFÍA

1. **Centeno, Alejandro.** Produccion y Manejo de Reservas . [En línea] 2003.  
[http://www.produccion-animal.com.ar/produccion\\_y\\_manejo\\_reservas/reservas\\_silos/24-para\\_silo.pdf](http://www.produccion-animal.com.ar/produccion_y_manejo_reservas/reservas_silos/24-para_silo.pdf).
2. **Dicovski, Luis.** *Wordpress*. [En línea] 2010. [Citado el: 18 de Febrero de 2015.]  
<https://luisdi.files.wordpress.com/2008/08/unidad-i-humedad-granos.pdf>.
3. **Food and Agriculture Organization of the United Nations.** <http://www.fao.org/>. [En línea] 2014. [Citado el: 10 de Febrero de 2015.]  
<http://www.fao.org/docrep/x5027s/x5027S05.HTM>.
4. *Relación teoría - práctica.* **Alvarez, Carmen.** Cantabria-España : Educaçã, 2011, Educativo siglo XXI, pág. 2.
5. **BIMBO.** Guías Alimenticias 2005. *Nutrición Grupo BIMBO*. [En línea] 2005.  
<http://www.nutriciongrupobimbo.com/assets/images/expertos/materiales/Granosenteros.pdf>.
6. **Peralta, Caicedo -.** Iniap. [En línea] 1999. [Citado el: 28 de Febrero de 2015.]  
[http://www.iniap.gob.ec/nsite/images/documentos/Mercado\\_potencial\\_leguminosas\\_granos\\_andinos\\_Ecuador.pdf](http://www.iniap.gob.ec/nsite/images/documentos/Mercado_potencial_leguminosas_granos_andinos_Ecuador.pdf).
7. **Aron.** Alimentacion para. [En línea] 2013.  
<http://alimentacionpara.com/embarazo/n/5326/propiedades-del-maiz-y-sus-nutrientes.html>.
8. **Natursan.** Natursan. [En línea] 2013. <http://www.natursan.net/los-beneficios-del-cacao/>.
9. **George Tchobanoglous, Hilary Theissen y Rolf Eliassen.** Paho. [En línea] 1982.  
<http://www.bvsde.paho.org/eswww/fulltext/curso/desecho2/desec-08.htm>.
10. **L. R. TOVAR, P. ORTEGA-ROMERO y E. J. VERNON-CARTER.** Interciencia. [En línea] 1996.  
[http://www.interciencia.org/v21\\_04/art02/](http://www.interciencia.org/v21_04/art02/).
11. *Secadores Industriales.* **Fenosa.** 2015.
12. **UDLAP.** Catarina. [En línea] 2012.  
[http://catarina.udlap.mx/u\\_dl\\_a/tales/documentos/lim/davila\\_n\\_jr/capitulo4.pdf](http://catarina.udlap.mx/u_dl_a/tales/documentos/lim/davila_n_jr/capitulo4.pdf).
13. **Navas, Juan Sebastian Ramirez.** Liofilizacion de alimentos. *Liofilización*. Cali- Colombia : Recitel, 2006.
14. **Geankoplis.** TRANSFERENCIA DE MATERIA. *Proceso de Transporte y Operaciones Unitarias*. Mexico : Continental, 1986.

15. **Treybal, Robert.** Operaciones de transferencia de masa. *Operaciones de transferencia de masa*. Mexico : McGRAW-HILL.
16. **Levespiel, Kunii y.** *Fluiditation engineering*. Oregon : Butterworth-Heinemann, 1991.
17. **Acosta, Jesus.** Tecno.Cruzfierro. [En línea] 2010.  
<http://tecno.cruzfierro.com/tesis/03040849-acosta-tesis-protocolo>.
18. **Smith, McCabe.** *Operaciones Unitarias*. Madrid : McGraw-Hill, 1991.
19. **Departamento de agricultura.** FAO. [En línea] 2012. [Citado el: 1 de Abril de 2015.]  
<http://www.fao.org/docrep/x5041s/x5041s03.htm>.
20. **Ingenierios Agrícolas.** BDigital. [En línea]  
<http://www.bdigital.unal.edu.co/26819/1/24483-85789-1-PB.pdf>.
21. **Departamento de agricultura.** FAO. [En línea]  
<http://www.fao.org/docrep/x5041s/x5041s03.htm>.
22. **Smith, Mc Cabe-.** *Operaciones Unitarias*. 6ta Edición.
23. **Agronegocios.** FertilMundo. [En línea] 24 de Noviembre de 2011.  
[https://www.google.com.ec/search?q=frijol+de+palo+arveja&biw=1242&bih=566&source=l nms&tbm=isch&sa=X&ei=U\\_EpVeaoBdWAsQS6zIH4BA&ved=0CAYQ\\_AUoAQ#imgsrc=rMSIDd ibvzZvZM%253A%3BK9SIlqNw\\_RX8JM%3Bhttps%253A%252F%252FfertilMundo.files.wordpress.com%252F2011%252F11%](https://www.google.com.ec/search?q=frijol+de+palo+arveja&biw=1242&bih=566&source=l nms&tbm=isch&sa=X&ei=U_EpVeaoBdWAsQS6zIH4BA&ved=0CAYQ_AUoAQ#imgsrc=rMSIDd ibvzZvZM%253A%3BK9SIlqNw_RX8JM%3Bhttps%253A%252F%252FfertilMundo.files.wordpress.com%252F2011%252F11%).

# ANEXOS

## **ANEXO I MANUAL DE OPERACIÓN DE SECADOR DE LECHO FLUIDIZADO.**

1. Generalidades.....	91
1.1.Introducción .....	91
1.2. Alcance .....	91
1.3. Responsables .....	92
1.4. Equipos de Protección personal. ....	93
2. Procedimiento .....	94
2.1.Encender el equipo .....	94
2.2. Secar granos .....	94
2.3 .Apagado del equipo.....	95
3. Recomendaciones .....	95
4. Diagrama de flujo.....	97

## **1. Generalidades**

### **1.1. Introducción**

Un Secador de lecho fluidizado consiste en secar partículas sólidas con aire, en una unidad de lecho móvil, da lugar a la formación de partículas fluidizadas hasta que vuelven a caer en el lecho fluidizado debido a su peso. La mezcla y transferencia de calor y masa son muy rápidas.

### **1.2. Alcance**

- Desarrollar un mecanismo de estudio detallado complementando la teoría con la práctica.
- El equipo es para uso exclusivo de prácticas,
- El producto analizado no podrá ser consumido.

### **1.3. Responsables**

El secador de lecho fluidizado pertenece única y exclusivamente al Laboratorio de Operaciones Unitarias de la Carrera de Ingeniería Química, perteneciente a la Facultad de Ciencias Naturales y Matemáticas de la Escuela Superior Politécnica del Litoral.

#### 1.4. Equipos de Protección personal.

Zona del cuerpo	E.P.P.	Principal riesgo	Imagen
<b>Cabeza</b>	Orejas	Exposición a ruidos que pueden causar daños en la audición.	
<b>Extremidades</b>	Guantes	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Quemaduras por exposición a objetos calientes</li> <li>- Contactos de tipo electrico</li> </ul>	
	Botas	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Caídas</li> <li>- Contactos con objetos calientes</li> </ul>	
	Ropa de protección	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Contacto con objetos calientes</li> </ul>	

## **2. Procedimiento**

Para operar el Secador de lecho fluidizado se requiere seguir el procedimiento que se detalla a continuación.

### **2.1. Encender el equipo**

- Pesar 5 kg del grano a secar, e introducirlos en el secador.
- Encender los breakers que se encuentran en la caja eléctrica (del blower, y de las resistencias).
- Encender el breaker general ubicado en la parte posterior del Laboratorio de Operaciones Unitarias.

### **2.2. Secar granos**

- Encender las resistencias 1, 2 y 3, indicando el set point (temperatura que se desea operar) en la pantalla del tablero.
- Encender el blower accionando el selector adecuado de este.

- Tomar muestras cada 15 min desde el momento que se llega a la temperatura marcada.
- Apagar el blower en cada toma de muestra.

### **2.3 .Apagado del equipo**

- Apagar las resistencias 1,2 y 3 (Off en el selector).
- Apagar el blower (Off en el selector).
- Recoger la muestra del solido seco.
- Apagar los breakers que se encuentran dentro de la caja eléctrica.
- Apagar el breaker general del Laboratorio de Operaciones Unitarias.

### **3. Recomendaciones**

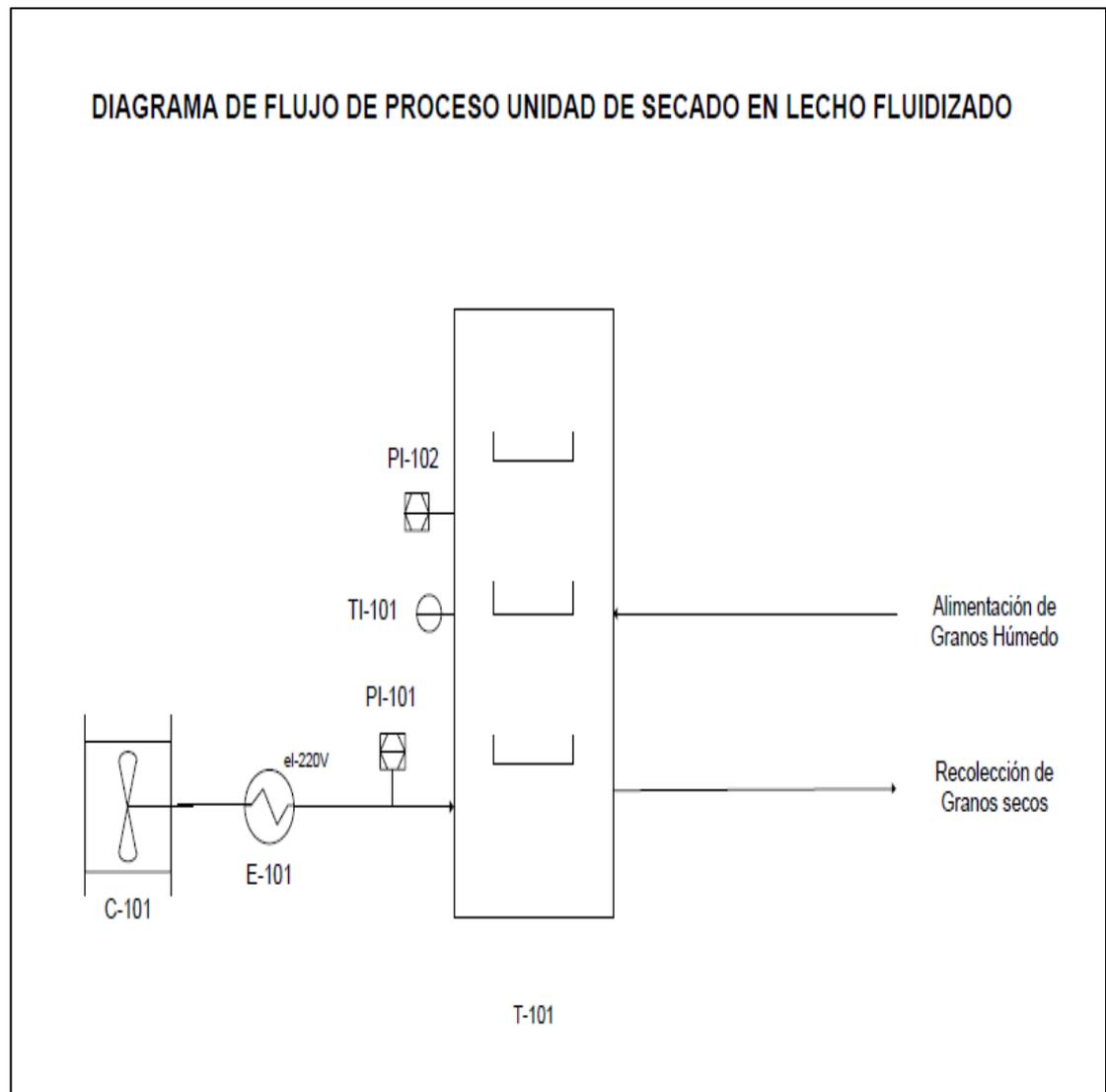
- Se recomienda mantener el equipo en un lugar abierto, para evitar sobrecalentamiento del motor del blower.

- No es recomendable sobrepasar los parámetros de diseño para el proceso de secado ( masa, temperatura)
- Es necesario seguir el procedimiento del manual tal cual se indica para evitar posibles problemas en el equipo y deterioro en la materia a secar.

### **3.1. Solución de Problemas**

- Si se desea medir contenido de humedad en una muestra pequeña, siendo el lecho de 6 Kg, introducir en el lecho una cantidad determinada de granos dentro de una malla, de esta manera se fluidizará el lote completo, pero se medirá una muestra pequeña.
- Si los granos a secar desprenden gran cantidad de polvo, limpiar la malla que se encuentra en la parte superior del secador.

#### 4. Diagrama de flujo del Proceso de Unidad de Secado en Lecho Fluidizado.



## ANEXO II ANÁLISIS DE LABORATORIO CONTENIDO DE HUMEDAD



**Figura A.2.1.** Maiz, Cacao, Arveja en el desecador.

**Fuente:** Autor,2015



**Figura A.2.2.** Muestras en la estufa a 105°C

**Fuente:** Autor,2015

## DIÁMETRO EQUIVALENTE



**Figura A.2.3.** Calibrador Vernier

**Fuente:** Autor, 2015



**Figura A.2.4.** Diámetro de la arveja

**Fuente:** Autor, 2015



**Figura A.2.5.** Diámetro del maíz

**Fuente:** Autor, 2015

### ANEXO III SECADO PRELIMINAR SECADO AL SOL



**Figura A.3.1.** Cacao en mazorca  
**Fuente:** Autor,2015



**Figura A.3.2.** Cacao secándose en el sol  
**Fuente:** Autor,2015



**Figura A.3.3.** Maiz en mazorca  
**Fuente:** Autor,2015



**Figura A.3.4.** Maiz seco por el sol  
**Fuente:** Autor,2015

## ANEXO IV CONSTRUCCIÓN DEL SECADOR



**Figura A.4.1** Fluidizador

**Fuente:** Autor, 2015



**Figura A.4.2.** Reguladores de resistencias

**Fuente:** Autor, 2015



**Figura A.4.3.** Breaker General LOPU

**Fuente:** Autor, 2015



**Figura A.4.4.** Caja eléctrica Secador

**Fuente:** Autor, 2015

## ANEXO V CURVAS DE HUMEDAD PARA SECADO

### MAÍZ MOROCHO

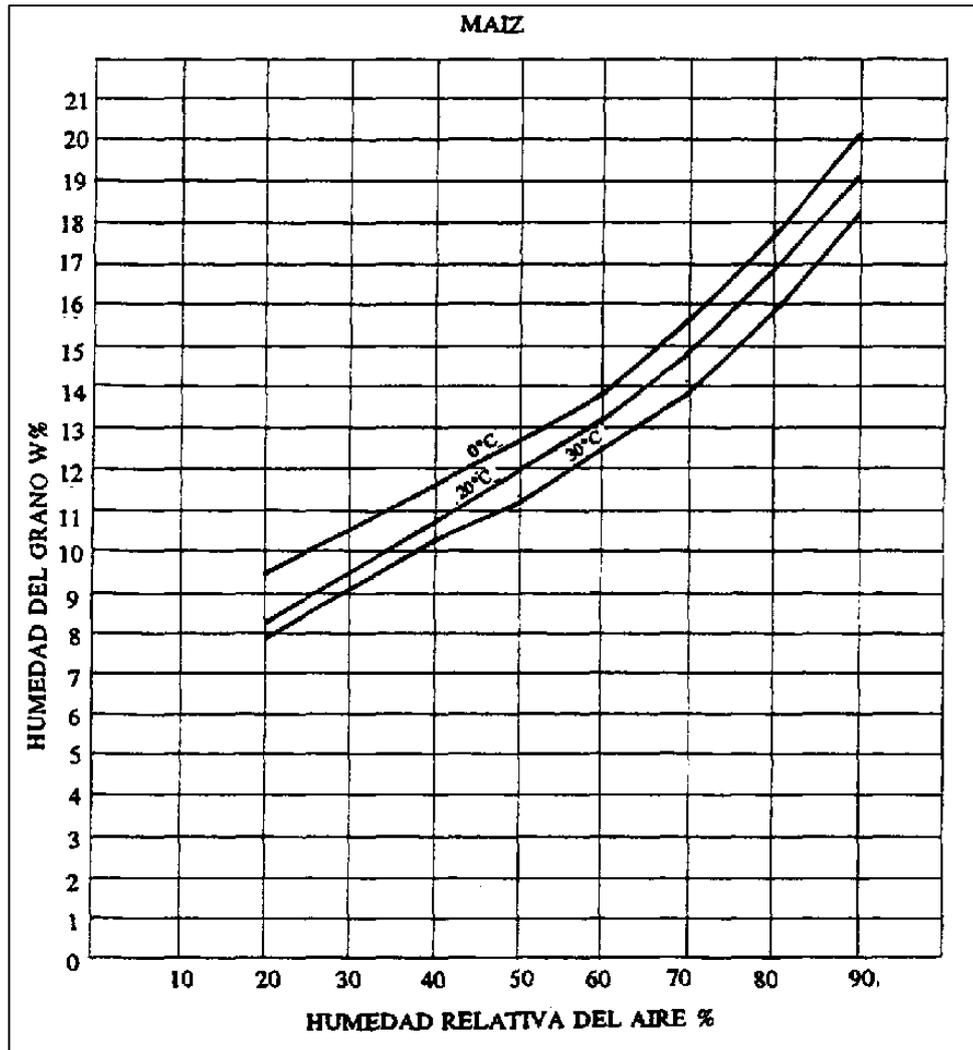


Figura A.5.1. Curva de humedad del maíz morocho

Fuente: Referencia (20)

## CACAO

Figura A.5.2. Curva de humedad del cacao

Fuente: Referencia (21)

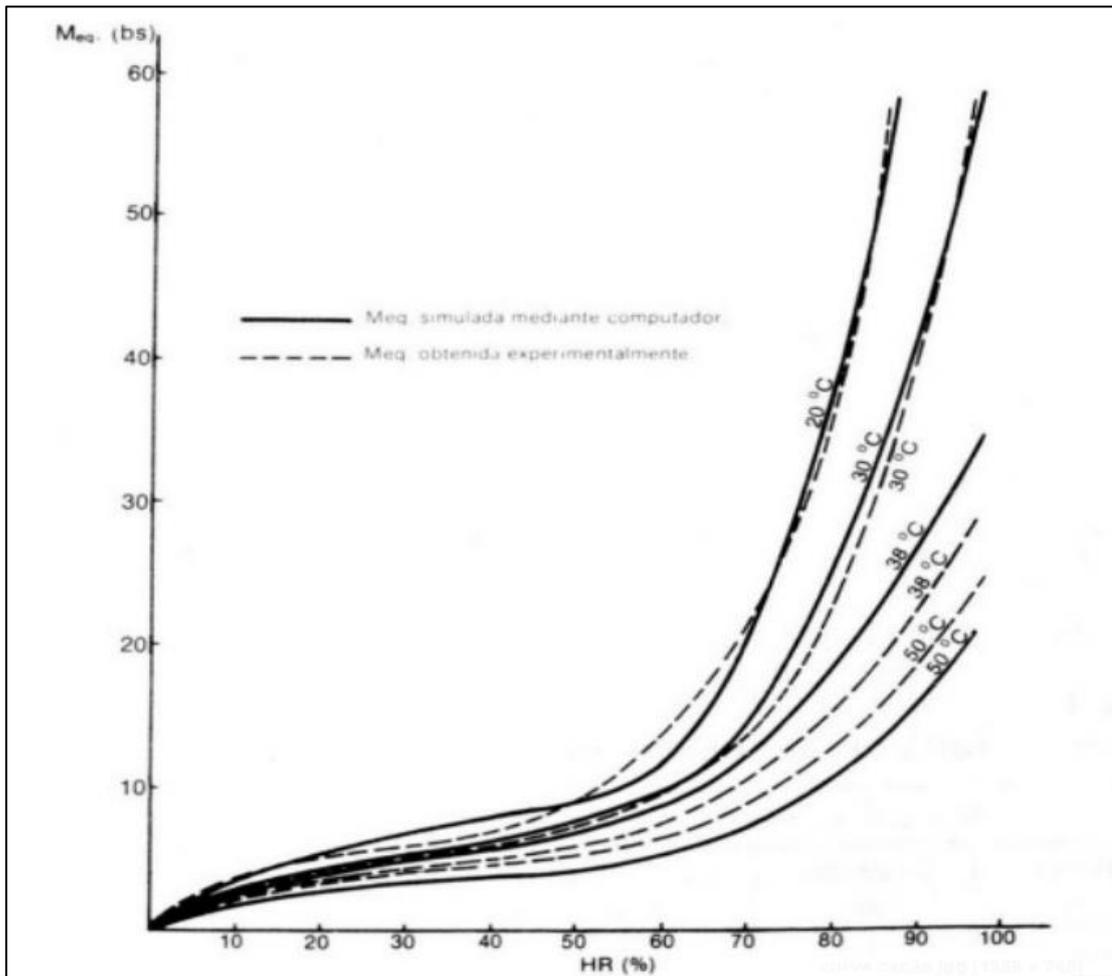


Figura 13 Curva de Humedad del cacao

### FRIJOL DE PALO (ARVEJA)

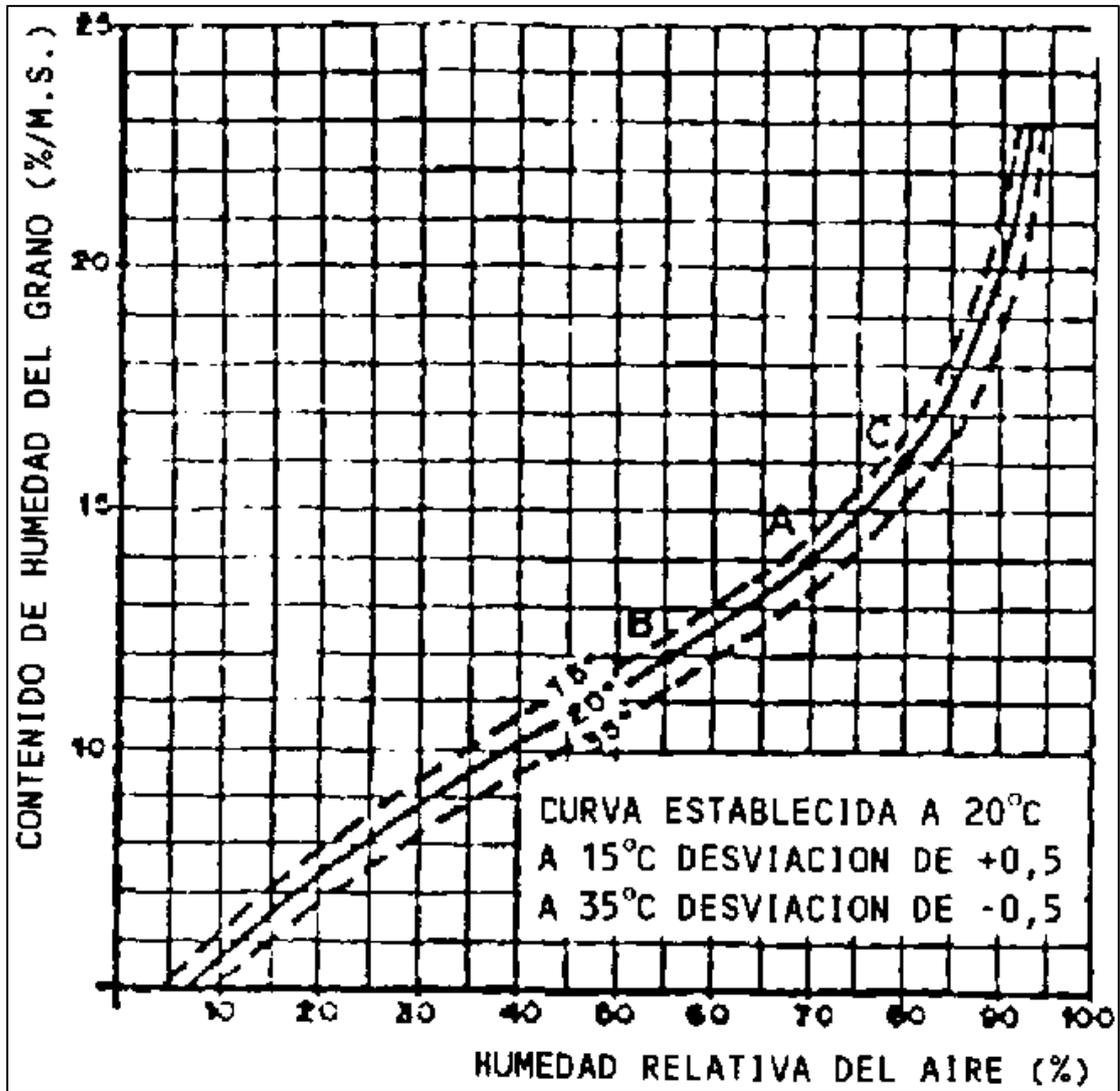


Figura A.5.3. Curva de humedad del frijol de palo (arveja)

Fuente: Referencia (22)

