

**UNIVERSIDAD NACIONAL DEL ALTIPLANO**  
**FACULTAD DE CIENCIAS AGRARIAS**  
**ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERIA AGROINDUSTRIAL**



**“EVALUACIÓN DEL SECADO DE QUINUA (*Chenopodium quinoa* Willd) EN  
UN PROTOTIPO DE LECHO FLUIDIZADO”**

TESIS  
PRESENTADO POR:

Bach. LIVIA ROXANA CANAHUIRE FLORES

Bach. YESICA LUZ VILCANQUI CHURA.

PARA OPTAR EL TITULO DE:  
**INGENIERO AGROINDUSTRIAL**

PUNO PERÚ

2010

UNIVERSIDAD NACIONAL DEL ALTIPLANO  
FACULTAD DE CIENCIAS AGRARIAS  
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERIA AGROINDUSTRIAL

“EVALUACIÓN DEL SECADO DE QUINUA (*Chenopodium quinoa wild*) EN UN  
PROTOTIPO DE LECHO FLUIDIZADO”

TESIS

PRESENTADO POR:

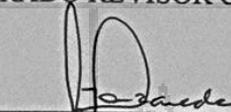
Bach. LIVIA ROXANA CANAHUIRE FLORES.

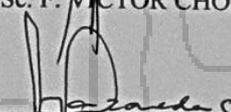
Bach. YESICA LUZ VILCANQUI CHURA.

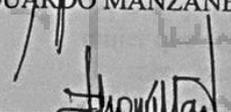
PARA OPTAR EL TITULO DE:

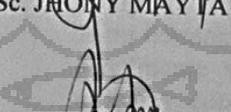
**INGENIERO AGROINDUSTRIAL**

APROBADO POR EL JURADO REVISOR CONFORMADO POR:

PRESIDENTE :   
Ing. M.Sc. F. VÍCTOR CHOQUEHUANCA CÁCERES.

PRIMER MIEMBRO :   
Ing. EDUARDO MANZANEDA CABALA.

SEGUNDO MIEMBRO :   
Ing. M.Sc. JHONY MAYTA HANCCO.

DIRECTOR DE TESIS :   
Ing. M.Sc. ROGER SEGURA PEÑA.

ASESOR DE TESIS :   
Ing. M.Sc. THOMAS ANCCO VIZCARRA.

PUNO PERÚ

2010

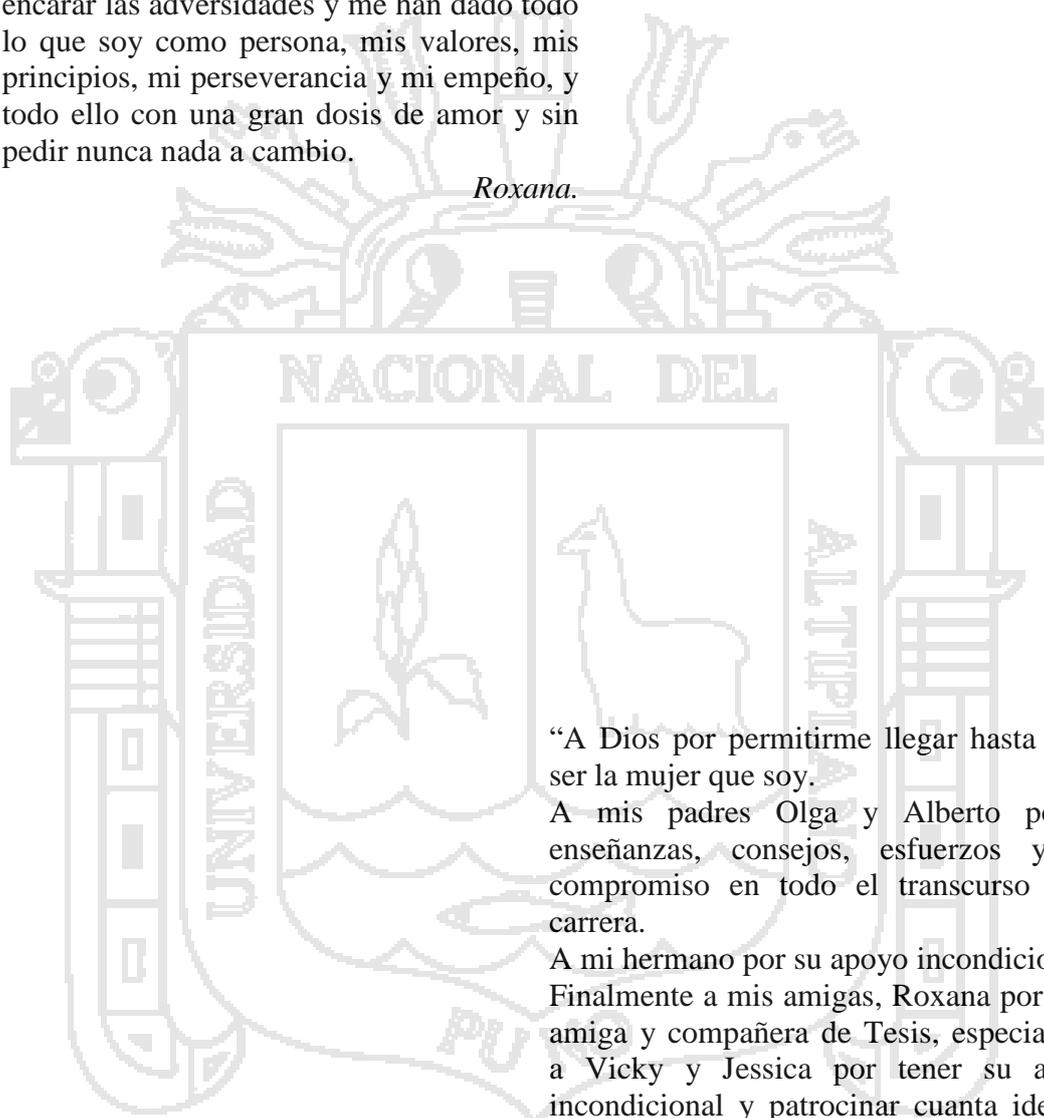
Área: Ingeniería y tecnología

Tema: Desarrollo de procesos y productos agroindustriales sostenibles y eficientes

## DEDICATORIA

A TI, el amigo de toda mi vida y a mis padres Patty y Fabian, por su comprensión y ayuda en momentos malos. Me enseñaron a encarar las adversidades y me han dado todo lo que soy como persona, mis valores, mis principios, mi perseverancia y mi empeño, y todo ello con una gran dosis de amor y sin pedir nunca nada a cambio.

*Roxana.*



“A Dios por permitirme llegar hasta aquí y ser la mujer que soy.

A mis padres Olga y Alberto por sus enseñanzas, consejos, esfuerzos y gran compromiso en todo el transcurso de mi carrera.

A mi hermano por su apoyo incondicional.

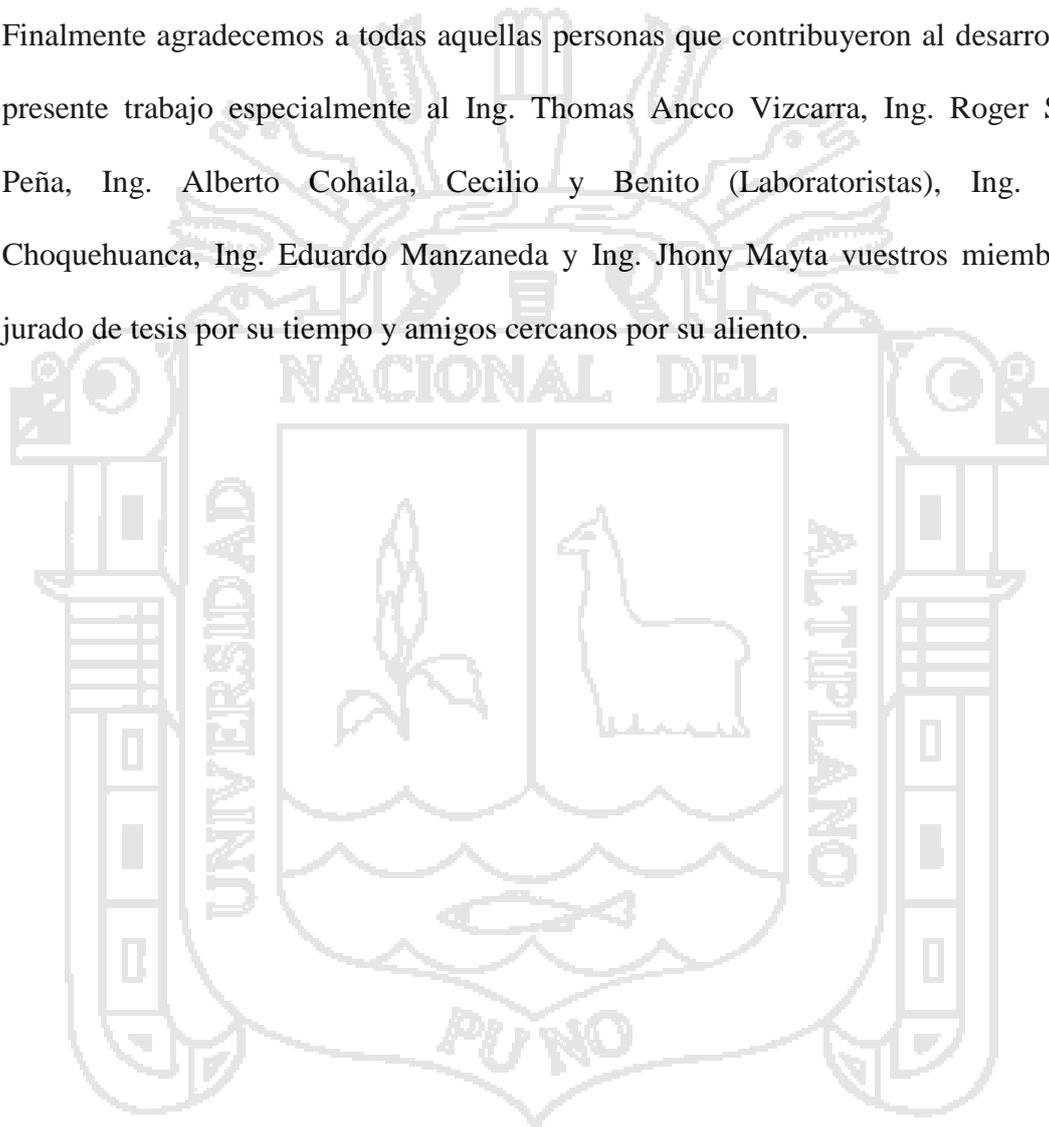
Finalmente a mis amigas, Roxana por ser mi amiga y compañera de Tesis, especialmente a Vicky y Jessica por tener su amistad incondicional y patrocinar cuanta idea loca que se me ocurría”

*Yesica.*

## AGRADECIMIENTO

A nuestra alma mater y a nuestros profesores, que durante nuestra formación profesional nos brindaron sus amplios conocimientos y experiencias.

Finalmente agradecemos a todas aquellas personas que contribuyeron al desarrollo del presente trabajo especialmente al Ing. Thomas Ancco Vizcarra, Ing. Roger Segura Peña, Ing. Alberto Cohaila, Cecilio y Benito (Laboratoristas), Ing. Victor Choquehuanca, Ing. Eduardo Manzaneda y Ing. Jhony Mayta vuestros miembros de jurado de tesis por su tiempo y amigos cercanos por su aliento.



**INDICE GENERAL**

Pág.

**INDICE GENERAL****INDICE DE CUADROS****INDICE DE TABLAS****INDICE DE FIGURAS****INDICE DE GRAFICOS****INDICE DE ANEXOS****INDICE DE APENDICES****RESUMEN****I INTRODUCCION**

1

**II REVISIÓN DE LITERATURA**

2

**2.1. QUINUA.**

2

2.1.1. Descripción botánica.

2

2.1.2. Clasificación taxonómica.

2

2.1.3. Valor nutricional.

2

2.1.4. Propiedades físicas del grano de quinua y algunos alimentos.

3

**2.2. SECADO.**

5

2.2.1. Definición.

5

2.2.2. Teoría del secado.

5

2.2.3. Mecanismos de secado.

7

2.2.4. Factores que intervienen en el proceso de secado.

8

a) Temperatura del aire.

9

b) Humedad relativa del aire.

9

c) Velocidad de flujo de aire.

9

2.2.5. Velocidad de secado.

9

a) Periodo inicial (zona A - B).

11

b) Periodo de velocidad constante (zona B - C).

11

c) Primer periodo de velocidad decreciente (Zona C-D).

12

d) Segundo Periodo de velocidad decreciente (Zona D-E).

12

e) Movimiento de humedad en los sólidos en el periodo de velocidad Decreciente.

12

2.2.6. Tiempos de secado.

13

a) Periodo de velocidad de secado constante.

14

b) Periodo de velocidad decreciente.

14

<b>2.3. FLUIDIZACIÓN.</b>	<b>16</b>
2.3.1. Comportamiento del lecho en la fluidización gaseosa.	16
2.3.2. Propiedades físicas de la partícula.	17
a) Diámetro de la partícula.	17
b) Esfericidad de la partícula.	18
c) Área superficial	18
d) Porosidad.	18
e) Densidad de la partícula.	19
2.3.3. Clasificación de la partícula.	20
2.3.4. Propiedades hidrodinámicas de la fluidización.	20
a) Velocidad mínima de fluidización.	20
b) Velocidad límite. ( $V_T$ ).	25
c) Tipos de fluidización.	25
d) Canalización de lecho.	27
<b>III MATERIALES Y MÉTODOS</b>	<b>29</b>
<b>3.1. ÁMBITO DE ESTUDIO.</b>	<b>29</b>
<b>3.2. MATERIALES Y EQUIPOS.</b>	<b>29</b>
3.2.1. Materia prima.	29
3.2.2. Materiales empleados en la construcción del secador de lecho fluidizado.	29
3.2.3. Materiales empleados en la instrumentación y control del secador de lecho fluidizado.	29
3.2.4. Instrumento para la determinación del diámetro de grano de quinua.	30
3.2.5. Materiales y equipos para la determinación de la densidad del grano de quinua.	30
3.2.6. Materiales y equipos para el pre-tratamiento del proceso de secado del grano de quinua.	30
3.2.7. Materiales y equipos para la determinación de la humedad del grano de quinua.	31
3.2.8. Instrumento para la determinación de las propiedades hidrodinámicas de lecho fluidizado.	31
<b>3.3. DESCRIPCIÓN DEL MÓDULO “SECADOR DE LECHO FLUIDIZADO”.</b>	<b>31</b>
3.3.1. Cámara de secado.	32
3.3.2. Alimentador de sólidos o control de flujo de sólidos.	33
3.3.3. Sistema de abastecimiento de gas.	34
3.3.4. Sistema de calefacción.	34
3.3.5. Instrumentación y control del secador de lecho fluidizado.	34
a) Sensor de temperatura.	34
b) Sensor de humedad.	35
c) Sistema de adquisición de datos.	35
d) Software.	36
<b>3.4. METODOLOGÍA EXPERIMENTAL.</b>	<b>37</b>
3.4.1. Determinación de las propiedades físicas del grano de quinua.	38
a) Diámetro de la partícula.	38
b) Esfericidad de la quinua.	39
c) Porosidad.	40
d) Densidad real.	40
3.4.2. Determinación de las propiedades hidrodinámica de la fluidización.	40
a) Densidad y viscosidad del aire.	40
b) Cálculo de la velocidad mínima de fluidización.	41
c) Número de Reynolds.	41
d) Porosidad en mínima fluidización.	41
e) Velocidad terminal.	42
f) Cálculo del tipo de fluidización.	42
3.4.3. Determinación de la cinética de secado de los granos de quinua.	42
3.4.4. Determinación de la difusividad efectiva.	43
<b>IV RESULTADOS Y DISCUSIONES</b>	<b>44</b>

<b>4.1. PROPIEDADES FÍSICAS DEL GRANO DE QUINUA E HIDRODINAMICAS DE LA FLUIDIZACIÓN.</b>	<b>44</b>
4.1.1. Propiedades físicas del grano de quinua.	44
4.1.2. Propiedades hidrodinámicas del lecho fluidizado.	45
<b>4.2. HUMEDAD REMOVIDA.</b>	<b>46</b>
<b>4.3. VELOCIDAD DE SECADO.</b>	<b>49</b>
4.3.1. Efecto de la temperatura de flujo de aire en la velocidad de secado.	49
4.3.2. Efecto de la velocidad de flujo de aire en la velocidad de secado.	51
4.3.3. Efecto de la cantidad de lecho en la velocidad de secado.	53
4.3.4. Análisis estadístico para la curva de velocidad de secado.	55
<b>4.4. DIFUSIVIDAD EFECTIVA.</b>	<b>61</b>
<b>V CONCLUSIONES</b>	<b>64</b>
<b>VI RECOMENDACIONES</b>	<b>65</b>
<b>VII BIBLIOGRAFIA</b>	<b>66</b>
<b>ANEXOS</b>	
<b>71</b>	
<b>APENDICES</b>	
<b>79</b>	



**INDICE DE CUADROS**

	Pág.
Cuadro 1: Propiedades físicas del grano de quinua variedad blanca de juli	44
Cuadro 2: Caracterización hidrodinámica del sistema granos de quinua-aire en el prototipo de lecho fluidizado.	46
Cuadro 3: Prueba de Duncan para Temperatura	47
Cuadro 4: Prueba de Duncan para Velocidad de flujo de aire	48
Cuadro 5: Prueba de Duncan para Cantidad de lecho	48
Cuadro 6: prueba de Duncan para temperatura	55
Cuadro 7: Prueba de Duncan para Velocidad de flujo de aire	56
Cuadro 8: Prueba de Duncan para Cantidad de lecho	56
Cuadro 9: Prueba de Duncan para Temperatura	57
Cuadro 10: Prueba de Duncan para Velocidad de flujo de aire	58
Cuadro 11: Prueba de Duncan para Cantidad de lecho	58
Cuadro 12: Prueba de Duncan para Temperatura	59
Cuadro 13: Prueba de Duncan para Velocidad de flujo de aire	59
Cuadro 14: Prueba de Duncan para Cantidad de lecho	60
Cuadro 15: Prueba de Duncan para temperatura	61
Cuadro 16: Prueba de Duncan para Velocidad de flujo de aire	62
Cuadro 17: prueba de Duncan para cantidad de lecho	62

**INDICE DE TABLAS**

	Pág.
Tabla 1: Composición proximal de los cereales y granos andinos de una porción comestible de 100 g de quinua.	3
Tabla 2: Propiedades Físicas de algunos granos de cereales.	4
Tabla 3: Propiedades Físicas, Mecánicas y termales del grano de quinua. Variedad Blanca de Juli y Kamiri.	4
Tabla 4: Longitudes de granos de cañihua, cebada y habas.	5



## INDICE DE FIGURAS

Figura 1: Curva de equilibrio de humedad en el diagrama de fases	6
Figura 2: Esquema del movimiento de la humedad durante el secado (Foust, 1998).	8
Figura 3: Proceso de secado	9
Figura 4: Curvas típicas de Cinética de Secado. (Geankoplis, 1998).	11
Figura 5: Porosidad de la partícula	19
Figura 6: Efecto de la velocidad superficial del fluido sobre el sólido, (Correa, 1982).	22
Figura 7: Caída de presión y altura del lecho frente a velocidad superficial para un lecho de sólidos, (Mc Cabe, 1991)	23
Figura 8: Fases de la fluidización de burbujeo, (Correa, 1982).	27
Figura 9: Efectos de la canalización causada por el sólido en el lecho fluidizado y en la velocidad de fluidización, (Correa, 1982).	28
Figura 10: Partes del modulo "Secador de lecho fluidizado".	32
Figura 11: Cámara de secado	33
Figura 12: Alimentador de sólidos.	34
Figura 13: Sensor de humedad.	35
Figura 14: Tarjeta de adquisición de datos.	35
Figura 15: Caja de control	36
Figura 16: Diagrama de flujo del secado de quinua	37
Figura 17: Medición de las dimensiones del grano de quinua	39

## INDICE DE GRAFICOS

	Pág.
Gráfico 1: Curvas de velocidad de secado a 12m/s y 50g a diferentes temperaturas	50
Gráfico 2: Curvas de velocidad de secado a 12m/s y 40g a diferentes temperaturas	50
Gráfico 3: Curvas de velocidad de secado a 12m/s y 30g a diferentes temperaturas	50
Gráfico 4: Curvas de velocidad de secado a 15m/s y 50g a diferentes temperaturas	50
Gráfico 5: Curvas de velocidad de secado a 15m/s y 40g a diferentes temperaturas	50
Gráfico 6: Curvas de velocidad de secado a 15m/s y 30g a diferentes temperaturas	50
Gráfico 7: Curvas de velocidad de secado a 17m/s, 50g y diferentes temperaturas	51
Gráfico 8: Curvas de velocidad de secado a 17m/s, 40g y diferentes temperaturas	51
Gráfico 9: Curvas de velocidad de secado a 17m/s, 30g y diferentes temperaturas	51
Gráfico 10: Curvas de velocidad de secado a 25°C, 50g y diferentes velocidades de flujo de aire.	52
Gráfico 11: Curvas de velocidad de secado a 25°C, 40g y diferentes velocidades de flujo de aire.	52
Gráfico 12: Curvas de velocidad de secado a 25°C, 30g y diferentes velocidades de flujo de aire.	52
Gráfico 13: Curvas de velocidad de secado a 35°C, 50g y diferentes velocidades de flujo de aire.	52
Gráfico 14: Curvas de velocidad de secado a 35°C, 40g y diferentes velocidades de flujo de aire.	52
Gráfico 15: Curvas de velocidad de secado a 35°C, 30g y diferentes velocidades de flujo de aire.	52
Gráfico 16: Curvas de velocidad de secado a 25°C, 12m/s y diferentes cantidades de lecho.	53
Gráfico 17: Curvas de velocidad de secado a 25°C, 15m/s y diferentes cantidades de lecho.	53
Gráfico 18: Curvas de velocidad de secado a 25°C, 17m/s y diferentes cantidades de lecho.	53
Gráfico 19: Curvas de velocidad de secado a 35°C, 12m/s y diferentes cantidades de lecho.	53
Gráfico 20: Curvas de velocidad de secado a 35°C, 15m/s y diferentes cantidades de lecho.	54
Gráfico 21: Curvas de velocidad de secado a 35°C, 17m/s y diferentes cantidades de lecho.	54

**INDICE DE ANEXOS**

Pág.

ANEXO 1: PROPIEDADES FISICAS DE LOS GRANOS DE QUINUA

72

ANEXO 2: HIDRODINÁMICA DE FLUIDIZACIÓN

74

ANEXO 3: PROTOTIPO DE LECHO FLUIDIZADO

77

ANEXO 4: CANTIDADES DE MUESTRA

78

ANEXO 5: PESO DE LAS MUESTRAS

78



## INDICE DE APENDICES

	Pág.
APÉNDICE 1: Datos Experimentales del Secado de Granos de Quinoa a 25°C, 12 m/s y 50g	80
APÉNDICE 2: Datos Experimentales del Secado de Granos de Quinoa a 25°C, 12 m/s y 40g	80
APÉNDICE 3: Datos Experimentales del Secado de Granos de Quinoa a 25°C, 12 m/s y 30g	81
APÉNDICE 4: Datos Experimentales del Secado de Granos de Quinoa a 25°C, 15 m/s y 50g	81
APÉNDICE 5: Datos Experimentales del Secado de Granos de Quinoa a 25°C, 15 m/s y 40g	82
APÉNDICE 6: Datos Experimentales del Secado de Granos de Quinoa a 25°C, 15 m/s y 30g	82
APÉNDICE 7: Datos Experimentales del Secado de Granos de Quinoa a 25°C, 17 m/s y 50g	83
APÉNDICE 8: Datos Experimentales del Secado de Granos de Quinoa a 25°C, 17 m/s y 40g	83
APÉNDICE 9: Datos Experimentales del Secado de Granos de Quinoa a 25°C, 17 m/s y 30g	84
APÉNDICE 10: Datos Experimentales del Secado de Granos de Quinoa a 35°C, 12 m/s y 50g	84
APÉNDICE 11: Datos Experimentales del Secado de Granos de Quinoa a 35°C, 12 m/s y 40g	85
APÉNDICE 12: Datos Experimentales del Secado de Granos de Quinoa a 35°C, 12 m/s y 30g	85
APÉNDICE 13: Datos Experimentales del Secado de Granos de Quinoa a 35°C, 15 m/s y 50g	86
APÉNDICE 14: Datos Experimentales del Secado de Granos de Quinoa a 35°C, 15 m/s y 40g	86
APÉNDICE 15: Datos Experimentales del Secado de Granos de Quinoa a 35°C, 15 m/s y 30g	87
APÉNDICE 16: Datos Experimentales del Secado de Granos de Quinoa a 35°C, 17 m/s y 50g	87
APÉNDICE 17: Datos Experimentales del Secado de Granos de Quinoa a 35°C, 17 m/s y 40g	88
APÉNDICE 18: Datos Experimentales del Secado de Granos de Quinoa a 35°C, 17 m/s y 30g	88
APÉNDICE 19: Tratamientos para el Análisis Estadístico	89
APÉNDICE 20: Resultados de Análisis Estadístico para Humedad Inicial	91
APÉNDICE 21: Análisis de Varianza de Humedad Removida	91
APÉNDICE 22: Análisis de varianza del Periodo de Velocidad de Secado Constante	92
APÉNDICE 23: Análisis de varianza del Primer Periodo de Velocidad de Secado Decreciente.	92
APÉNDICE 24: Análisis de varianza del Segundo Periodo de Velocidad de Secado Decreciente.	93
APÉNDICE 25: Análisis de varianza de Difusividad Efectiva	93
APÉNDICE 26: Gráficos Experimentales Obtenidos para la Determinación de la Velocidad de Secado	94

## RESUMEN

El trabajo de investigación se realizó en el laboratorio de Post-cosecha de la Escuela Profesional de Ingeniería Agroindustrial, Facultad de Ciencias Agrarias de la Universidad Nacional del Altiplano-Puno, ubicada a 3825 m.s.n.m. El objetivo fue evaluar el proceso de secado de los granos de quinua de la variedad Blanca de Juli, en un prototipo de lecho fluidizado implementado, determinando teóricamente las propiedades físicas del grano y la hidrodinámica de fluidización; obteniendo valores experimentales de humedad removida, velocidad de secado y difusividad efectiva sometiendo cantidades de lecho de 30, 40 y 50g por tiempo de 315 segundos, extrayéndose muestras cada 35 segundos, a temperaturas de 25 y 35°C, velocidades de flujo de aire de 12, 15 y 17m/s durante el proceso de secado de los granos de quinua. Resultando valores de las propiedades físicas de los granos de quinua de 1.6mm de diámetro, 625Kg/m<sup>3</sup> de densidad, 0.28 de porosidad y 0.90 de esfericidad; la hidrodinámica presenta un valor máximo de la velocidad mínima de fluidización de 6.05m/s a velocidad de flujo de aire de 12m/s y a 25°C, con una porosidad mínima de fluidización de 0.72 constante para todos los tratamientos presentando un flujo de transición, según el número de Reynolds (Re) y una fluidización de burbujeo debido a la clasificación de los granos de quinua en el grupo D. Se Realizó una prueba de comparación múltiple de Duncan a un nivel de confianza del 95%, se obtuvo el mejor resultado de velocidad de secado para el tratamiento de 50g de lecho a 35°C y velocidad de flujo de aire de 17m/s con un valor de 25.44% de humedad removida y; el mayor valor de difusividad efectiva se dio en el tratamiento para 30g de lecho a 35°C y velocidad de flujo de aire de 17m/s con un valor de 1.48489e-12m/s<sup>2</sup>. Concluyendo que a mayor velocidad de flujo de aire y temperatura la velocidad mínima de fluidización será menor y la cantidad de lecho a fluidizar y la temperatura influyen directamente sobre el secado.

## I INTRODUCCION

La quinua es un producto de vital importancia, debido a las características nutritivas que posee este cultivo. Siendo el Departamento de Puno el mayor productor anual de 10.000 TM en promedios en los últimos años. Por tanto cualquier investigación que se realice para mejorar la producción o su procesamiento es de gran importancia para el sector agrícola y para la economía del país.

EL trabajo de investigación se ha centrado en el estudio y experimentación del comportamiento fluidinámico. Al conjunto de partículas fluidizadas se les denomina lecho fluidizado. En este proceso el sistema adquiere propiedades muy particulares que lo hacen potencialmente importante para la industria alimentaria. Los elevados coeficientes de transferencia de calor y de masa favorecen el secado de los granos. Una propiedad importante de un lecho fluidizado es la uniformidad de la temperatura, asegurando la calidad del producto final, debido al control que se mantiene de esta.

Pese a que el proceso de secado ya ha sido investigado aun no se domina, ni se ha explotado lo suficiente. El problema del secado con exposición directa al sol es dependiente de las condiciones climáticas y demanda mayor tiempo en remover la humedad del producto, y como consecuencia tiende a perder su valor nutricional. . Debido a estas dificultades nace la idea de manipular los lechos fluidizados donde se opera a presiones y temperaturas bajas, evitando así la degradación térmica, en el cual se considera los siguientes objetivos.

Los objetivos específicos que se plantearon fueron:

- Determinar la hidrodinámica de la fluidización de los granos de quinua en un secador por lecho fluidizado.
- Determinar la cantidad de humedad removida a diferentes temperaturas, velocidad de flujo de aire y caudal de alimentación.
- Determinar la velocidad de secado de los granos de quinua a diferentes temperaturas, velocidad de flujo de aire y caudal de alimentación.
- Determinar la difusividad efectiva en el secado de granos de quinua a diferentes temperaturas de flujo de aire, velocidad de flujo de aire y caudal de alimentación.

## II REVISIÓN DE LITERATURA

### 2.1. QUINUA.

#### 2.1.1. Descripción botánica.

Mujica (2000), menciona que la quinua, es una planta herbácea anual, de amplia dispersión geográfica, presenta características peculiares en su morfología, coloración y comportamiento en diferentes zonas agroecológicas donde se la cultiva, esta planta alcanza alturas variables desde 30 a 300 cm, dependiendo del tipo de quinua, genotipo, de las condiciones ambientales donde crece y de la fertilidad de los suelos.

#### 2.1.2. Clasificación taxonómica.

Este cultivo fue descrito por primera vez por el científico Alemán Luis Willdnow. (León, 2003).

Reyno: Vegetal  
División: Fanerógamas  
Clase: Dicotiledóneas  
Subclase: Angiospermas  
Orden: Centrospermales  
Familia: Chenopodiaceae  
Género: *Chenopodium*  
Sección: Chenopodia  
Subsección: Cellulata  
Especie: *Chenopodium quinoa* Willd.

#### 2.1.3. Valor nutricional.

La calidad nutricional de un producto depende tanto de la cantidad como de la calidad de sus nutrientes, siendo la quinua un producto con un contenido de proteínas de alto valor biológico y nutricional. En la Tabla 1 se aprecia el contenido de la composición proximal de cereales y granos andinos.

**Tabla 1: Composición proximal de los cereales y granos andinos de una porción comestible de 100 g de quinua.**

Cereales y granos andinos	Proteína	Grasa	Fibra cruda	Ceniza	carbohidratos
Cebada	11.8	1.8	5.3	3.1	78.1
Avena	11.6	5.2	10.4	2.9	69.8
Centeno	13.4	1.8	2.6	2.0	78.7
Triticale	15.0	1.7	2.6	2.0	78.7
Arroz	9.1	2.2	10.2	7.2	71.2
Maíz	11.1	4.9	2.1	1.7	80.2
Sorgo	12.4	3.6	2.7	1.7	79.7
Quinua	14.4	6.0	4.0	2.9	72.6
Kañiwa	18.8	7.6	6.1	4.1	63.4
Kiwicha	14.5	6.4	5.0	2.6	71.5

Fuente: Kent (1983), Repo-Carrasco (1992)

#### 2.1.4. Propiedades físicas del grano de quinua y algunos alimentos.

Las propiedades físicas son de importancia para determinar y clasificar: Forma, tamaño, densidad, textura superficial, porosidad, color, elasticidad y conductividad térmica (Harmond, 1965).

En el estudio de secado de grano: pérdida de presión en lecho surtidor por Cesario Condorhuaman C., determina las propiedades físicas de algunos alimentos como se muestra en la siguiente Tabla 2.

**Tabla 2: Propiedades Físicas de algunos granos de cereales.**

Tipos de grano	Densidad (kg/m <sup>3</sup> )		Diámetro (mm)	Porosidad
	absoluta	aparente		
Cebada	1230	790	3.90	0.3545
Trigo	1370	800	3.92	0.4175
Café	1120	630	15.4	0.4384
Quinua	1380	940	2.02	0.321
Fríjol	1150	560	7.17	0.5143

Fuente: Condorhuaman (2001).

En la determinación de las propiedades físicas, mecánicas y termal de quinua variedad blanca de Juli y Kamiri, (Medina, 2000), en la Universidad de Concepción. Chillan - Chile, se observa en la Tabla 3.

**Tabla 3: Propiedades Físicas, Mecánicas y termal del grano de quinua. Variedad Blanca de Juli y Kamiri.**

Propiedad	Dimensión
Tamaño	2.13 a 2.55mm
Esfericidad	0.88 a 0.93
Forma (posición lateral)	Prolato esferoide
Porosidad	0.37 a 0.45
Módulos de elasticidad	715 a 290 MPa
Conductividad termal	0.0734 a 0.10 W m <sup>-1</sup> °C <sup>-1</sup>
Difusividad termal	9.24 a 8.85 X 10 <sup>-8</sup> m <sup>2</sup> s <sup>-1</sup>
Calor específico	0.75 a 1.06 KJ Kg <sup>-1</sup> °C <sup>-1</sup>

Fuente: Medina (2000)

**Tabla 4: Longitudes de granos de cañihua, cebada y habas.**

Grano	Variedad	Diámetro (mm)
Cañihua	Ramis	1.24
	Cupi	1.035
Cebada	UNA -80	10.75
	Grignon	9.73
	Comun	11.48
Habas	Gigante 1ra. clase	25.76
	Gigante 2da. clase	23.11

Fuente: Rosas (2003)

## 2.2. SECADO.

### 2.2.1. Definición.

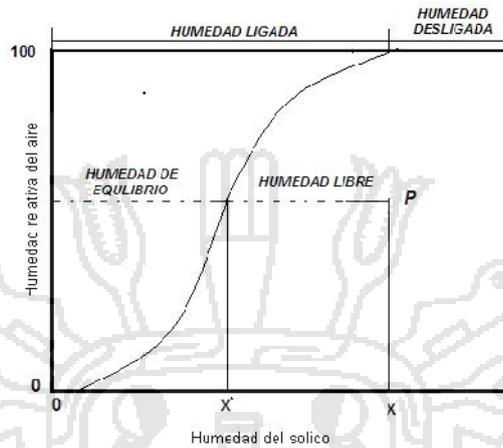
El secado se define como la aplicación del calor bajo condiciones controladas para remover por evaporación la mayor cantidad de agua presente en los alimentos. El principal propósito del secado es extender la vida media de los alimentos y reducir la actividad acuosa. Inhibir el crecimiento microbiano y la actividad enzimática. La reducción en peso y en volumen de los alimentos, reduce los costos de transporte y almacenamiento (Foust, 1998).

### 2.2.2. Teoría del secado.

El secado de los sólidos, desde el punto de vista teórico o experimental, es la operación unitaria que consiste en retirar el contenido de humedad en un alimento, fluctúa en función de numerosos factores, en tanto que la materia seca permanece constante durante la deshidratación (Welti, 2001).

Bajo diversas presiones y temperaturas, el agua puede asumir una combinación de los tres estados: sólido, líquido, o vapor. La mayoría de los procesos de secado para los alimentos implica el cambiar del agua de un estado líquido a un estado gaseoso para después quitar este vapor haciendo circular aire sobre la superficie del alimento. Esto puede ocurrir a presión atmosférica o en condiciones de vacío. Su humedad tiende hacia un valor de equilibrio. A cada humedad del cuerpo le corresponde en el equilibrio

una humedad relativa del aire. Tomando estas variables como coordenadas de un diagrama rectangular, se puede obtener la curva de equilibrio, Figura 1 (Bueno e Iglesias, 1994).



**Figura 1: Curva de equilibrio de humedad en el diagrama de fases**

En la curva de equilibrio se puede conocer el sentido en que variará la humedad de un cuerpo puesto en contacto con aire húmedo. Si el punto representativo está a la derecha de la curva de equilibrio (punto P en la Figura 1) la humedad del sólido tiende a disminuir, pues la humedad es superior al valor de la humedad de equilibrio del aire. Si el punto P estuviera a la izquierda de la curva, la humedad del cuerpo tiende a aumentar a expensas del vapor del agua recibido del aire húmedo, en contacto con el sólido. Por tanto se tiene los siguientes tipos de humedad (Bueno e Iglesias, 1994).

- Humedad ligada: la humedad mínima necesaria para que el sólido deje de comportarse como higroscópico ó la humedad mínima de equilibrio con el aire saturado.
- Humedad desligada: representa la humedad del sólido en contacto con el aire saturado, dicho de otro modo, representa la diferencia entre la humedad del sólido y la humedad ligada. la cantidad de agua contenida en el sólido no está afectada por la presencia del sólido.

La determinación de humedad de un sólido son de dos formas diferentes: humedad en base húmeda y humedad en base seca. Mediante las siguientes ecuaciones (1) y (2).

Base seca

$$X_{bs} = \frac{m_a - m_b}{m_b} \quad (\text{ec. 1})$$

Base húmeda

$$X_{bh} = \frac{m_a - m_b}{m_a} \quad (\text{ec.2})$$

Donde:

$m_a$  : Masa inicial. (g).

$m_b$  : Masa final. (g).

$X_{bs}$  : Humedad en base seca. (Kg de agua/Kg de sólido seco).

$X_{bh}$  : Humedad en base húmeda. (Kg de agua/Kg de sólido húmedo).

### 2.2.3. Mecanismos de secado.

Los mecanismos por los cuales el agua abandona al sólido sometido a un proceso de secado, es por el mecanismo convectivo, (Geankoplis, 1995), el cual se da como resultado de una evaporación superficial que es proporcional a la cantidad de calor que llega al sólido, cuando el agua se extrae del interior del sólido, los mecanismos pueden ser diferentes: capilaridad, difusión de agua, difusión de vapor, encogimiento del sólido, etc. evidentemente, estos mecanismos depende en buena medida de la naturaleza interior del sólido (Vizcarra *et al.*, 1998). Menciona los siguientes tipos de mecanismos de migración del agua.

a) Transporte por difusión líquida:

Mecanismo por el que se asume que la velocidad de transferencia de la humedad líquida es proporcional al gradiente de la concentración de humedad dentro del material.

b) Transporte por difusión de vapor:

Este es el principal mecanismo de transferencia de humedad por vapor en el material. Toma lugar cuando la dimensión característica de los espacios del aire libre son mayores a  $10^{-7}$ m.

c) Transporte por termodifusión:

La cual es la transferencia de humedad debida al cambio de temperaturas en una dirección tomando en cuenta el coeficiente de termodifusión.

d) Transporte por fuerzas capilares:

Si el número de capilaridades con varios radios forman canales interconectados entonces se crea una diferencia en presión capilar la cual da como resultado una distribución de la humedad de los capilares grandes a los pequeños por succión capilar.

e) Transporte por presión ósmica:

La presión ósmica es una función del contenido de humedad en el material

f) Transporte debido al gradiente de presión:

Este tipo de transporte se debe a que ciertas presiones internas varían debido a que la humedad se evapora, cambia de lugar o ha sido transportada. La humedad debe de compensar el cambio de presión y se genera el transporte.

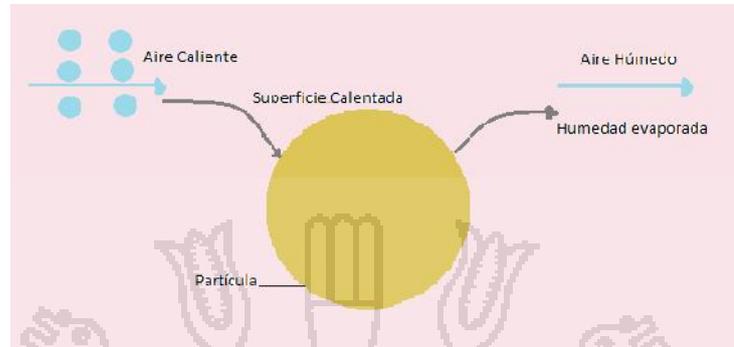


**Figura 2: Esquema del movimiento de la humedad durante el secado (Foust, 1998).**

#### 2.2.4. Factores que intervienen en el proceso de secado.

La transferencia de masa en el secado de un sólido mojado dependerá de dos mecanismos: el movimiento interno de la humedad en el sólido que es una función de la naturaleza física interna del sólido y de su contenido de humedad, y del movimiento de vapor de agua de la superficie del material como resultado de condiciones externas de temperatura, humedad de aire y fluido, área de exposición y presión flotante como

se observa en la Figura 3. En una operación de secado, algunos de estos mecanismos pueden ser un factor limitante en la velocidad de secado.



**Figura 3: Proceso de secado**

a) Temperatura del aire.

La temperatura desempeña un papel importante en el proceso de secado, conforme incrementa su valor se acelera la eliminación de humedad dentro de los límites posible. Este factor se considera según el tipo de alimento a secar. (Mujumdar, 2000).

b) Humedad relativa del aire.

Se define como la razón de la presión de vapor de agua presente en ese momento, con respecto a la presión de saturación de vapor de agua a la misma temperatura. Generalmente, se expresa en porcentaje (%), a medida que se incrementa la temperatura del aire aumenta su capacidad de absorción de humedad y viceversa. (Perry, 1984).

c) Velocidad de flujo de aire.

Este factor en un secador tiene como funciones principales, transmitir la energía requerida para calentar el agua contenida en el material facilitando su evaporación, y transportar la humedad saliente del material. (Mujumdar, 2000).

### 2.2.5. Velocidad de secado.

Para reducir el contenido de humedad en los materiales durante el proceso de secado se realizan una serie de cálculos y consideraciones que generalmente involucran

el tamaño del secador, las condiciones de humedad, la temperatura del aire empleado y el tiempo necesario para lograr el contenido de humedad deseado (Treybal, 1988). A intervalos regulares se determina por pesada la humedad del sólido. De estos datos de humedad con respecto al tiempo se obtiene la curva de secado. En la Figura 3, se representa la variación de la humedad frente al tiempo de una muestra sometida a ensayo de secado: la humedad disminuye continuamente desde su valor inicial. Finalmente se aproxima como límite a la humedad de equilibrio ( $X_e$ ) que corresponde a la humedad relativa constante del aire.

Para que los datos obtenidos tengan la máxima validez es necesario observar una serie de precauciones encaminadas a lograr la mayor semejanza con las condiciones que han de prevalecer en la operación a gran escala (Nonhebel *et al*, 1979).

La velocidad de secado se define como la pérdida de humedad por unidad de tiempo, más exactamente por la derivada de la humedad respecto al tiempo (cambia de signo). Para definir cuantitativamente la velocidad, es conveniente referir ésta a la unidad de superficie de secado (Bueno e Iglesias, 1996).

$$R = - \frac{W_s}{A} \frac{dx}{dt} \quad (\text{ec.3})$$

Donde:

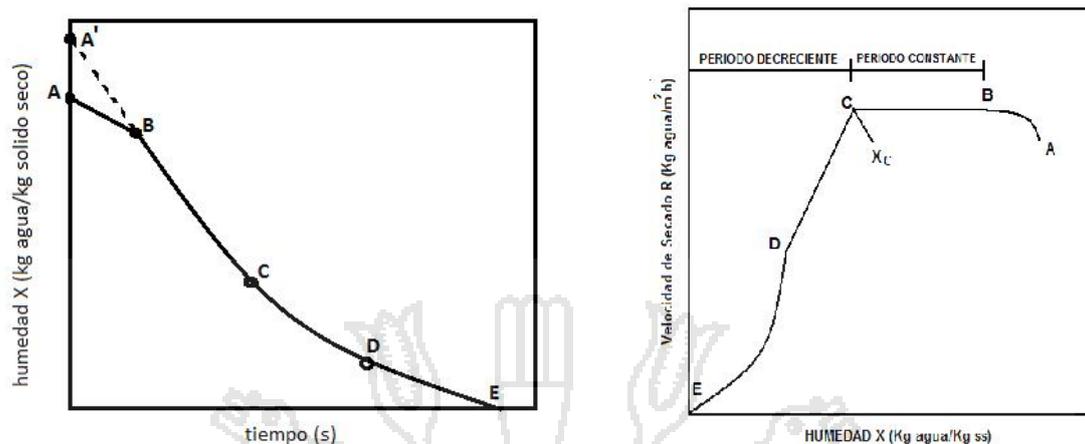
$R$  : Velocidad de secado. ( $\text{kg H}_2\text{O}/\text{m}^2\text{s}$ ).

$W_s$  : Cantidad de sólido seco. (Kg).

$A$  : Área superficial del sólido a secar. (m).

$\frac{dx}{dt}$  : Diferencial de humedad por diferencial de tiempo.

La Figura 3 muestra cómo se comporta la humedad con respecto al tiempo, generando una curva típica con cuatro periodos durante el proceso de secado.



a) Curva de Secado,

b) Curva de Velocidad de Secado.

**Figura 4: Curvas típicas de Cinética de Secado. (Geankoplis, 1998).**

a) Periodo inicial (zona A - B).

El sólido comienza a calentarse y con ello crece la velocidad de evaporación. Esto se aprecia porque la masa del sólido (directamente relacionada con  $X$ ) decrece con el tiempo cada vez más rápidamente. La evaporación ocurre desde una superficie libre y, Usualmente, la temperatura incrementa desde un valor inicial ( $T^{\circ}$ ) hasta la temperatura de bulbo húmedo del aire ( $T_{bh}$ ). (Van Arsdel *et al.*, 1973).

b) Periodo de velocidad constante (zona B - C).

Durante este periodo la superficie de la partícula se mantiene saturada de agua líquida debido a que el movimiento del agua desde el interior del sólido a la superficie ocurre a la misma velocidad que la evaporación en la superficie, y la velocidad de secado es constante en la eliminación de humedad ligada. Cuando el sólido se seca bajo estas condiciones, el balance de materia y energía se establecen entre la película de aire saturado que rodea a la partícula húmeda y el medio. De esta manera se puede considerar, para efectos prácticos, que la temperatura y la humedad del gas correspondientes a la interfase, son: respectivamente, a la temperatura de bulbo húmedo y la humedad de saturación. Como la temperatura de la partícula no sufre cambios durante este periodo, el calor transferido por convección, desde el gas hasta el sólido, es

usado para la evaporación y corresponde al calor latente de vaporización del agua que satura la interfase (Geankoplis, 1995; Brennan *et al.*, 1980).

c) Primer periodo de velocidad decreciente (Zona C-D).

La humedad desciende por debajo de la "humedad crítica" ( $X_c$ ), no llega suficiente agua a la superficie para mantener la máxima evaporación. La temperatura incrementa en la superficie e interior del sólido y la velocidad de secado desciende tendiendo a ser cero conforme llegue a la humedad de equilibrio ( $X_e$ ) (Heldman *et al.*, 1981).

Humedad en el equilibrio: Es el contenido de humedad de una sustancia que está en el equilibrio con una presión parcial dada del vapor.

d) Segundo Periodo de velocidad decreciente (Zona D-E).

Representa el fenómeno de secado en la superficie provocando una detención de la pérdida de agua hasta elevar la temperatura lo suficiente para compensar esta nueva resistencia a la transferencia de materia. (Heldman *et al.*, 1981).

e) Movimiento de humedad en los sólidos en el periodo de velocidad Decreciente.

Los mecanismos para evaporar la humedad desde el interior hasta superficie del área expuesta del sólido, afectan al secado durante los periodos de velocidad de secado constante y decreciente. A continuación se analizan algunas teorías.

- Teoría de la difusión del líquido.

La difusión de la humedad líquida se presenta en sólidos porosos, se verifica cuando existe una diferencia de concentraciones entre el interior del sólido y la superficie. En el secado de muchos materiales alimenticios, el movimiento del agua durante el periodo de velocidad decreciente se verifica por difusión (Geankoplis, 1993).

$$\frac{X - X^*}{X_0 - X^*} = \frac{6}{f^2} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n^2} \text{EXP} - (nf)^2 \frac{D_e t}{r^2} \quad (4)$$

Donde:

- $X$  : Humedad del grano para el tiempo  $t$ . (Kg H<sub>2</sub>O/kg s.s.).  
 $X_0$  : Humedad inicial del grano. (Kg H<sub>2</sub>O/kg s.s.).  
 $X^*$  : Humedad de equilibrio. (Kg H<sub>2</sub>O/kg s.s.).  
 $D_e$  : Difusividad efectiva. (m<sup>2</sup>/s).  
 $r^2$  : Radio de la partícula. (m)  
 $t$  : Tiempo. (s).

- Teoría del flujo capilar.

Esta teoría considera la estructura porosa del sólido como un conjunto de tubos capilares de diferentes radios orientados al azar. Durante el periodo de velocidad constante de secado estos capilares están llenos de líquidos y toda el área superficial está cubierta por una película del líquido. A medida que el secado avanza, esta película se evapora y empieza a aparecer superficies secas en el sólido. Al parecer la primera superficie seca (periodo de velocidad decreciente), el líquido será succionado del interior de la partícula, sacando primero de las capilaridades más grandes a través de los pequeños. A medida que estos capilares se vacían, aumentará la superficie seca del sólido. Si los capilares son largos, habrá una resistencia de friccional al flujo del líquido y si son cortos, tal resistencia se puede despreciar. En resumen esta teoría supone que el movimiento del líquido es por capilaridad y la evaporación tiene lugar sólo en la superficie externa del sólido (Geankoplis, 1998).

#### **2.2.6. Tiempos de secado.**

El tiempo de secado depende del material, esto define las características que tendrá la curva de secado. El tiempo de secado debe ser determinado separadamente para el primer y segundo periodo de secado (Geankoplis, 1995).

Despejando  $dt$  de la ecuación 3 se obtiene el tiempo de secado (ec 5):

$$dt = -\frac{W_s}{A} \frac{dx}{R_{DI}} \quad (\text{ec. 5})$$

$$\int_0^t dt = -\frac{W_s}{A} \int_{X_1}^{X_2} \frac{dx}{R_{DI}} \quad (\text{ec. 6})$$

Donde:

$R_{DI}$  : Velocidad de secado en el periodo constante. ( $\text{KgH}_2\text{O}/\text{m}^2\text{s}$ )

Donde  $X_1$  y  $X_2$  son el contenido de humedad desde el tiempo cero al tiempo  $t$ , respectivamente.

a) Periodo de velocidad de secado constante.

El tiempo en el periodo de velocidad de secado constante (B -C) de la Figura 3 se obtiene integrando la ec 6.

$$t_I = \frac{W_s}{AR_{DI}} (X_0 - X_{cr}) \quad (\text{ec. 7})$$

Donde:

$t_I$  : Tiempo en el periodo de velocidad constante. (s)

$X_{cr}$  : Humedad crítica. ( $\text{KgH}_2\text{O}/\text{Kg s.s.}$ ).

Obsérvese que  $X_2 = X_{cr}$  en la ecuación (7) esto es porque es el contenido de humedad al final del primer periodo. En este periodo de secado influye la velocidad de secado ( $R_{DI}$ ) depende de los coeficiente de transferencia de calor y masa ( $h$  y  $K_g$ ) entre el agente de secado y la superficie a secar (Geankoplis, 1995).

Sin embargo los materiales porosos representan un reto debido a su estructura no uniforme que crea dificultades en la estimación del contenido crítico de humedad. Es por eso que a veces es mejor hacer experimentos bajo condiciones similares a las que se usan en la práctica.

b) Periodo de velocidad decreciente.

Este periodo de caída de secado puede comportarse de manera lineal como lo muestra la curva de velocidad de secado (Figura 3b) pero también puede comportarse

de manera no lineal por lo cual requiere un estudio más minucioso del comportamiento de la curva de secado. En este estudio consideraremos el caso lineal de la curva de caída secado (Geankoplis, 1993).

La forma de la velocidad de la curva de secado depende del tipo de cuerpo, la velocidad de secado en el primer periodo de secado y el contenido crítico de humedad.

Ahora tomando la ecuación (6) podemos construir una ecuación similar en la cual la velocidad de secado depende del contenido de humedad.

$$t_{II} = \frac{W_s}{A} \int_{X_2}^{X_{cr}} \frac{dx}{R_{DII}} \quad (\text{ec. 8})$$

Donde:

$R_{DII}$  : Velocidad de secado decreciente. (KgH<sub>2</sub>O/m<sup>2</sup>s).

$t_{II}$  : Tiempo en el periodo de velocidad decreciente. (s)

Donde  $X_2$  es el contenido final de humedad en el material.

En la Figura 3 de la velocidad de secado. Podemos decir que existe una dependencia de  $R_{DII} = f(x)$  que es lineal y puede ser escrita de la siguiente manera.

$$R_{DII} = aX + b \quad (\text{ec. 9})$$

Sustituyendo la ecuación 9 en la ecuación 8 obtenemos:

$$t_{II} = \frac{W_s}{A} \int_{X_2}^{X_{cr}} \frac{dX}{aX + b} \quad (\text{ec. 10})$$

Realizando la integración obtenemos:

$$t_{II} = \frac{W_s}{aA} \ln \frac{aX_{cr} + b}{aX_2 + b} \quad (\text{ec. 11})$$

Los coeficientes pueden ser obtenidos de la siguiente manera.

$$a = \frac{R_{DI} - R_{DII}}{X_{cr} - X_2} \quad (\text{ec. 12})$$

$$R_{DII} = aX_2 + b \quad (\text{ec. 13})$$

Sustituyendo estos coeficientes (a y b) en la ecuación (12) obtenemos.

$$t_{II} = \frac{W_s}{A} \frac{X_{cr} - X_2}{R_{DI} - R_{DII}} \ln \frac{R_{DI}}{R_{DII}} \quad (\text{ec. 14})$$

Finalmente el tiempo total del proceso es la suma de los tiempos tomados en los dos periodos.

$$t = t_I + t_{II} \quad (\text{ec. 15})$$

Donde:

t : Tiempo total. (s)

### 2.3. FLUIDIZACIÓN.

La fluidización consiste en suspender una masa de sólidos finamente divididos en una corriente gaseosa sin que sea arrastrado por la misma. Los sólidos se comportan en su conjunto como un fluido y se hallan en movimiento turbulento (Kunii y Levenspiel, 1991).

Las características principales de estos lechos son su temperatura uniforme y una alta eficiencia de contacto entre el sólido y el gas, lo cual conduce a un secado homogéneo (Mujumdar, 1987).

La fluidización de sólidos se produce cuando una corriente de fluido atraviesa en forma ascendente un lecho de partículas en reposo, el que tiene una cierta altura  $L$  y porosidad o fracción ocupada por los huecos,  $\epsilon$ , haciéndole perder su forma compacta y suspendiéndolas en él, (Mc Cabe, 1991):

#### 2.3.1. Comportamiento del lecho en la fluidización gaseosa.

Muchos de los reactores actualmente que ocupan a la fluidización, realizan sus operaciones a grandes velocidades mayores a la velocidad mínima de fluidización, ( $>5$  m/s) donde existen condiciones de gran agitación. A su vez en laboratorios a baja escala desarrollan experimentos justos arriba de donde la fluidización es mínima. Esto nos indica que la fluidización se extiende en un rango muy amplio y que no hay nada ideal, por lo que hay que conocer y aprender tanto de las investigaciones como de la experiencia. Encontrar un flujo de aire el cual sea lo suficientemente fuerte para ejercer una fluidización efectiva y que a su vez no sea lo suficientemente fuerte como para provocar desgaste de las partículas. (Dávila, 2004).

### 2.3.2. Propiedades físicas de la partícula.

#### a) Diámetro de la partícula.

El tamaño de la partícula es usualmente determinado por experimentación para obtener el peso fracción en cada rango de tamaño (Pell, 1990). Si la partícula es esférica se emplea su diámetro. Para partículas no esféricas, el tamaño viene expresado por:

$$d_e = W_S d_{esf} \quad (\text{ec. 16})$$

Donde:

$d_e$  : Diámetro efectivo. (mm).

$d_{esf}$  : Diámetro de la esfera. (mm).

$W_S$  : Esfericidad.

Donde para partículas isotrópicas de forma como el grano de quinua, la ecuación 16 se transforma en (Kunii y Levenspiel, 1991):

$$d_e = W_S d_p \quad (\text{ec. 17})$$

Donde:

$d_p$  : Diámetro promedio de partícula.(m).

Siendo  $d_p$  el diámetro promedio de partícula (Kunii y Levenspiel, 1991):

$$d_p = \left[ \frac{6m}{nf \dots_p} \right]^{1/3} \quad (\text{ec. 18})$$

Donde:

$m$  : Masa. (g).

$n$  : Número de partículas.

$\dots_p$  : Densidad de la partícula. ( $\text{Kg/m}^3$ ).

b) Esfericidad de la partícula.

La manera más apropiada de conocer el grado de redondez de una partícula es la esfericidad, este concepto comprende la relación del área de una esfera con el área de la partícula, ambas partículas con el mismo volumen (Aguilera, 2001).

$$w_s = \left( \frac{\text{SuperficieEsfera}}{\text{SuperficieParticulada}} \right) \quad (\text{ec. 19})$$

$\phi_P = 1$  para partículas esféricas y,  $0 < \phi_P < 1$  para las demás geometrías.

Como también se puede calcular esta propiedad con la siguiente relación según (Kunii y Levenspiel, 1991):

$$\text{esfericidad} = w = \frac{d_e}{d_p} \quad (\text{ec. 20})$$

c) Área superficial

Es importante tener conocimiento del área superficial ( $a_p$ ) ya que es el el área de contacto donde se lleva a cabo la transferencia de calor de gas-sólido. La siguiente ecuación muestra la obtención del área superficial, cuando la superficie de una partícula no es esférica:

$$a_p = 2fr^2 + 2frl \quad (\text{ec. 21})$$

Donde:

$a_p$  : Área de la partícula. ( $m^2$ ).

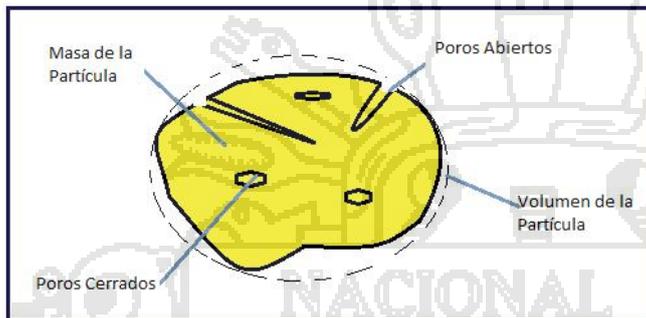
$r$  : Radio. (m).

$l$  : Altura de la partícula. (m).

d) Porosidad.

## d) Porosidad.

Capacidad que tienen algunos sólidos de ser atravesados por líquidos o gases. Existen diferentes tipos de partícula y por lo tanto distintas porosidades hasta en el mismo tipo de partícula y algunas de estas partículas cuentan con porosidades abiertas. Esto es hacia el ambiente afectando las propiedades de la partícula. Y existe las porosidades cerradas las cuales son huecos en la partícula que no tienen contacto con el ambiente ver figura (Dávila, 2004).



**Figura 5: Porosidad de la partícula.**

La porosidad de la partícula según Dávila, 2004 es determinada por la ecuación 22:

$$v = 1 - \frac{V_{H_2O}}{V_T} \quad (\text{ec. 22})$$

Donde:

$v$  : Porosidad.

$V_{H_2O}$  : Volumen de agua. ( $m^3$ ).

$V_T$  : Volumen total. ( $m^3$ ).

## e) Densidad de la partícula.

La densidad real, que es la densidad formada únicamente por los sólidos, referidos al volumen que los contiene, corregido por el volumen correspondiente a los espacios inter e intrapartícula (Alvarado, 2001).

$$\rho_p = (m / n^\circ \text{ granos}) / v_{particula} \quad (\text{ec. 23})$$

Donde:

$v$  : Volumen de la partícula.

### 2.3.3. Clasificación de la partícula.

El comportamiento de la fluidización depende del tipo de partículas que se van a estudiar.

Geldart (1990) las clasificó en términos de la diferencia de densidades (gas-partícula) y el diámetro promedio de las partículas. Existen cuatro grupos, que son:

- Grupo A. Son materiales que tienen un diámetro promedio de partícula pequeño ( $30 < d_p < 100 \mu\text{m}$ ), o bien, una densidad aparente baja ( $< \sim 1400 \text{ kg/m}^3$ ).
- Grupo B. Son partículas que tienen un diámetro de ( $4 < d_p < 500 \mu\text{m}$ ), y una densidad de ( $1400 < \rho_p < 4000 \text{ kg/m}^3$ ). Estos sólidos son de fácil fluidización.
- Grupo C. Son partículas muy finas y extremadamente difíciles de fluidizar por la presencia de fuerzas interpartículas muy grandes en el lecho.
- Grupo D. Son partículas grandes y densa ( $d_p > 1 \text{ mm}$ ) que no permiten la expansión del lecho; muchos cereales se clasifican en este grupo.

### 2.3.4. Propiedades hidrodinámicas de la fluidización.

a) Velocidad mínima de fluidización.

La velocidad mínima de fluidización es una propiedad de la partícula. Esta propiedad es sensible a su forma, densidad y tamaño.

Para lograr la fluidización, se comienza con el ascenso del fluido a una velocidad tan baja que el lecho de partículas permanece inmóvil. El estado de lecho fijo se representa en la Figura 4. En este estado se puede determinar la caída de presión a través del lecho por medio de la ecuación de Ergun, (Mc Cabe, 1991):

$$\frac{\Delta P g_c}{L} \frac{w_p d_p}{\dots \bar{V}_0^2} \frac{v^3}{(1-v)} = 150 \frac{(1-v) \sim}{w_p d_p \bar{V}_0 \dots} + 1.75 \quad (\text{ec. 24})$$

Donde:

$\Delta P$  : Caída de presión. (mmHg).

$g_c$  : Factor de proporcionalidad a la Ley de Newton. (9.81 m·kg/kg·s<sup>2</sup>).

$L$  : Altura del lecho fluidizado. (m).

$W$  : Esfericidad.

$d_p$  : Diámetro de la partícula. (m).

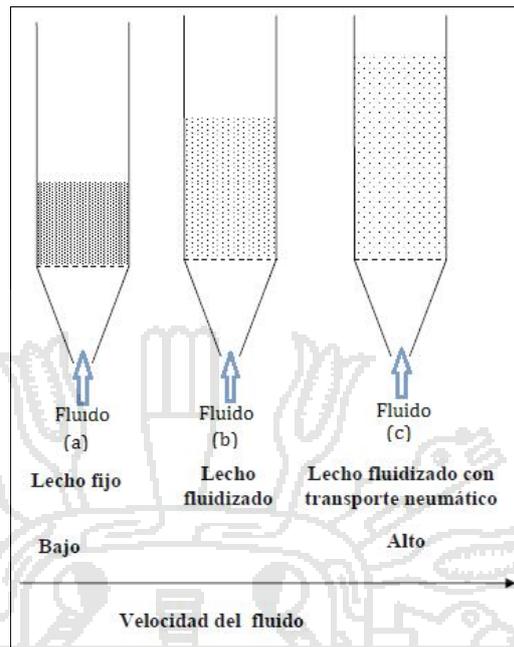
$\rho_a$  : Densidad del aire. (Kg/m<sup>3</sup>).

$\mu_a$  : Viscosidad del aire. (Kg/m s).

$\bar{V}_0$  : Velocidad superficial del fluido. (m/s).

Al aumentar la velocidad del fluido, aumenta la caída de presión, aun cuando las partículas permanecen sin alterar su condición de lecho fijo, su altura ni su porosidad.

Con el aumento constante de la velocidad superficial del fluido,  $\bar{V}_0$ , aumenta la altura del lecho,  $L$ , y su porosidad,  $\epsilon$ . Este movimiento se produce cuando la caída de presión a través del lecho se iguala al peso de este, a una cierta velocidad llamada velocidad mínima de fluidización,  $\bar{V}_{m0}$ . Este punto se conoce como punto de fluidización incipiente.



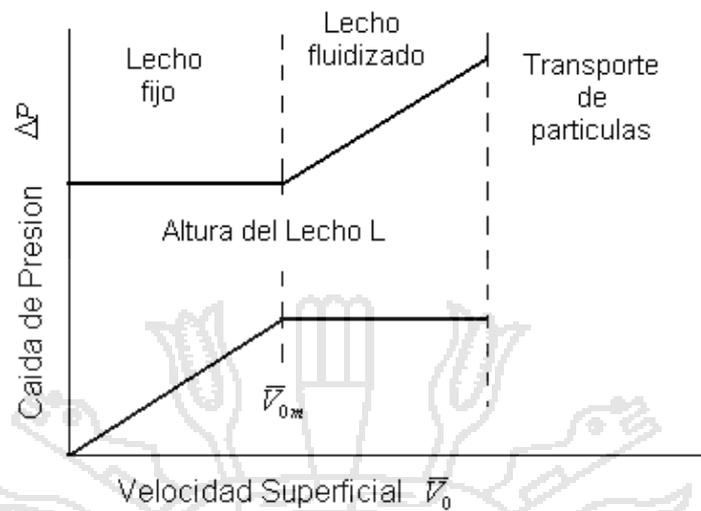
**Figura 6: Efecto de la velocidad superficial del fluido sobre el sólido, (Correa, 1982).**

Al aumentar la velocidad superficial más allá de la velocidad mínima de fluidización las partículas se separan entre ellas, moviéndose en el lecho, representado en la Figura 6 b).

Ahora la caída de presión permanece constante, pero la altura del lecho aumenta al aumentar el flujo de fluido, tal como lo indica la Figura 7.

Al disminuir la velocidad del fluido, la caída de presión permanece constante, disminuyendo la altura, hasta la velocidad de fluido igual a  $\bar{V}_{m0}$ , la caída de presión disminuye y la altura permanece constante.

La fluidización de sólidos termina cuando la velocidad del fluido sobrepasa la velocidad límite,  $V_T$ , provocando el arrastre de las partículas, observado en (c) (Figura 6).



**Figura 7: Caída de presión y altura del lecho frente a velocidad superficial para un lecho de sólidos, (Mc Cabe, 1991)**

Como se dijo, la fluidización se alcanza cuando la caída de presión a través del lecho se iguala al peso de este, esto es:

(Caída de presión a través del lecho) = (Peso lecho / unidad área sección transversal)

$$\Delta P = (1 - v)(\dots_p - \dots)g \frac{L}{g_c} \tag{ec. 25-a}$$

$$\frac{\Delta P g_c}{L} = (1 - v)(\dots_p - \dots)g \tag{ec. 25-b}$$

Considerando en este punto la porosidad como la porosidad mínima  $v_m$ , la ecuación (25) se modifica a:

$$\frac{\Delta P g_c}{L_m} = (1 - v_m)(\dots_p - \dots)g \tag{ec. 26}$$

Donde:

$L_m$  : Altura del lecho en mínima fluidización. (m).

$v_m$  : Porosidad en mínima fluidización.

$g$  : Aceleración de gravedad. (9.8 m/s<sup>2</sup>).

Reemplazando  $\frac{\Delta P g_c}{L_m}$  de la ecuación (26) en la ecuación (24) se obtiene:

$$150 \frac{\bar{V}_{0m}}{W_p d_p^2} \frac{(1-v_m)}{v_m^3} + 1.75 \frac{\bar{V}_{0m}^2}{W_p d_p v_m^3} = g(\dots_p - \dots) \quad (\text{ec. 27})$$

Donde:

$\bar{V}_{0m}$  : Velocidad en mínima fluidización. (m/s).

Esta ecuación se aplica al punto de fluidización incipiente, con el fin de conocer el valor de la velocidad mínima de fluidización.

Ocasionalmente, existen inconvenientes para evaluar los parámetros de esfericidad y porosidad en el punto de fluidización incipiente, imposibilitando la aplicación de esta ecuación. Por esto Wen y Yu Peña (1993) desarrollaron empíricamente una correlación aplicable a un amplio espectro de datos experimentales, la que al compararla con las propuestas por otros investigadores demuestran sus ventajas, tales como su simplicidad, exactitud y facilidad para obtener una estimación rápida de la velocidad mínima de fluidización.

Si  $v_m$  y/o  $\rho_p$  son desconocidos, Wen y Yu, sugieren lo siguiente:

$$W_p v_m = \frac{1}{4} \quad \text{y} \quad \frac{(1-v)}{(W_p^2 v_m^3)} = 11 \quad (\text{ec. 28})$$

$$Re = ((33.7)^2 + 0.0408Ga)^{1/2} - 33.7 \quad (\text{ec. 29})$$

Para todos los rangos de número de Reynolds.

Donde Ga es el número de Galileo, que está dado por:

$$Ga = \frac{\dots(\dots_p - \dots)gd_p^3}{\dots} \quad (\text{ec. 30})$$

Luego, para conocer el valor de la velocidad mínima de fluidización se reemplazan las ecuaciones (28) en la ecuación (27), obteniendo:

$$24.5 \frac{\bar{V}_{0m}^2}{d_p} + 1650 \frac{\bar{V}_{0m}}{d_p^2} = g(\dots_p - \dots) \quad (\text{ec. 31})$$

b) Velocidad límite. ( $V_T$ ).

Cuando la velocidad del fluido a través del lecho es muy grande se produce el arrastre de las partículas, pudiendo ser transportadas de un lugar a otro. Esta velocidad se conoce como velocidad límite o velocidad de arrastre,  $V_T$ , la que puede estimarse para los diferentes regímenes de flujo, de acuerdo a las siguientes ecuaciones (Mendez, 1998):

$$\text{Flujo Laminar: } V_T = \frac{g(\dots_p - \dots)d_p^2}{18\mu} \quad \text{Re} < 0.4 \quad (\text{ec.32})$$

$$\text{Flujo Turbulento: } V_T = \left[ \frac{3.1g(\dots_p - \dots)d_p}{\dots} \right]^{1/2} \quad 500 < \text{Re} < 200000 \quad (\text{ec. 33})$$

$$\text{Flujo de Transición: } V_T = \left[ \frac{4(\dots_p - \dots)^2 g^2}{225\mu} \right]^{1/3} d_p \quad 0.4 < \text{Re} < 500 \quad (\text{ec. 34})$$

Donde:

$$\text{Re} = \frac{d_p \bar{V}_{0m}}{\mu} \quad (\text{ec. 35})$$

Donde:

$V_T$  : Velocidad Terminal. (m/s).

Re : Numero de Reynolds.

c) Tipos de fluidización.

Dependiendo del fluido usado y de la diferencia de densidades entre éste y el sólido, se distinguen dos tipos de fluidización, la particulada u homogénea y la de burbujeo o heterogénea, siendo el criterio adecuado para decidir entre una y otra, el producto de cuatro números adimensionales:

$$(Fr)_m (Re)_m \left( \frac{\dots P \dots}{\dots} \right) \left( \frac{L_m}{D} \right) < 100 \quad (\text{ec. 36})$$

Que corresponde a fluidización particulada y

$$(Fr)_m (Re)_m \left( \frac{\dots P \dots}{\dots} \right) \left( \frac{L_m}{D} \right) > 100 \quad (\text{ec. 37})$$

A fluidización de burbujeo, (Foust, 1998)

Donde:

$(Fr)_m$  : Número de Fraude.

$D$  : Diámetro del lecho de fluidización. (m).

$$(Fr)_m = \frac{\bar{V}_{0m}^2}{d_p g} \quad (\text{ec. 38})$$

y  $Re_m$  está definido por:

$$(Re)_m = \frac{d_p \dots \bar{V}_0}{\dots} \quad (\text{ec. 39})$$

- Fluidización particulada.

La fluidización particulada u homogénea, generalmente, se presenta cuando el fluido usado es un líquido, la diferencia de densidades entre éste y el sólido es mínima o las partículas son pequeñas, (Foust, 1998). Esto permite que las partículas se muevan individualmente y exista una fluidización uniforme del sólido.

La fluidización particulada proporciona un buen contacto entre el fluido y el sólido, formando pequeñas burbujas y manteniendo la caída de presión constante a través del lecho fluidizado.

La expansión del lecho se puede conocer al igualar las ecuaciones (25) y (26) y conociendo los valores de la porosidad y los de altura y porosidad para la fluidización incipiente:

$$L = L_m \frac{(1-v_m)}{(1-v)} \quad (\text{ec. 40})$$

Donde la ecuación que permite determinar el valor de la porosidad es:

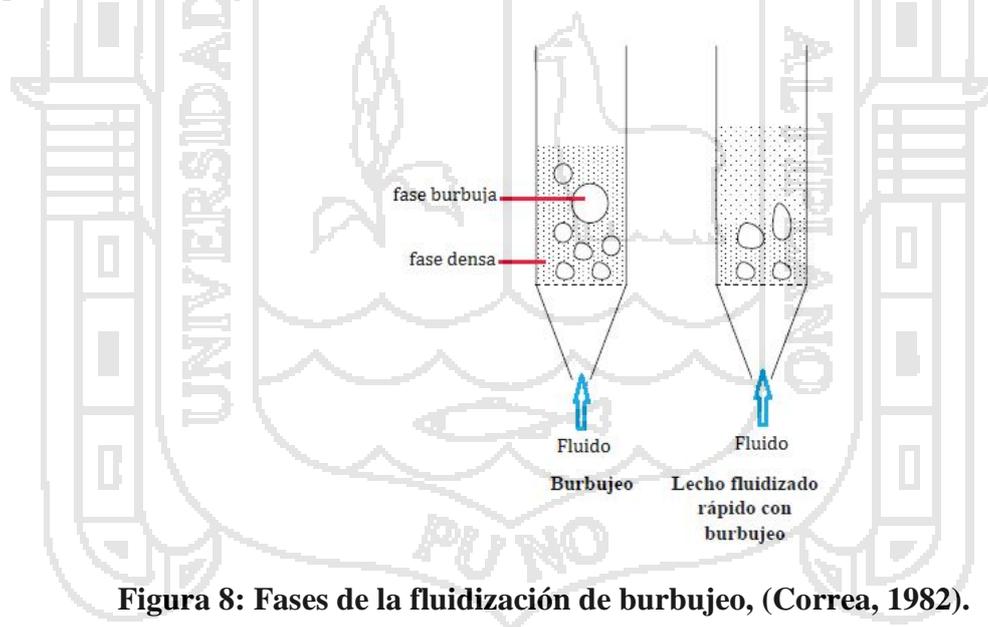
$$v = 1 - \frac{m_p}{fr^2 L_{m \dots p}} \quad (\text{ec. 41})$$

La que es válida para el punto de fluidización incipiente, al reemplazar por  $m$ .

- Fluidización de burbujeo.

La fluidización de burbujeo o heterogénea se presenta en lechos fluidizados con gases, la diferencia de densidades entre éste y el sólido es muy grande o las partículas son de gran tamaño, (Foust, 1998). Esto impide que la fluidización sea pareja, pasando la mayor parte del fluido a través del lecho en forma de grandes burbujas que desaparecen en la superficie.

En este tipo de fluidización se distinguen dos fases: una densa o emulsión, que presenta una porosidad constante e igual a la porosidad en el mínimo de fluidización y una fase de burbuja, que contiene una cantidad insignificante de sólidos, las que se representan en la Figura 6.

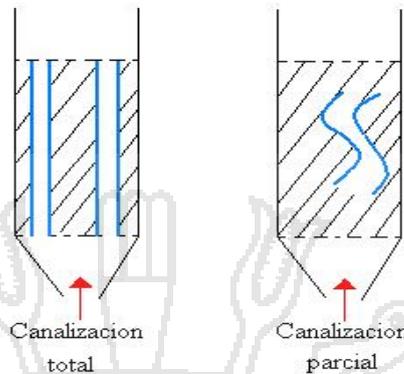


**Figura 8: Fases de la fluidización de burbujeo, (Correa, 1982).**

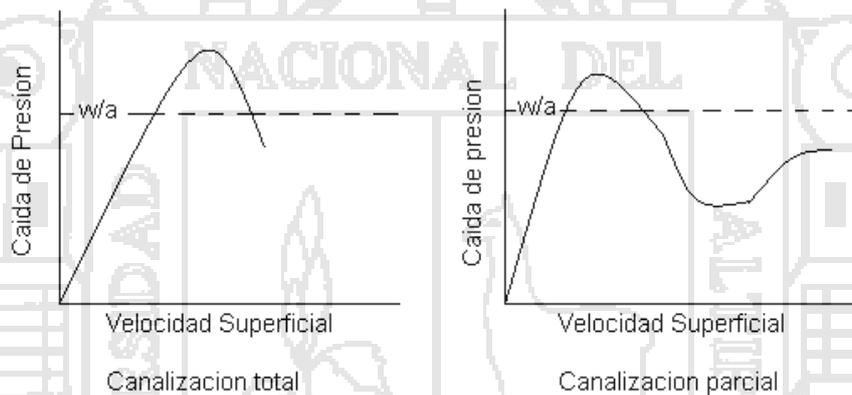
- d) Canalización de lecho.

El fluido pasa a través del sólido abriendo verdaderos canales, en lugar de formar burbujas. Las causas de la canalización son: el tipo de sólido, la distribución del gas y la baja velocidad del gas.

La canalización causada por el sólido puede ser total o parcial, representadas por la Figura 7.



a) Canalización causada por el sólido en el lecho fluidizado.



b) Caída de presión y velocidad superficial en lecho fluidizado presentando canalización causada por el sólido.

**Figura 9: Efectos de la canalización causada por el sólido en el lecho fluidizado y en la velocidad de fluidización, (Correa, 1982).**

La canalización causada por el distribuidor ocurre cuando éste proporciona una dirección preferencial al fluido en el lecho y la canalización causada por la baja velocidad puede volver a la normalidad con un aumento de la velocidad, sin embargo existen casos donde la fluidización empeora y la pérdida de carga disminuye rápidamente.

### III MATERIALES Y MÉTODOS

#### 3.1. ÁMBITO DE ESTUDIO.

El trabajo de investigación se realizó en el laboratorio de post-cosecha de la Escuela Profesional de Ingeniería Agroindustrial de la Facultad de Ciencias Agrarias de la Universidad Nacional del Altiplano en la provincia y departamento de Puno ubicado a 3850 m.s.n.m.

#### 3.2. MATERIALES Y EQUIPOS.

##### 3.2.1. Materia prima.

Se empleo quinua (*Chenopodium quinoa* Willd), variedad blanca de juli, adquirida del mercado de la Provincia Chucuito-Juli del Departamento de Puno.

##### 3.2.2. Materiales empleados en la construcción del secador de lecho fluidizado.

- Plancha de acero inoxidable de 1.4301 (conocido como 304) de 2 mm de espesor (cámara de secado, lecho de fluidización y tornillo sin fin).
- Plancha de aluminio de 1.5mm de espesor (computadora).
- Tubos de fierro de 2mm y 1.5mm de espesor (soporte de cámara de secado)
- Pernos pequeños, medianos y grandes.
- Pintura esmalte color aluminio (recubrimiento de superficie de la estructura del soporte del secador).
- Soldadura Tig (uniones de la cámara de secado, lecho de fluidización y alimentador).
- Soldadura cellocord (unión de las diferentes partes de la estructura de soporte del secador).

##### 3.2.3. Materiales empleados en la instrumentación y control del secador de lecho fluidizado.

- Hardware de adquisición de datos NI – USB6008 (tarjeta de adquisición de datos).
- Sensor de temperatura tipo J (Termocupla).

- Sensor de humedad.
- Tablero de control digital (Resistencias eléctricas de 129 K y 132 K y con tensión de ½ W)
- Software NI LabVIEW (versión 8.2)
- Computador marca Intel (R) Pentium IV.
- Adaptador de energía.
- Cables.

#### **3.2.4. Instrumento para la determinación del diámetro de grano de quinua.**

- Vernier.

#### **3.2.5. Materiales y equipos para la determinación de la densidad del grano de quinua.**

##### **a) Materiales.**

- Probeta.
- Vaso precipitado.
- Varilla de vidrio.
- Espátula.
- Pizeta.
- Agua destilada.

##### **b) Equipos.**

- Balanza digital METTLER Modelo JB 3002-G. 200g de capacidad.

#### **3.2.6. Materiales y equipos para el pre-tratamiento del proceso de secado del grano de quinua.**

##### **a) Materiales.**

- Vaso precipitado de 500 ml
- Espátula
- Agua

##### **b) Equipos.**

- Balanza digital METTLER Modelo JB 3002-G. 200g de capacidad.
- Centrifugador.
- Cronómetro.

### **3.2.7. Materiales y equipos para la determinación de la humedad del grano de quinua.**

- a) Materiales.
  - Probeta.
  - Vaso precipitado.
  - Varilla de vidrio.
  - Espátula.
  - Pizeta.
  - Agua destilada.
- b) Equipos.
  - Balanza digital METTLER Modelo JB 3002-G. 200g de capacidad.
  - Estufa.

### **3.2.8. Instrumento para la determinación de las propiedades hidrodinámicas de lecho fluidizado.**

- Manómetro (presión del flujo de aire).
- Anemómetro (velocidad de flujo de aire).

### **3.3. DESCRIPCION DEL MODULO “SECADOR DE LECHO FLUIDIZADO”.**

- Cámara de secado.
- Tubo de lecho fluidizado.
- Alimentador de sólidos o control de flujo.
- Sistema de abastecimiento de gas
- Sistema de calefacción
- Descarga de sólidos
- Sistema de control.

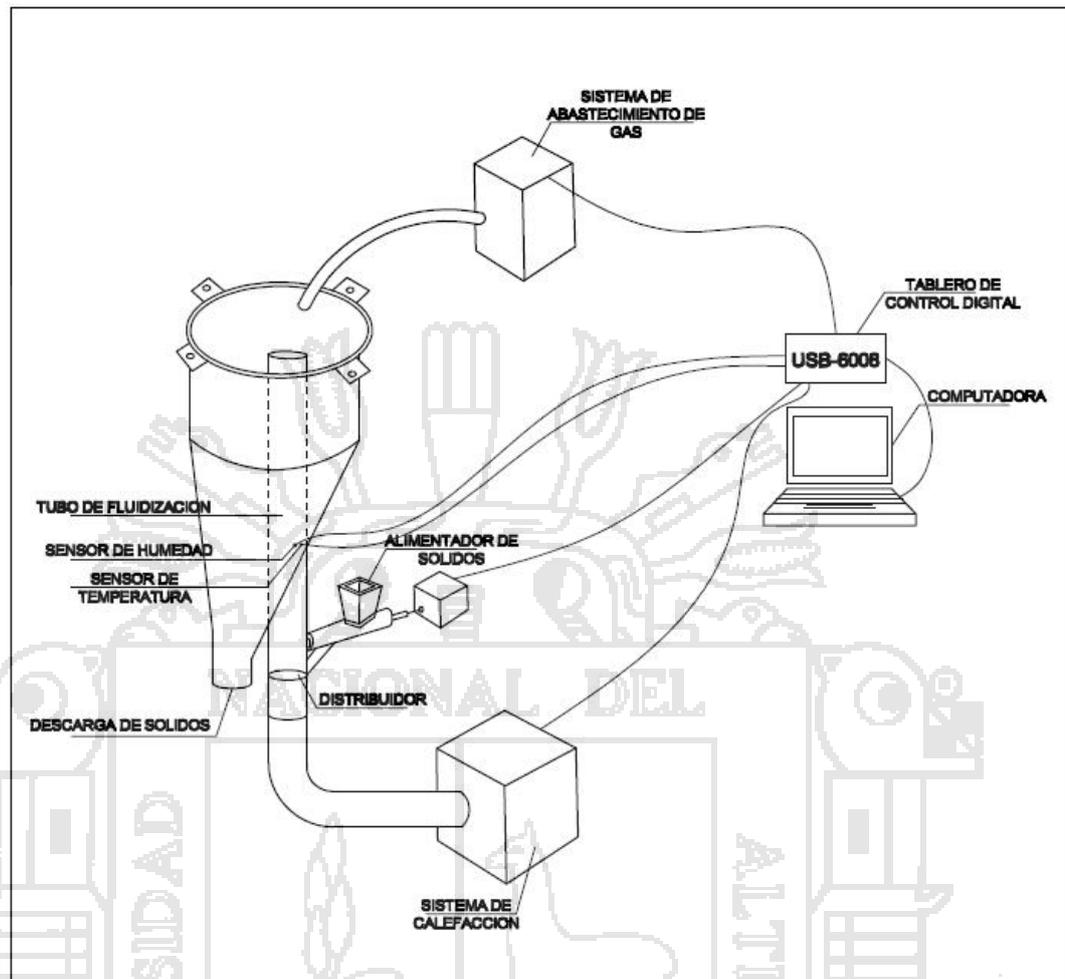


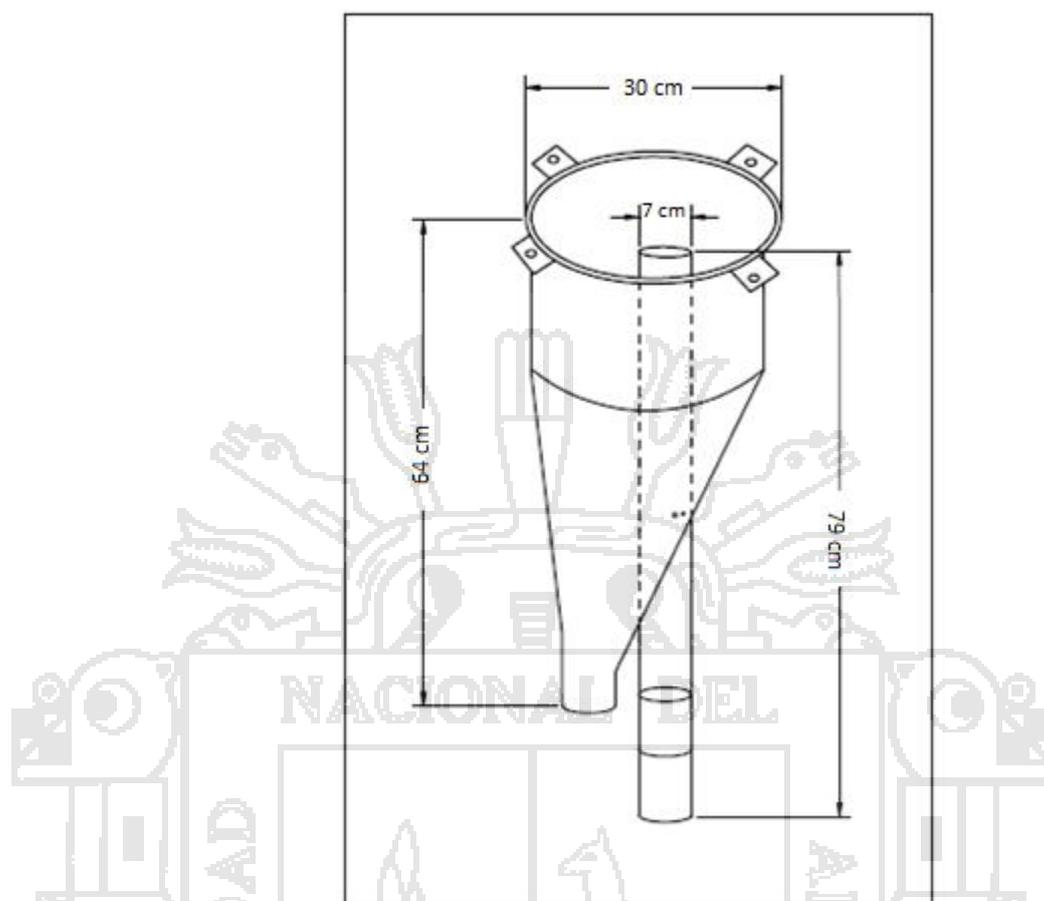
Figura 10: Partes del módulo "Secador de lecho fluidizado".

### 3.3.1. Cámara de secado.

Es de tipo cónico de 30cm de diámetro, 64cm de altura y 2 mm de espesor, construido de material acero inoxidable.

#### a) Lecho de fluidización.

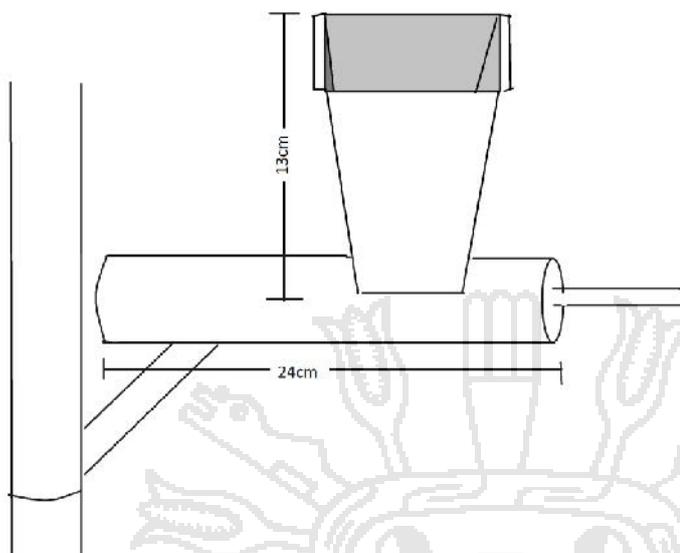
Columna de geometría cilíndrica de 7cm de diámetro, altura 79 cm y espesor de 2mm de material acero inoxidable 304.



**Figura 11: Cámara de secado**

### **3.3.2. Alimentador de sólidos o control de flujo de sólidos.**

El alimentador de tornillo sinfín hecha de acero inoxidable de 2mm de espesor, conectada a la columna de lecho fluidizado, accionado mediante un motor de 0.25HP y 120 voltios.



**Figura 12: Alimentador de sólidos.**

### 3.3.3. Sistema de abastecimiento de gas.

El sistema de circulación de gases está constituido por un aspirador de aire, de 12 voltios y 50Hz con velocidades de flujo de aire de 12,15 y 17m/s. conectada a la cámara de secado.

### 3.3.4. Sistema de calefacción.

Consta de 2 resistencias: 129 K con tensión de 0.5 W y 132 K y una tensión de 0.5 W. Conectada al lecho de fluidización.

### 3.3.5. Instrumentación y control del secador de lecho fluidizado.

#### a) Sensor de temperatura.

Dentro del secador, dependiendo de la necesidad de obtener datos de temperatura está ubicada dentro de la porción de lecho fluidizado. Por lo anteriormente señalado el sensor de temperatura es del tipo "J" calibrado directamente en grados centígrados. El voltaje de salida analógico es linealmente proporcional a los grados centígrados de temperatura que operan en un rango de 0 a 600°C.

b) Sensor de humedad.

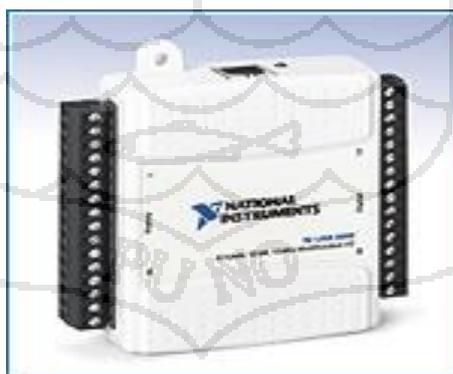
El sensor de humedad relativa tiene rango de operación de 0 a 100% HR la cual está colocado en la parte media en el lecho fluidizado para monitorear la humedad del flujo de aire.



**Figura 13: Sensor de humedad.**

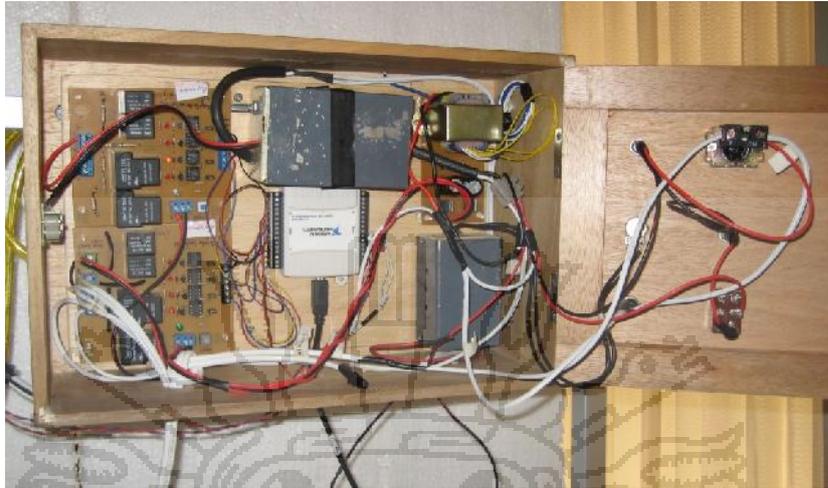
c) Sistema de adquisición de datos.

La instrumentación de la tarjeta de adquisición de datos utilizada es NI – USB6008, de National Instruments, tiene como objetivo la entrada y salida de datos de información generada por los sensores.



**Figura 14: Tarjeta de adquisición de datos.**

Las conexiones de cada uno de los sensores en la tarjeta se muestran en la Figura 13.



**Figura 15: Caja de control**

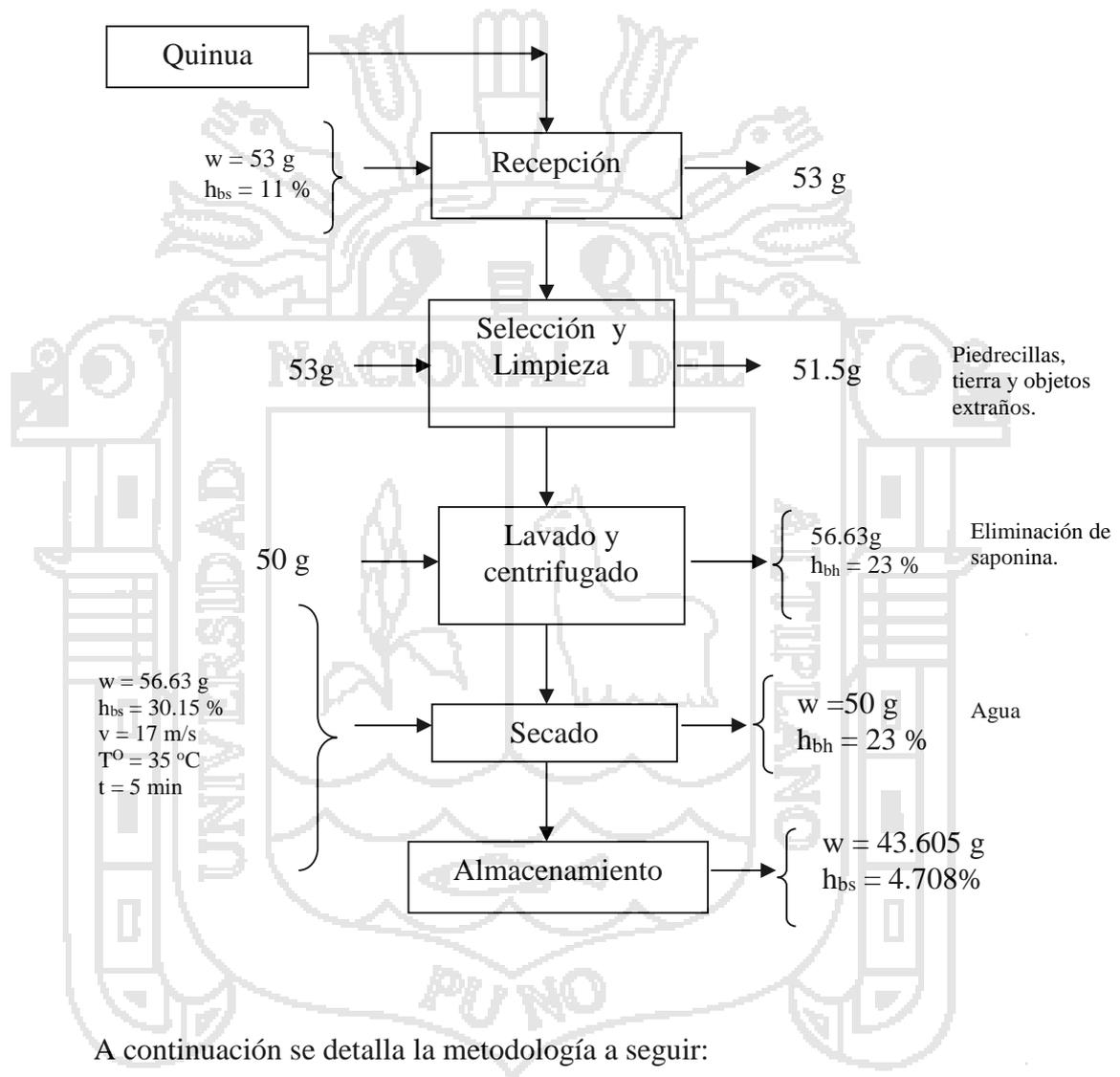
d) Software.

Se requiere de un programa que realice la adquisición de las señales generadas por los sensores, así como la ejecución de las acciones de control necesarias sobre el proceso de secado, además de permitir una análisis y presentación en forma grafica del monitoreo. El programa utilizado es Software NI LabVIEW (versión 8.2).

### 3.4. METODOLOGÍA EXPERIMENTAL.

La metodología del trabajo de investigación se desarrolló de acuerdo a la Figura 14 que se presenta a continuación.

**Figura 16: Diagrama de flujo del secado de quinua**



a) Recepción:

Los granos de quinua empleadas en el trabajo de investigación es la variedad Blanca de Juli.

b) Selección:

Los granos de quinua se seleccionaron mediante un tamiz para eliminar contaminantes físicos e impurezas como residuos de quinua y espinas, para someterlas a un posterior lavado.

c) Lavado y centrifugado:

Mediante este proceso se eliminó el contenido de saponina del grano de quinua, piedrecillas y materias extrañas. Seguidamente se somete a centrifugado por 30 segundos para eliminar el agua de la superficie hasta obtener un 29.61% de humedad en base seca.

d) Secado:

Los granos de quinua una vez centrifugado se proceden a introducir en el alimentador para su secado en el lecho fluidización, permaneciendo por tiempo de 315 segundos.

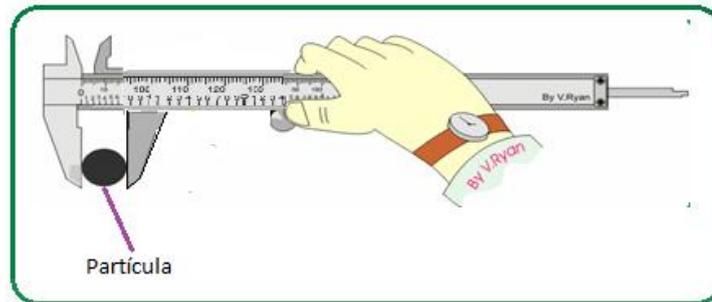
e) Almacenamiento:

Los granos de quinua se almacenaron en bolsas de polietileno por debajo de los 11 % de humedad.

### 3.4.1. Determinación de las propiedades físicas del grano de quinua.

a) Diámetro de la partícula.

Su determinación se realizó mediante el instrumento vernier, con el cual se obtiene sus respectivas dimensiones del grano de quinua con 10 repeticiones (Mazariegos, 2006).



**Figura 17:** Medición de las dimensiones del grano de quinua

Diámetro promedio de la partícula se determinó mediante la ecuación 18 (Kunii y Levenspiel, 1991).

$$d_p = \left[ \frac{6m}{nf \dots_p} \right]^{1/3}$$

Diámetro efectivo de la partícula (Kunii y Levenspiel, 1991).

$$d_e = \left[ \frac{4}{f} bh \right]^{1/2}$$

b) Esfericidad de la quinua.

Luego de calcular el diámetro promedio y el diámetro efectivo se procedió a calcular la esfericidad que tiene el grano de quinua mediante la ecuación 17 (Kunii y Levenspiel, 1991):

$$d_e = W_s d_p$$

$$W_s = \frac{d_e}{d_p}$$

## c) Porosidad.

La porosidad se calculó mediante la ecuación 22,  $V_{H_2O}$  (volumen del agua agregado con la pipeta) es 4 ml y el  $V_T$  (volumen del sólido + hueco en la probeta) es de 5.5528E-06, cuya determinación se encuentra en el ANEXO 1

$$v = 1 - \frac{V_{H_2O}}{V_T}$$

## d) Densidad real.

La densidad real del sólido (grano de quinua) se determina de la siguiente manera: se introdujeron una cantidad de partículas pesadas completamente entero y limpio, en una probeta graduada con una determinada cantidad de agua. La determinación de la densidad real se calculó mediante la ecuación 23. Datos obtenidos para la determinación de la densidad se encuentra en el ANEXO 1 (Alvarado, 2001).

$$\rho_p = (m / n^\circ \text{ granos}) / v$$

### 3.4.2. Determinación de las propiedades hidrodinámica de la fluidización.

## a) Densidad y viscosidad del aire.

Una vez obtenidas las características físicas de la partícula a fluidizar, es necesario tener las características del fluido utilizado en el experimento para poder realizar los cálculos fluidinámicos, tales como: la densidad y la viscosidad, con respecto a la temperatura y presión atmosférica en este caso se presentan las características del aire a dos diferentes temperaturas a presión atmosférica de 1.5 mmHg, 1.2 mmHg y 0.9 mmHg.

Es de gran dificultad encontrar en tablas termodinámicas las propiedades del aire a presiones menores que la atmosférica por lo que es necesario utilizar las ecuaciones 43 y 44 (Sit y Grace, 1981):

$$\eta = 0.01709 \frac{273.15 + 114}{T + 114} \left( \frac{T}{273.15} \right)^{3/2} \text{ centipoises} \quad (\text{ec. 43})$$

$$\dots = \frac{P * \bar{M}}{R * T} \tag{ec. 44}$$

Donde:

- T: Temperatura (°K).
- P: Presión (mmHg).
- R: Constante de los gases. (L mmHg / K mol).
- $\bar{M}$ : Peso Molecular del aire (g/mol).
- $\dots$ : Densidad del aire. (Kg/m<sup>3</sup>).

b) Calculo de la velocidad mínima de fluidización.

Ergun: La velocidad mínima de fluidización se determina mediante la ecuación 27, del cual se conocen los valores de viscosidad del gas, densidad del gas, diámetro de partículas, esfericidad de partículas y porosidad en el punto de fluidización incipiente, que son determinadas según la metodología indicada anteriormente (Mc Cabe, 1991).

$$1.75 \frac{\dots}{W_p d_p V_m^3 g(\dots_p - \dots)} \bar{V}_{0m}^2 + 150 \frac{\sim(1-v_m)}{W_p^2 d_p^2 V_m^3 g(\dots_p - \dots)} \bar{V}_{0m} - 1 = 0$$

c) Numero de Reynolds.

Se calculo mediante la ecuación (35) (Méndez, 1998).

$$Re = \frac{d_p \dots \bar{V}_{0m}}{\sim}$$

d) Porosidad en mínima fluidización.

Se calculo mediante la ecuación 45 (Peña, 1993).

$$V^3 + 150 \frac{\sim \bar{V}_{0m} V}{W_p^2 d_p^2 g(\dots_p - \dots)} - 150 \frac{\sim \bar{V}_{0m}}{W_p^2 d_p^2 g(\dots_p - \dots)} - 1.75 \frac{\dots \bar{V}_{0m}^2}{W_p d_p g(\dots_p - \dots)} = 0 \tag{ec. 45}$$

Donde:

$\bar{V}_{0m}$  : Velocidad mínima de fluidización. (m/s).

$V$  : Porosidad del lecho fluidizado, (adimensional).

$\sim$  : Viscosidad del aire. (Kg/m s).

$\dots$  : Densidad del aire, (Kg/m<sup>3</sup>).

$\dots_p$  : Densidad de la partícula, (Kg/m<sup>3</sup>).

$W_p$  : Esfericidad de las partículas, (adimensional).

e) Velocidad terminal.

Se calcula mediante la ecuación 34 (Méndez, 1998).

$$V_t = \left[ \frac{4(\dots_p - \dots)^2 g^2}{225 \dots \sim} \right]^{1/3} d_p$$

f) Cálculo del tipo de fluidización.

Se calcula mediante la ecuación 37 y 38 (Foust, 1998)

$$(Fr)_m = \frac{V_{0m}^2}{d_p g}$$

$$(Fr)_m (Re)_m \left( \frac{\dots_p - \dots}{\dots} \right) \left( \frac{L_m}{D} \right) > 100$$

### 3.4.3. Determinación de la cinética de secado de los granos de quinua.

Se llevó un registro de datos obtenidos en el laboratorio de forma experimental en el prototipo de lecho fluidizado, se trabajó con dos temperaturas de aire (25 y 35°C), tres velocidades de flujo de aire (12, 15 y 17m/s) y tres cantidades de lecho (50, 40 y 30g) por un tiempo de 315 segundos, se obtuvieron muestras cada 35 segundos para obtener las gráficas que relacionan la pérdida de humedad con respecto al tiempo. La cantidad de humedad (kg de agua/kg ss) se determinó con el procedimiento descrito por

Hart y Fisher (1971) utilizando una estufa de convección forzada y una balanza analítica.

El procedimiento consiste en pesar pequeñas muestras de granos que se van obteniendo en diferentes tiempos de secado, las cuales se dejan por espacio de 24 hrs en la estufa, posteriormente se vuelven a pesar las muestras y por diferencia de peso se determina la cantidad de humedad que tienen los granos en el tiempo en que se sacaron del secador. La humedad en base seca se determina mediante la fórmula descrita en la ecuación 1.

$$X_{bs} = \frac{m_a - m_b}{m_b}$$

Donde:  $m_a$  es el peso de la muestra a un determinado tiempo de secado,  $m_b$  es el peso de la muestra después de haber estado 24 hrs en la estufa y  $H_{bs}$  es la humedad final en base seca

Para determinar la velocidad de secado se utiliza la formula descrita en la ecuación 3.

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

#### 3.4.4. Determinación de la difusividad efectiva.

Tras obtener las curvas de velocidad de secado se determina la difusividad efectiva de la humedad para cada una de las muestras mediante la segunda ley de Fick, descrita en la ecuación 5:

$$\frac{X - X^*}{X_0 - X^*} = \frac{6}{f^2} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n^2} \text{EXP} - (nf)^2 \frac{D_e t}{R^2}$$

## IV RESULTADOS Y DISCUSIONES

### 4.1. PROPIEDADES FÍSICAS DEL GRANO DE QUINUA E HIDRODINAMICAS DE LA FLUIDIZACIÓN.

#### 4.1.1. Propiedades físicas del grano de quinua.

Los datos registrados para la determinación de las propiedades físicas del grano de quinua se muestran detalladamente en el ANEXO 1. En el Cuadro 1, se observa los valores de densidad real, diámetro efectivo, esfericidad y porosidad del grano de quinua.

**Cuadro 1:** Propiedades físicas del grano de quinua variedad blanca de juli.

$P$ (Kg/m <sup>3</sup> )	625
de (mm)	1.6
s	0.9055
v	0.28

Fuente: Laboratorio de Post-cosecha (2009) UNAP

La densidad del grano de quinua variedad blanca es de 625kg/m<sup>3</sup> (densidad real), diámetro del grano de quinua que es de 1.6mm, esfericidad del grano de quinua es de 0.9055 y porosidad de 0.28, Condorhuaman (2002) reporta valores de 1380kg/m<sup>3</sup> (densidad absoluta) y 940kg/m<sup>3</sup> (densidad aparente), se puede notar que hubo cierta variación, sin embargo es muy normal que ocurra esto ya que se determino la densidad real en el presente trabajo además la variedad de quinua es diferente, también se puede atribuir al diámetro del grano.

El diámetro del grano de quinua se encuentra entre los rangos que nos presenta Mujica (2000) indicando que el diámetro del grano de quinua variedad blanca de juli está entre 1.2 – 1.6mm, Medina (2000) reporta valores de 2.13-2.55mm la diferencia de diámetros puede ser debido a que los tamices que se utilizaron en la selección de granos son de distintos diámetros de orificios y porque se adquirieron en distintos lugares.

Según la esfericidad obtenida podemos indicar que la quinua no es totalmente esférica concordando con Medina (2000) que obtuvo valores de esfericidad entre 0.88-0.93.

La porosidad que se obtuvo se encuentra por debajo de los valores obtenidos por Medina (2000) indicada en la Tabla 3, esto puede ser debido a que el diámetro del grano que se uso en los tratamientos es menor.

#### **4.1.2. Propiedades hidrodinámicas del lecho fluidizado.**

En el ANEXO 2 se detallan los cálculos realizados para la hidrodinámica del lecho fluidizado, Cuadro 2 se muestran los datos obtenidos teóricamente mediante las ecuaciones 44 al 49, se puede apreciar que la presión absoluta de trabajo tiene una relación inversamente proporcional con la velocidad mínima de fluidización teórica, al igual que la temperatura. Al manejar una presión de 1.5 mmHg , la velocidad mínima de fluidización teórica se encuentra entre 5.95m/s a 25°C y 5.82 m/s a 35°C, con una presión de 1.2mmHg las velocidades mínimas de fluidización van de 6.00m/s a 25°C y 5.86m/s a 35°C y finalmente con la presión más baja que fue de 0.9mmHg se obtuvieron resultados de 6.05m/s a 25°C y 5.91m/s a 35°C, concordando con los resultados obtenidos por Mazariegos (2006), Carbajal (2008), Guameros (2005) y Romero (2006) donde la velocidad mínima de fluidización disminuye con el aumento de la presión y temperatura de operación.

**Cuadro 2:** Caracterización hidrodinámica del sistema granos de quinua-aire en el prototipo de lecho fluidizado.

	Po <sub>2</sub> = 1.5 mmHg		Po <sub>2</sub> = 1.2 mmHg		Po <sub>2</sub> = 0.9 mmHg	
	25°C	35°C	25°C	35°C	25°C	35°C
V <sub>mf</sub> (m/s)	5.95	5.82	6.00	5.86	6.05	5.91
m <sub>f</sub>	0.72	0.72	0.72	0.72	0.72	0.72
Re	1.21	1.11	0.97	0.90	0.73	0.68
VT	39.87	39.97	42.94	43.05	47.27	47.38
Tipo de fluidización	Burbujeo	Burbujeo	Burbujeo	Burbujeo	Burbujeo	Burbujeo
Clasificación de partículas	Grupo D	Grupo D	Grupo D	Grupo D	Grupo D	Grupo D

Fuente: Laboratorio de Post-cosecha (2009) UNA-Puno.

En tanto el número de Reynolds es directamente proporcional con la presión e inversamente proporcional con respecto a la temperatura, según Méndez (1998) indica que si  $0.4 < Re < 500$  el tipo de flujo entre estos parámetros será de transición, correspondiendo a este tipo de flujo según el Cuadro 2 donde Re fluctúa entre 0.68 y 1.21. El tipo de fluidización es de burbujeo porque el flujo que se utiliza es un gas y la velocidad mínima de fluidización es  $>5$  m/s concordando con Dávila (2000), además Foust (1998) nos indica que la porosidad no cambia si el tipo de fluidización es de burbujeo, por lo tanto no habrá variación de la porosidad en mínima fluidización tal como se observa en el Cuadro 2 donde la  $m_f$  es de 0.72, finalmente los granos de quinua se clasifican en el Grupo D debido a que tienen un  $d_p > 1$ mm. (Partículas grandes y densas) según la clasificación de Foust (1998) y Geldart (1973).

#### 4.2. HUMEDAD REMOVIDA.

El secado en lecho fluidizado es influida por la temperatura (25 y 35°C), la velocidad del flujo de aire (12, 15 y 17m/s) y la cantidad de lecho a secar (30, 40 y 50g).

Del análisis de varianza de la respuesta humedad removida, en el secado por lecho fluidizado a un nivel de confianza del 95%. Mostrada en el Apéndice 21, se observa que están presentes los efectos principales de los factores en estudio como es: la temperatura (A), velocidad de flujo de aire (B), así mismo las interacciones A\*B, B\*C y A\*B\*C; son altamente significativas. Por otra parte la cantidad de lecho (C) tiene un efecto significativo en el proceso de secado por lecho fluidizado. Por lo que podemos afirmar que los factores en estudio, temperatura, velocidad de flujo de aire y cantidad de lecho son importantes para el proceso de secado en lecho fluidizado.

Para determinar el nivel óptimo de los factores en estudio se realizó la Prueba de Duncan.

De acuerdo al Cuadro 3 de comparaciones de la prueba de Duncan a un nivel de confianza del 95%, se observa que las temperaturas estudiadas en el secado, son estadísticamente diferentes, obteniéndose mejores resultados durante el proceso de secado de quinua a 35°C con la que se alcanzo una humedad removida promedio de 23.5167%bs, superando al producto secado a 25°C donde se alcanzo un promedio de 18.8712%bs de humedad removida.

**Cuadro 3:** Prueba de Duncan para Temperatura

Temperatura	Nº de tratamientos	Promedio (%)	Agrupamiento Duncan
25°C	27	18.8712	b
35°C	27	23.5167	a

Según el Cuadro 4 de la prueba de Duncan a un nivel de confianza del 95%, se observa en la prueba de comparaciones de medias entre los tratamientos 17 y 15m/s no existen diferencias; ambos tratamientos difieren del tratamiento 12m/s, por lo que podemos aplicar cualquiera de las dos velocidades de flujo de aire de 17m/s o 15m/s y la remoción de humedad será la misma con promedios de humedad removida de 21.94% y 21.73%b.s. respectivamente.

**Cuadro 4:** Prueba de Duncan para Velocidad de flujo de aire

Velocidades de flujo de aire	N° de tratamientos	Promedio (%)	Agrupamiento Duncan
12m/s	18	19.904	b
15m/s	18	21.7367	a
17m/s	18	21.9412	a

Los resultados mostrados en el Cuadro 5 de la prueba de Duncan con un nivel de confianza del 95%, se observa que a 50g de cantidad de lecho, se logro tener mayor remoción de humedad con un valor promedio de 21.3781 %b.s. de humedad removida, en tanto la cantidades de lecho de 40 y 30g presentan valores promedios inferiores de 21.2007 y 21.0031 %b.s. de humedad removida respectivamente.

**Cuadro 5:** Prueba de Duncan para Cantidad de lecho

Cantidad de lecho	N° de tratamientos	Promedio (%)	Agrupamiento Duncan
40g	18	21.0031	b
30g	18	21.2007	b
50g	18	21.3781	a

Según Ortiz (2004) los resultados obtenidos en el secado de semillas de cilantro, perejil y epazote, notándose una fuerte influencia de la temperatura en la remoción de humedad generándose así menores tiempos de secado, en tanto la velocidad del flujo de aire afecta en menor medida sobre la remoción de humedad de las semillas, al igual que Guameros (2005) indica en sus resultados la influencia que tiene la temperatura sobre la humedad removida obteniendo mayor remoción de humedad a temperaturas elevadas. Los resultados obtenidos en el trabajo de investigación son congruentes con las investigaciones mencionadas, la influencia de la temperatura se hace notoria lográndose obtener mejores resultados de remoción de humedad a 35°C.

Según Ortiz (2004) las semillas de cilantro presento un comportamiento similar a velocidades de flujo de aire de 5 y 10m/s. Siendo concordante con los resultados que se obtuvo en el secado de granos de quinua, en el cual se observa que a 17 y 15m/s la remoción de humedad será la misma por lo tanto la velocidad de flujo de aire no influye en gran medida en la eliminación de humedad.

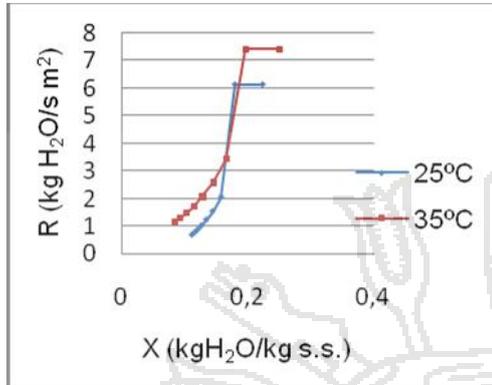
### **4.3. VELOCIDAD DE SECADO.**

Los resultados obtenidos a partir de la ecuación 1 se muestran en los APENDICES 1 al 18, cuyo comportamiento se presentan en el APENDICE 26, de los cuales se construyeron las curvas de velocidad de secado a partir de la ecuación 3, cuyo comportamiento se presentan en los Gráficos 1 al 21. Al determinar la velocidad de secado en función de la humedad del grano se encontró que existe un periodo de velocidad de secado constante y dos periodos de velocidad de secado decreciente. Según Reay Y Allen (1982) indica la existencia de más de dos etapas en el periodo de velocidad de secado decreciente, así mismo Pérez (2000) en su trabajo de investigación del secado del grano de Trigo en lecho vibrofluidizado presenta dos periodos de velocidad de secado decreciente, concordando con la investigación que se realizó en el secado de granos de quinua en lecho fluidizado.

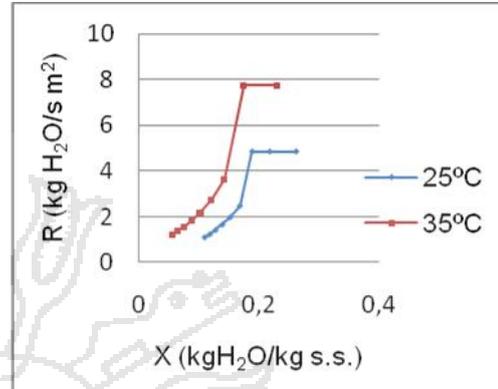
#### **4.3.1. Efecto de la temperatura de flujo de aire en la velocidad de secado.**

Los Gráficos 1 - 9 reflejan claramente las diferencias de la velocidad de secado en función de la temperatura de bulbo seco del aire, se puede observar que el uso de temperatura de secado de 35°C genera una velocidad de deshidratación mayor por lo tanto se logra mayor remoción de humedad con respecto a la temperatura de 25°C. En tanto Pérez (2000) trabajo con temperaturas de 40, 50, 60 y 70°C, en los gráficos que obtiene se observó que a mayor temperatura se tendrá mayor humedad removida comparada con la temperatura menor, lo mismo sucede en los gráficos obtenidos en el trabajo de investigación.

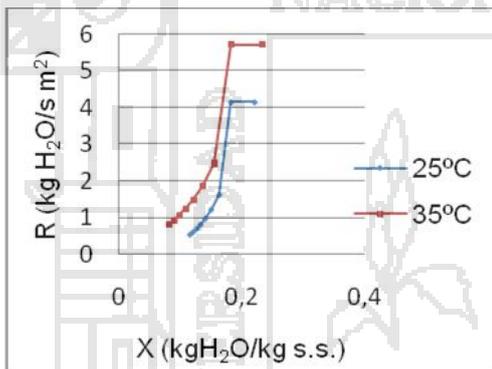
**Gráfico 1: Curvas de velocidad de secado a 12m/s y 50g a diferentes temperaturas**



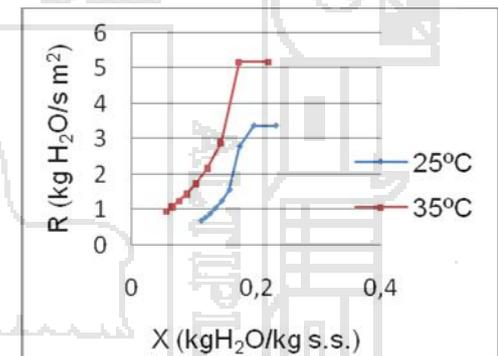
**Gráfico 4: Curvas de velocidad de secado a 15m/s y 50g a diferentes temperaturas**



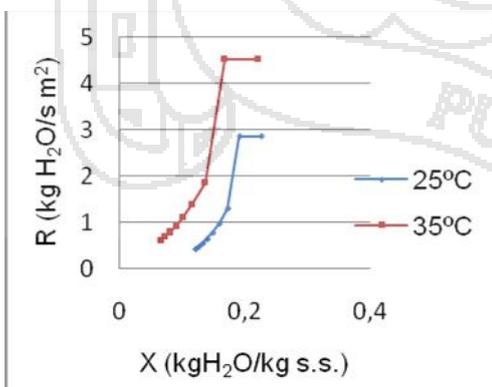
**Gráfico 2: Curvas de velocidad de secado a 12m/s y 40g a diferentes temperaturas**



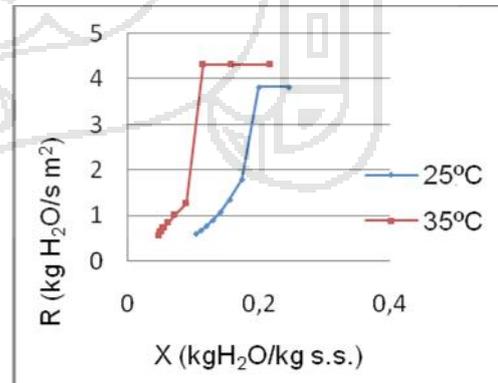
**Gráfico 5: Curvas de velocidad de secado a 15m/s y 40g a diferentes temperaturas**



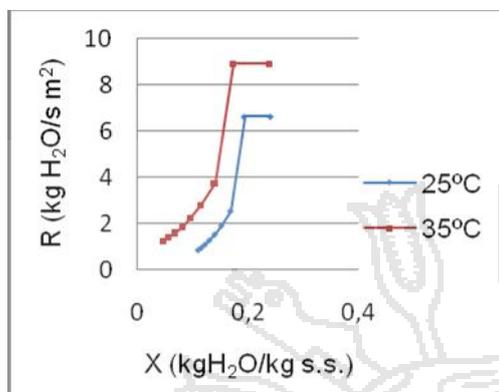
**Gráfico 3: Curvas de velocidad de secado a 12m/s y 30g a diferentes temperaturas**



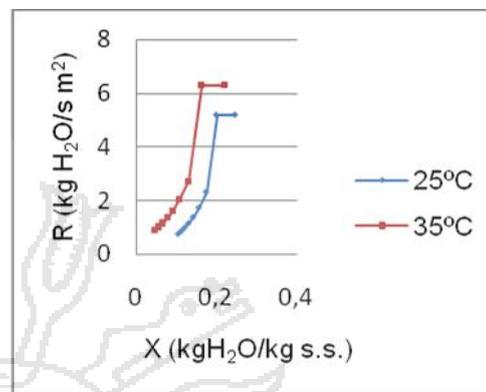
**Gráfico 6: Curvas de velocidad de secado a 15m/s y 30g a diferentes temperaturas**



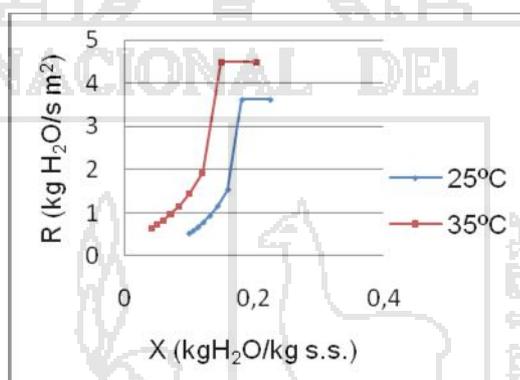
**Gráfico 7: Curvas de velocidad de secado a 17m/s, 50g y diferentes temperaturas**



**Gráfico 8: Curvas de velocidad de secado a 17m/s, 40g y diferentes temperaturas**



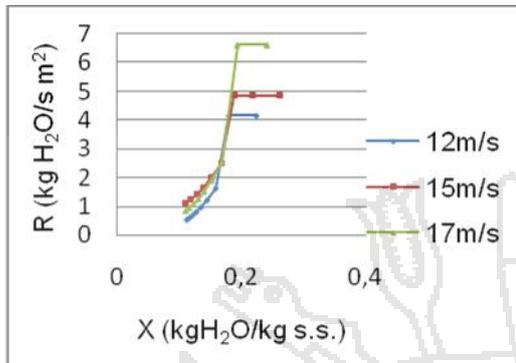
**Gráfico 9: Curvas de velocidad de secado a 17m/s, 30g y diferentes temperaturas**



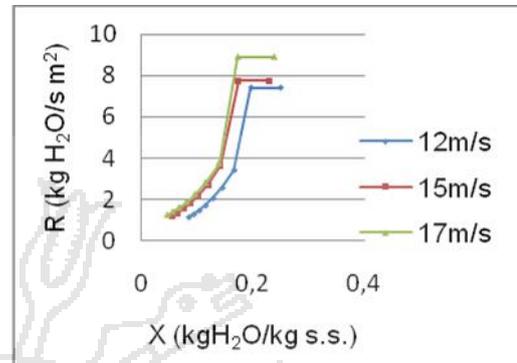
#### 4.3.2. Efecto de la velocidad de flujo de aire en la velocidad de secado.

En los Gráficos 10 - 15 se observa que el incremento de la velocidad del flujo de aire de 12 a 17m/s, genera un leve incremento en la velocidad de secado así como en la remoción de humedad, en tanto Ortiz (2004) en los datos que presenta en su trabajo de investigación se pudo observar que la velocidad de flujo de aire no influye en gran medida sobre la deshidratación de las semillas de cilantro concordando con los datos obtenidos para el secado de granos de quinua en lecho fluidizado.

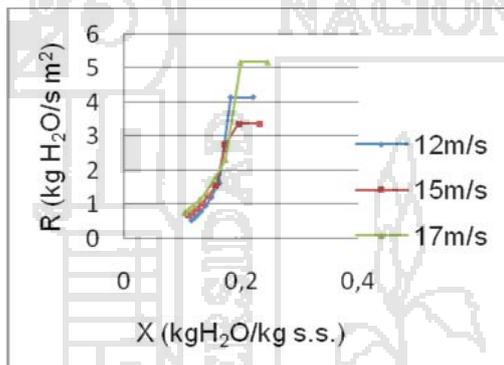
**Gráfico 10: Curvas de velocidad de secado a 25°C, 50g y diferentes velocidades de flujo de aire.**



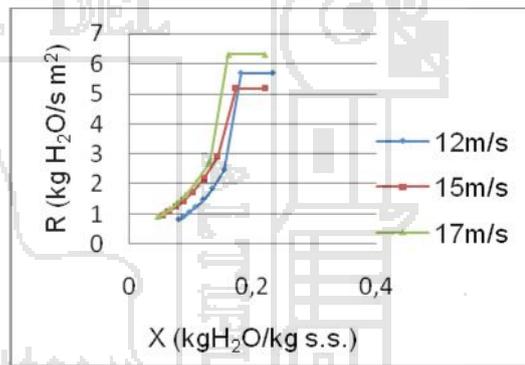
**Gráfico 13: Curvas de velocidad de secado a 35°C, 50g y diferentes velocidades de flujo de aire.**



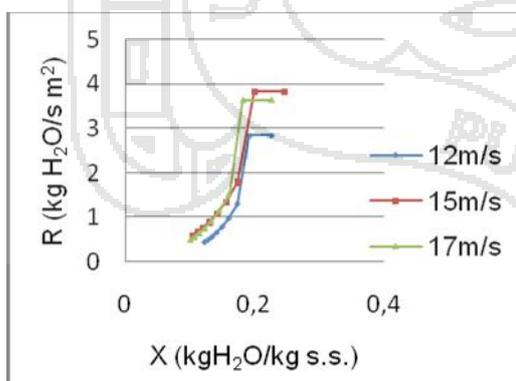
**Gráfico 11: Curvas de velocidad de secado a 25°C, 40g y diferentes velocidades de flujo de aire.**



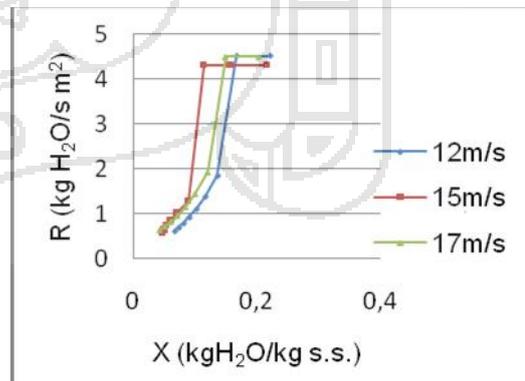
**Gráfico 14: Curvas de velocidad de secado a 35°C, 40g y diferentes velocidades de flujo de aire.**



**Gráfico 12: Curvas de velocidad de secado a 25°C, 30g y diferentes velocidades de flujo de aire.**



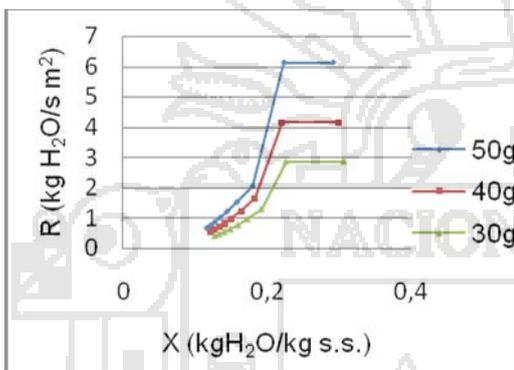
**Gráfico 15: Curvas de velocidad de secado a 35°C, 30g y diferentes velocidades de flujo de aire.**



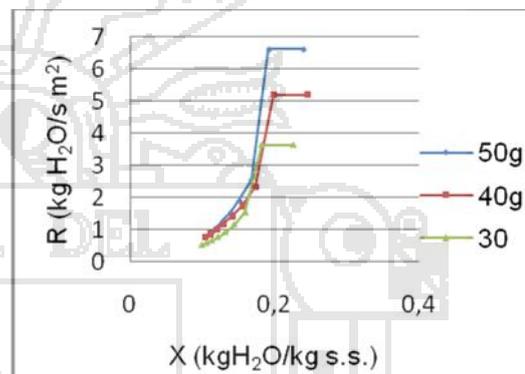
**4.3.3. Efecto de la cantidad de lecho en la velocidad de secado.**

Según los Gráficos 16 - 21 se puede observar que al secar mayor cantidad de granos de quinua de 30 a 50g la velocidad de secado será mayor así como la remoción de humedad, en tanto el tiempo de secado se incrementara.

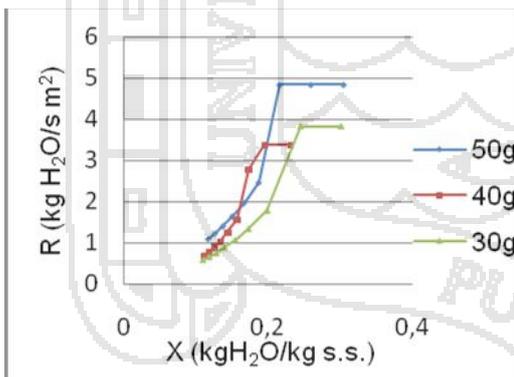
**Gráfico 16: Curvas de velocidad de secado a 25°C, 12m/s y diferentes cantidades de lecho.**



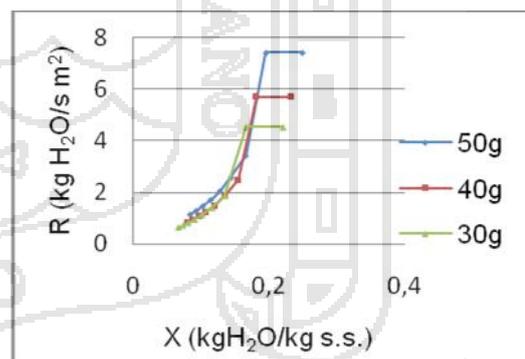
**Gráfico 18: Curvas de velocidad de secado a 25°C, 17m/s y diferentes cantidades de lecho.**



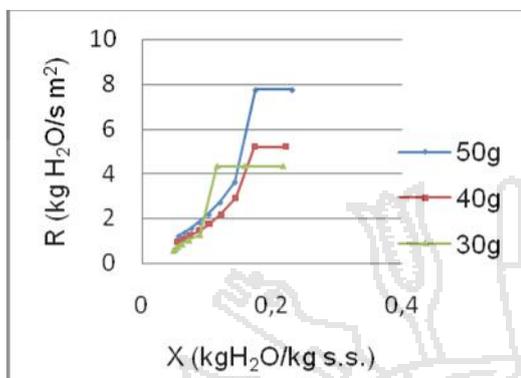
**Gráfico 17: Curvas de velocidad de secado a 25°C, 15m/s y diferentes cantidades de lecho.**



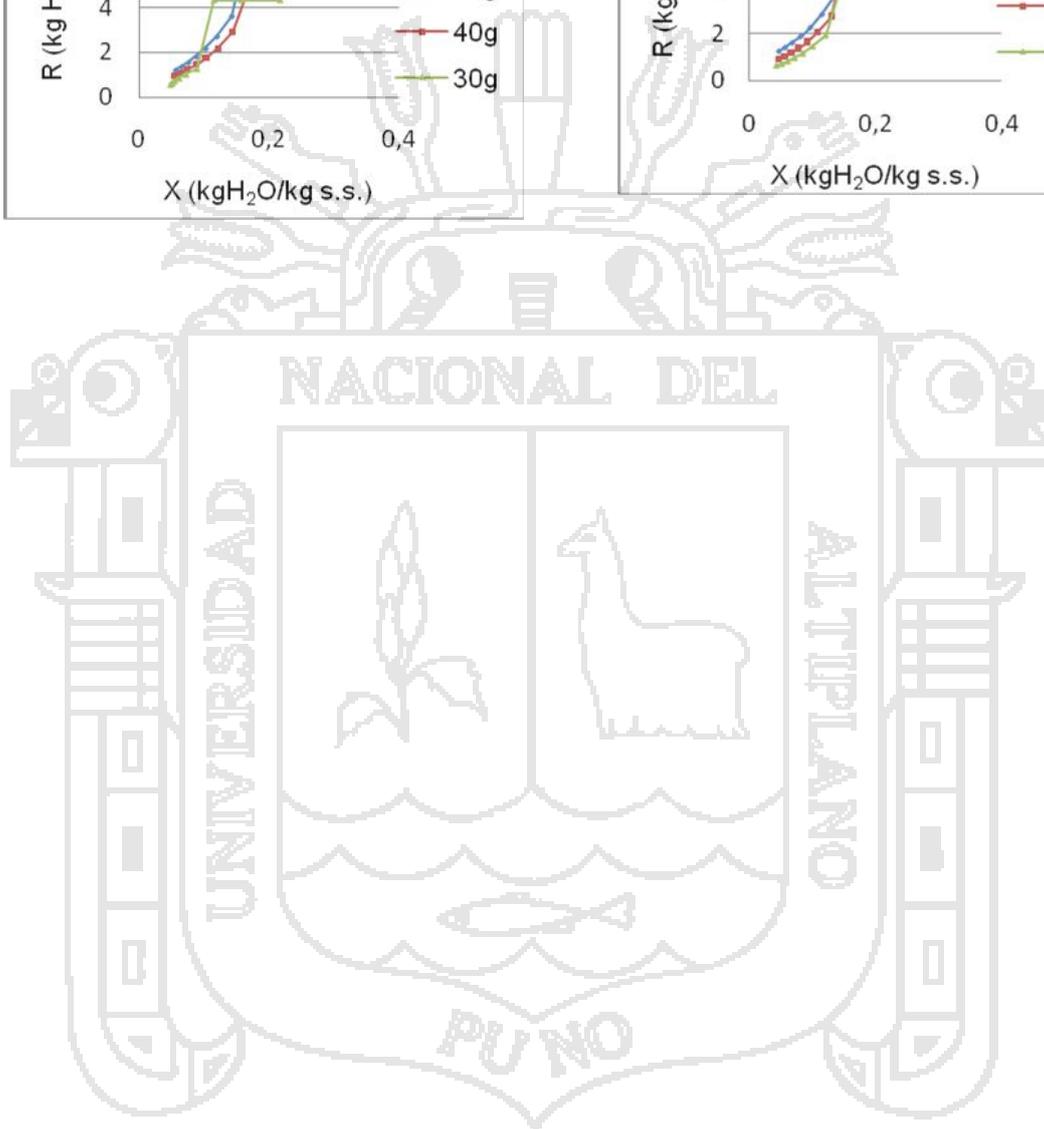
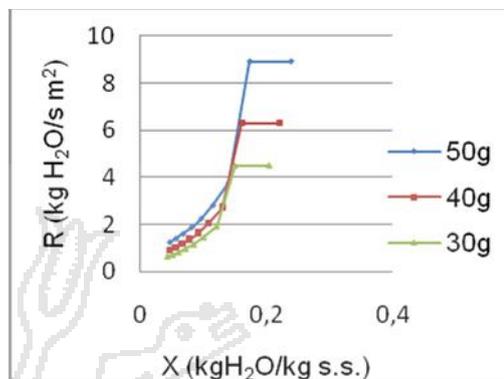
**Gráfico 19: Curvas de velocidad de secado a 35°C, 12m/s y diferentes cantidades de lecho.**



**Gráfico 20: Curvas de velocidad de secado a 35°C, 15m/s y diferentes cantidades de lecho.**



**Gráfico 21: Curvas de velocidad de secado a 35°C, 17m/s y diferentes cantidades de lecho.**



#### 4.3.4. Análisis estadístico para la curva de velocidad de secado.

##### a) Periodo de velocidad constante.

Del análisis de varianza (ANVA) de la respuesta periodo de velocidad constante mostrada en el APENDICE 22, reporta que existe diferencia estadística altamente significativa con 95% de nivel de confianza en los niveles de temperatura (A), velocidad de flujo de aire (B) y cantidad de lecho(C) así como en sus interacciones A\*C, B\*C Y A\*B\*C, mientras en las interacciones A\*B no se encontró diferencia significativa.

En el Cuadro 6 de la prueba de comparación de Duncan con un nivel de confianza del 95% se observa que el uso de una temperatura de secado de 35°C genera una velocidad de deshidratación promedio del orden de 6.0657 kg H<sub>2</sub>O/m<sup>2</sup>s que resulta significativamente superior que aquella obtenida a 25°C, que es de orden de 4.51006 kg H<sub>2</sub>O/m<sup>2</sup>s, por lo tanto la remoción de humedad será mayor a 35°C.

**Cuadro 6:** prueba de Duncan para temperatura

Temperatura	Nº de tratamientos	Promedio (kgH <sub>2</sub> O/m <sup>2</sup> s)	Agrupamiento Duncan
25°C	27	4.51006	b
35°C	27	6.0657	a

Según el Cuadro 7 de la prueba de comparación múltiple de la prueba de Duncan a un nivel de confianza de 95%, se observa que el mayor valor promedio de velocidad de secado es 5.85617 kg H<sub>2</sub>O/m<sup>2</sup>s a una velocidad de flujo de aire de 17m/s en la cual se logro mayor remoción de humedad en comparación con las velocidades de 12 y 15m/s presentando velocidades de secado promedio de 5.12693 y 4.88054 kg H<sub>2</sub>O/m<sup>2</sup>s respectivamente, como se puede observar en la comparación de medias entre el tratamiento 12 y 15m/s no existe diferencias, por lo que en ambos tratamientos habrá la misma cantidad de humedad removida y se puede aplicar cualquiera de los dos velocidades de flujo de aire.

**Cuadro 7:** Prueba de Duncan para Velocidad de flujo de aire

Velocidad de flujo de aire	Nº de tratamientos	Promedio (kgH <sub>2</sub> O/m <sup>2</sup> s)	Agrupamiento Duncan
15m/s	18	4.88054	b
12m/s	18	5.12693	b
17m/s	18	5.85617	a

En el cuadro 8 de la prueba de comparación múltiple con un nivel de confianza del 95% se observa que, a una cantidad de 50g de lecho se logro mayor remoción de humedad con velocidad de secado promedio de 6.93996 kg H<sub>2</sub>O/m<sup>2</sup>s comparada con la cantidad de lecho de 40 y 30g que presentan velocidad de secado promedio de 4.98285 y 3.94083 kg H<sub>2</sub>O/m<sup>2</sup>s presentando una menor cantidad de humedad removida.

**Cuadro 8:** Prueba de Duncan para Cantidad de lecho

Cantidad de lecho	Nº de tratamientos	Promedio (kgH <sub>2</sub> O/m <sup>2</sup> s)	Agrupamiento Duncan
30g	18	3.94083	c
40g	18	4.98285	b
50g	18	6.93996	a

En este periodo el movimiento de agua desde el interior del grano a la superficie ocurre a la misma velocidad que la de evaporación en la superficie del grano lo cual se ve saturada de agua líquida, a medida que esta va siendo evaporada gracias al calor que el aire transmite al grano de quinua. Concordando con la teorías descriptivas de (Welti, 2001) y (Perry, 1984).

Según Perry (1984) señala que, conforme se incrementa la temperatura de secado se acelera la eliminación de humedad. Siendo congruente con los resultados obtenidos que nos indican que a 35°C se tendrá mayor velocidad de secado así como también se incrementara la humedad removida y posterior eliminación en consecuencia el tiempo de secado disminuirá. En tanto Mujumdar (2000) indica que durante las primeras etapas del secado, la velocidad del aire desempeña un papel muy importante, a mayor velocidad, mayor será la tasa de evaporación y menor el tiempo de secado y viceversa. Concordando con los resultados obtenidos en el Cuadro 7 observamos que la

velocidad de secado se incrementa a 17m/s por ende la remoción de humedad será mayor. Por tal razón para asegurar un secado rápido es indispensable una circulación de aire fuerte y regular.

b) Primer periodo de velocidad de secado decreciente.

El ANVA del arreglo experimental evaluado para el primer periodo de velocidad de secado decreciente, mostrada en el APENDICE 23 con un nivel de confianza del 95% según el análisis de los efectos múltiples de la interacción de temperatura, velocidad de flujo de aire y cantidad de lecho se observa que existe diferencia altamente significativa en los niveles de temperatura (A), velocidad de flujo de aire (B) y cantidad de lecho (C) así mismo sus interacciones A\*B, A\*C, A\*B\*C y presenta una diferencia significativa en la interacción B\*C.

En el Cuadro 9 de la prueba de Duncan con un nivel de confianza del 95%, se observa que la velocidad de secado varía considerablemente en función a la temperatura, siendo mayor a 35°C con promedio de velocidad de secado de 2.66543 kg H<sub>2</sub>O/m<sup>2</sup>s en tanto a 25°C se tiene una velocidad de secado promedio de 1.93216 kg H<sub>2</sub>O/m<sup>2</sup>s, logrando menor remoción de humedad comparada con la temperatura de 35°C.

**Cuadro 9:** Prueba de Duncan para Temperatura

Temperatura	Nº de tratamientos	Promedio (kgH <sub>2</sub> O/m <sup>2</sup> s)	Agrupamiento Duncan
25°C	27	1.93216	b
35°C	27	2.66543	a

Según el Cuadro 10 de la prueba de Duncan a un nivel de confianza del 95%, se observa que a 17m/s de velocidad de flujo de aire el promedio de velocidad de secado es 2.46959 kg H<sub>2</sub>O/m<sup>2</sup>s lográndose mayor remoción de humedad comparadas con las velocidades de flujo de aire de 15 y 12m/s presentando valores de velocidades de secado promedio de 2.3026 y 2.1242 kg H<sub>2</sub>O/m<sup>2</sup>s por lo tanto la remoción de humedad también será menor.

**Cuadro 10:** Prueba de Duncan para Velocidad de flujo de aire

Velocidad de flujo de aire	Nº de tratamientos	Promedio (kgH <sub>2</sub> O/m <sup>2</sup> s)	Agrupamiento Duncan
12m/s	18	2.1242	c
15m/s	18	2.3026	b
17m/s	18	2.46959	a

De acuerdo al Cuadro 11 de la prueba de Duncan a un nivel de confianza del 95%, se observa que a cantidad de 50g de lecho se tendrá mayor velocidad de secado con un valor promedio de 2.97591 kg H<sub>2</sub>O/m<sup>2</sup>s en tanto la humedad removida también será mayor comparada con las cantidades de lecho de 40 y 30g con velocidades de secado promedio de 2.30559 y 1.6149 kg H<sub>2</sub>O/m<sup>2</sup>s respectivamente.

**Cuadro 11:** Prueba de Duncan para Cantidad de lecho

Cantidad de lecho	Nº de tratamientos	Promedio (kgH <sub>2</sub> O/m <sup>2</sup> s)	Agrupamiento Duncan
30g	18	1.6149	c
40g	18	2.30559	b
50g	18	2.97591	a

c) Segundo periodo de velocidad de secado decreciente.

El ANVA del arreglo experimental evaluado para el segundo periodo de velocidad de secado decreciente a un nivel de confianza de 95% mostrada en el APENDICE 24, se observa el análisis de los efectos múltiples de la interacción de temperatura, velocidad de flujo de aire y cantidad de lecho, mostrando que existe diferencia altamente significativa en los niveles de temperatura (A), velocidad de flujo de aire (B) y cantidad de lecho (C) y así mismo sus interacciones A\*B, A\*C, B\*C y A\*B\*C.

Según el Cuadro 12 de la prueba de Duncan a un nivel de confianza del 95% se observa que la temperatura tiene un efecto favorable sobre la remoción de humedad, obteniendo a 35°C una velocidad de secado promedio de 0.904235 kg H<sub>2</sub>O/m<sup>2</sup>s

comparando con la temperatura de 25°C la velocidad de secado será menor obteniendo un valor promedio de 0.687289 kg H<sub>2</sub>O/m<sup>2</sup>s.

**Cuadro 12:** Prueba de Duncan para Temperatura

Temperatura	Nº de tratamientos	Promedio (kgH <sub>2</sub> O/m <sup>2</sup> s)	Agrupamiento Duncan
25°C	27	0.687289	b
35°C	27	0.904235	a

En el Cuadro 13 de la Prueba de Duncan a un nivel de confianza de 95%, de comparaciones múltiples se encontró que a 15m/s de velocidad de flujo de aire se tendrá mayor remoción de humedad obteniendo un valor promedio de velocidad de secado de 0.856022 kg H<sub>2</sub>O/m<sup>2</sup>s mientras que a velocidades de flujo de aire de 17 y 12m/s se obtuvieron valores promedio inferiores de 0.823197 y 0.708068 kg H<sub>2</sub>O/m<sup>2</sup>s, de acuerdo a los valores que se obtuvieron podemos indicar que el flujo de aire en esta etapa no influye en el proceso de secado, siendo congruente con lo que indica Perry (1984), la velocidad de flujo de aire no tiene gran influencia sobre el periodo de velocidad de secado decreciente.

**Cuadro 13:** Prueba de Duncan para Velocidad de flujo de aire

Velocidad de flujo de aire	Nº de tratamientos	Promedio (kgH <sub>2</sub> O/m <sup>2</sup> s)	Agrupamiento Duncan
12m/s	18	0.708068	c
17m/s	18	0.823197	b
15m/s	18	0.856022	a

Del Cuadro 14 de la prueba de Duncan a un nivel de confianza del 95% se puede observar que la cantidad de lecho a secar influirá sobre esta etapa de secado teniendo mayor remoción de agua y velocidad de secado a la cantidad de 50g de lecho con un valor promedio de 1.03762 kg H<sub>2</sub>O/m<sup>2</sup>s comparada con las cantidades de 40 y 30g de lecho se obtuvieron valores promedios inferiores de velocidad de secado de 0.787733 y 0.561936 kgH<sub>2</sub>O/m<sup>2</sup>s.

**Cuadro 14:** Prueba de Duncan para Cantidad de lecho

Cantidad de lecho	Nº de tratamientos	Promedio (kgH <sub>2</sub> O/m <sup>2</sup> s)	Agrupamiento Duncan
30g	18	0.561936	c
40g	18	0.787733	b
50g	18	1.03762	a

Pérez (2000), indica que al trabajar a mayor temperatura de alimentación de aire, la rapidez de secado aumenta considerablemente, por lo que concluye que la variable principal en la deshidratación de los granos es la temperatura, al igual que Caballero (1999) la temperatura de flujo de aire es la variable más importante en el secado, un incremento de temperatura acelera en forma notoria la evaporación de agua en el secado de granos de amaranto. Siendo congruente con los resultados obtenidos en el presente trabajo de investigación tal como se observa en los Gráficos 1 – 9 así como en el análisis estadístico Cuadros 6, 9 y 12, en los cuales se observa claramente que a 35°C se incrementa los valores promedios de velocidad de secado y como consecuencia se acelera la eliminación de humedad.

Así mismo la velocidad del flujo de aire dentro del secador tiene como funciones principales, transmitir la energía requerida para calentar el agua contenida en el material facilitando su evaporación, y transportar la humedad saliente del grano de quinua.

En el primer periodo de velocidad de secado decreciente la humedad interna se mueve hasta la superficie del grano tan rápido como se evapora. Sin embargo, en el segundo periodo de velocidad de secado decreciente, la distancia promedio que recorre el agua que difunde aumenta, provocando que la migración de la humedad del interior del grano a la superficie de este sea más difícil, debido a que los gradientes de humedad cada vez son más pequeños conforme pasa el tiempo de secado, por lo que la velocidad de secado se hace más lenta.

En el segundo periodo de velocidad de secado decreciente, los cambios en la velocidad del aire tiene un efecto mucho menor que durante el periodo de secado de velocidad constante y primer periodo de velocidad de secado decreciente, mientras que el aumento de temperatura incrementa la velocidad de secado en los tres periodos de velocidad de secado, concordando con lo que indica Heldman *et al.*, (1981) , esto puede

ser debido a que en el periodo de velocidad de secado constante la eliminación de humedad depende de los factores externos mientras que en el periodo de velocidad de secado decreciente es controlada por el transporte de la humedad del material (condiciones internas) .

#### 4.4. DIFUSIVIDAD EFECTIVA.

La difusividad efectiva de humedad en los granos de quinua se determino mediante la ecuación 57.

El ANVA del arreglo experimental evaluado para difusividad efectiva mostrada en el APENDICE 25, donde el análisis de los efectos múltiples de la interacción de temperatura, velocidad de flujo de aire y cantidad de lecho, muestra que existe diferencia altamente significativa en los niveles de temperatura (A), velocidad de flujo de aire (B) así mismo en sus interacciones A\*B y A\*B\*C. Presentando diferencia significativa en la cantidad de lecho (C) como en las interacciones A\*C y B\*C.

En el Cuadro 15 de la prueba de Duncan a un nivel de confianza del 95%, se observa en la prueba de comparaciones de medias que a 35°C se obtiene mejor resultado con un valor de  $1,31482E-12m^2/s$  de difusividad de humedad, mientras que a 25°C el promedio obtenido es menor lo que significa que la temperatura influye bastante en el secado.

**Cuadro 15:** Prueba de Duncan para temperatura

Temperatura	N° de tratamientos	Promedio ( $m^2/s$ )	Agrupamiento Duncan
25°C	27	6,81456E-13	b
35°C	27	1,31482E-12	a

Según el Cuadro 16 de la prueba de Duncan a un nivel de confianza del 95%, se observa que los mejores valores promedios de difusividad se obtienen a velocidad de flujo de aire de 15 y 17m/s con un promedio de difusividad efectiva de  $1.1121E-12 m^2/s$  y  $1.09239E-12 m^2/s$  por lo tanto el secado puede realizarse a cualquiera de las dos velocidades, en tanto a velocidad de flujo de 12m/s el valor promedio de difusividad es menor.

Tal como se puede observar en la prueba de comparación de medias entre el tratamiento 17 y 15m/s no existen diferencias, de acuerdo a los valores promedios

mostrados se tiene que la velocidad de flujo de aire no influye sobre la difusividad de humedad en los tratamientos de secado debido a que la difusividad ocurre en los dos periodos de velocidad de secado decreciente contrastando con los resultados obtenidos por Dávila (2004) que nos indica que la velocidad de flujo de aire no influye mucho en el secado.

**Cuadro 16:** Prueba de Duncan para Velocidad de flujo de aire

Velocidad de flujo de aire	Nº de tratamientos	Promedio (m <sup>2</sup> /s)	Agrupamiento Duncan
12m/s	18	7.89918E-13	b
15m/s	18	1.09239E-12	a
17m/s	18	1.1121E-12	a

En el Cuadro 17 de la prueba de Duncan, se observa que a 30g de lecho se obtuvo mayor difusividad de humedad con un valor promedio de 1.03419E-12 m<sup>2</sup>/s, mientras que a 40 y 50g se obtuvieron valores promedios inferiores de 9.62713E-13 y 9.9751E-13 m<sup>2</sup>/s por lo que podemos indicar que la difusividad de humedad es más lenta.

**Cuadro 17:** prueba de Duncan para cantidad de lecho

Cantidad de lecho	Nº de tratamientos	Promedio (m <sup>2</sup> /s)	Agrupamiento Duncan
50g	18	9.9751E-13	c
40g	18	9.62713E-13	b
30g	18	1.03419E-12	a

De los Cuadros 15 al 17, indican que la temperatura influye en la difusividad de humedad, mientras que la velocidad de flujo de aire no presenta gran influencia sobre esta, debido a que la difusividad ocurre en la etapa de velocidad de secado decreciente, Brennan *et al.*, (1980) indica que la velocidad de deshidratación en los periodos de velocidad de secado decreciente está influenciada principalmente por la velocidad de movimiento de la humedad dentro del sólido, reduciéndose los efectos de los factores externos, concordando con los resultados obtenidos en el secado de granos de quinua en lecho fluidizado. En tanto la cantidad de lecho a fluidizar si influye en la difusividad de humedad, mientras la cantidad de lecho sea menor se obtendrá mayor difusividad de humedad, siendo congruente con los resultados obtenidos por Pérez *et al.*, (2006) la difusividad a una cantidad de lecho de 300g será mayor comparada con una cantidad de lecho de 600g.

Comparar los coeficientes de difusión reportados en la literatura para distintos cereales es difícil ya que para la estimación se emplean distintos métodos y modelos con distintas suposiciones y restricciones junto con la variación de la composición y estructura física de los alimentos. El maíz, el trigo y el arroz que son tres cereales ampliamente estudiados, que tienen tamaño de partícula grande y que son difíciles de fluidizar presentan coeficientes de difusión efectiva alrededor de  $0.11 \times 10^{-10}$  -  $5.3 \times 10^{-10} \text{m}^2/\text{s}$ ,  $5.1 \times 10^{-10}$  -  $2.2 \times 10^{-09} \text{m}^2/\text{s}$ ,  $1.3 \times 10^{-10}$  -  $3.2 \times 10^{-09} \text{m}^2/\text{s}$ , respectivamente (Zogzas et al., 1996), en tanto Pérez *et al.*, (2006) reporta valores de  $1.37 \times 10^{-10}$  -  $4.67 \times 10^{-10} \text{m}^2/\text{s}$  en el secado de pimienta. Los valores de difusividad efectiva que se obtuvo en el secado de granos de quinua, son menores que los obtenidos en los cereales mencionados esto puede ser debido a el diámetro del grano de quinua es menor por lo tanto la difusividad será más lenta.

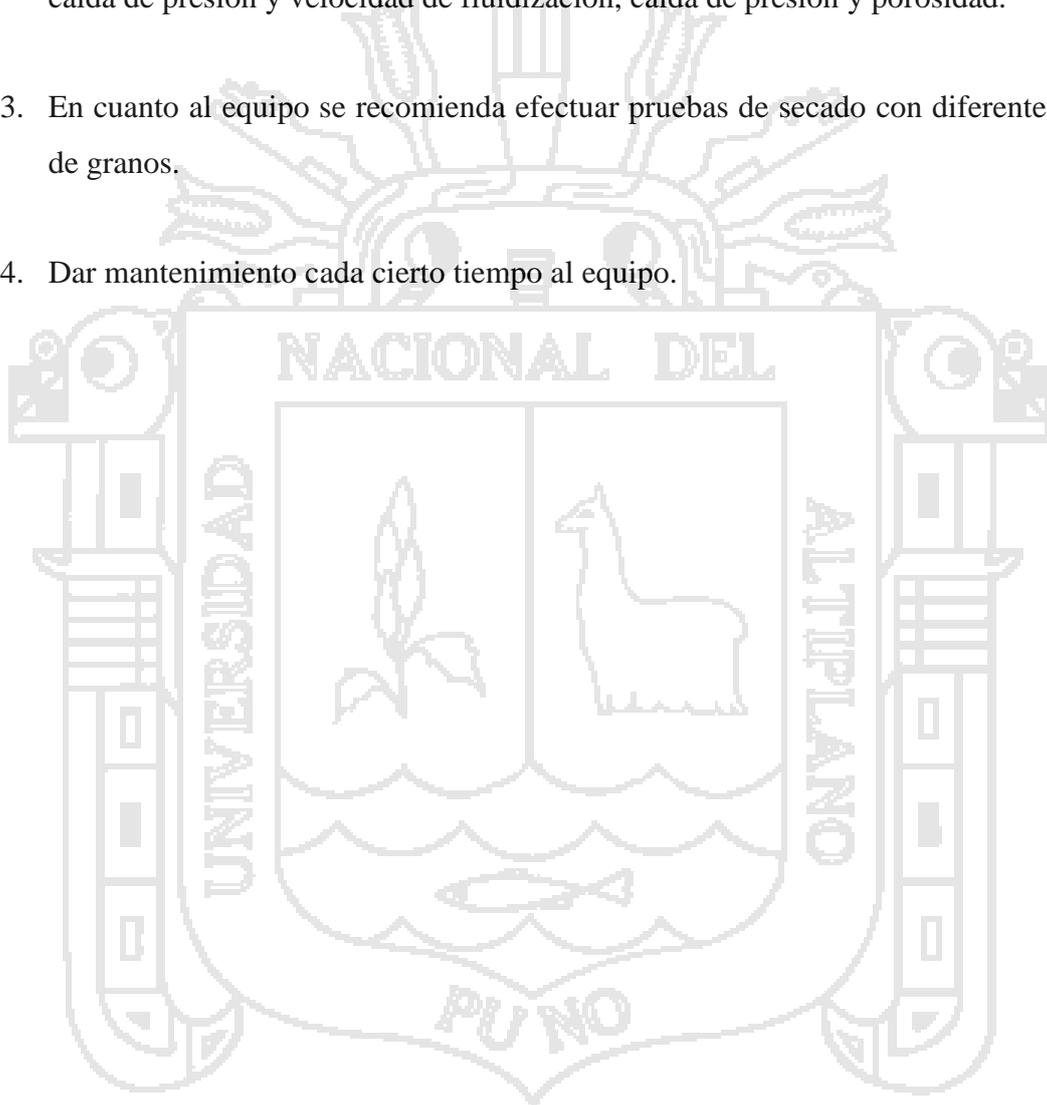
En tanto Gely *et al.*, (2006) en su estudio difusividad de la humedad en granos de quinua obtiene valores de  $2.53 \times 10^{-12}$  ( $30^\circ\text{C}$ , 12.87% bh) y  $7.67 \times 10^{-11}$  ( $90^\circ\text{C}$ , 23.44% bh); como se puede ver la temperatura y la humedad a la cual son sometidas los granos de quinua para su secado son factores importantes en la difusividad de humedad.

## V CONCLUSIONES

- a) A mayor presión la velocidad mínima de fluidización disminuye de igual manera sucede con la temperatura, según la variación del número de Reynolds el tipo de flujo que se presentó es de transición, tipo de fluidización de burbujeo por lo tanto la porosidad no varió finalmente los granos de quinua se clasifican en el grupo D.
- b) La humedad removida de los granos de quinua por el equipo es 25.44 % de humedad en base seca a 35°C, 17m/s y 50g.
- c) En la velocidad de secado de los granos de quinua mostraron un comportamiento de tres periodos: velocidad de secado constante, primer periodo de velocidad decreciente y segundo periodo de velocidad decreciente, las condiciones externas óptimas para 50g de cantidad de lecho que influyeron son la temperatura a 35°C y velocidad de flujo de aire de 17 m/s. afectaron considerablemente en el secado de granos de quinua.
- d) El tratamiento en el cual habrá mayor difusividad de humedad será a 35°C, 17m/s y cantidad de 30g con un valor promedio de  $1.48489E-12m^2/s$ .

## VI RECOMENDACIONES

1. Se recomienda realizar un análisis físico – químico después de realizar el secado en el prototipo de lecho fluidizado.
2. Se recomienda implementar con un sensor de presión para construir las curvas de caída de presión y velocidad de fluidización, caída de presión y porosidad.
3. En cuanto al equipo se recomienda efectuar pruebas de secado con diferentes tipos de granos.
4. Dar mantenimiento cada cierto tiempo al equipo.



**VII BIBLIOGRAFIA**

1. Alvarado, J. y Aguilera, J. M., (2001): *"Métodos para Medir las Propiedades Físicas en la Industria de los Alimentos"*, Editorial Acribia, S.A.
2. Brennan, J. G., Butters, J. R., Cowell, N. D. y Lilly, A.E.U., (1980). *"Las Operaciones de la Ingeniería de los Alimentos"*. 2da. ed. Acribia, Zaragoza, España.
3. Bueno, J.; Iglesias, O.; García, A., (1994). *"Equilibrio de secado (II). Diagrama de equilibrio ternario"*; Ingeniería Química.
4. Bueno, J.; Iglesias, O.,(1993) *"El secado. El secado como operación básica"*; Ingeniería química.
5. Caballero, F.V., (1999). *"Secado de amaranto: Simulación y modelado en lecho fluidizado"*. Tesis. División de Ciencias Básicas e Ingeniería. Universidad Autónoma Metropolitana Iztapalapa.
6. Carbajal, V.L., (2008). *"Estudio experimental del Secado de Maíz Precocido en un Lecho Fluidizado con aire Operando en Condiciones de Vacío"*. Departamento de Ingeniería Industrial y mecánica, Escuela de Ingeniería y Ciencias. Universidad de las Américas Puebla, México.
7. Clemente, G.; Bon. J.; Sanjuan, N.; Benedito, J.; "La concentración durante el secado de los alimentos"; Alimentación. Equipos y Tecnología, Enero-Febrero, 1999.
8. Condorhuaman, C., (2001). *"Secado de Granos, Perdida de Presión en Lecho Surtidor"*, Tesis. Departamento Académico de Operaciones Unitarias, Facultad de Química e Ingeniería Química. Universidad Nacional Mayor de San Marcos.
9. Correa M.C., (1982). *"Diseño, Construcción y ensayo de una instalación experimental para congelar alimento en lecho Fluidizado"*. Universidad de concepción.

10. Davidson, J.F., y Harrison D., (1963). "*Fluidised particles*". Cambridge. University press.
11. Davila, N.J.R., (2004). "*Estudio Experimental del Efecto de la Porosidad de Partículas sobre el Proceso de Secado en un Lecho Fluidizado a Vacío empleando Aire*". Tesis Licenciatura. UDLAP.
12. Ergun, S., (1952). "*Fluid flow through packed columns*". Chem. Eng. Prog.
13. Foust, A., (1998). "*Principios de Operaciones Unitarias*". Compañía editorial Continental, México, México.
14. Geankoplis, C. J., (1998). "*Procesos de transporte y operaciones unitarias*". 3a ed. México.
15. Geankoplis, J. CH, (1995). "*Procesos de transporte y operaciones unitarias*". Ed. México, D.F.
16. Geankoplis, C. J.,(1993). "*Procesos de transporte y operaciones unitarias. Teoría de la difusión molecular*". Ed. México, D.F.
17. Geldart, D., (1990). "*Estimation of Basic Particle Properties for Use in Fluid-Particle Process Calculations*". Powder Technology.
18. Geldart, D., (1973). "*Types of Gas Fluidization*". Powder Technology.
19. Gely, M.C. y Santalla, E.M., (2006). "*Moisture diffusivity in quinoa (Chenopodium quinoa Willd) seeds: effect of air temperature and initial moisture content of seeds*". Paper. Facultad de Ingeniería UNCPBA. Provincia de Buenos Aires, Argentina.
20. Guameros, M., (2005). "*Experimentación de Mejoras en la Operación de un Sistema de Secado del grano de pimienta en Lecho Fluidizado al Vacío con Vapor Sobre Calentado*". Universidad de las Américas Puebla, México.
21. Hart, F.L. y Fisher, H.J., (1971). "*Modern Food Analysis*". Spring – Verlag, New York.

22. Heldman, D. R., (1977). "*Food processing engineering*". AVI. Westport conn.
23. León, J., (2003). "*Cultivo de la Quinoa*". Universidad Nacional del Altiplano Puno-Perú.
24. Kent, N., (1983). "*Technology of Cereals*". Third Edition Pergamon Press. Oxford, New York.
25. Kunii, D. y Levenspiel, O., (1991). "*Fluidization Engineering*". Edit. Butterworth-Heinemann Series Editors, 2nd. Edition.
26. León, J., (2003). "Cultivo de la quinua en Puno-Perú. Descripción, manejo y producción".
27. Manquilef, N.E., (2006). "*Diseño, montaje y puesta en marcha de un lecho fluidizado para laboratorio de operaciones unitarias*". Tesis. Facultad de Ingeniería. Universidad Católica de Telemuco.
28. Mazariegos, B.D., (2006). "*Secado de Arroz con Cascara en un Lecho Fluidizado al Vacío, Empleando Vapor Sobre Calentado*". Departamento de Ingeniería Industrial y mecánica, Escuela de Ingeniería y Ciencias. Universidad de las Américas Puebla, México.
29. Mc Cabe, W.L., (1991). "*Operaciones Básicas de la Ingeniería Química*". Mc Graw-Hill, Madrid, España.
30. Méndez, C., (1998). "*Gasificado de aserrín en lecho fluidizado*". Universidad de concepción.
31. Medina, W., (2000): "*Determinación de las propiedades físicas, mecánicas y termales de quinua (Chenopodium quinoa wild) variedad Blanca de Juli y Kamiri*". Tesis. Universidad de Concepción. Chillan - Chile.
32. Mujica, A. y Jacobsen, S.E., (2000): "*Potencial y Perspectivas futuras de la quinua (Chenopodium quinoa wild) en el Perú*", Revista Mosaico.

33. Mujumdar, A.S., (1987). *“Handbook of Industrial Drying”*. Marcel Dekker, Inc., Nueva York and Basel.
34. Mujumdar, A.S., (2000). *“Handbook of Industrial Drying”*. Marcel Dekker, Inc., Nueva York and Basel.
35. Nonhebel, G. y Moss, A., (1979). *“El secado de solidos en la industria química”*; Editorial Reverte S. A.
36. Pell, M., (1990). *“Gas Fluidization”*. Elsevier. USA.
37. Peña, M.A., (1993). *“Diseño de una Columna de lecho fluidizado”*. Universidad de concepción.
38. Perry, R., (1992). *“Manual del Ingeniero Químico”*. 6ta ed. Tomo 2, Mc Graw Hill, México pp20-2 a 20-84.
39. Perry, R., (1984). *“Perry’s Chemical Engineers Handbook”*. Sexta Edición. Mc Graw – Hill, México, México.
40. Pérez, C., (2000). *“Estudio del proceso de secado de trigo en un sistema de Lecho Vibrofluidizado”*. Tesis de Maestría en Ingeniería Química. Universidad Autónoma Metropolitana Unidad Iztapalapa.
41. Pérez, A. C., Cruz. O. J., Vizcarra, M., y Vernon, C.J.E., (2006). *“Modelamiento del Proceso de Secado de Pimienta Gorda (Pimienta dioica L. Merrill) en Lecho Fluidizado”*. Tesis. Universidad Autónoma del Estado de México.
42. Reay, D. y Allen, R.W.K., (1986). *“Predicting the Performance of a Continiuous Well – Mixed Fluid Bed Dryer from Batch Tests”*. 3rd International Drying Symposium, Journal Separation Processes Technology.
43. Reay, D. y Allen, R.W.K., (1982). *“Proceedings of the Third International Drying Symposium”*. Birmingham.

44. Repo-Carrasco, R. (1991). "*Contenido de aminoácidos en algunos granos andinos*".  
En: Avances en Alimentos y Nutrición Humana. Programa de Alimentos  
Enriquecidos. Universidad Nacional Agraria La Molina. Publicación 01/91.
45. Romero, L.M., (2006). "*Estudio Experimental del Secado de Semillas de Cilantro en un Lecho Fluidizado al Vacío Utilizando Aire*". Tesis de Licenciatura.  
Universidad de las Américas Puebla. México.
46. Sit, S. P. y Grace, J. R., (1981). "*Effect of Bubble interaction on interphase Mass Transfer in Gas Fluidized Beds*", chem Eng Sci, 36, 327-334.
47. Treybal, R., (1988). "*Operaciones de Transferencia de Masa*". McGrawHill.  
Segunda Edición. México D.F.
48. Vizcarra, M. M., Recio, E. A., Vázquez, Ch. L. y Ruiz, M. R., (1998). "*Efecto del contenido de la humedad y temperatura en la determinación de la difusividad del agua durante el secado en lecho fluidizado*".
49. Welti, J., (2001). "*Apuntes de curso de Ingeniería de Alimentos III*". UDLAP. Sin publicar.
50. Zogzas, N.P., Maroulis, Z.B. y Marinou-Kouris, D., (1996). "*Moisture Diffusivity Data Compilation in Foods Tuffs*". Drying Technology.



## ANEXO 1

## PROPIEDADES FISICAS DE LOS GRANOS DE QUINUA

Densidad real

$$m = 0.000625 \text{ Kg}$$

$$n^{\circ} \text{ granos} = 349$$

$$\text{Volumen} = 2.86533\text{E} - 09 \text{ m}^3$$

$$\rho_p = \left( \frac{\frac{m}{n^{\circ} \text{ granos}}}{\text{volumen}} \right)$$

$$\rho_p = 625 (\text{Kg/m}^3)$$

Diámetro promedio de la partícula

$$m = 0.000625 \text{ Kg}$$

$$n^{\circ} \text{ granos} = 349$$

$$\rho_p = 625 (\text{Kg/m}^3)$$

$$d_p = \left[ \frac{6m}{n f \rho_p} \right]^{1/3}$$

$$d_p = 0.001762214 \text{ m}$$

Diámetro efectivo del grano de quinua

Dimensiones características del grano de quinua

base=	0.002m
altura=	0.001m
largo=	0.00201m

$$d_e = \left[ \frac{4}{f} bh \right]^{1/2}$$

$$d_e = 0.001595769 \text{ m}$$

Esfericidad del grano de quinua

$$d_e = W_s d_p$$

$$W_s = \frac{d_e}{d_p}$$

Porosidad del grano de  $cW_s = 0.905547857$

$$v = 1 - \frac{V_{H_2O}}{V_T}$$

$$v = 0.28$$

$$V_T = 5.5528E - 06$$

$$V_{H_2O} = 0.000004$$



**ANEXO 2**

**HIDRODINÁMICA DE FLUIDIZACIÓN**

Porosidad del lecho

$$v = \frac{V_{H_2O}}{V_T}$$

$$v = 0.72$$

Calculo de la densidad y viscosidad del aire

$$\rho = \frac{P * \bar{M}}{R * T}$$

$$\mu = 0.01709 \frac{273.15 + 114}{T + 114} \left( \frac{T}{273.15} \right)^{3/2} \text{ centipoises}$$

Datos obtenidos para hallar la densidad y viscosidad del aire.

17 m/s		15 m/s		12 m/s	
P (mmHg)	1.5	P (mmHg)	1.2	P (mmHg)	0.9
M(g/mol)	28.97	M(g/mol)	28.97	M(g/mol)	28.97
R(mmHg-L/mol-0K)	62.4	R(mmHg-L/mol0K)	62.4	R(mmHg-L/mol0K)	62.4
T (°K)	273.15	T (°K)	273.15	T (°K)	273.15
T °C	25	T °C	25	T °C	25
T °C	35	T °C	35	T °C	35

Datos de densidad y viscosidad del aire

	P = 0.9 mmHg		P = 1.2 mmHg		P = 1.5 mmHg	
	25°C	35°C	25°C	35°C	25°C	35°C
kg/m <sup>3</sup>	0.0014	0.0013	0.001868	0.001807	0.0023	0.0022
μ kg/ms	1.83E-05	1.878E-05	1.83E-05	1.87E-05	1.83E-05	1.87E-05



Cálculo de la velocidad mínima de fluidización y velocidad límite

Ecuación de ERGUN

$$150 \frac{\sim \bar{V}_{0m} (1-v_m)}{W_P^2 d_P^2 v_m^3} + 1.75 \frac{\dots \bar{V}_{0m}^2}{W_P d_P v_m^3} = g(\dots_P - \dots)$$

$$1.75 \frac{\dots}{W_P d_P v_m^3 g(\dots_P - \dots)} \bar{V}_{0m}^2 + 150 \frac{\sim (1-v_m)}{W_P^2 d_P^2 v_m^3 g(\dots_P - \dots)} \bar{V}_{0m} - 1 = 0$$

$$Re_m = \frac{d_P \dots \bar{V}_{0m}}{\sim}$$

$$V_t = \left[ \frac{4(\dots_P - \dots)^2 g^2}{225 \dots \sim} \right]^{1/3} d_P$$

Datos de velocidad mínima de fluidización, número de Reynolds y velocidad terminal

	P = 0.9 mmHg		P = 1.2 mmHg		P = 1.5 mmHg	
	25°C	35°C	25°C	35°C	25°C	35°C
V <sub>0m</sub>	6.05	5.91	6.00	5.86	5.95	5.82
Re	0.73	0.68	0.97	0.90	1.21	1.11
V <sub>T</sub>	47.27	47.38	42.94	43.05	39.87	39.97

Porosidad mínima de fluidización

$$150 \frac{\sim \bar{V}_{0m} (1-v_m)}{W_P^2 d_P^2 v_m^3} + 1.75 \frac{\dots \bar{V}_{0m}^2}{W_P d_P v_m^3} = g(\dots_P - \dots)$$

$$v^3 + 150 \frac{\sim \bar{V}_{0m} v}{W_P^2 d_P^2 g(\dots_P - \dots)} - 150 \frac{\sim \bar{V}_{0m}}{W_P^2 d_P^2 g(\dots_P - \dots)} - 1.75 \frac{\dots \bar{V}_{0m}^2}{W_P d_P g(\dots_P - \dots)} = 0$$

Datos de la porosidad en mínima fluidización

	P = 0.9 mmHg		P = 1.2 mmHg		P = 1.5 mmHg	
	25°C	35°C	25°C	35°C	25°C	35°C
	0.72	0.72	0.72	0.72	0.72	0.72

Tipo de fluidización

$$(Fr)_m (Re)_m * \left( \frac{\dots p \dots}{\dots} \right) \left( \frac{L_m}{D} \right) > 100 \quad \text{Fluidización de Burbujeo}$$

$$(Fr)_m = \frac{V_{0m}^2}{d_p g}$$

Datos del número de Froude y tipo de fluidización

	P = 0.9 mmHg		P = 1.2 mmHg		P = mmHg	
	25°C	35°C	25°C	35°C	25°C	35°C
Fr	2495.39	2381.43	2452.28	2343.31	2410.97	2306.664512
0.005	41168918.07	37414450.45	40106826.79	36519681.01	65162620.6	59443803.93
0.0075	68614863.45	62357417.41	66844711.32	60866135.01	91227668.84	83221325.51
0.01	96060808.83	87300384.38	93582595.84	85212589.02	130325241.2	118887607.9

### ANEXO 3

### PROTOTIPO DE LECHO FLUIDIZADO



## ANEXO 4

## CANTIDADES DE MUESTRA



## ANEXO 5

## PESO DE LAS MUESTRAS





**APÉNDICE 1: Datos Experimentales del Secado de Granos de Quinua a 25°C, 12 m/s y 50g**

Tiempo (s)	X (Kg agua/Kg ss)	Humedad removida (Kg agua/Kg ss)	R (kg H <sub>2</sub> O/s m <sup>2</sup> )
0	0.2916	0	
35	0.22335	0.06825	6.127973525
70	0.17953409	0.11206591	6.127973525
105	0.15793817	0.13366183	2.058016171
140	0.14421051	0.14738949	1.543512128
175	0.13438988	0.15721012	1.234809703
210	0.12686451	0.16473549	1.029008086
245	0.1208317	0.1707683	0.882006931
280	0.11583828	0.17576172	0.771756064
315	0.11160539	0.17999461	0.68600539
De (m <sup>2</sup> /s)			5.80168E-13

**APÉNDICE 2: Datos Experimentales del Secado de Granos de Quinua a 25°C, 12 m/s y 40g**

Tiempo (s)	X (Kg agua/Kg ss)	Humedad removida (Kg agua/Kg ss)	R (kg H <sub>2</sub> O/s m <sup>2</sup> )
0	0.29905	0	
35	0.2203	0.07875	4.148001968
70	0.18213419	0.11691581	4.148001968
105	0.16290916	0.13614084	1.629572202
140	0.14990018	0.14914982	1.222179151
175	0.14014116	0.15890884	0.977743321
210	0.1323691	0.1666809	0.814786101
245	0.12593227	0.17311773	0.698388086
280	0.12045169	0.17859831	0.611089576
315	0.1156882	0.1833618	0.543190734
De (m <sup>2</sup> /s)			5.63527E-13

**APÉNDICE 3: Datos Experimentales del Secado de Granos de Quinua a 25°C, 12 m/s y 30g**

Tiempo (s)	X (Kg agua/Kg ss)	Humedad removida (Kg agua/Kg ss)	R (kg H <sub>2</sub> O/s m <sup>2</sup> )
0	0.30615	0	
35	0.22565	0.0805	2.847422924
70	0.19164497	0.11450503	2.847422924
105	0.17279084	0.13335916	1.299808822
140	0.15941363	0.14673637	0.974856617
175	0.14903745	0.15711255	0.779885293
210	0.1405595	0.1655905	0.649904411
245	0.13339149	0.17275851	0.557060924
280	0.12718228	0.17896772	0.487428308
315	0.12170537	0.18444463	0.433269607
De (m <sup>2</sup> /s)			5.37201E-13

**APÉNDICE 4: Datos Experimentales del Secado de Granos de Quinua a 25°C, 15 m/s y 50g**

Tiempo (s)	X (Kg agua/Kg ss)	Humedad removida (Kg agua/Kg ss)	R (kg H <sub>2</sub> O/s m <sup>2</sup> )
0	0.30605	0	
35	0.26055	0.0455	4.83787384
70	0.21698259	0.08906741	4.83787384
105	0.18799183	0.11805817	4.83787384
140	0.16742257	0.13862743	2.46501191
175	0.1514678	0.1545822	1.97200953
210	0.13843181	0.16761819	1.64334127
245	0.12741004	0.17863996	1.40857823
280	0.11786254	0.18818746	1.23250595
315	0.10944106	0.19660894	1.09556085
De (m <sup>2</sup> /s)			8.40665E-13

**APÉNDICE 5: Datos Experimentales del Secado de Granos de Quinua a 25°C, 15 m/s y 40g**

Tiempo (s)	X (Kg agua/Kg ss)	Humedad removida (Kg agua/Kg ss)	R (kg H <sub>2</sub> O/s m <sup>2</sup> )
0	0.293	0	
35	0.23175	0.06125	3.370251599
70	0.19636002	0.09663998	3.370251599
105	0.17345124	0.11954876	2.777679889
140	0.1571972	0.1358028	1.564759671
175	0.14458959	0.14841041	1.251807737
210	0.13428842	0.15871158	1.043173114
245	0.12557891	0.16742109	0.894148383
280	0.11803439	0.17496561	0.782379836
315	0.11137965	0.18162035	0.695448743
De (m <sup>2</sup> /s)			6.76982E-13

**APÉNDICE 6: Datos Experimentales del Secado de Granos de Quinua a 25°C, 15 m/s y 30g**

Tiempo (s)	X (Kg agua/Kg ss)	Humedad removida (Kg agua/Kg ss)	R (kg H <sub>2</sub> O/s m <sup>2</sup> )
0	0.3017	0	
35	0.2457	0.056	3.829292898
70	0.1998963	0.1018037	3.829292898
105	0.17394654	0.12775346	1.795419381
140	0.15553488	0.14616512	1.346564535
175	0.1412537	0.1604463	1.077251628
210	0.12958512	0.17211488	0.89770969
245	0.11971947	0.18198053	0.769465449
280	0.11117347	0.19052653	0.673282268
315	0.10363535	0.19806465	0.598473127
De (m <sup>2</sup> /s)			7.77151E-13

**APÉNDICE 7: Datos Experimentales del Secado de Granos de Quinua a 25°C, 17 m/s y 50g**

Tiempo (s)	X (Kg agua/Kg ss)	Humedad removida (Kg agua/Kg ss)	R (kg H <sub>2</sub> O/s m <sup>2</sup> )
0	0.3001	0	
35	0.2406	0.0595	6.61176091
70	0.19289531	0.10720469	6.61176091
105	0.16810168	0.13199832	2.53412439
140	0.15170599	0.14839401	1.90059329
175	0.13959688	0.16050312	1.52047463
210	0.13006438	0.17003562	1.2670622
245	0.12224097	0.17785903	1.08605331
280	0.11562885	0.18447115	0.95029665
315	0.10991722	0.19018278	0.84470813
De (m <sup>2</sup> /s)			6.72145E-13

**APÉNDICE 8: Datos Experimentales del Secado de Granos de Quinua a 25°C, 17 m/s y 40g**

Tiempo (s)	X (Kg agua/Kg ss)	Humedad removida (Kg agua/Kg ss)	R (kg H <sub>2</sub> O/s m <sup>2</sup> )
0	0.2999	0	
35	0.24565	0.05425	5.18500246
70	0.1991448	0.1007552	5.18500246
105	0.1736005	0.1262995	2.333251107
140	0.15547653	0.14442347	1.74993833
175	0.14141848	0.15848152	1.399950664
210	0.12993223	0.16996777	1.166625554
245	0.12022073	0.17967927	0.99996476
280	0.11180826	0.18809174	0.874969165
315	0.10438792	0.19551208	0.777750369
De (m <sup>2</sup> /s)			7.6957E-13

**APÉNDICE 9: Datos Experimentales del Secado de Granos de Quinua a 25°C, 17 m/s y 30g**

Tiempo (s)	X (Kg agua/Kg ss)	Humedad removida (Kg agua/Kg ss)	R (kg H <sub>2</sub> O/s m <sup>2</sup> )
0	0.28895	0	
35	0.22595	0.063	3.632918903
70	0.18230701	0.10664299	3.632918903
105	0.16020916	0.12874084	1.533587388
140	0.14453049	0.14441951	1.150190541
175	0.13236916	0.15658084	0.920152433
210	0.12243264	0.16651736	0.766793694
245	0.11403143	0.17491857	0.657251738
280	0.10675397	0.18219603	0.57509527
315	0.10033479	0.18861521	0.511195796
De (m <sup>2</sup> /s)			7.15691E-13

**APÉNDICE 10: Datos Experimentales del Secado de Granos de Quinua a 35°C, 12 m/s y 50g**

Tiempo (s)	X (Kg agua/Kg ss)	Humedad removida (Kg agua/Kg ss)	R (kg H <sub>2</sub> O/s m <sup>2</sup> )
0	0.29886667	0	
35	0.24986667	0.049	7.418073214
70	0.19666185	0.10220481	7.418073214
105	0.16652228	0.13234439	3.424907509
140	0.14513791	0.15372875	2.568680632
175	0.12855091	0.17031576	2.054944505
210	0.11499834	0.18386833	1.712453754
245	0.10353981	0.19532686	1.467817504
280	0.09361397	0.20525269	1.284340316
315	0.08485877	0.2140079	1.141635836
De (m <sup>2</sup> /s)			9.9471E-13

**APÉNDICE 11: Datos Experimentales del Secado de Granos de Quinua a 35°C, 12 m/s y 40g**

Tiempo (s)	X (Kg agua/Kg ss)	Humedad removida (Kg agua/Kg ss)	R (kg H <sub>2</sub> O/s m <sup>2</sup> )
0	0.29085	0	
35	0.2331	0.05775	5.703502706
70	0.18170082	0.10914918	5.703502706
105	0.15453466	0.13631534	2.481394035
140	0.13525996	0.15559004	1.861045526
175	0.12030934	0.17054066	1.488836421
210	0.1080938	0.1827562	1.240697017
245	0.0977657	0.1930843	1.063454586
280	0.0888191	0.2020309	0.930522763
315	0.08092763	0.20992237	0.827131345
De (m <sup>2</sup> /s)			9.59252E-13

**APÉNDICE 12: Datos Experimentales del Secado de Granos de Quinua a 35°C, 12 m/s y 30g**

Tiempo (s)	X (Kg agua/Kg ss)	Humedad removida (Kg agua/Kg ss)	R (kg H <sub>2</sub> O/s m <sup>2</sup> )
0	0.28915	0	
35	0.2209	0.06825	4.516601879
70	0.16671671	0.12243329	4.516601879
105	0.13605016	0.15309984	1.851526236
140	0.11617861	0.17297139	1.388644677
175	0.10168002	0.18746998	1.110915742
210	0.09035803	0.19879197	0.925763118
245	0.08111825	0.20803175	0.793511244
280	0.07334107	0.21580893	0.694322339
315	0.06664359	0.22250641	0.617175412
De (m <sup>2</sup> /s)			1.10465E-12

**APÉNDICE 13: Datos Experimentales del Secado de Granos de Quinua a 35°C,  
15 m/s y 50g**

Tiempo (s)	X (Kg agua/Kg ss)	Humedad removida (Kg agua/Kg ss)	R (kg H <sub>2</sub> O/s m <sup>2</sup> )
0	0.3034	0	
35	0.2299	0.0735	7.740598137
70	0.17399312	0.12940688	7.740598137
105	0.14216411	0.16123589	3.624565794
140	0.11958107	0.18381893	2.718424346
175	0.1020643	0.2013357	2.174739477
210	0.08775206	0.21564794	1.812282897
245	0.07565123	0.22774877	1.55338534
280	0.06516902	0.23823098	1.359212173
315	0.05592305	0.24747695	1.208188598
De (m <sup>2</sup> /s)			1.3409E-12

**APÉNDICE 14: Datos Experimentales del Secado de Granos de Quinua a 35°C,  
15 m/s y 40g**

Tiempo (s)	X (Kg agua/Kg ss)	Humedad removida (Kg agua/Kg ss)	R (kg H <sub>2</sub> O/s m <sup>2</sup> )
0	0.29855	0	
35	0.2198	0.07875	5.18500246
70	0.1726364	0.1259136	5.18500246
105	0.14368402	0.15486598	2.91347757
140	0.12130287	0.17724713	2.18510818
175	0.10318475	0.19536525	1.74808654
210	0.08815779	0.21039221	1.45673879
245	0.07550316	0.22304684	1.24863325
280	0.06472946	0.23382054	1.09255409
315	0.05547774	0.24307226	0.97115919
De (m <sup>2</sup> /s)			1.33309E-12

**APÉNDICE 15: Datos Experimentales del Secado de Granos de Quinua a 35°C, 15 m/s y 30g**

Tiempo (s)	X (Kg agua/Kg ss)	Humedad removida (Kg agua/Kg ss)	R (kg H <sub>2</sub> O/s m <sup>2</sup> )
0	0.285	0	
35	0.21620706	0.06879294	4.320227885
70	0.1569978	0.1280022	4.320227885
105	0.11452833	0.17047167	4.320227885
140	0.08830753	0.19669247	1.276430966
175	0.07146981	0.21353019	1.021144773
210	0.06084664	0.22415336	0.850953977
245	0.05438207	0.23061793	0.729389123
280	0.05045399	0.23454601	0.638215483
315	0.04763935	0.23736065	0.567302652
De (m <sup>2</sup> /s)			1.58555E-12

**APÉNDICE 16: Datos Experimentales del Secado de Granos de Quinua a 35°C, 17 m/s y 50g**

Tiempo (s)	X (Kg agua/Kg ss)	Humedad removida (Kg agua/Kg ss)	R (kg H <sub>2</sub> O/s m <sup>2</sup> )
0	0.3015	0	
35	0.2385	0.063	8.903468027
70	0.1734264	0.1280736	8.903468027
105	0.13936733	0.16213267	3.748828643
140	0.11520204	0.18629796	2.811621482
175	0.09645798	0.20504202	2.249297186
210	0.08114297	0.22035703	1.874414322
245	0.06819431	0.23330569	1.606640847
280	0.05697767	0.24452233	1.405810741
315	0.0470839	0.2544161	1.249609548
De (m <sup>2</sup> /s)			1.55648E-12

**APÉNDICE 17: Datos Experimentales del Secado de Granos de Quinua a 35°C, 17 m/s y 40g**

Tiempo (s)	X (Kg agua/Kg ss)	Humedad removida (Kg agua/Kg ss)	R (kg H <sub>2</sub> O/s m <sup>2</sup> )
0	0.2933	0	
35	0.2198	0.0735	6.305367018
70	0.16091436	0.13238564	6.305367018
105	0.13009901	0.16320099	2.735148119
140	0.10823518	0.18506482	2.051361089
175	0.09127627	0.20202373	1.641088871
210	0.07741983	0.21588017	1.36757406
245	0.06570438	0.22759562	1.172206337
280	0.05555599	0.23774401	1.025680545
315	0.04660448	0.24669552	0.91171604
De (m <sup>2</sup> /s)			1.47386E-12

**APÉNDICE 18: Datos Experimentales del Secado de Granos de Quinua a 35°C, 17 m/s y 30g**

Tiempo (s)	X (Kg agua/Kg ss)	Humedad removida (Kg agua/Kg ss)	R (kg H <sub>2</sub> O/s m <sup>2</sup> )
0	0.284	0	
35	0.2035	0.0805	4.498494667
70	0.14923967	0.13476033	4.498494667
105	0.1205868	0.1634132	1.932601857
140	0.10025727	0.18374273	1.449451393
175	0.08448846	0.19951154	1.159561114
210	0.0716044	0.2123956	0.966300929
245	0.06071109	0.22328891	0.828257939
280	0.05127487	0.23272513	0.724725696
315	0.04295153	0.24104847	0.644200619
De (m <sup>2</sup> /s)			1.48489E-12

APÉNDICE 19: Tratamientos para el Análisis Estadístico

	T (°C)	V (m/s)	LECHO (g)	REPETICION	HUMEDAD		HUMEDAD REMOVIDA (Kg agua/Kg ss)	VELOCIDAD DE SECADO				De (m <sup>2</sup> /s)
					H <sub>i</sub> (Kg agua/Kg ss)	H <sub>f</sub> (Kg agua/Kg ss)		VC (kg H <sub>2</sub> O/s m <sup>2</sup> )	VD <sub>i</sub> (kg H <sub>2</sub> O/s m <sup>2</sup> )	VD <sub>ff</sub> (kg H <sub>2</sub> O/s m <sup>2</sup> )		
1	25	12	50	1	0.2916	0.111605386	0,179994614	6.28923599	2.0733745	0.69112483	5.9592E-13	
2	25	12	50	2	0.3006	0.112778641	0,187821359	6.77302337	2.11944949	0.70648316	5.9401E-13	
3	25	12	50	3	0.2826	0.110432131	0,172167869	5.32166122	1.98122452	0.66040817	5.5057E-13	
4	25	12	40	1	0.29905	0.115688197	0,183361803	4.27762703	1.6295722	0.54319073	5.4524E-13	
5	25	12	40	2	0.2916	0.111029086	0,180570914	3.88875185	1.7406794	0.58022647	6.5147E-13	
6	25	12	40	3	0.3065	0.120347308	0,186152692	4.27762703	1.51846501	0.506155	4.9388E-13	
7	25	12	30	1	0.30615	0.121705372	0,184444628	2.94560992	1.29045768	0.43015256	5.281E-13	
8	25	12	30	2	0.291	0.110866223	0,180133777	2.94560992	1.45877825	0.48625942	6.1726E-13	
9	25	12	30	3	0.3213	0.132544522	0,188755478	2.65104893	1.15019054	0.38339685	4.6624E-13	
10	25	15	50	1	0.30605	0.109441056	0,196608944	4.83787384	2.45349316	1.0904414	8.2602E-13	
11	25	15	50	2	0.3111	0.103146762	0,207953238	5.32166122	2.72994309	1.21330804	9.6404E-13	
12	25	15	50	3	0.301	0.115735351	0,185264649	4.35408645	2.21159947	0.9829331	7.3193E-13	
13	25	15	40	1	0.293	0.111379646	0,181620354	3.11100148	1.55550074	0.69133366	6.9335E-13	
14	25	15	40	2	0.2888	0.10720336	0,18159664	3.88875185	2.11103672	0.70367891	6.7136E-13	
15	25	15	40	3	0.2972	0.115555932	0,181644068	3.11100148	1.55550074	0.69133366	6.6623E-13	
16	25	15	30	1	0.3017	0.103635351	0,198064649	3.8292929	1.79541938	0.59847313	7.6732E-13	
17	25	15	30	2	0.3004	0.100877633	0,199522367	4.12385389	1.87957966	0.62652655	8.2806E-13	
18	25	15	30	3	0.303	0.106393069	0,196606931	3.53473191	1.7112591	0.5704197	7.3607E-13	
19	25	17	50	1	0.3001	0.109917216	0,190182784	6.77302337	2.53412439	0.84470813	6.7296E-13	
20	25	17	50	2	0.3012	0.108325928	0,192874072	7.25681075	2.53412439	0.84470813	6.9083E-13	
21	25	17	50	3	0.299	0.111508505	0,187491495	5.8054486	2.53412439	0.84470813	6.5264E-13	
22	25	17	40	1	0.2999	0.104387924	0,195512076	5.0553774	2.33325111	0.77775037	7.6821E-13	
23	25	17	40	2	0.2986	0.103025061	0,195574939	5.44425258	2.51842977	0.83947659	8.2716E-13	
24	25	17	40	3	0.3012	0.105750787	0,195449213	5.0553774	2.14807245	0.71602415	7.1334E-13	



25	25	17	30	1	0.28895	0.100334791	0.188615209	3.53473191	1.54293853	0.51431284	7.1851E-13
26	25	17	30	2	0.2907	0.096155932	0.194544068	4.12385389	1.57099196	0.32366399	7.4871E-13
27	25	17	30	3	0.2872	0.10451365	0.18268635	3.24017091	1.48683167	0.49561056	6.7986E-13
28	35	12	50	1	0.298	0.086709625	0.211290375	7.25681075	3.40954918	1.13651639	9.7376E-13
29	35	12	50	2	0.298	0.080304479	0.217695521	7.74059814	3.50169916	1.16723305	1.0356E-12
30	35	12	50	3	0.3006	0.087562197	0.213037803	7.25681075	3.36347419	1.12115806	9.7473E-13
31	35	12	40	1	0.29085	0.080927633	0.209922367	5.83312777	2.48139403	0.82713134	9.5104E-13
32	35	12	40	2	0.2885	0.076925061	0.211574939	5.44425258	2.51842977	0.83947659	1.0044E-12
33	35	12	40	3	0.2932	0.084930206	0.208269794	5.83312777	2.4443583	0.8147861	9.2223E-13
34	35	12	30	1	0.28915	0.066643594	0.222506406	4.41841488	1.85152624	0.61717541	1.0924E-12
35	35	12	30	2	0.2908	0.072077564	0.218722436	5.00753687	1.62709881	0.54236627	9.8855E-13
36	35	12	30	3	0.2875	0.061209625	0.226290375	4.12385389	2.07595366	0.69198455	1.233E-12
37	35	15	50	1	0.3034	0.055923048	0.247476952	7.74059814	3.63992412	1.21330804	1.3362E-12
38	35	15	50	2	0.3079	0.060199334	0.247700666	7.25681075	3.59384913	1.19794971	1.2639E-12
39	35	15	50	3	0.2989	0.051646762	0.247253238	8.22438552	3.63992412	1.21330804	1.4225E-12
40	35	15	40	1	0.29855	0.055477744	0.243072256	5.0553774	2.92582282	0.97527427	1.3359E-12
41	35	15	40	2	0.2958	0.059162197	0.236637803	5.0553774	2.70360843	0.90120281	1.2274E-12
42	35	15	40	3	0.3013	0.05179329	0.24950671	5.44425258	3.11100148	1.03700049	1.436E-12
43	35	15	30	1	0.285	0.047639354	0.237360646	4.41841488	1.28344432	0.5704197	1.5865E-12
44	35	15	30	2	0.276	0.044781584	0.231218416	4.41841488	1.22032411	0.54236627	1.5569E-12
45	35	15	30	3	0.294	0.050497125	0.243502875	4.12385389	1.32552446	0.58912198	1.6133E-12
46	35	17	50	1	0.3015	0.047083898	0.254416102	9.19196029	3.87029907	1.29009969	1.5466E-12
47	35	17	50	2	0.3005	0.046083898	0.254416102	8.32648351	3.50588779	1.16862926	1.5763E-12
48	35	17	50	3	0.2971	0.633249666	0.254416102	9.19196029	3.87029907	1.29009969	1.5466E-12
49	35	17	40	1	0.2933	0.045704479	0.247595521	6.61087814	2.81471562	0.93823854	1.4859E-12
50	35	17	40	2	0.2913	0.046404479	0.244895521	5.69434478	2.57601311	0.85867104	1.4795E-12
51	35	17	40	3	0.2953	0.047704479	0.247595521	6.61087814	2.81471562	0.93823854	1.4562E-12
52	35	17	30	1	0.284	0.044519915	0.239480085	4.41841488	1.96373995	0.65457998	1.4517E-12
53	35	17	30	2	0.281	0.03791477	0.24308523	4.36409324	1.87032568	0.62344189	1.604E-12
54	35	17	30	3	0.287	0.046419915	0.240580085	4.71297587	1.96373995	0.65457998	1.3989E-12

**APÉNDICE 20: Resultados de Análisis Estadístico para Humedad Inicial**

Promedio de la humedad inicial en base seca

N° muestras	Promedio de Hi
54	0.296073

**APÉNDICE 21: Análisis de Varianza de Humedad Removida**

F. de V.	S. de C.	G.L.	C.M.	F.C	Significancia	
A: temperatura	0.0291348	1	0.0291348	1402.65	0.0000	**
B: velocidad	0.00453063	2	0.00226531	109.06	0.0000	**
C: lecho	0.000126717	2	0.0000633585	3.05	0.0597	ns
AB	0.00131018	2	0.000655091	31.54	0.0000	**
AC	0.0000933722	2	0.0000466861	2.25	0.1203	ns
BC	0.000526977	4	0.000131744	6.34	0.00006	**
ABC	0.000532692	4	0.000133173	6.41	0.0005	**
RESIDUAL	0.000747764	36	0.0000207712			
TOTAL	0.0370032	53				

**APÉNDICE 22: Análisis de varianza del Periodo de Velocidad de Secado Constante**

F. de V.	S. de C.	G.L.	C.M.	F.C	Significancia	
A: temperatura	32.6706	1	32.6706	186.33	0.0000	**
B: velocidad	9.26608	2	4.63304	26.42	0.0000	**
C: lecho	83.4652	2	41.7326	238.01	0.0000	**
AB	0.233946	2	0.116973	0.67	0.5194	ns
AC	3.01422	2	1.50711	8.60	0.0009	**
BC	4.54677	4	1.13669	6.48	0.0005	**
ABC	3.21117	4	0.802793	4.58	0.0043	**
RESIDUAL	6.31214	36	0.175337			
TOTAL	142.72	53				

**APÉNDICE 23: Análisis de varianza del Primer Periodo de Velocidad de Secado Decreciente.**

F. de V.	S. de C.	G.L.	C.M.	F.C	Significancia	
A: temperatura	7.2587	1	7.2587	309.25	0.0000	**
B: velocidad	1.07401	2	0.537007	22.88	0.0000	**
C: lecho	16.6725	2	8.33623	355.15	0.0000	**
AB	0.254438	2	0.127219	5.42	0.0088	**
AC	2.77659	2	1.3883	59.15	0.0000	**
BC	0.270864	4	0.0677159	2.88	0.0360	*
ABC	1.23626	4	0.309065	13.17	0.0000	**
RESIDUAL	0.845003	36	0.0234723			
TOTAL	30.3883	53				

**APÉNDICE 24: Análisis de varianza del Segundo Periodo de Velocidad de Secado Decreciente.**

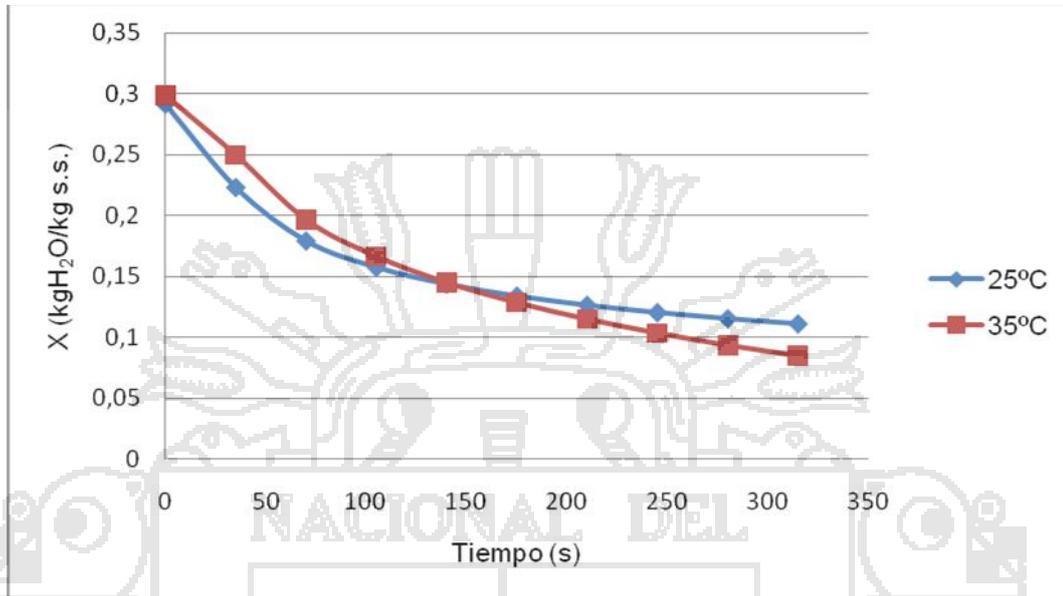
F. de V.	S. de C.	G.L.	C.M.	F.C	Significancia	
A: temperatura	0.635387	1	0.635387	274.79	0.0000	**
B: velocidad	0.217335	2	0.108668	47.00	0.0000	**
C: lecho	2.0382	2	1.0191	440.74	0.0000	**
AB	0.0805083	2	0.0402542	17.41	0.0000	**
AC	0.119509	2	0.0597544	25.84	0.0000	**
BC	0.0607855	4	0.0151964	6.57	0.0004	**
ABC	0.0815428	4	0.0203857	8.82	0.0000	**
RESIDUAL	0.0832414	36	0.00231226			
TOTAL	3.31651	53				

**APÉNDICE 25: Análisis de varianza de Difusividad Efectiva**

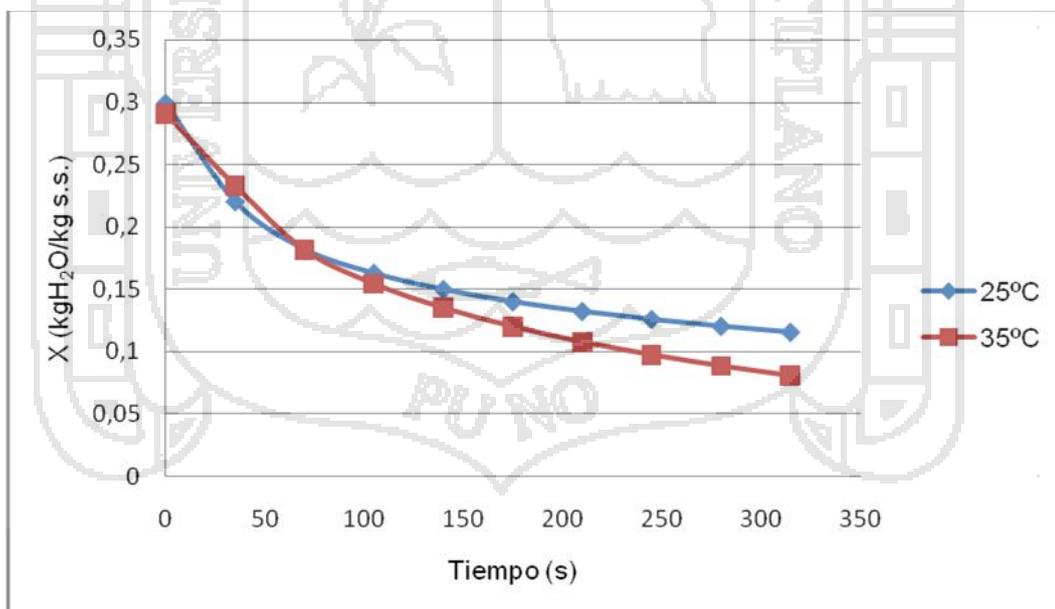
F. de V.	S. de C.	G.L.	C.M.	F.C	Significancia	
A: temperatura	0.0	1	0.0	1194.25	0.0000	**
B: velocidad	0.0	2	0.0	129.46	0.0000	**
C: lecho	0.0	2	0.0	5.07	0.0115	*
AB	0.0	2	0.0	26.83	0.0000	**
AC	0.0	2	0.0	5.01	0.0120	*
BC	0.0	4	0.0	3.28	0.0218	*
ABC	0.0	4	0.0	4.26	0.0063	**
RESIDUAL	0.0	36	0.0			
TOTAL	0.0	53				

**APÉNDICE 26: Gráficos Experimentales Obtenidos para la Determinación de la Velocidad de Secado**

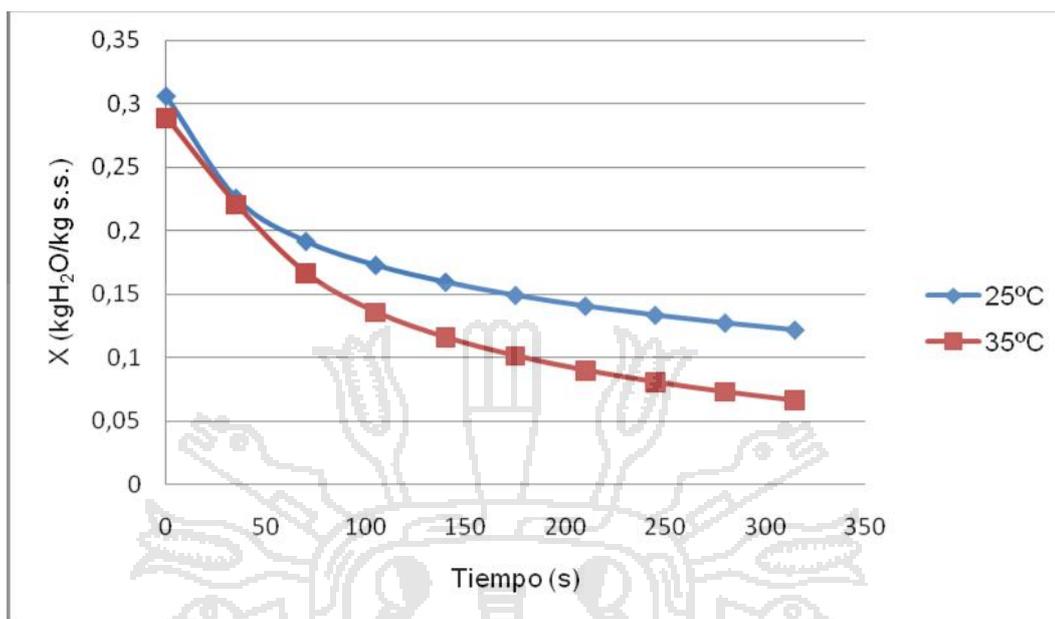
Curvas de secado a 12m/s, 50g de granos de quinua a diferentes temperaturas



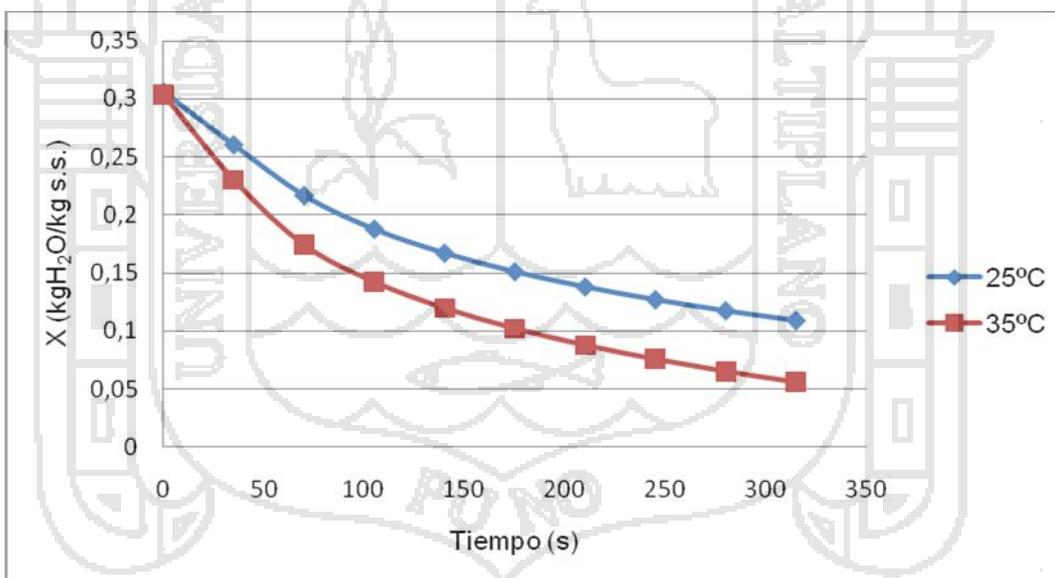
Curvas de secado a 12m/s, 40g de granos de quinua a diferentes temperaturas



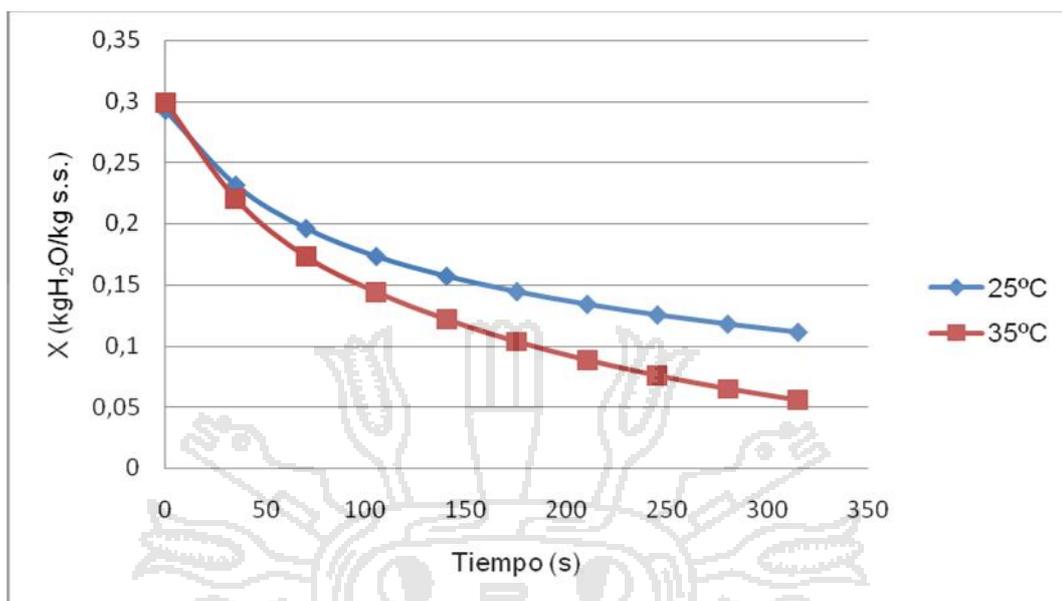
Curvas de secado a 12m/s, 30g de granos de quinua a diferentes temperaturas



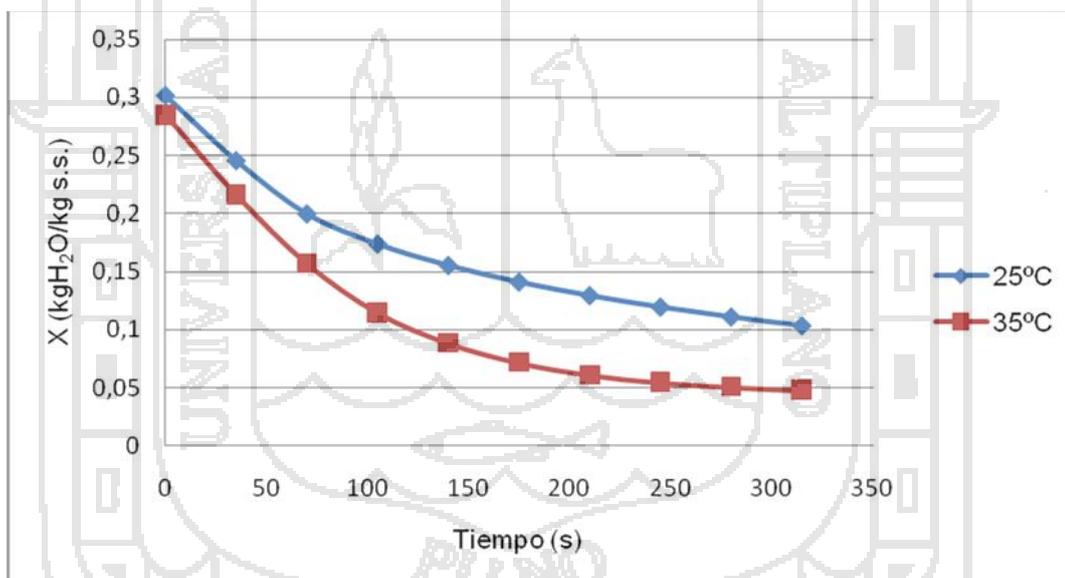
Curvas de secado a 15m/s, 50g de granos de quinua a diferentes temperaturas



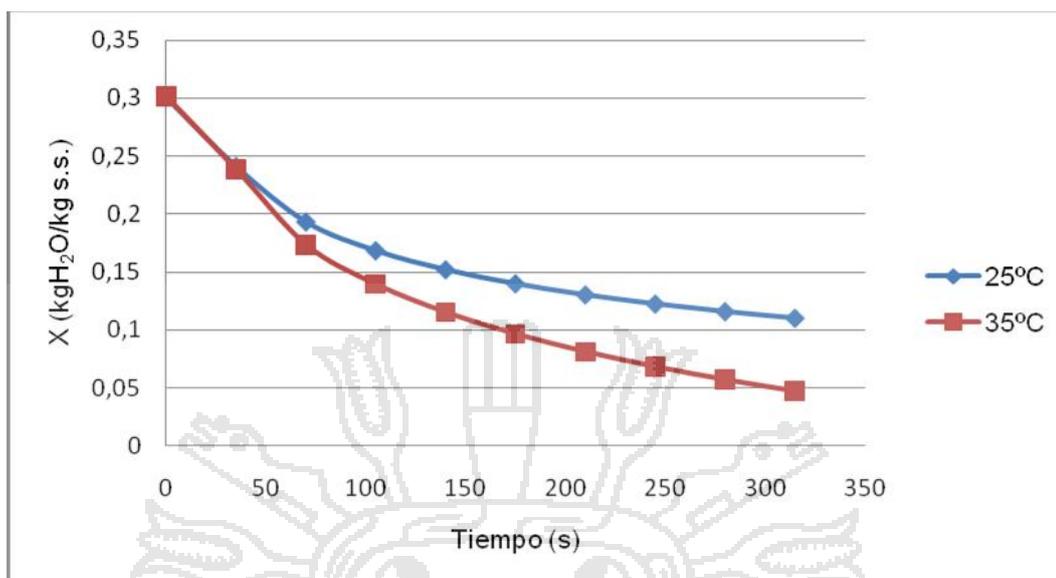
Curvas de secado a 15m/s, 40g de granos de quinua a diferentes temperaturas



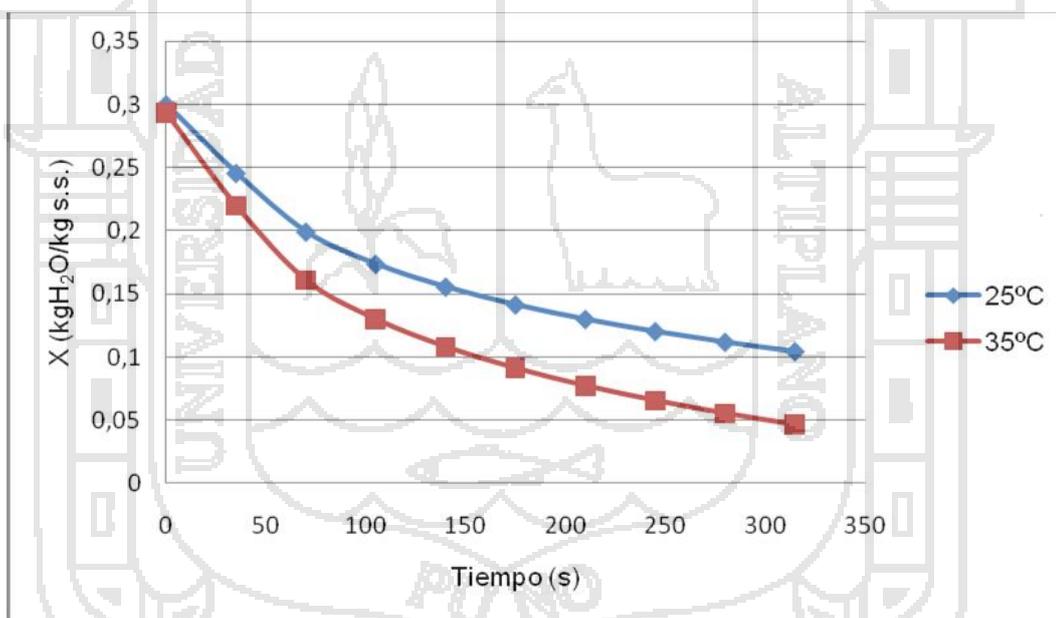
Curvas de secado a 15m/s, 30g de granos de quinua a diferentes temperaturas



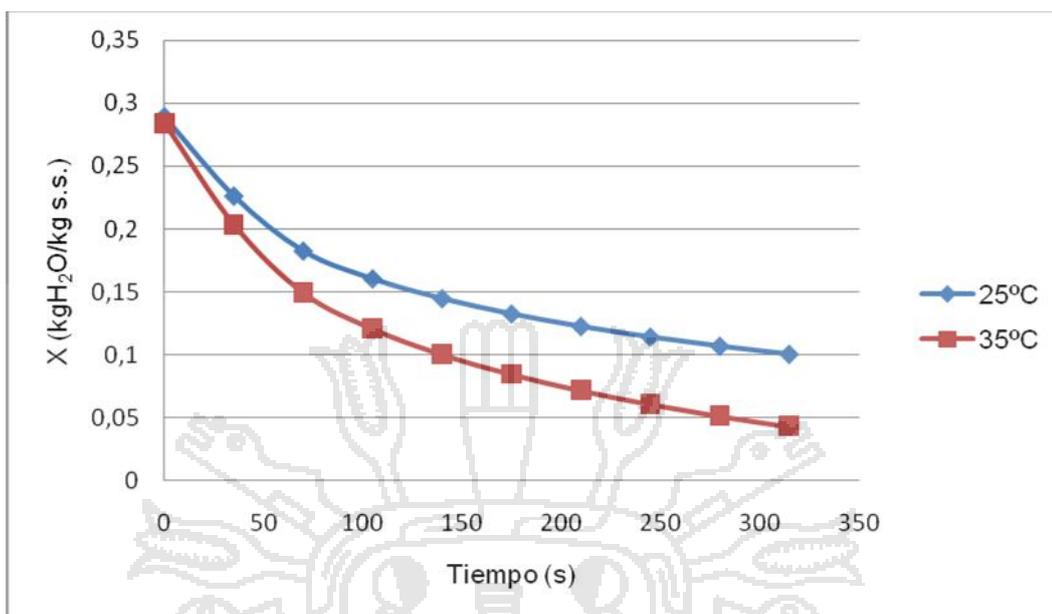
Curvas de secado a 17m/s, 50g de granos de quinua a diferentes temperaturas



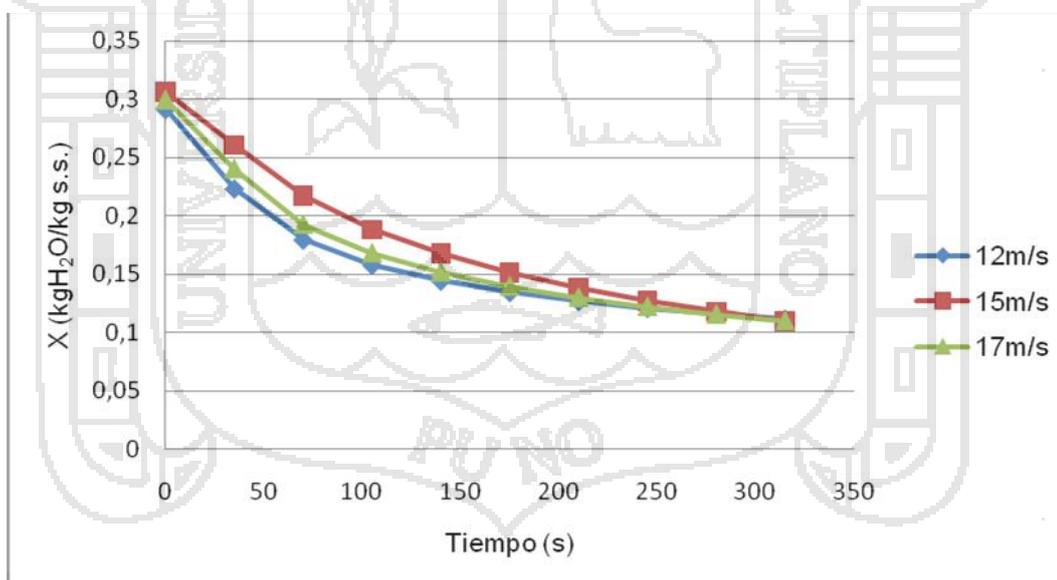
Curvas de secado a 17m/s, 40g de granos de quinua a diferentes temperaturas



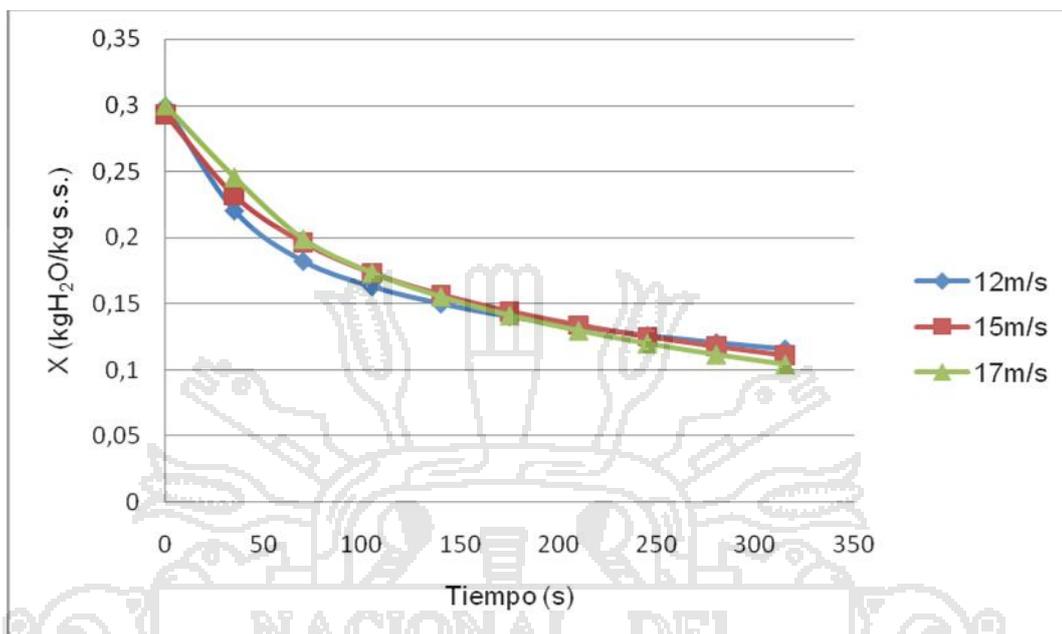
Curvas de secado a 17m/s, 30g de granos de quinua a diferentes temperaturas



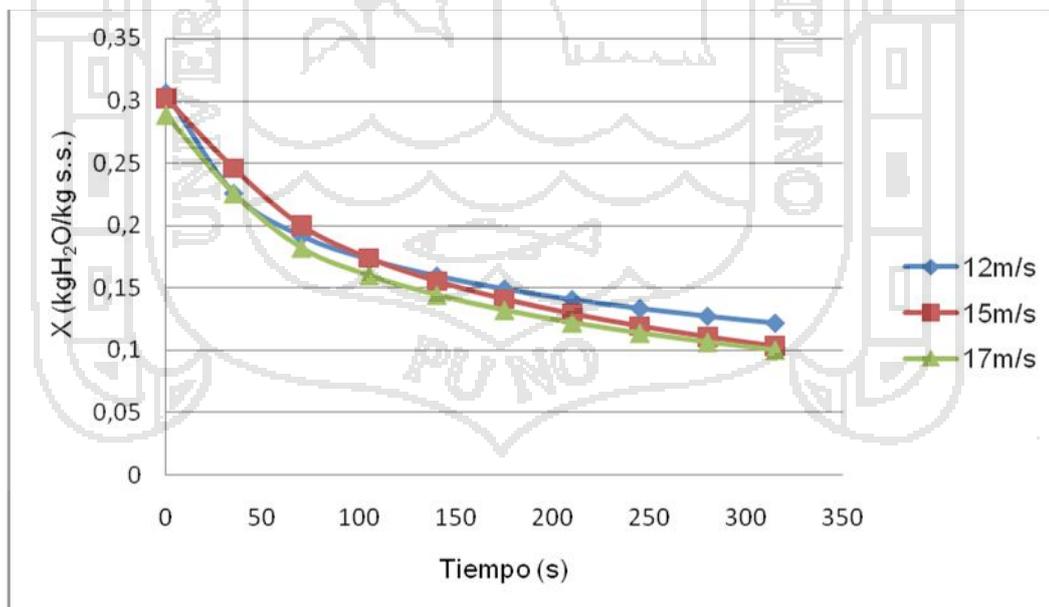
Curvas de secado a 25°C, 50g de granos de quinua a diferentes velocidades de flujo de aire.



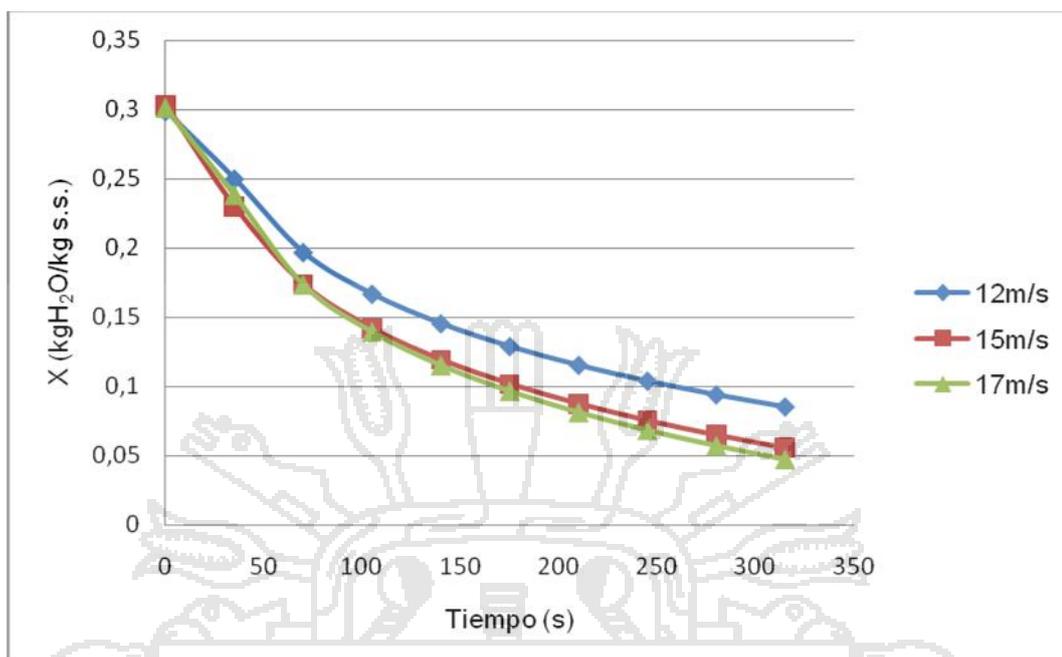
Curvas de secado a 25°C, 40g de granos de quinua a diferentes velocidades de flujo de aire.



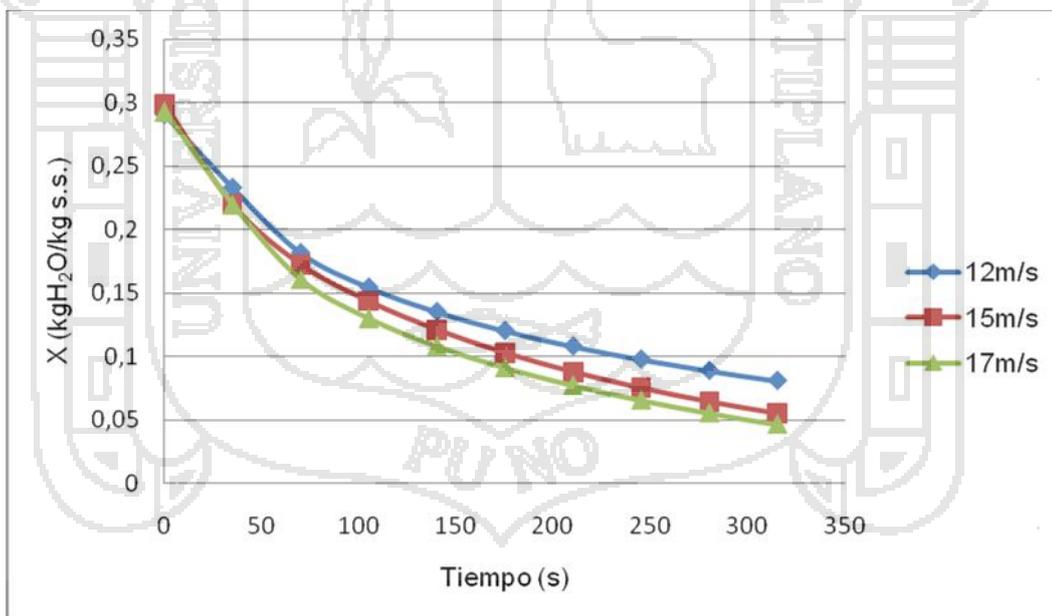
Curvas de secado a 25°C, 30g de granos de quinua a diferentes velocidades de flujo de aire.



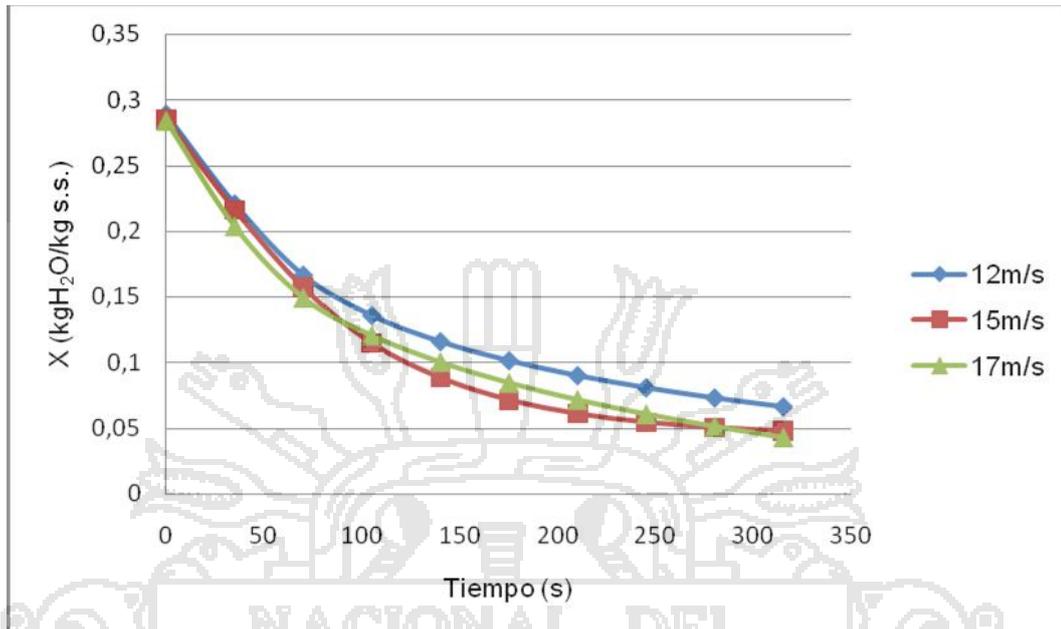
Curvas de secado a 35°C, 50g y diferentes velocidades de flujo de aire.



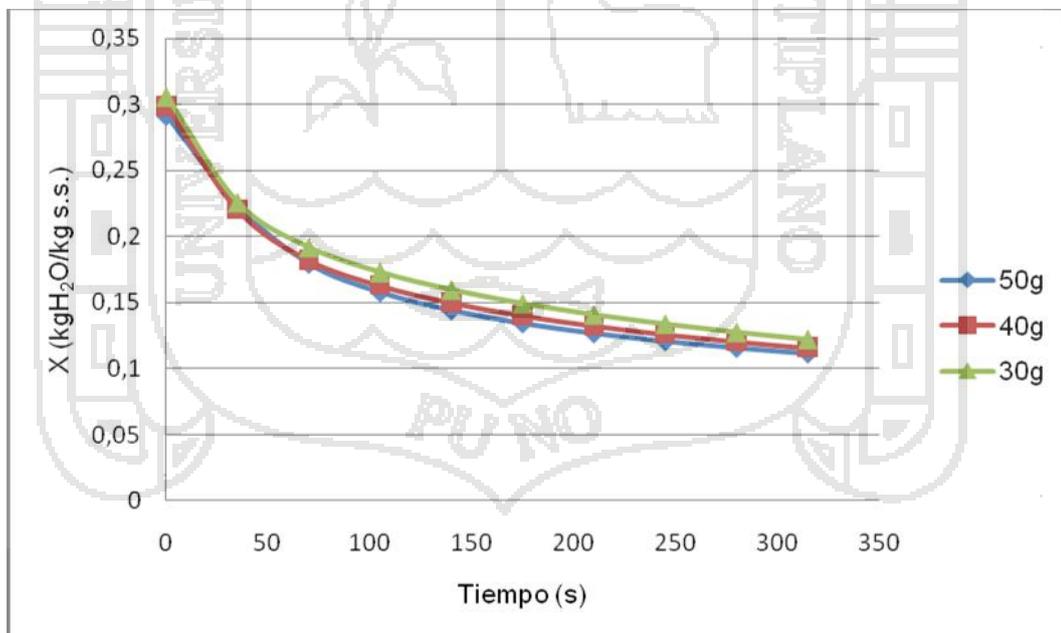
Curvas de secado a 35°C, 40g y diferentes velocidades de flujo de aire.



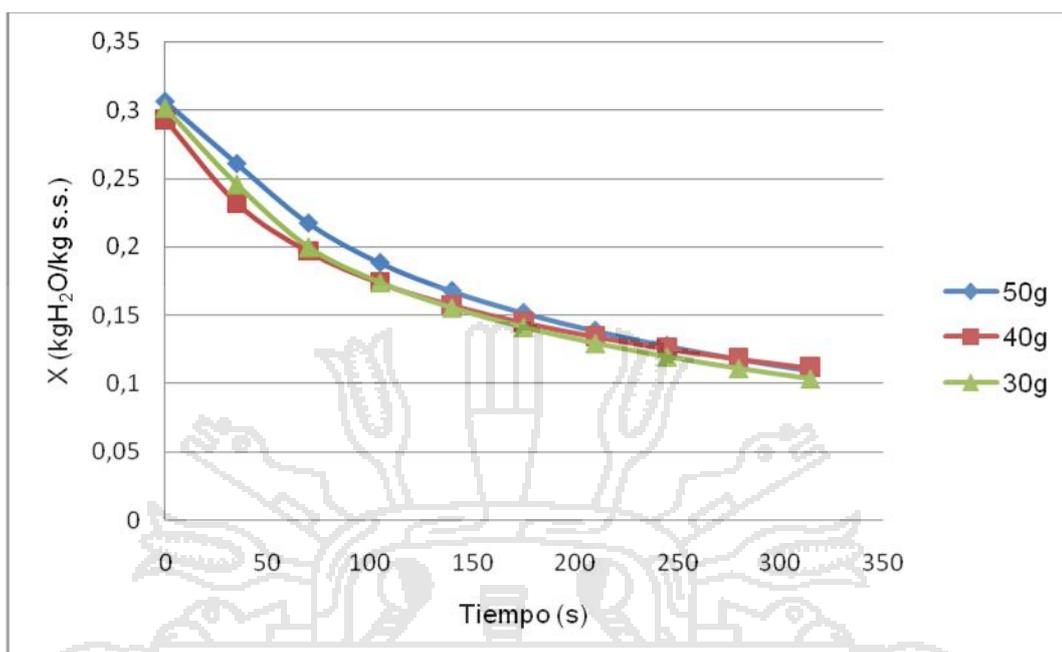
Curvas de secado a 35°C, 30g de granos de quinua a diferentes velocidades de flujo de aire.



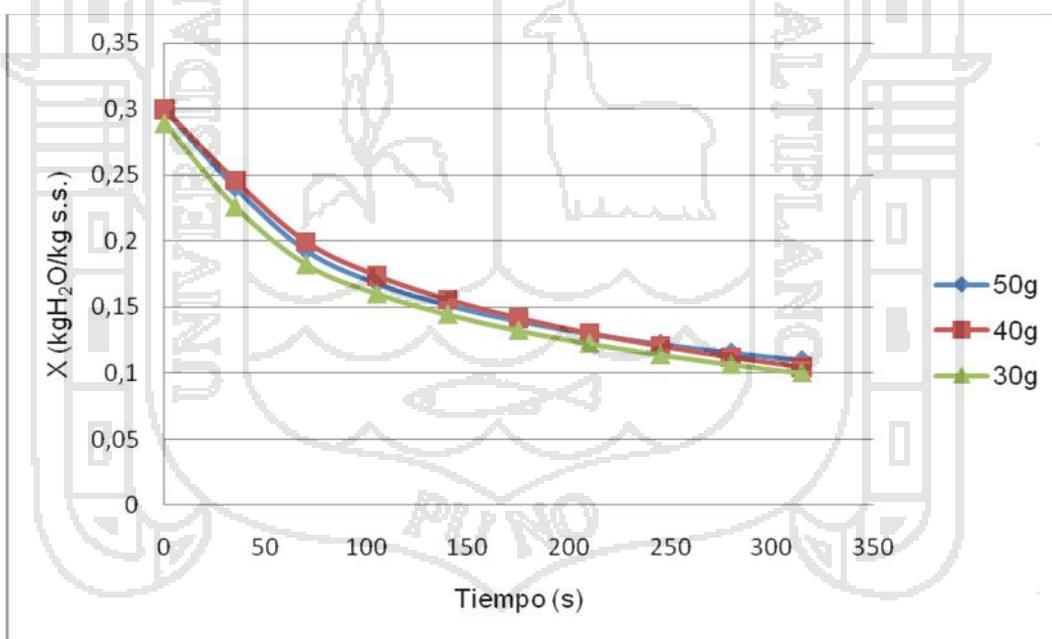
Curvas de secado a 25°C, 12m/s y diferentes cantidades de lecho.



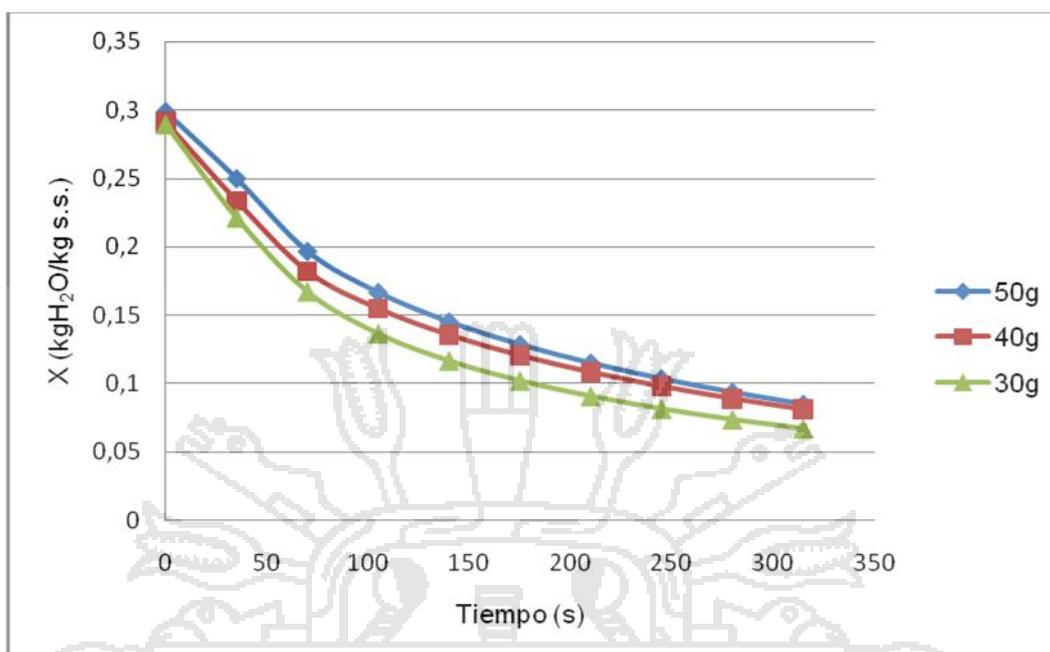
Curvas de secado a 25°C, 15m/s y diferentes cantidades de lecho.



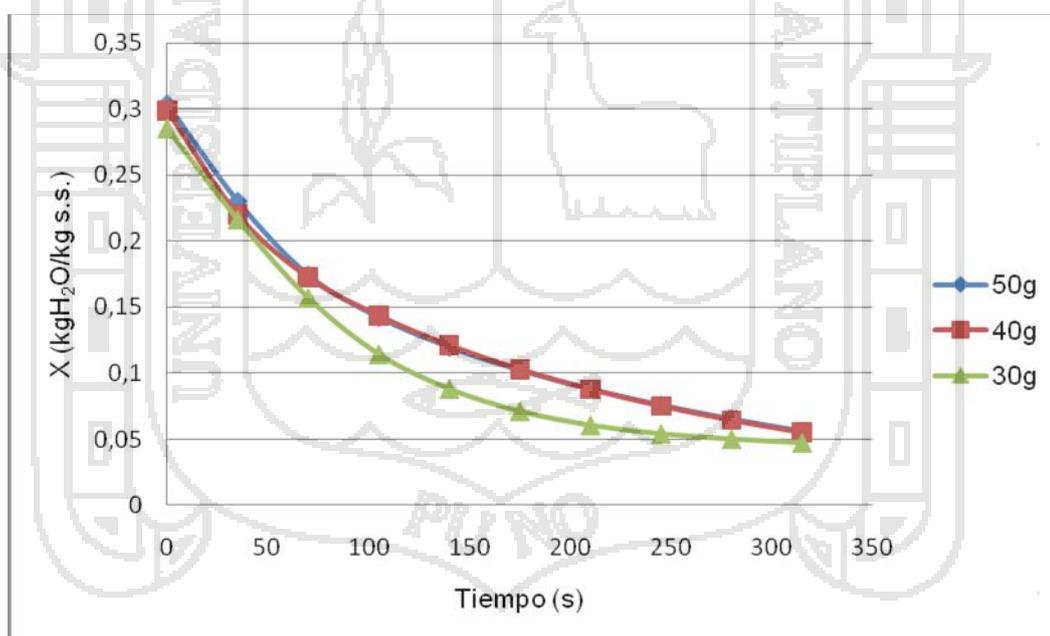
Curvas de secado a 25°C, 17m/s y diferentes cantidades de lecho.



Curvas de secado a 35°C, 12m/s y diferentes cantidades de lecho.



Curvas de secado a 35°C, 15m/s y diferentes cantidades de lecho.



Curvas de secado a 35°C, 17m/s y diferentes cantidades de lecho.

