

UNIVERSIDAD NACIONAL DEL ALTIPLANO

FACULTAD DE CIENCIAS AGRARIAS  
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA AGROINDUSTRIAL

"VALIDACIÓN DE LA ECUACIÓN DE KOZENY-CARMAN ERGUN PARA LA  
DETERMINACIÓN DE CONSTANTES DE TRANSPORTE EN LECHOS EMPACADOS DE  
GRANOS DE CEREALES ANDINOS"

TESIS

PRESENTADA POR:

Bach. JUAN MARCEL LAURA JARAMILLO

Bach. SHEYLA DIANA CARRILLO CUTIPA

PARA OPTAR EL TITULO DE:

INGENIERO AGROINDUSTRIAL

PUNO

PERU

2010

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

"VALIDACION DE LA ECUACION DE KOZENY-CARMAN ERGUN PARA LA DETERMINACION DE  
CONSTANTES DE TRANSPORTE EN LECHOS EMPACADOS DE GRANOS DE CEREALES ANDINOS"

TESIS

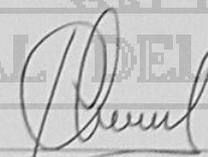
PRESENTADA POR:

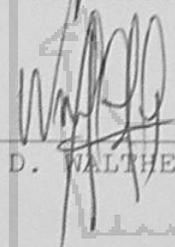
Bach. JUAN MARCEL LAURA JARAMILLO  
Bach. SHEYLA DIANA CARRILLO CUTIPA

PARA OPTAR EL TÍTULO DE:  
INGENIERO AGROINDUSTRIAL

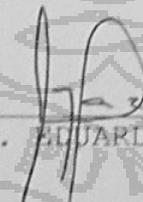
APROBADO POR EL JURADO REVISOR CONFORMADO POR:



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

PRIMER MIEMBRO :   
Ing. Ph. D. WALTHER APARICIO ARAGÓN

SEGUNDO MIEMBRO :  
Ing. M.Sc. ALEJANDRO COLOMA PAXI

DIRECTOR DE TESIS :   
Ing. EDUARDO JUAN MANZANEDA CABALA

PUNO

PERU

2010

Área: Ingeniería y tecnología

Tema: Propiedades físicas y estructurales

## INDICE GENERAL

I. INTRODUCCIÓN .....	1
II. REVISIÓN DE LITERATURA .....	4
2.1 Cañihua.....	4
2.1.1. Descripción Botánica.....	4
2.1.2. Descripción Taxonómica.....	4
2.1.3. Valor Nutricional.....	5
2.1.4. Ecotipos y variedades de Cañihua.....	7
2.2. Kiwicha.....	8
2.2.1. Descripción Botánica.....	8
2.2.2. Descripción Taxonómica.- (Sumar 1997).....	12
2.2.3. Valor Nutricional.....	12
2.3. Quinoa.....	13
2.3.1. Descripción Botánica.....	13
2.3.2. Descripción Taxonómica.....	13
2.3.3. Valor Nutricional.....	14
2.3.4. Características del Grano.....	14
2.3.5. Composición Química.....	16
2.4 CONCEPTOS IMPORTANTES.....	19
2.4.1. Flujo en lechos empacados.....	19
2.4.2. Flujo Laminar.....	20
2.4.3. Flujo turbulento.....	20
2.4.4. Flujo a través de lechos porosos.....	20
2.4.5. Flujo de fluidos a través de lechos fluidificados y empaquetados.....	21
2.4.6. Diámetro equivalente de una partícula; esfericidad.....	23
2.4.7. Modelo de Kozeny-Carman.....	24
2.4.8. Modelo de Ergun.....	29
III. MATERIALES Y MÉTODOS.....	30
3.1. AMBITO DE ESTUDIO.....	30
3.2. MATERIALES Y EQUIPOS .....	31
3.2.1. Materia Prima.....	31
3.2.2. Materiales empleados en la construcción del equipo para la determinación de las constantes Kozeny-Carman y Ergun.....	31
3.2.3. Equipos empleados en la instrumentación y control del equipo para la determinación de las constantes Kozeny-Carman y Ergun.....	32
3.2.4. Materiales y Equipos para la determinación de Propiedades Físicas de los granos de Cañihua, Kiwicha y Quinoa.....	33
3.3. DESCRIPCION DEL EQUIPO PARA LA DETERMINACION DE LAS CONSTANTES DE KOZENY-CARMAN Y ERGUN EN CAÑIHUA, KIWICHA Y QUINUA.....	34
3.3.1. Tolvas de alimentación de granos.....	34
3.3.2. Compresora.....	34
3.3.3. Válvula de asiento.....	34
3.3.4. Válvulas auxiliares.....	35
3.3.5. Manómetro diferencial digital.....	35
3.3.6. Rotámetro.....	35
3.3.7. Rejillas de Plástico.....	36
3.3.8. Tuberías rígidas en tiras.....	37

3.3.9.	Circuito conversor de niveles TTL- (RS-232) .....	37
3.3.10.	Software.....	38
3.4.	METODOLOGIA EXPERIMENTAL .....	40
IV.	RESULTADOS Y DISCUSIONES .....	52
4.1.	DETERMINACION DE PROPIEDADES FISICAS DE LOS GRANOS DE QUINUA, CAÑIHUA Y KIWICHA. ....	52
4.2.	DISEÑO DEL EXPERIMENTO.....	54
V.	CONCLUSIONES .....	73
VI.	RECOMENDACIONES.....	74
	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	77



## RESUMEN

El presente trabajo de investigación titulado, "Validación de la Ecuación de Kozeny-Carman Ergun para la Determinación de Constantes de Transporte en Lechos Empacados de Granos de Cereales Andinos" se realizó en el laboratorio de Ingeniería de la Escuela Profesional de Ingeniería Agroindustrial, Facultad de Ciencias Agrarias de la Universidad Nacional del Altiplano ubicada a 3825 m.s.n.m. El objetivo principal fue hallar las constantes de Kozeny-Carman Ergun en Granos Andinos (Cañihua, Kiwicha y Quinoa). En la investigación se realizaron varias series de experimentos de circulación de aire, a temperatura ambiente ( $14^{\circ}\text{C}$ ), a través de lechos de distintos granos (Cañihua, Kiwicha y Quinoa), contenidos en dos columnas de diferente diámetro (7,62 cm. Y 4,45cm.). Se ensayaron varias alturas de lecho y para cada una de ellas, se estudia la variación de la caída de presión en función de la velocidad volumétrica del aire empleado.

Por otra parte se correlacionan los resultados experimentales mediante la ecuación propuesta por Kozeny-Carman y por la de Ergun, obteniendo diferentes valores de las constantes  $K_0$ ,  $K_1$  y  $K_2$  de la misma para cada tipo de grano estudiado.

Se obtuvieron las constantes de Kozeny para Cañihua (variedad Cupi) columna  $a_1$  entre un rango de 2,870 - 3,328, por otro lado para las constantes de Ergun  $K_1$  entre 2,726 - 3,261; para la constante  $K_2$  entre  $-2,71 \times 10^{-6}$  hasta  $1,20 \times 10^{-5}$  y para la columna  $a_2$  entre un rango de 3,624 - 4,132, por otro lado para las constantes de Ergun

$K_1$  entre 3,869 - 4,396; para la constante  $K_2$  entre -  
 $2,17 \times 10^{-4}$  hasta  $2,83 \times 10^{-5}$ .

Se obtuvieron las constantes de Kozeny para Kiwicha (variedad Oscar Blanco) columna  $a_1$  entre un rango de 4,024 - 4,392, por otro lado para las constantes de Ergun  $K_1$  entre 3,942 - 4,307; para la constante  $K_2$  entre -  
 $1,06 \times 10^{-5}$  hasta  $1,30 \times 10^{-5}$  y para la columna  $a_2$  entre un rango de 3,715 - 4,518, por otro lado para las constantes de Ergun  $K_1$  entre 3,353 - 4,806; para la constante  $K_2$  entre -  
 $1,03 \times 10^{-4}$  hasta  $1,27 \times 10^{-4}$ .

Se obtuvieron las constantes de Kozeny para Quinua (variedad real) columna  $a_1$  entre un rango de 8,331 - 9,575, por otro lado para las constantes de Ergun  $K_1$  entre 7,402 - 8,934; para la constante  $K_2$  entre  $1,36 \times 10^{-5}$  hasta  $3,46 \times 10^{-5}$  y para la columna  $a_2$  entre un rango de 6,625 - 8,785, por otro lado para las constantes de Ergun  $K_1$  entre 7,730 - 10,236; para la constante  $K_2$  entre -  
 $3,37 \times 10^{-4}$  hasta  $5,81 \times 10^{-5}$ . Concluyendo se obtuvieron las constantes de Kozeny - Carman y Ergun  $K_0$ ,  $K_1$  y  $K_2$  para los diferentes lechos de granos estudiados.

Se observa que los valores de las constantes  $K_0$  y  $K_1$  son inferiores para Cañihua, superiores para Kiwicha y Quinua; a los propuestos por Kozeny-Carman y Ergun, para cualquier tipo de partícula; los valores de la constante  $K_2$  son inferiores en todos los granos estudiados.

## I. INTRODUCCIÓN

Frecuentemente la relación propuesta por Kozeny (1927) mencionada por Mc Cabe, et al 1991; y después modificada por Carman (1937,1956); resulta la conocida ecuación Kozeny-Carman.

Desde la primera modificación (Carman 1937) esta ecuación ha sido tomada de varias formas siendo la mas usada:

$$\frac{\Delta p}{L} = \frac{150 V_0 \mu (1 - \epsilon)^2}{\epsilon^3 D_p^2}$$

Donde:

- $\Delta p$  es la Caída de presión en un lecho de relleno
- $L$  es la altura total del lecho
- $V_0$  es la velocidad superficial o de la "torre-vació"
- $\mu$  es la viscosidad del fluido.
- $\epsilon$  es la porosidad de la cama
- $\phi_s$  es la esfericidad de las partículas en la cama llena.
- $D_p$  es el diámetro de la partícula esférica relacionada.

La ecuación de Kozeny-Carman es comúnmente usada en la mecánica de suelos y valida generalmente para arenas, siendo valida también para cualquier tipo de material incluyendo a los alimenticios.

La ecuación de Ergun es la combinación de la ecuación de Kozeny-Carman la región viscosa mas la ecuación de Blake-Plumer para la región turbulenta (Levenspiel 1993).

Los granos andinos Quinua, Kiwicha, Cañihua; como en todos los cereales su comercialización se realiza a una humedad aproximadamente de 12% para lo cual es necesario mantener el contenido de humedad durante el almacenaje, para el diseño de silos, es imprescindible calcular la perdida de presión.

Cuando un gas circula a través de un lecho granular estático, experimenta una perdida de presión que esta íntimamente relacionada con la velocidad del gas, el espesor del lecho y el tamaño y forma de los granos. Para seleccionar los ventiladores o soplantes que han de impulsar el gas a través del lecho granular y para conocer la energía que va a consumir es imprescindible poder calcular esa perdida de presión.

Teniendo en cuenta estos antecedentes se consideraron los siguientes objetivos:

Objetivo General:

- Obtener las constantes de Kozeny-Carman Ergun en lechos empacados de granos de cereales andinos (Quinua, Cañihua y Kiwicha).

Objetivos Específicos:

- Determinar las propiedades físicas (densidad, porosidad, diámetro de partícula) de los granos de Cañihua, kiwicha y Quinua.

- Adecuar los modelos matemáticos de Kozeny-Carman y de Ergun para la obtención de las constantes de dichos modelos, en lechos empacados de granos de cereales andinos.



## II. REVISIÓN DE LITERATURA

### 2.1 Cañihua

#### 2.1.1. Descripción Botánica

La Cañihua es una planta terófito erguida. Su tamaño oscila entre 20 y 60 cm. Su tallo y hojas presentan manchas de color rojo y amarillo, incrementándose en tamaño en las partes inferiores de la planta. Es hermafrodita, se auto poliniza en época de fertilidad. Las numerosas semillas tienen aproximadamente 1 mm de diámetro igual que la semilla de amaranto y poseen una cubierta rugosa. Estas varían en color desde el marrón oscuro al negro. Comparados con los granos convencionales, el embrión es largo en relación al tamaño de la semilla. (Ritva y Repo 1998).

#### 2.1.2. Descripción Taxonómica

La clasificación taxonómica de la Cañihua según Engler citado por Solano (2001):

Reyno: Vegetal.

Sub Reino: Phanerogamae.

División: Angiospermae.

Clase: Dicotyledoneae.

Sub Clase: Archichlamydeae.

Orden: Centrospermales.

Familia: Chenopodiaceae.

Genero: Chenopodium.

Especie: Chenopodium Canihua Cook.

### 2.1.3. Valor Nutricional

Por su alto contenido proteínico, es, generalmente, utilizada por personas vegetarianas o gente que mantiene una dieta baja en carnes. Puede ser consumido por diabéticos, por contener un bajo índice glicémico.

El harina de Cañihua se utiliza para preparar bebidas calientes energizantes en zonas de la sierra y para hacer galletas.

En 100 gramos de Cañihua podemos encontrar un contenido de proteínas parecido al de la Quinoa (15%). Contiene lisina, calcio, fósforo, hierro y un alto índice de tiamina o vitamina B1, vitamina muy importante que ayuda a que los carbohidratos se conviertan en energía en el organismo. (Ritva y Repo 1998).

En la tabla 1 se presenta la composición química de la Cañihua, según el CENAN (1993). Se puede encontrar una gran variación dependiendo de su ecotipo, variedad, madurez biológica, localización de cultivo y composición del suelo:

**Tabla 1. Composición de macro y micro nutrientes de una porción comestible de 100g de Cañihua**

COMPONENTE	Cañihua GRIS	Cañihua PARDA
Energía (Kcal)	344	340
Agua (g)	12,4	12,2
Proteína (g)	14	13,8
Grasa (g)	4,5	3,5
Carbohidratos (g)	64.0	65.2
Fibra (g)	9,8	10,2
Ceniza (g)	5,1	5,3
Calcio (mg)	110	141
Fosforo (mg)	375	387
Hierro (mg)	13	12
Tiamina (mg)	0,47	0,67
Rivoflavina (mg)	0,65	0,3
Niacina (mg)	1,13	1,45
Acido Ascorbico (mg)	1,1	0

Fuente: CENAN - INS - MINSA (1993)

El grano de Cañihua presenta un elevado contenido de proteínas y, al igual que la Quinoa y la Kiwicha, una proporción importante de aminoácidos azufrados (MUJICA 2002).

En la tabla 2 se presenta una comparación de aminoácidos esenciales de la Cañihua y otros granos.

**Tabla 2. Comparación del contenido de aminoácidos esenciales de la Cañihua y otros granos andinos y el patrón de la FAO (g aá/g proteínas)**

Aminoácidos	Cañihua Gris <sup>1</sup>	Cañihua Parda <sup>1</sup>	Quinu a <sup>1</sup>	Amarant o <sup>1</sup>	FAO <sup>2</sup>
Isoleucina	41	43	44	39	28
Lisina	39	39	46	45	58
Metionina + Cisteína	11	11	14	13	25
Fenilalanina + Triosina	23	23	25	25	63
Treonina	29	31	28	30	34
Triptofano	5	5	8	6	11
Valina	27	30	21	27	35
Histidina	17	-	17	14	19

Fuente: <sup>1</sup>Collazos (1975)

<sup>2</sup>FAO/OMS/ONU (1985)

#### 2.1.4. Ecotipos y variedades de Cañihua

Existen dos ecotipos de Cañihua: Saihua, una planta erecta con crecimiento determinado y lasta, planta semierecta y con crecimiento no determinado. Cada uno de ellos se clasifican según el color de la semilla. La Cañihua erecta normalmente crece mas rápido durante aproximadamente 70 días y la producción de materia seca termina en este tiempo. La variedad semierecta continua

creciendo pasando los 70 días y produce mas materia seca que la erecta se conservan mas 380 accesiones, en colecciones de germoplasma de las estaciones experimentales del instituto nacional de investigación agraria (INIA), centros experimentales de Camacani y Illpa de la universidad nacional del altiplano (Puno), estación experimental de la estación experimental de la universidad San Antonio de Abad en K`ayra (Cusco), en el Peru y el instituto Boliviano de tecnología agropecuaria- IBTA Patacamaya, Bolivia (MUJICA 2000).

Las principales variedades cultivadas son:

- Vallenas.
- Variedad Ramis, tipo Lasta (grano de mayor diámetro).
- Variedad Cupi, Tipo Lasta (producción de grano y forraje).

## 2.2. Kiwicha

### 2.2.1. Descripción Botánica

De acuerdo a los cronistas españoles, el consumo de la Kiwicha se hallaba ampliamente extendido en la población local al momento de la llegada de los europeos. Esta planta tiene, como en el caso de la Quinua y Cañihua, diferentes nombres locales, como por ejemplo Achica, Quihuicha, inca Jataco, Ataku, Sankurachi, Míllmí, Coimi y sangorache. En México, su pariente el Amaranto, era considerado

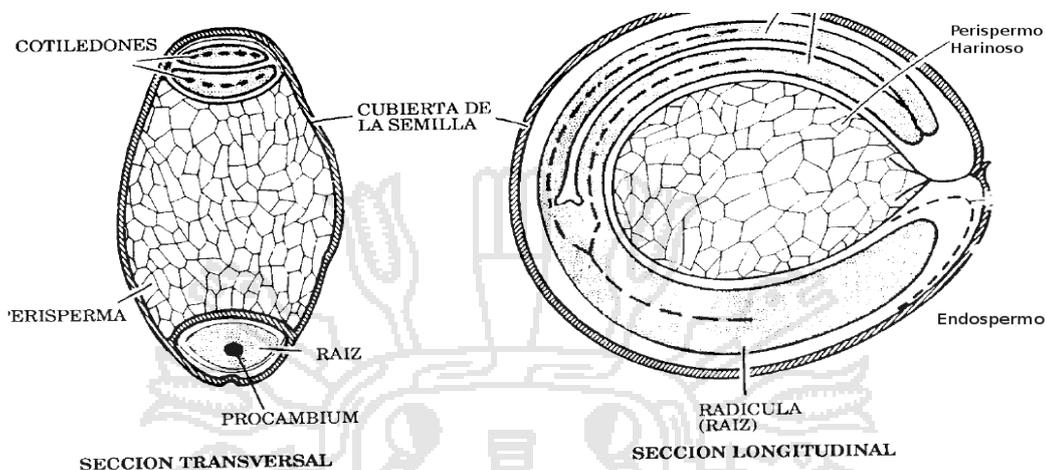
El *Amaranthus caudatus* o Kiwicha tiene su origen en los andes de la América del Sur. Esta especie crece en zonas de Bolivia, Perú, Ecuador y Argentina. En México y América Central se encuentran otras especies de amaranto como el *Amaranthus cruentos*, *Amaranthus hypochondriacus*.

La mayoría de especies de amaranto pueden crecer bien en suelos alcalinos, ácidos, con alto contenido de sal y aluminio. También tienen gran capacidad para adaptarse a diferentes altitudes (desde el nivel de mar hasta 3500 m.s.n.m.). Algunos genotipos existen relativamente bien a temperaturas bajas. En cuanto a humedad para su desarrollo, las especies de amaranto requieren un nivel menor que, por ejemplo, el maíz. (Sumar 1997).

La semilla de la Kiwicha es de forma elíptica redondeadas redondeada (lenticulares), lisas de borde convexo o afilado opacas o semitranslucidas de color diferente según el ecotipo: negro castaño, blanco, blanco rosado, blanco amarillento y de 1,0 a 1,3 mm de diámetro por 0,5 a 0,8 mm de espesor un gramo de grano contiene de 800 a 1600 semillas.

El tamaño de la semilla está determinado por la herencia genética y por las condiciones de crecimiento de la planta. El tamaño de los granos que se forman en el eje principal va disminuyendo de la base a la punta de la inflorescencia. De la misma manera, el tamaño promedio del grano se reduce en los casos de un periodo corto de vegetación (heladas siembra tardía, cultivos en la costa

del Perú), por la diferencia de nutrientes y por el ataque de la enfermedad alternaria. ( Sumar 1997)



**Figura 1. Grano de Kiwicha**

**Tabla 3. Composición química de 100gr de Kiwicha del 100% comestible:**

<b>Minerales</b>	<b>Kiwicha Cruda</b>	<b>Kiwicha Tostada</b>
Calorías	377	428
Agua (g)	12	0,7
Proteína (g)	13,5	14,5
Grasa (g)	7,1	7,8
Carbohidratos (g)	65,4	71,3
Fibra (g)	2,5	3
Ceniza (g)	2,4	2,7
Calcio (mg)	236	293
Fósforo (mg)	453	502

Hierro (mg)	7,500	8,100
Retinol	-	-
Tiamina (mg)	0,3	0,3
Rivoflavina (mg)	0,1000	0,0001
Niacina (mg)	0,400	0,004
Reducido (mg)	1,300	1,3
Ácido ascorbico (mg)	3,200	3,200

Fuente: Tabla De Composición Química De Los Alimentos Del Ministerio De Salud 1993

**Tabla 4. Comparación de Proteína Energía y Minerales de la Kiwicha con otros alimentos**

Alimento	Proteina %	Energia (Kcal)	Calcio mg/100g	Fosforo mg/100g	Hierro mg/100g
Kiwicha	14,5	377	236	7,5	455
Carne de pollo	18,2	170	14	200	1,5
Fideos	9,4	360	24	-	11
Leche evaporada	7	143	231	-	-
Huevo cocido	12,9	139	30	192	1,1
Arroz	2,4	115	11	30	0,3
Avena	1,3	53	21	42	0,5

Fuente: Tabla De Composición Química De Los Alimentos Del Ministerio De Salud 1993.

#### 2.2.2. Descripción Taxonómica.- (Sumar 1997)

Reino: Vegetal.

División: Magnoliophyta.

Clase: Magnoliopsida.

Subclase: Cariophyllidae.

Orden: Cariphyllales.

Familia: Amaranthaceae.

Sub Familia: Amarantoideas.

Tribu: Amarantaceae.

Genero: Amaranthus.

Especie: A. Caudatus.

#### 2.2.3. Valor Nutricional

La Kiwicha la reconocemos fácilmente, ya que su presentación en tiendas es en bolsas que contienen unas bolitas menuditas. Podemos encontrar las famosas "bolas de Kiwicha", conformadas por gran cantidad de este cereal, perfectas para consumir como refrigerio. El sabor al paladar es dulce: puede mezclarse con yogurth y agregarse a la leche de niños o adultos en el desayuno. Por lo general se utiliza en harina para preparar panes y pasteles.

Este cereal contiene hierro, potasio, zinc, vitamina E y complejo de vitamina B. El calcio que se encuentra en 100 gramos de Kiwicha es el doble que encontramos en la misma cantidad de leche, así como

el fósforo que casi quintuplica al que está presente en dicho lácteo. También contiene lisina. (Sumar 1997).

### 2.3. Quinua

#### 2.3.1. Descripción Botánica

La Quinua, es una planta herbácea anual, de amplia dispersión geográfica, presenta características peculiares en su morfología, coloración y comportamiento en diferentes zonas agro ecológicas donde se la cultiva, esta planta alcanza alturas variables desde 30 a 300 cm, dependiendo del tipo de Quinua, de genotipo, de las condiciones ambientales donde crece y de la fertilidad de los suelos. (Mujica 1993).

#### 2.3.2. Descripción Taxonómica

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

Reino: Vegetal

División: Fanerógamas

Clase: Dicotiledóneas

Subclase: Angiospermas

Orden: Centrospermales

Familia: Chenopodiacea

Género: Chenopodium

Sección: Chenopodia

Subsección: Cellulata

Especie: Chenopodium quinoa Willd.

### 2.3.3. Valor Nutricional

La Quinoa contiene un alto grado de valor nutricional y puede ser utilizado de diversas maneras. Muchas familias reemplazan el arroz por Quinoa, se prepara también ensaladas de Quinoa, postres, omelettes, bebidas y todo tipo de platillos. La Quinoa se convierte en un plato muy versátil dentro de la cocina peruana.

La Quinoa, como cereal, posee gran cantidad de proteínas, un 16%, mientras que el arroz solo contiene 7%. Asimismo, contiene aminoácidos que se comparan a los que contiene la leche; uno de los que resalta más es la lisina, aminoácido que ayuda al desarrollo del cerebro. (León 2003).

### 2.3.4 . Características del Grano

El fruto de la Quinoa es un aquenio; el perigonio cubre una sola semilla y se desprende con facilidad al frotarlo (Tapia 1990).

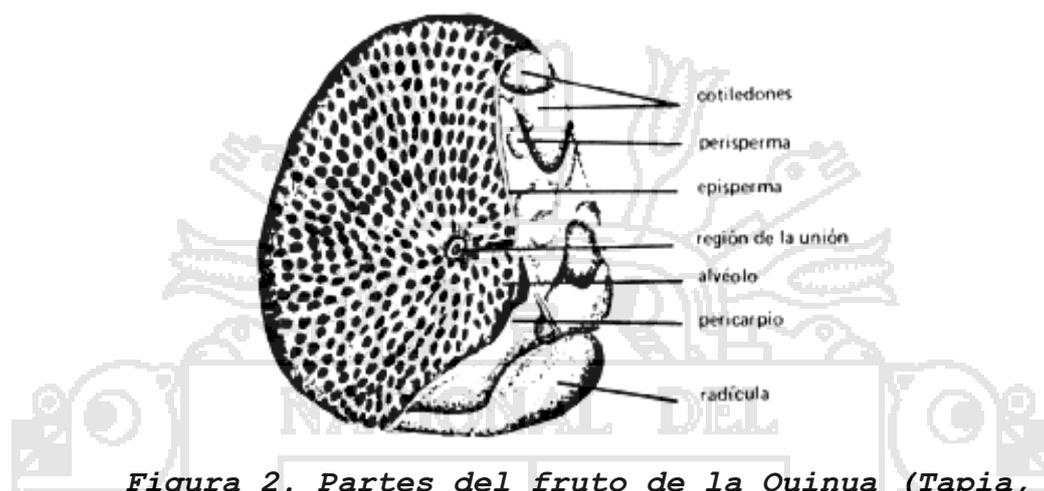
Torres y Minaya (1980), indican al pericarpio del fruto esta adherido a la semilla presenta alveolos y en algunas variedades se puede separar fácilmente. En el pericarpio se encuentra la saponina, compuesto que le trasfiere sabor amargo a la Quinoa.

Las mayores partes anatómicas del fruto son: la cubierta externa (perianto y capas de semillas), el episperma y el embrión. Cuando la Quinoa es cosechada, el fruto cae de la planta encerrado en el perianto. Las células débiles adheridas al perianto son fácilmente removidas por lavado y restregado en agua hasta exponer la superficie de color amarillo pálido del pericarpio consiste en una capa compacta y densa de células de alrededor de 10um de espesor. Debajo del pericarpio existen 2 capas que cubren la semilla. Una de las capas tiene alrededor de 20um de espesor y contiene gránulos poligonales de almidón y cuerpos de electrones densos. La segunda cubierta de la semilla esta ligada al perisperma tiene 3um de espesor que puede ser la cutícula (Varriano y de Francisco, 1984).

Los mismos autores indican que los gránulos de almidón de las células del perisperma son poligonales y su tamaño varia entre 0,4 a 2,0 um, agrupándose entre granos de 0.5 um u 1,3 um. Los gránulos de almidón se encuentran como entidades simples dentro de las células o como componentes estructurales consistente de agregados esféricos u oblongos. Aproximadamente 14000 gránulos de almidón se pueden comprimir en un agregado de 18 a 20 um . Matrices de proteínas circundan a los gránulos de almidón y se interconectan entre ellos dentro de las células.

El almidón de Quinoa contiene alrededor de 11% de amilosa y una distribución bimodal de amilopectina en cadenas cortas y largas. La temperatura de

gelatinización esta en un rango de 57 a 64 °C (Atwell, et al. 1983).



**Figura 2. Partes del fruto de la Quinua (Tapia, 1990)**

#### 2.3.5. Composición Química

La Quinua es uno de los pocos alimentos de origen vegetal que es nutricionalmente completo, es decir que presenta un adecuado balance de proteínas, carbohidratos y minerales, necesarios para la vida humana. (Meyhuay 1997)

En la Tabla 5 se presenta la composición proximal del grano de Quinua, en la Tabla 6 la composición proximal de los cereales y granos andinos de una porción comestible de 100gr. De Quinua.

El valor biológico de los granos se debe a la calidad de la proteína, es decir a su contenido de aminoácidos. Se encuentran cantidades significativas de todos los

aminoácidos esenciales, particularmente de lisina, triptofano y cisteína.

**Tabla 5. Composición proximal (%) del grano de Quinua**

Componente	N <sup>a</sup>	Rango	Promedio
Humedad	127	6,20 - 14,09	9,61
Proteínas	127	10,83 - 21,86	15,72
Carbohidratos	69	53,24 - 67,17	61,7
Grasas	92	4,26 - 9,50	7,16
Fibra	69	1,22 - 4,78	2,91
Cenizas	73	1,98 - 6,13	3,29
Saponinas	69	0,01 - 4,65	0,65

N<sup>a</sup>= Número de Determinaciones

Fuente: Koziol (1992)

La organización de la Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación (FAO), señala que una proteína es biológicamente completa, cuando contiene todos los aminoácidos esenciales en una cantidad igual o superior a la establecida para cada aminoácido en una proteína de referencia o patrón. Las proteínas que poseen uno o mas aminoácidos limitantes; es decir, aquellas que se encuentran en menor proporción que la establecida para la proteína patrón, se consideran biológicamente incompletas, debido a que no puede utilizarse totalmente (Meyhuay, 1997).

**Tabla 6. Composición proximal de los cereales y granos andinos de una porción comestible de 100 gr de Quinua.**

<b>Cereales y Granos Andinos</b>	<b>Proteína</b>	<b>Grasa</b>	<b>Fibra Cruda</b>	<b>Ceniza</b>	<b>Carbohidratos</b>
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	78,7
Triticale	15	1,7	2,6	2	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	4	2,9	72,6
Cañihua	18,8	7,6	6,1	4,1	63,4
Kiwicha	14,5	6,4	5	2,6	71,5

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

**Tabla 7. Composición de Aminoácidos esenciales de Quinua (mg/100g proteína) comparados con otros granos y con valores recomendados**

<b>Fuente Proteína</b>	<b>HIS</b>	<b>ILE</b>	<b>LEU</b>	<b>LYS</b>	<b>M+C</b>	<b>P+T</b>	<b>THR</b>	<b>TYR</b>	<b>VAL</b>
Quinua <sup>a</sup>	4,2	4,9	6,6	6	5,3	6,9	3,7	0,9	4,5
Quinua <sup>b</sup>	6,1	3,8	6,5	6,1	4,2	7,6	3,9	1,3	4,5
Promedio	3,2	4,4	6,6	6,1	4,8	7,3	3,8	1,1	6,1
Arroz <sup>c</sup>	2,1	4,1	8,2	3,8	3,6	10,5	3,8	1,1	6,1
Maiz <sup>d</sup>	2,6	4	12,5	2,9	4	8,6	3,8	0,7	5
Trigo <sup>d</sup>	2	4,2	6,8	2,6	3,7	8,2	2,8	1,2	4,4
Recomendaciones <sup>e</sup>									
Infantes	2,6	4,6	9,3	6,6	4,2	7,2	4,3	1,7	5,5

Preescolares	1,9	2,8	6,6	5,8	2,5	6,3	3,4	1,1	3,5
Escolares	1,9	2,8	4,4	2,4	2,2	2,2	2,8	0,9	2,5
Adultos	1,6	1,3	1,9	1,6	1,7	1,9	0,9	0,5	1,3

<sup>a</sup> promedio de los valores reportados por Cardozo y Tapia (1979), Mahoney et. al. (1975), Risi y Galwey (1984), Romero (1981) y Marroquin (1983).

<sup>b</sup> Valores de Latinreco S.A.

<sup>c</sup> Promedio de los valores reportados por Lásztity (1984) y Romero (1981).

<sup>d</sup> Promedio de los valores reportados por Lásztity (1984), Risi y Galwey (1984) y Romero (1981).

<sup>e</sup> Recomendaciones de WHO/FAO/UN.

Abreviaturas:

HIS - Histidina. M + C - Metionina + Cisteína.

ILE - Isoleucina. P + T - Fenilalanina + Tirosina.

LEU - Leucina. THR - Treonina.

LYS - Lisina. TRY - Triptófano.

VAL - Valina

Fuente: Koziol (1992).

## 2.4 CONCEPTOS IMPORTANTES

### 2.4.1. Flujo en lechos empacados

Un sistema de considerable importancia en ingeniería y en otros campos de proceso es el lecho empacado o la columna empacada que se usa para un reactor catalítico de lecho fijo, para adsorción de un soluto, absorción simple, lecho de filtración, etc. El material que se empaca en el lecho puede consistir en esferas, partículas irregulares, cilindros o varios tipos de empaques comerciales.

En el análisis que sigue se supone que el empaquetamiento es uniforme en todos lados y que, si acaso hay acanalamiento, éste es mínimo. La razón entre el diámetro de la torre y el diámetro del

empaquetamiento debe ser de un mínimo de 8:1 a 10:1 para que los efectos de las paredes sean pequeños.

En el enfoque teórico que se usa, la columna empacada se considera como un manajo de tubos torcidos con diferentes áreas de corte transversal. (Geankoplis 1998).

#### 2.4.2. Flujo Laminar

A velocidades bajas, el fluido tiende a fluir sin mezclado lateral y las capas adyacentes se resbalan unas sobre las otras como los naipes de una baraja. En este caso no hay corrientes cruzadas perpendiculares a la dirección del flujo, ni tampoco remolinos de fluido. (Geankoplis 1998)

Para números de Reynolds inferiores a 2100 se encuentra siempre flujo laminar. pero éste puede persistir hasta números de Reynolds de varios millares para condiciones especiales de entrada del tubo. (McCabe, et al 1991)

#### 2.4.3. Flujo turbulento

A velocidades más altas se forman remolinos, lo que conduce a un mezclado lateral. (Geankoplis 1998)

Para números de Reynolds superiores a aproximadamente 4000 el flujo es turbulento. (McCabe, et al 1991)

#### 2.4.4. Flujo a través de lechos porosos

Un caso especial de movimiento de fluidos lo constituye el flujo a través de lechos porosos formados, bien por

un cuerpo sólido atravesado por poros o canales de pequeño tamaño, o bien por un conjunto de partículas en contacto unas con otras que dejan espacios huecos por los que se desplaza el fluido. En este caso el concepto de lecho

implica que las partículas no son arrastradas por el fluido aunque se permita un ligero desplazamiento de las mismas. (Hermida 2000)

#### 2.4.5. Flujo de fluidos a través de lechos fluidificados y empaquetados

Cuando un fluido fluye a través de un lecho empaquetado el material que comprende el lecho ofrece una resistencia al flujo y tiene lugar una caída de presión. Al penetrar el fluido por el lecho, la superficie disponible para el fluido disminuye mientras que la velocidad se eleva.

El flujo de fluidos a través de un lecho empaquetado puede analizarse de forma análoga al flujo a través de una conducción, en términos de números de Reynolds modificados y de factores de rozamiento. (Lewis 1993).

El número de Reynolds para el flujo de un lecho a sido definido como:

$$N_{Re,P} = \frac{\rho v}{\mu (1 - \varepsilon)}$$

□ □

Se a propuesto un factor de rozamiento modificado  $j_f$ , siendo:

$$j_f = \frac{\Delta p}{L} \frac{\varepsilon^3}{(1 - \varepsilon) S_0 v^2} \quad [2]$$

Bajo condiciones de flujo laminar, es decir, donde

$$j_f = \frac{5}{N_{ReP}} \quad [3]$$

$N_{ReP} < 2,0,$

Cuando se combinan estas ecuaciones, Puede demostrarse que:

$$v = 5 \frac{\rho_p^2}{S_0^2 (1 - \varepsilon)^2} \quad [4]$$

Relacionándose la caída de presión con la velocidad de flujo (basándonos en la columna vacía).

Para partículas esféricas, donde  $S_0 = 6/d$ , la ecuación se convierte en:

$$\Delta p = \frac{180 v_0 \mu (1 - \varepsilon)^2 L}{\varepsilon^3 d^2} \quad [5]$$

Esta expresión se conoce como ecuación de Kozeny-Carman; muestra los factores que afectan a la caída de presión son la velocidad de flujo, longitud del lecho, viscosidad

del fluido y diámetro de partícula. La forma mas generalizada de la ecuación es:

$$\Delta_p = K_C \mu L \frac{(1 - \varepsilon) S_o^2}{\varepsilon^3} v \quad [6]$$

Donde  $K_C$  es una constante que depende de la forma de la partícula, porosidad y gama de tamaños, y se encuentra entre 3,5 y 5,5, siendo su valor mas común de 5.

Cuando el flujo se vuelve turbulento, puede utilizarse la ecuación propuesta por Carman para todo el rango de numero de Reynolds Sustituyendo  $j_f$  en las expresiones anteriores:

$$j_f = \frac{5}{N_{ReP}} \left[ \frac{0.4}{N_{ReP}^{0.1}} \right] \quad [7]$$

#### 2.4.6. Diámetro equivalente de una partícula; esfericidad

El diámetro equivalente de una partícula no esférica se define como el diámetro de una esfera que tiene el mismo volumen que la partícula. La esfericidad  $\phi_s$  es la relación entre la superficie de esta esfera y la superficie real de la partícula. Puesto que para una esfera  $S_p = \pi D_p^2$  y  $v_p = (1/6)\pi D_p^3$  resulta que, para una partícula:

$$\frac{S_p}{v_p} = \frac{6}{\Phi_s D_p}$$

8

#### 2.4.7. Modelo de Kozeny-Carman

La ecuación de Kozeny-Carman es una relación usada en el campo de la dinámica fluida para calcular la caída de presión de un fluido que atraviesa una cama llena de sólidos. Se nombra por José Kozeny y de Philip C. Carman. La ecuación es solamente válida para el flujo laminar. (McCabe, et al 1991)

$$\frac{\Delta p}{L} = \frac{150 \mu v_0 (1 - \epsilon)^2}{\epsilon^3 D_p^2}$$

9

Donde:

$\Delta p$  es la Caída de presión en un lecho de relleno o fluidizado.

$L$  es la altura total del lecho.

$v_0$  es la velocidad superficial o de la "torre-vacío"

$\mu$  es la viscosidad del fluido

$\epsilon$  es la porosidad de la cama

$\Phi_s$  es la esfericidad de las partículas en la cama llena.

$D_p$  es el diámetro de la partícula esférica relacionada.

Esta ecuación es valida para lechos rellenos, con números de Reynolds de partícula hasta aproximadamente 1.0, después de lo cual frecuentes cambios de flujo en los canales de la cama, causa considerables perdidas de energía cinética.

Esta ecuación puede ser expresada como el "flujo es proporcional a la caída de presión e inversamente proporcional a la viscosidad fluida", que se conoce como ley de Darcy.

Poiseuille (1846) citado por Schlueter y Witherspoont (1994); llevo a cabo experimentos en tubos capilares y estableció las relaciones de flujo laminar a través de contactos. Reynolds (1846) citado por Schlueter y Witherspoont (1994); demostró experimentalmente 2 tipos de flujo laminar y turbulento. Derivo un grupo adimensional conocido como el numero de Reynolds, que predice la condición del sistema y predice el tipo de flujo. Que también demostró la resistencia al flujo es una función de este grupo adimensional.

Darcy (1856) citado por Schlueter y Witherspoont (1994); estableció el concepto de flujo laminar a través de un lecho poroso. Su ecuación es equivalente a la relación de Poiseuille para conductos y puede ser establecida como sigue:

$$v = \frac{dv}{adt} = K_1 \frac{\Delta p}{\mu L} \quad [10]$$

donde:

$dv/dt$ : es el volumen del líquido que circula en la unidad de tiempo  $t$ .

$a$  :area.

$\Delta p$  :Caída de presión.

$\mu$  :viscosidad del fluido

$L$  :longitud del conducto

Blake (1922) citado por Schlueter y Witherspoont (1994); presento la siguiente correlación para flujo laminar:

$$\frac{\Delta p}{L} \frac{g_c \mu_f^3}{G^2 a} = f \left( \frac{G}{a} \right) = K \left( \frac{G}{a} \right)^{-1.0} \quad (1)$$

donde:

- $\Delta p$  es la Caída de presión en un lecho de relleno
- $L$  es la altura total del lecho
- $\mu$  es la viscosidad del fluido.
- $\varepsilon$  es la porosidad de la cama
- $a$  es el área.
- $G$  es la velocidad másica superficial en un lecho de relleno.

Para derivar esta ecuación Blake tomo la suposición de Dupuit (1863) citado por Schlueter y Witherspoont (1994); el diámetro efectivo es proporcional al volumen vacío por unidad de área superficial y la velocidad del lecho es inversamente proporcional a la porosidad del mismo.

Carman (1937) citado por Schlueter y Witherspoont (1994); introdujo el concepto de factor de forma. Su importancia en el entendimiento del fenómeno de flujo de fluidos a través de lechos porosos a sido resaltado por diversos autores. Para partículas esféricas la superficie

especifica fue transformada a diámetro de partículas por la siguiente relación:

$$a = \frac{6(1 - \phi)}{D_p} \quad (12)$$

Para partículas no esféricas:

$$\phi_s = 6 \frac{1 - \phi}{a D_p} \quad (13)$$

Donde esfericidad es definida como

$$\phi = \frac{a_p}{a} \quad (14)$$

donde:

$a$ : Área,  $\text{pie}^2$  o  $\text{m}^2$

$a_p$ : área proyectada de la partícula.

Max Leva (1947); citado por Schluetert y Witherspoont (1994) derivó una ecuación en la cual el factor de forma ha sido presentado de varias maneras pueden ser relacionadas como sigue:

$$\phi = \frac{0,205 S}{V_p^{2/3}} \quad (15)$$

El factor de forma pueden ser relacionadas como sigue:

$$\alpha = \frac{1}{\alpha_s} \quad (16)$$

Kozeny (1927) asumió que el lecho granular es equivalente a un grupo de canales paralelos similares tal que la superficie interior total y el volumen interior total son iguales a la superficie de la partícula y al volumen de los poros en el lecho mismo. Además asumió que los pasajes en el lecho tortuoso son más largos que la profundidad del lecho, y la velocidad del canal es mayor que si el canal vertical recto existiera. Propuso la siguiente correlación para flujo laminar:

$$\frac{\alpha_p g_c \alpha_f \alpha^3}{L} = 5 \left[ \frac{G}{\alpha a} \right]^{-1.0} \quad (17)$$

o

$$\frac{\alpha_p}{L} = \frac{180 G \alpha - \alpha^2 \alpha}{\alpha_s^2 D_p^2 g_c \alpha^3 \alpha_f} \quad (18)$$

Carman demostró la validez de la correlación propuesta por Kozeny y derivó la siguiente expresión para flujo turbulento:

$$\frac{\alpha_p}{L} = \frac{G^2 a}{g_c \alpha^3 \alpha_f} 0.4 \left[ \frac{G}{\alpha a} \right]^{-0.1} \quad (19)$$

o

$$\frac{\alpha_p}{L} = \frac{2.9 G^{1.9} \alpha_{0.1} \alpha - \alpha^{1.1}}{D_p^{1.1} g_c \alpha_s^{1.1} \alpha^3 \alpha_f} \quad (20)$$

donde:

- $\Delta p$  es la Caída de presión en un lecho de relleno
- $L$  es la altura total del lecho
- $\mu$  es la viscosidad del fluido.
- $\varepsilon$  es la porosidad de la cama
- $a$  es el área.
- $G$  es la velocidad másica superficial en un lecho de relleno.
- $\Phi_s$  es la esfericidad de las partículas en la cama llena.
- $D_p$  es el diámetro de la partícula esférica relacionada.
- $\rho_f$  es la Densidad del fluido.

#### 2.4.8. Modelo de Ergun

La ecuación de Ergun es una correlación derivada por Ergun en 1952 para el factor de fricción en una columna llena en función del número de Reynolds (McCabe, et al 1991):

$$f_p = \frac{150}{Re_p} + 1.75 \quad [21]$$

Donde  $f_p$  y  $Re$  son definidos como:

$$f_p = \frac{\rho_p D_p}{L} \frac{D_p^3}{V_s^2} \frac{1}{1 - \varepsilon} \quad [22]$$

$$Re_p = \frac{D_p V_s}{\mu}$$

[23]

donde:

$\Delta p$  es la caída de presión a través del lecho

$L$  es la longitud del lecho

$D_p$  es el diámetro esférico equivalente del embalaje

$\rho$  es la densidad del aire

$\mu$  es la viscosidad dinámica del aire

$V_s$  es la velocidad superficial (es decir la velocidad que el líquido tendría a través del tubo vacío al mismo flujo volumétrico)

$\varepsilon$  es la fracción vacía del lecho (porosidad del lecho en cualquier momento).

### III. MATERIALES Y MÉTODOS

#### 3.1. AMBITO DE ESTUDIO

El presente trabajo de investigación se realizó en el laboratorio de Ingeniería de la Escuela Profesional de Ingeniería Agroindustrial de la Facultad de Ciencias Agrarias de la Universidad Nacional del Altiplano en la Distrito, Provincia y Departamento de Puno ubicado a 3850 m.s.n.m.

### 3.2. MATERIALES Y EQUIPOS

#### 3.2.1. Materia Prima.

Se empleó granos enteros de Quinoa (*Chenopodium quinoa Willd*) de la variedad Real, grano pelado de Cañihua (*Chenopodium canihua Cook*) de la variedad Cupi y grano entero de Kiwicha (*Amaranthus Caudatus*) de la variedad Oscar Blanco, adquiridas de la Planta de Servicios Agroindustriales el Altiplano S.A.C. Ubicada en la ciudad de Juliaca provincia de San Román Departamento de Puno.

3.2.2. Materiales empleados en la construcción del equipo para la determinación de las constantes Kozeny-Carman y Ergun.

- Tubería comercial de Hierro Galvanizado  $\frac{1}{2}$  pulgada con un diámetro interno de 17,34 mm. y un diámetro externo de 21,4 mm.
- 02 Válvulas de hierro de bola o esfera de  $\frac{1}{2}$  pulgada.
- 01 Válvula de PVC de bola o esfera de  $\frac{1}{2}$  pulgada.
- 06 codos de hierro galvanizado de  $\frac{1}{2}$  pulgada.

- 02 Tees de hierro galvanizado de  $\frac{1}{2}$  pulgada.
- 01 tubo comercial de PVC de 3 pulgadas de diámetro con una altura de 440 mm.
- 01 tubo comercial de PVC de  $1\frac{3}{4}$  pulgada de diámetro con una altura de 850 mm.
- 02 uniones tope de PVC de  $\frac{1}{2}$  pulgada.
- 01 reducción de campana de PVC de 3 a  $\frac{1}{2}$  .
- 01 reducción de campana de PVC de  $1\frac{3}{4}$  a  $\frac{1}{2}$  pulgadas.
- 02 rejillas de plástico de 3 pulgadas de diámetro.
- 02 rejillas de plástico de  $1\frac{3}{4}$  pulgada de diámetro.
- 02 tuberías rígidas en tiras para toma de presión de 8 mm de diámetro.
- 02 reducciones de campana de cobre de  $\frac{1}{2}$  a  $3/8$ ".
- 02 mangueras de conexión de 8 mm.
- Pintura esmalte color blanco (recubrimiento de la superficie de la estructura del soporte del equipo).
- Soldadura de resina epoxi.

3.2.3. Equipos empleados en la instrumentación y control del equipo para la determinación de las constantes Kozeny-Carman y Ergun.

- Rotámetro/Aire.VETO (0-10 l/min). (Anexo 1.2).

- Manómetro para Presion Diferencial Digital EXTECH Modelo 406800 (0-5 PSI).(Anexo 1.1)
- Computador personal de escritorio.
- Circuito conversor de niveles TTL-RS-232.Fabricacion propia.(Anexo.1.3)
- Cables.
- Software EXTECH 407752 RS232 FOR HAND HELD METERS.(Anexo 1.4)
- Compresor de Aire MAXXUS 0,8HP, 120watts. , 220V. Y 36 psi.

3.2.4. Materiales y Equipos para la determinación de Propiedades Físicas de los granos de Cañihua, Kiwicha y Quinua.

**a) Materiales.**

- Probetas (10 ml., 20 ml., 100 ml.)
- Vaso de Precipitado.
- Varilla de vidrio.
- Espátula.
- Pipetas (1 ml., 5 ml., 10 ml.)
- Pizeta.
- Tolueno (20 ppm).
- Papel Absorbente.
- Picnometro.
- Pie de metro marca Caliper (Vernier); 150x0,02 mm, 6"x1/1000 inch.

**b) Equipos.**

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

### 3.3. DESCRIPCION DEL EQUIPO PARA LA DETERMINACION DE LAS CONSTANTES DE KOZENY-CARMAN Y ERGUN EN CAÑIHUA, KIWICHA Y QUINUA.

#### 3.3.1. Tolvas de alimentación de granos.

Son dos tuberías de diámetros de 40.5 mm. Y 76 mm. y con una altura de 850 mm. Y 440 mm. respectivamente, construido en material de PVC comercial, en cuyo interior se sitúa los granos estudiados (Cañihua, Kiwicha y Quinua) y por los cuales circula aire procedente de la compresora.

#### 3.3.2. Compresora.

Un compresor es una máquina de fluido que está construida para aumentar la presión y desplazar cierto tipo de fluidos llamados compresibles, tal como lo son los gases y los vapores.



**Figura 3: Compresora**

#### 3.3.3. Válvula de asiento.

Esta válvula de asiento permite que el aire procedente de la compresora se dirija al rotámetro para medir el flujo de aire que ingrese al sistema.

#### 3.3.4. Válvulas auxiliares.

Las válvulas auxiliares permiten que el aire procedente de la compresora a un flujo determinada ingrese a la columna  $a_1$  o  $a_2$ .

#### 3.3.5. Manómetro diferencial digital.

Este dispositivo mide Presión diferencial de 0 a 5 P.S.I. Mediante el conector de entrada de 8mm. El cual es conectado a las tuberías rígidas en tiras para toma de presión ubicadas en medio de las dos rejillas tal como se indica en la Figura 3.



**Figura 4: Manómetro digital EXTECH 406800**

#### 3.3.6. Rotámetro.

El rotámetro para aire Modelo NO315507 que tiene un rango de operación de 1-10 l/min. Y con una presión máxima de 150 PSI.

El cual esta ubicado en la parte inicial del sistema el cual calibra el caudal del aire que ingresa al equipo.



**Figura 5: Rotámetro VETO NO315507**

#### 3.3.7. Rejillas de Plástico.

Son cuatro rejillas de plástico, 2 de 3 pulgadas de diámetro y 2 de 1 $\frac{3}{4}$  pulgada de diámetro; en cada una de las tolvas de alimentación de los granos (Cañihua, Kiwicha y Quinoa) hay dos rejillas tal y como se muestra en la figura 8, la rejilla que se encuentra en la parte superior sirve para soportar el grano y la segunda tiene la misión de repartir uniformemente el aire a lo ancho de toda la sección de la tolva.

### 3.3.8. Tuberías rígidas en tiras.

Estas dos tuberías rígidas en tiras de cobre de 8 mm. de diámetro ubicadas entre las rejillas de plástico tal como se muestra en la Figura 8 son utilizadas para toma de presión siendo conectadas mediante una manguera al conector de entrada del Manómetro diferencial Digital.

### 3.3.9. Circuito conversor de niveles TTL-(RS-232).

#### **TTL.**

TTL es la sigla en inglés de transistor-transistor logic, es decir, "Lógica transistor a transistor". Es una familia lógica o lo que es lo mismo, una tecnología de construcción de circuitos electrónicos digitales. En los componentes fabricados con tecnología TTL los elementos de entrada y salida del dispositivo son transistores bipolares.

#### **RS-232.**

RS-232 (Recommended Standard 232), también conocido como Electronic Industries Alliance RS-232C) es una interfaz que designa una norma para el intercambio serie de datos binarios entre un DTE (Equipo terminal de datos) y un DCE (Data Communication Equipment, Equipo de comunicación de datos), aunque existen otras en las que también se utiliza la interfaz RS-232.





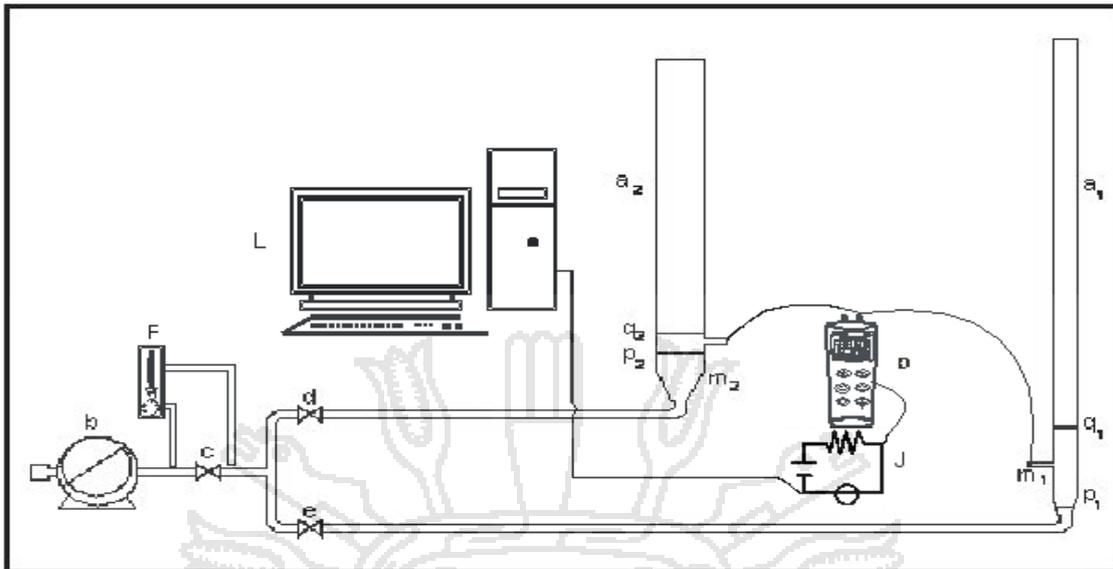


Figura 8: Partes del equipo para la determinación de las constantes de Kozeny-Carman y Ergun en Cañihua, Kiwicha y Quinua.

Siendo:

- $a_1$  y  $a_2$  : Tolvas de alimentación de granos.
- $b$  : Compresora.
- $c$  : Válvula de asiento.
- $d$  y  $e$  : Válvulas auxiliares.
- $D$  : Manómetro diferencial digital.
- $F$  : Rotámetro.
- $p_1, p_2$  y  $q_1, q_2$  : Rejillas de plástico.
- $m_1$  y  $m_2$  : Tuberías rígidas de cobre para toma de presión.
- $J$  : Circuito conversor de niveles TTL-RS-232.
- $L$  : Ordenador Personal de escritorio.

3.4. METODOLOGIA EXPERIMENTAL

La metodología del trabajo de investigación se desarrolló de acuerdo a la Figura 9, que se presenta a continuación.

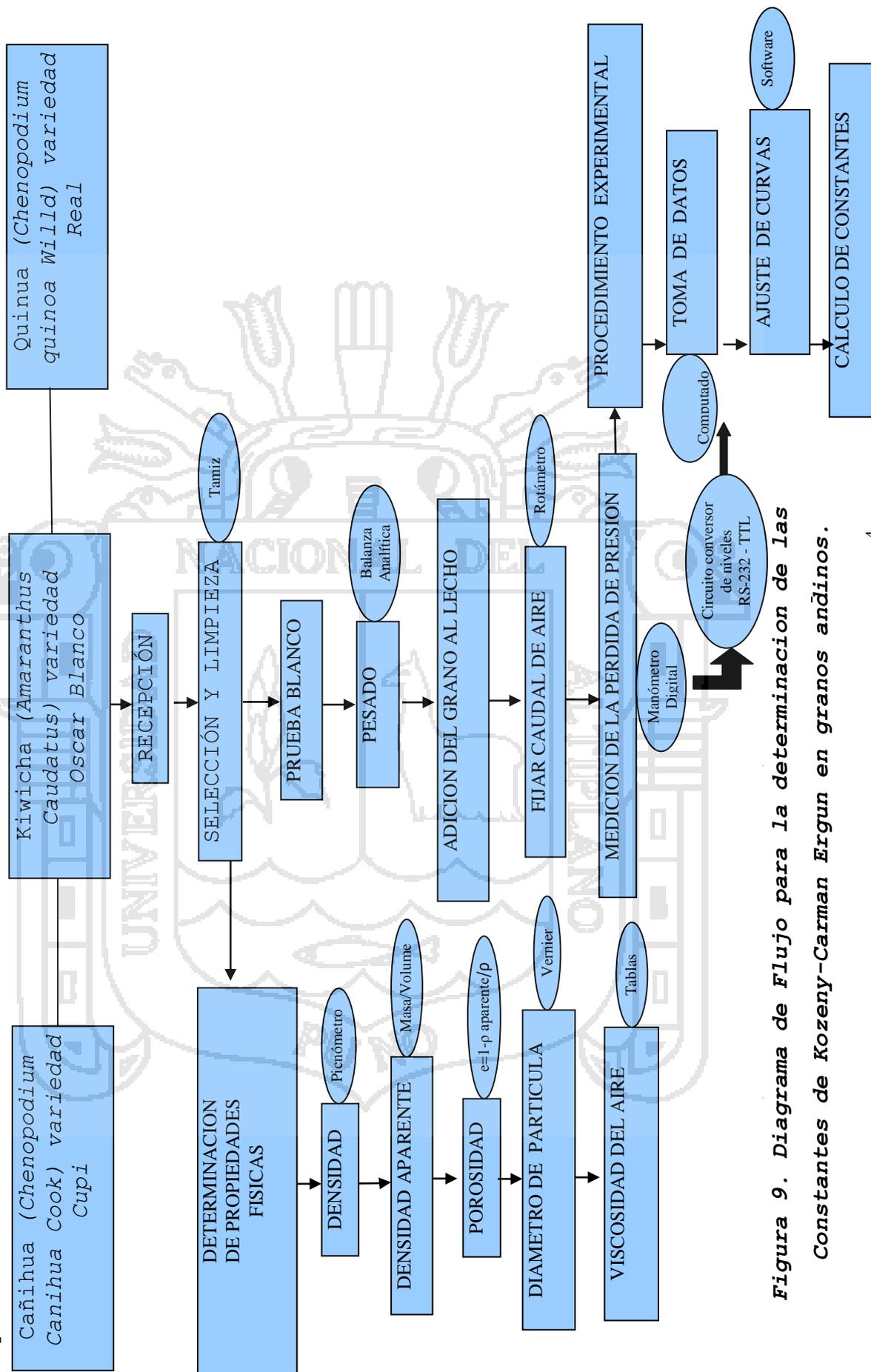


Figura 9. Diagrama de Flujo para la determinación de las Constantes de Kozeny-Carman Ergun en granos andinos.

A continuación se detalla la metodología a seguir:

**a) Recepción:**

Se empleo Quinoa (*Chenopodium quinoa Willd*) variedad Real, Cañihua (*Chenopodium canihua Cook*) variedad Cupi y Kiwicha (*Amaranthus Caudatus*) variedad Oscar Blanco, adquiridas de la Planta de Servicios Agroindustriales el Altiplano S.A.C. Ubicada en la ciudad de Juliaca provincia de San Román Departamento de Puno.

**b) Selección y Limpieza:**

Los granos de Quinoa, Cañihua y Kiwicha se seleccionaron mediante un tamiz para eliminar contaminantes físicos e impurezas como residuos de granos y espigas, para posterior procedimiento.

**γ) Prueba Blanco:**

Se realizó una prueba inicial sin lecho de granos, con el objetivo de asegurar el buen funcionamiento de las tuberías y los instrumentos de medición.

**d) Pesado:**

Los granos de Quinoa, Cañihua y Kiwicha fueron pesadas en una balanza analítica digital, estos pesos fueron equivalentes a una altura determinada.

**e) Adición del Grano al Lecho:**

Los granos de Quinoa, Cañihua y Kiwicha son adicionados a los dos lechos en los 10 diferentes muestras para su posterior toma de datos.

**f) Fijar al caudal del aire:**

Este procedimiento se hizo con el ROTAMETRO/AIRE VETO en los caudales de 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9 y 10 l/min.

**g) Medición de la Perdida de Presión:**

Se realizo con el Manómetro para Presión Diferencial EXTECH Modelo 406800 con kPa como unidad de medida este equipo tiene retención de datos, y conexión RS-232 para captura de lecturas a PC usando el software operativo.

**3.4.1. Determinación de propiedades físicas de los granos de Quinoa, Cañihua y Kiwicha.****3.4.1.1. Densidad**

Se determino la densidad de las semillas mediante el método de la botella de gravedad especifica (Mohsenin, 1970). Este procedimiento comprende las siguientes etapas:

- Determinación de la capacidad exacta de la botella de gravedad específica mediante su pesado cuando esta vacío y con agua destilada a 20 °C.
- Determinación de la gravedad específica del tolueno. (ecuación 24).

$$G.E.TOLUENO = \frac{PESO TOLUENO}{PESO AGUA DESTILADA} \quad [24]$$

- Adicionar 10 g de muestra en la botella de gravedad específica.
- Adicionar cierta cantidad de tolueno y agitar para lograr la eliminación del aire del espacio entre los granos.
- Llenar la botella con tolueno y esperar que alcance una temperatura de 20 °C.
- Pesar la botella de gravedad específica y calcular la gravedad específica. (ecuación 25).

$$G.E.Semilla = \frac{G.E.Tolueno \times P.S.}{P.S. - [P.B.Tolueno - P.B.Agua]} \quad [25]$$

Determinar la densidad con la (ecuación 26)

$$\text{Densidad Semilla} = G.E.Semilla \times \text{Densidad.Agua.4}^{\circ}\text{C} \quad [26]$$

La determinación se realizó en tres repeticiones para cada tipo de grano (Quinua, Cañihua y Kiwicha).

#### 3.4.1.2. Densidad Aparente

La densidad aparente de los granos de Quinua, Cañihua y Kiwicha se determinó pesando la masa de los granos contenidos en un volumen definido. (Escardino, et. al. 1970).

#### 3.4.1.3. Porosidad

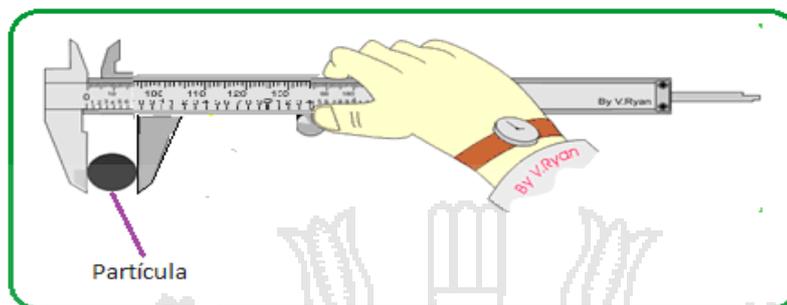
La porosidad del lecho de granos de Quinua, Cañihua y Kiwicha se calculó mediante la ecuación 27. (Escardino, et. al. 1970). utilizando los datos de densidad real y densidad aparente obtenidos anteriormente.

$$\varepsilon = 1 - \frac{\rho_{\text{aparente}}}{\rho_{\text{real}}} \quad [27]$$

#### 3.4.1.4. Diámetro de Partícula

La determinación se realizó mediante el instrumento Pie de Metro marca Pie de metro marca Caliper (Vernier); 150x0,02 mm, 6"x1/1000 inch, con el cual se obtienen sus respectivas dimensiones como alto, ancho y longitud en

los granos de Quinoa, Cañihua y Kiwicha. (Mazariegos 2006).



**Figura 10: Medición de las dimensiones del grano de Quinoa**

Diámetro efectivo de la partícula se determinó mediante la (ecuación 29) (Kunii y Levenspiel 1991).

$$D_p = \left[ \frac{6m}{n \rho_p} \right]^{1/3} \quad [28]$$

donde:

$m$ : Masa

$\rho_p$ : Densidad de la partícula

$n$ : Numero de partículas

$$D_e = \left[ \frac{4}{3} bh \right]^{1/2} \quad [29]$$

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

#### 3.4.1.5. Esfericidad

Luego de calcular el diámetro promedio y el diámetro efectivo se procedió a calcular la esfericidad que tienen

los granos de Quinua, Cañihua y Kiwicha mediante la (ecuación 30) (Kunni y Levenspiel 1991)

$$\frac{S_P}{v_P} = \frac{6}{\Phi_S D_P} \quad \square 30 \square$$

#### 3.4.1.6. Viscosidad del Aire

La viscosidad del Aire se determino mediante tablas de viscosidad. (Foust 1998)

#### 3.4.2. Procedimiento Experimental

##### 3.4.2.1. Toma de Datos

- Para la caída de presión la toma de datos se realizo con el manómetro diferencial digital EXTECH 406800, conectado al computador personal, mediante el circuito conversor de niveles RS-232, operando el software: 407752 EXTECH RS232 SOFTWARE FOR HAND HELD METERS. (Versión 2.0); para cada altura de grano preestablecida.
- Para los caudales de aire se fijan los caudales manualmente en el rotámetro de aire VETO NO315507.
- Para los diámetros de partícula se miden exactamente: base y altura con el Pie de metro (Vernier) marca Caliper; 150x0,02 mm, 6"x1/1000 inch.

Tomando el valor medio de 30 granos elegidos al azar.

(Apendice 6)

- Para las condiciones de operación se miden la temperatura y humedad del ambiente con un termohigrometro digital marca RadioShack 63-1032 (Anexo 4).
- Para la viscosidad del Aire se tomo el dato de tablas de viscosidad. (Foust 1998)
- Para la medicion de las alturas de lecho de los granos se utilizo una cinta metrica realizando 3 repeticiones para cada medicion.
- Se toma el factor de proporcionalidad de la ley de Newton  $9,80665 \text{ m}\cdot\text{kg}/\text{kg}_f\cdot\text{s}^2$
- Para la densidad del aire se tomo el dato de tablas de propiedades del aire. (Foust 1998)
- Para la densidad de los granos se uso el procedimiento descrito en el apartado (3.4.1.1) y (3.4.1.2).
- Para la humedad y temperatura del ambiente se usa el Termohigrometro digital RadioShack 63-1032 (anexo 4)

#### 3.4.2.2. Ajuste de Curvas

Para el calculo de ajuste de curvas se realizo el procedimiento en 2 pasos:

- La correlación y adecuación de los modelos de Kozeny-Carman y de Ergun.

- Cálculo y ajuste de curvas mediante los software "Open Office Calc" para cálculos aritméticos ; "Qtiplot" para el ajuste de curvas (Anexo 3)

### 3.4.2.3. Correlación y adecuación de los Modelos de Kozeny-Carman Y de Ergun.

#### 3.4.2.3.1. Modelo de Kozeny-Carman

La ecuación propuesta, por Kozeny-Carman puede escribirse de la forma:

$$\frac{g_c \rho p}{L} = AV_0 \quad [31]$$

Siendo:

$$A = K_0 \frac{1 - \epsilon^2}{\epsilon^3 D_p^2} \quad [32]$$

De acuerdo con la ecuación (32) si se representa la razón  $\frac{g_c \rho p}{L}$  frente a  $V_0$  debe resultar una línea recta  $y=AX$  siempre que  $D_p$ ,  $\epsilon$ , y  $\mu$  permanezcan constantes.

#### 3.4.2.3.2. Modelo de Ergun

La ecuación , propuesta por Ergun puede escribirse de la forma:

$$\frac{g_c \rho p}{L} = aV_0 + bV_0^2 \quad (33)$$

En estas condiciones:

$$a = K_1 \frac{1 - \rho^2}{\rho^3 D_p^2} \quad (34)$$

$$b = K_2 \frac{1 - \rho}{\rho^3 D_p} \quad (35)$$

De acuerdo con la ecuación (34) si se representa la razón  $\frac{g_c \rho p}{L}$  frente a  $V_0$  debe resultar un polinomio de segundo orden de la forma  $y = aX + bX^2$  siempre que  $D_p$ ,  $\varepsilon$ , y  $\mu$  permanezcan constantes.

### 3.4.3. Diseño del experimento

La metodología experimental empleada en el siguiente trabajo de investigación se detalla en la siguiente manera:

#### 3.4.3.1. Modelos Estadísticos

Para evaluación de resultados del experimento se utilizo 3 modelos:

1) Para la estructuración del experimento en si mismo; se utilizo un modelo trifactorial de efectos fijos. Donde el numero de tratamientos es de 200 por cada grano



estudiado. El modelo matemático asociado al experimento es:

$$y_{ijkl} = \mu + \alpha_i + \beta_j + \gamma_k + (\alpha\beta)_{ij} + (\alpha\gamma)_{ik} + (\beta\gamma)_{jk} + (\alpha\beta\gamma)_{ijk} + e_{ijkl}$$

con  $i=1-10, j=1,2;$   
 $k=1-10; l=1$

Donde:

$y_{ijkl}$  : Es la variable de respuesta ; de la l-ésima presión bajo el k-ésimo nivel de factor altura de lecho, en el j-ésimo nivel de factor diámetro de columna, sujeto al i-ésimo nivel de caudal volumétrico de aire.

$\mu$  : Media Global

$\alpha_i$  : Efecto del i-esimo caudal volumétrico de aire.

$\beta_j$  : Efecto del j-esimo diametro de columna.

$\gamma_k$  : Efecto de la k-esima altura del lecho.

$(\alpha\beta)_{ij}$  : Efecto debido a la interacción entre caudal volumétrico del aire y diámetro de columna.

$(\alpha\gamma)_{ik}$  : Efecto debido a la interacción entre caudal volumétrico de aire y altura del lecho.

$(\beta\gamma)_{jk}$  : Efecto de la interacción entre diámetro de columna y altura de lecho.

$(\alpha\beta\gamma)_{ijk}$  : Efecto de la interacción entre los 3 factores.

$e_{ijkl}$  : Efecto del error experimental.

2) Para el cálculo de la constante de Kozeny-Carman se usa un análisis de regresión lineal para cada altura de lecho de grano. Cuyo modelo matemático se detalla en el apartado 3.4.2.3.1.

3) Para el cálculo de las constantes de Ergun se usa un análisis de regresión cuadrático, para cada altura de lecho de grano. Cuyo modelo matemático se detalla en el apartado 3.4.2.3.2.



## IV. RESULTADOS Y DISCUSIONES

## 4.1. DETERMINACION DE PROPIEDADES FISICAS DE LOS GRANOS DE QUINUA, CAÑIHUA Y KIWICHA.

## 4.1.1. Densidades

En la siguiente tabla se detallan los resultados experimentales obtenidos para tipo de grano:

**Tabla 8. Valores promedio Densidades real y aparente para cada grano estudiado**

Grano	Densidad Real (kg/m <sup>3</sup> )	Densidad Aparente (kg/m <sup>3</sup> )
Cañihua	1181,2	768,96
Kiwicha	1202,5	763,59
Quinua	1242,7	695,91

Fuente: elaboración Propia.

Para la Cañihua la densidad real de los granos es menor en comparación a al rango 1350-1410 Kg/m<sup>3</sup> de los cereales reportados por Mohsenin (1970), sin embargo estos resultados tienen similitud con los reportados por Foraquita y Lipa (2005).

La densidad aparente de la Cañihua es ligeramente mayor a 675,53 reportado por Foraquita y Lipa (2005).

Para la Kiwicha la densidad real los valores son similares a los obtenidos por Linarez y Velezmoro (2005).

Para la Quinua la densidad real los valores son similares a los obtenidos por Medina (2000) para las variedades blanca de Juli y Kamiri 1236,54 y 1237,57 Kg/m<sup>3</sup>.

La densidad aparente de la Quinua es ligeramente superior a: 680,78 y 694,75 Kg/m<sup>3</sup> Reportados por Medina (2000).

#### 4.1.2. Porosidad

La porosidad del lecho de granos de Quinua, Cañihua y Kiwicha se calculó mediante la ecuación 27. Utilizando los datos de densidad real y densidad aparente obtenidos anteriormente. Los valores obtenidos se detallan en la tabla 9.

**Tabla 09: Valores de porosidad para los granos estudiados**

Grano	Porosidad
Cañihua	0,349
Kiwicha	0,365
Quinua	0,440

Fuente: elaboración Propia.

Para la Cañihua el valor de porosidad difiere ligeramente a 0,426 reportado por Foraquita y Lipa (2005) para granos enteros de Cañihua.

Para Kiwicha el valor de porosidad es muy similar a 0,365 obtenido por Linarez y Velezmoro (2005).

Para Quinua el valor de porosidad 0,45 para blanca de Juli y 0,44 para kamiri es muy similar al valor obtenido.

#### 4.1.3. Diámetro de Partícula

Se realizó los cálculos de diámetros de partícula tomando 30 granos elegidos al azar, en el apéndice 6 se detallan las medidas realizadas; utilizando la ecuación (30).

**Tabla 10: Valores de diámetros de partícula para los granos estudiados**

Grano	Diámetro de Partícula (m)
Cañihua	0,00104
Kiwicha	0,00128
Quinoa	0,00189

Fuente: elaboración Propia.

#### 4.1.4. Viscosidad del aire

Se Toma como dato el valor 0,0000181 Kg/ms ( foust 1999)

### 4.2. DISEÑO DEL EXPERIMENTO

#### 4.2.1. Cañihua, Kiwicha, Quinoa

En el apéndice 8, 9, 10 se muestra el resumen de los análisis de varianza de los modelos matemáticos asociados a los experimentos para cada grano estudiado.

Para los efectos principales de los factores en estudio:

Altura de lecho (H), diámetro de columna(D), Flujo de Aire (G); resultaron ser altamente significativos.

Para las interacciones: HD, HG, DG, HDG; resultaron ser altamente significativos.

Lo que indica que los factores involucrados influyen de manera directa en la caída de presión para cada uno de los granos estudiados; lo que era de esperarse puesto que los factores estudiados según los modelos de Kozeny-Carman (1952) y Ergun (1952); influyen directamente en la caída de presión.

#### 4.2.2. Ajuste de Curvas

En el anexo 3 se detallan los resultados del análisis de ajuste de curvas para todos los granos estudiados, realizados con el software QTIPLLOT de los modelos adecuados de Kozeny-Carman y Ergun, indicados en los apartados 3.4.2.3.1. y 3.4.2.3.2.

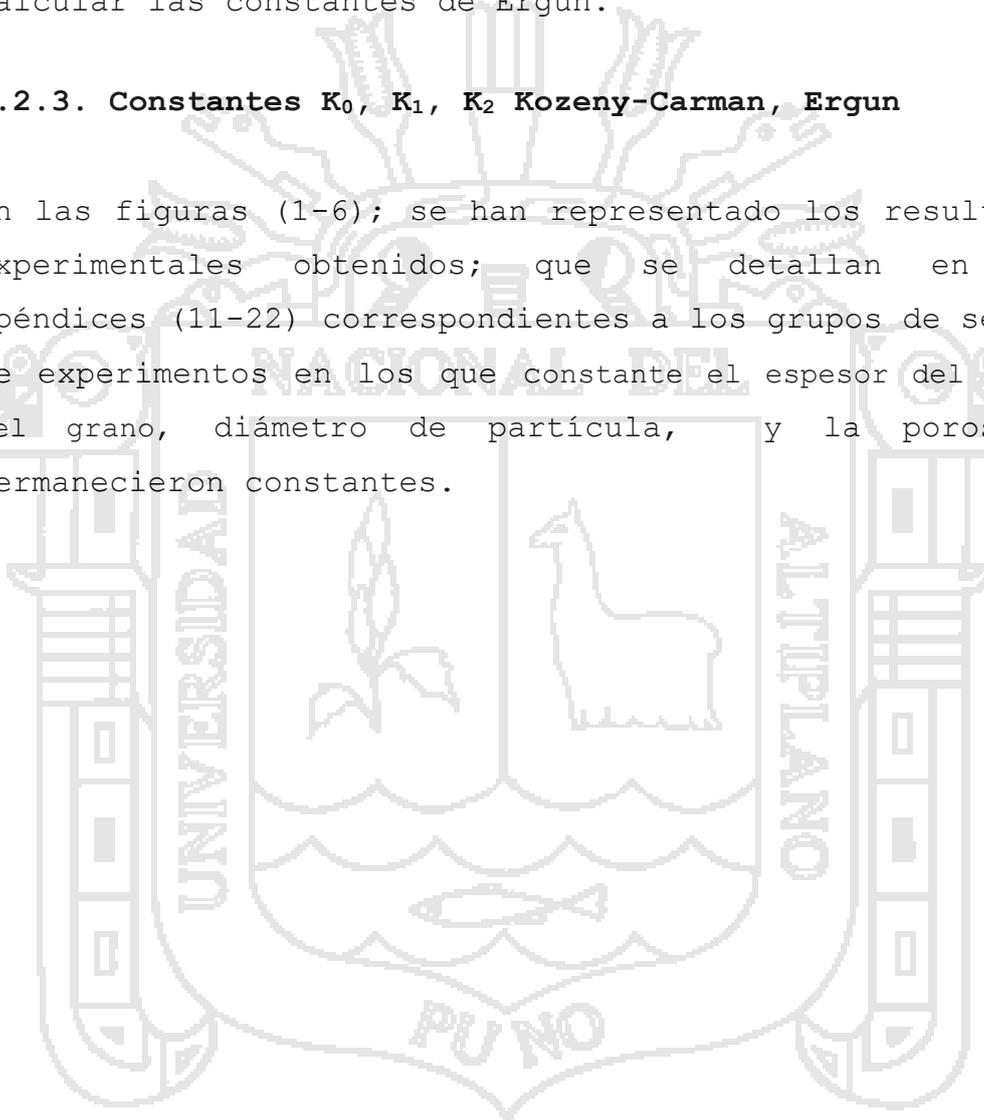
Se observa que el ajuste de la razón  $\frac{g_c \cdot p}{L}$  frente a  $V_0$ , en todos los granos estudiados y para todas las alturas propuestas el coeficiente de determinación es mayor al 80% llegando al 99% en la mayoría de las alturas de lecho de grano; de manera que el modelo planteado es adecuado para poder calcular la constante de Kozeny-Carman.

Para el ajuste de curvas del modelos adecuado de Ergun, se detallan los resultados del análisis en el anexo 3; para cada grano estudiado y para todas las alturas propuestas.

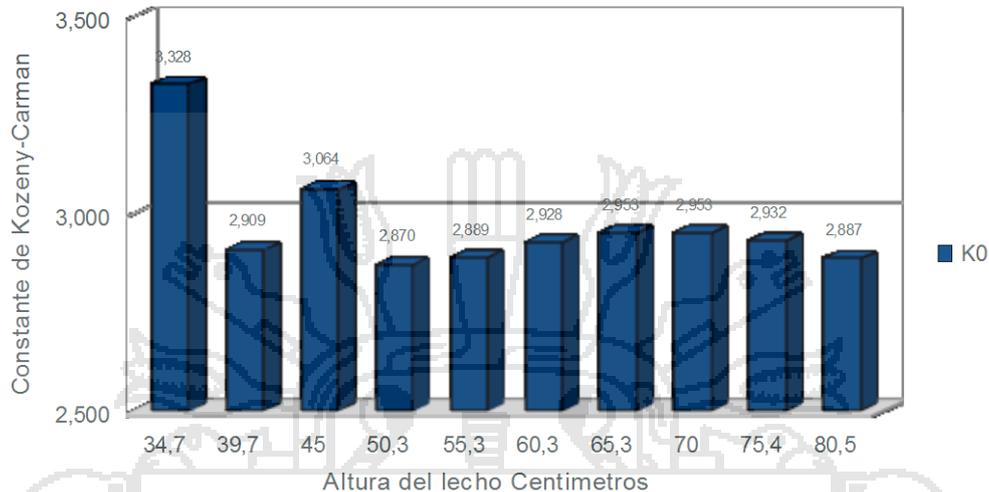
Se observa que el ajuste de la razón  $\frac{g_c \rho}{L}$  frente a  $V_0$ , en todos los granos estudiados y alturas propuestas se tiene un coeficiente de determinación mayor al 80% llegando al 99% en la mayoría de las alturas de lecho grano; de manera que el modelo planteado es adecuado para calcular las constantes de Ergun.

#### 4.2.3. Constantes $K_0$ , $K_1$ , $K_2$ Kozeny-Carman, Ergun

En las figuras (1-6); se han representado los resultados experimentales obtenidos; que se detallan en los apéndices (11-22) correspondientes a los grupos de series de experimentos en los que constante el espesor del lecho del grano, diámetro de partícula, y la porosidad permanecieron constantes.



#### 4.2.3.1. CAÑIHUA



**Figura 11. Valores de las constantes  $K_0$  de Kozeny-Carman para cada altura de lecho de grano de Cañihua (cm) en la Columna a1**

Se Puede observar que las constantes  $K_0$  para cada altura preestablecida en la columna a1 están entre el rango de (2,870-3,328), los valores según Foust (1998) se encuentra entre 3,5 y 5,5, siendo su valor mas común de 5. Escardino et al (1970) menciona que los valores obtenidos deberían reflejar la forma esférica no perfecta de granos de diversos cereales influyen sobre la orientación de los mismos al constituir el lecho. Kozeny (1927) asumió que los canales en el lecho granular es equivalente a un grupo de canales paralelos similares tal que la superficie interior total y el volumen interior total son iguales a la superficie de la partícula y al volumen de los poros en el lecho mismo, estas condiciones

no se dieron en nuestro experimento por lo que los valores obtenidos deberían reflejar el comportamiento real del lecho con un grupo de canales que no son todos similares.

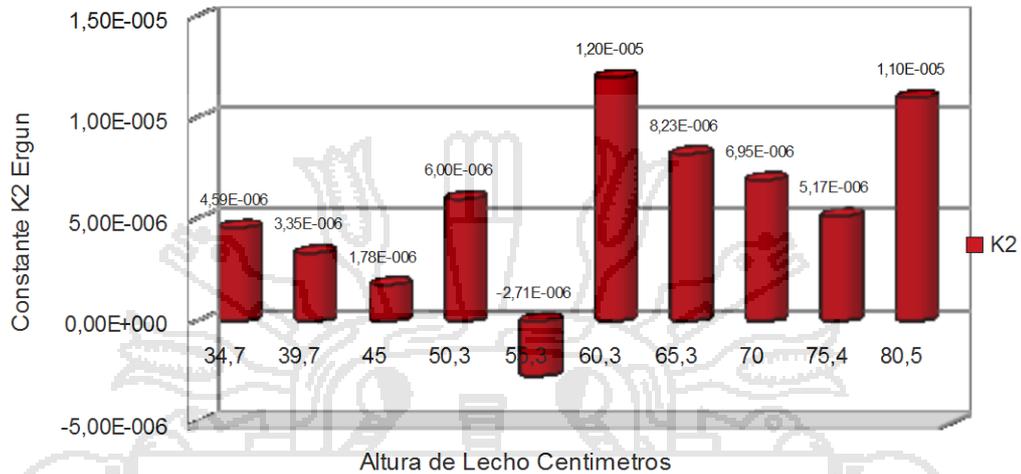
Pero podemos contrastar nuestros resultados obtenidos que coinciden con los obtenidos por Linarez y Velezmoro (2005); que se encuentran en el rango 3,12-4.94.

**Figura 12. Valores de las constantes  $K_1$  de Ergun para cada altura de lecho de grano de Cañihua (cm) en la Columna al**



Podemos observar que los valores de la constante de Ergun  $K_1$  son relativamente similares a los valores de la constante de Kozeny  $K_0$  que están en un rango de (2,73-3,26) , Esto se debe que según la teoría mencionada por Levenspiel (1993) La ecuación de Ergun es la combinación de la ecuación de Kozeny-Carman para la región de flujo laminar mas la ecuación de Blake-Plumer para la región

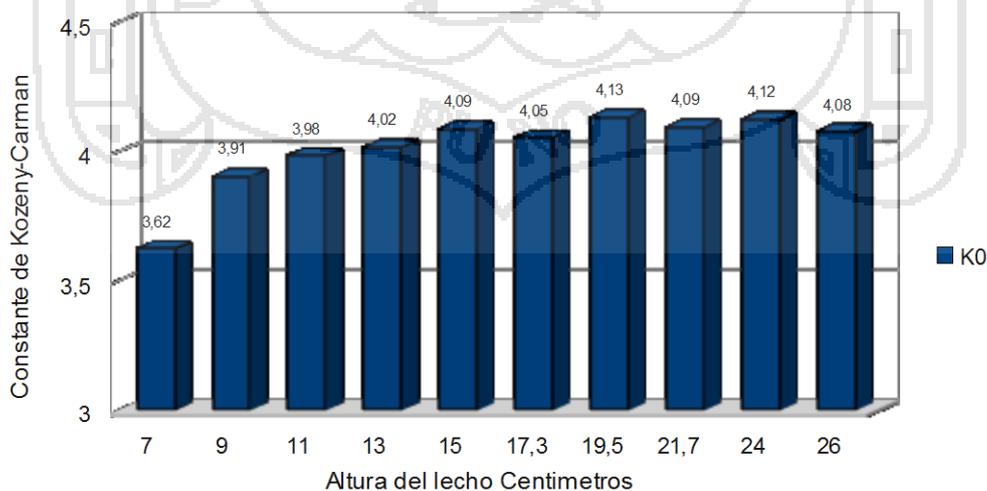
turbulenta, en este caso los valores de  $K_1$  vendrían a ser relativamente los mismos que  $K_0$ .



**Figura 13.** Valores de las constantes  $K_2$  de Ergun para cada altura de lecho de grano de cañihua (cm) en la Columna al

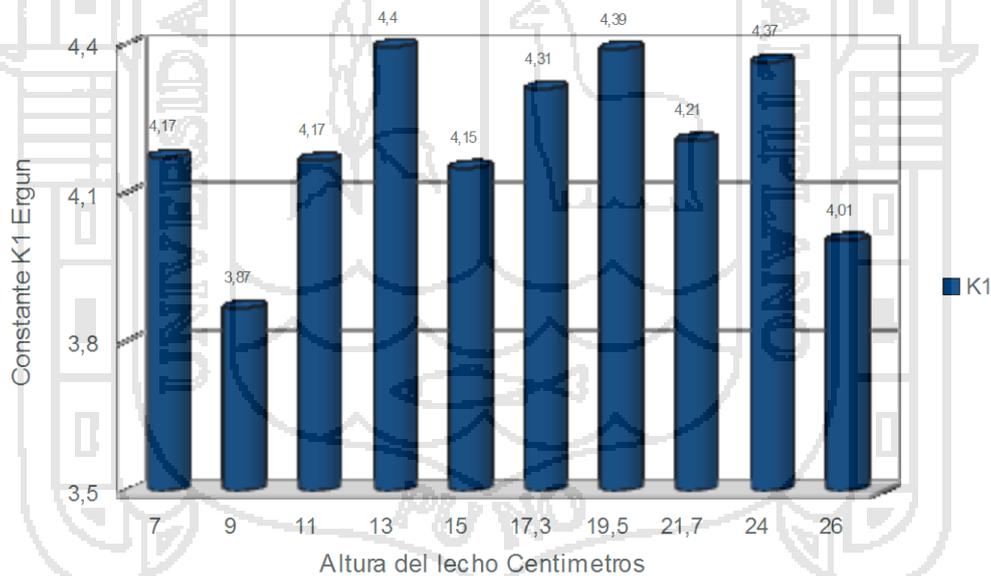
Los valores valores  $K_2$  obtenidos no reflejan el comportamiento del flujo estudiado puesto que el segundo miembro de la ecuación de Ergun detallado en la ecuación (36) vendría a ser la ecuación de Blake-Plumer para la región turbulenta (Levenspiel 1990), puesto que no se llegó a tener un flujo turbulento en el estudio.

**Figura 14.** Valores de las constantes  $K_0$  de Kozeny-Carman para cada altura de lecho de grano de Cañihua (cm) en la



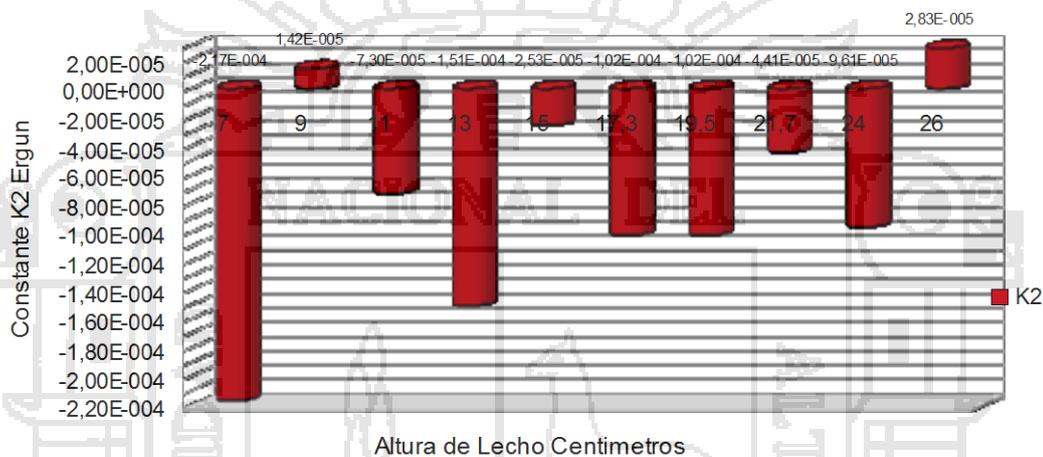
### Columna $a_2$

Para el caso de la columna  $a_2$  podemos observar que los valores de las constantes de Kozeny-Carman observadas se encuentran en el rango (3,62-4,13) ligeramente superiores a los valores obtenidos en las columna  $a_1$ , en teoría el diámetro mayor y alturas diferentes no deberían influir en los valores de las constantes de Kozeny-Carman pero este modelo fue dado para formas esféricas perfectas y canales totalmente paralelos, lo que nos demostrarían estos valores reflejarían el comportamiento real del lecho a las alturas y diámetro preestablecido. Pero podemos contrastar nuestros resultados obtenidos coinciden con los obtenidos por Linarez y Velezmoro (2005); que se encuentran en el rango 3,12-4.94.



**Figura 15. Valores de las constantes  $K_1$  de Ergun para cada altura de lecho de grano de Cañihua (cm) en la Columna a2**

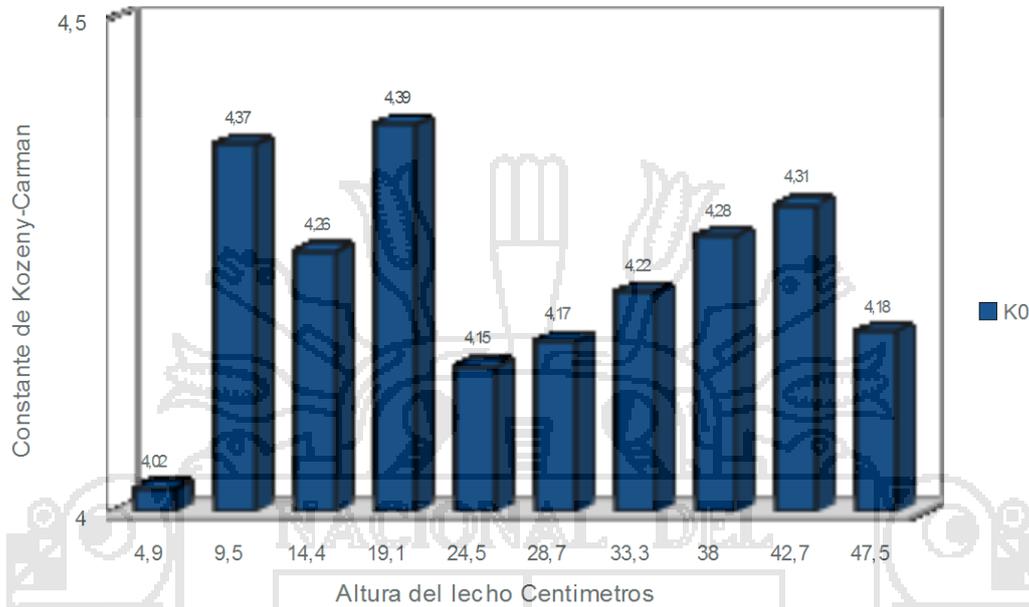
De igual manera que en la columna a<sub>1</sub> podemos observar que los valores de la constante  $K_1$  de Ergun también son relativamente similares a los valores de la constantes  $K_0$  esto se debe a la teoría citada por Levenspiel (1993).



**Figura 16. Valores de las constantes  $K_2$  de Ergun para cada altura de lecho de grano de Cañihua (cm) en la Columna a2**

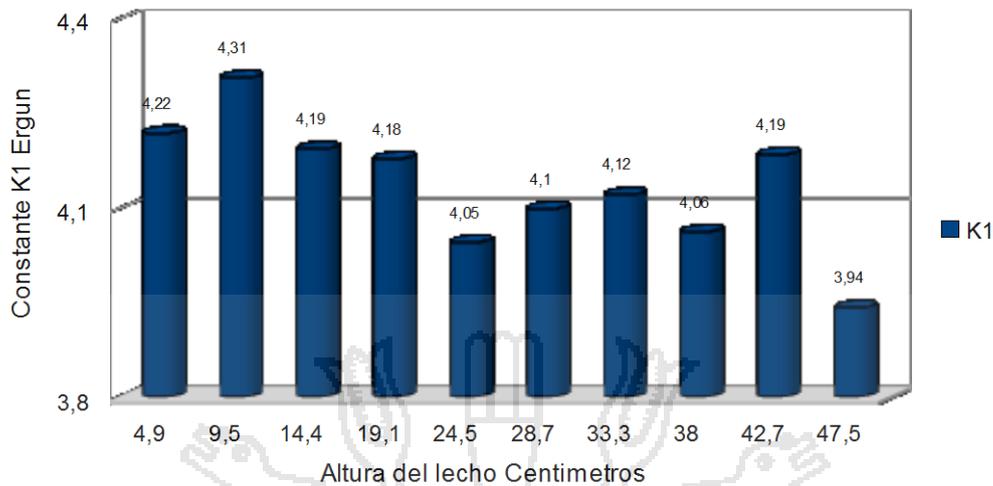
De igual manera para las constantes  $K_2$  Los valores obtenidos no reflejan el comportamiento del flujo estudiado puesto que el segundo miembro de la ecuación de Ergun detallado en la ecuación (36) vendría a ser la ecuación de Blake-Plumer para la región turbulenta (Levenspiel 1993), puesto que no se llegó a tener un flujo turbulento en el estudio.

## 4.2.3.1. KIWICHA



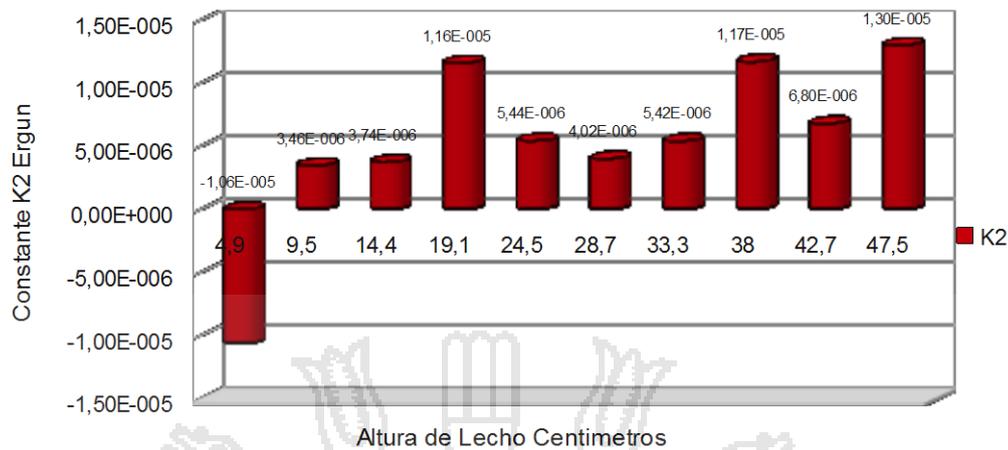
**Figura 17.** Valores de las constantes  $K_0$  de Kozeny-Carman para cada altura de lecho de grano de Kiwicha (cm) en la Columna  $a_1$

Los valores de las constantes de Kozeny-Carman  $K_0$  para Kiwicha en la columna  $a_1$  están en el rango de (4,02-4,39), en este caso podemos observar que los valores se encuentran dentro del rango teórico de 3,5-5 mencionado por Foust (1998), por lo que nuestros valores experimentales son teóricamente correctos.



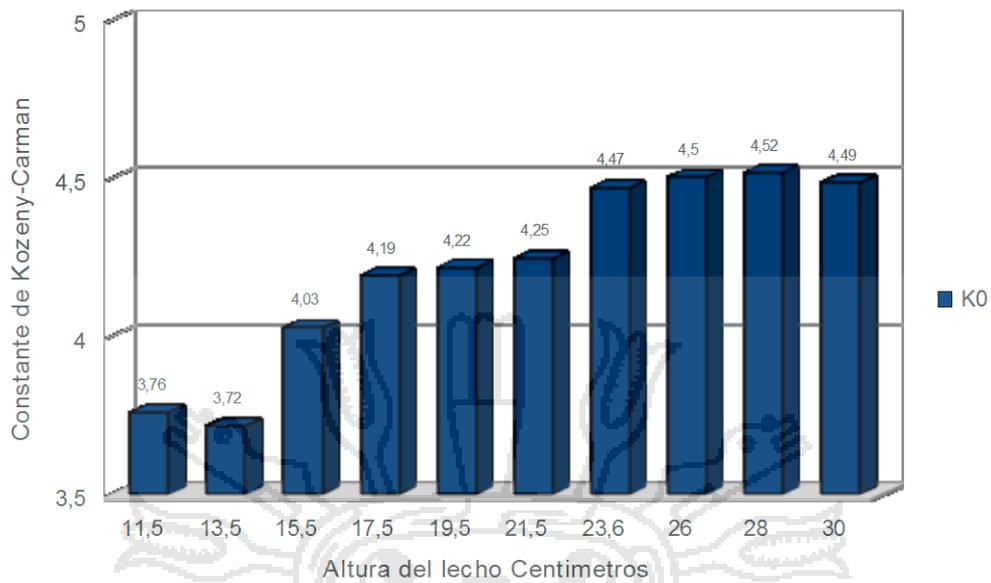
**Figura 18. Valores de las constantes  $K_1$  de Ergun para cada altura de lecho de grano de Kiwicha (cm) en la Columna al**

Para los valores de las constantes  $K_1$  para Kiwicha son similares a los de  $K_0$  estando en un rango de (3,94-4,31) estos valores se encuentran dentro del rango teórico de 3,5-5, y contrastan la teoría mencionada por Levenspiel (1993), que menciona que la ecuación de Ergun es la combinación de la ecuación de Kozeny-Carman para la región de flujo laminar mas la ecuación de Blake-Plumer para la región turbulenta.



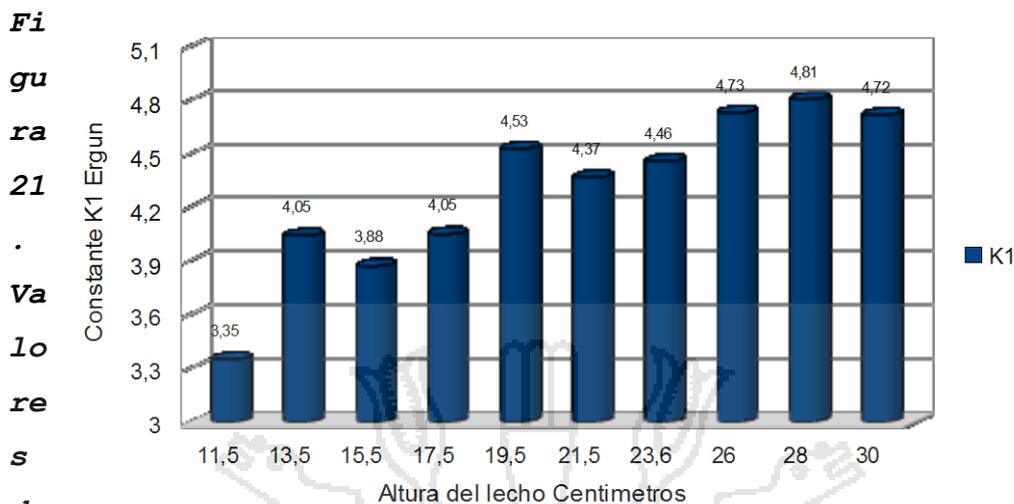
**Figura 19. Valores de las constantes  $K_2$  de Ergun para cada altura de lecho de grano de Kiwicha (cm) en la Columna a1**

los valores de las constantes  $K_2$  de Ergun para la columna a1 no reflejan el comportamiento del flujo estudiado puesto que el segundo miembro de la ecuación de Ergun detallado en la ecuación (36) vendría a ser la ecuación de Blake-Plumer para la región turbulenta (Levenspiel 1993).



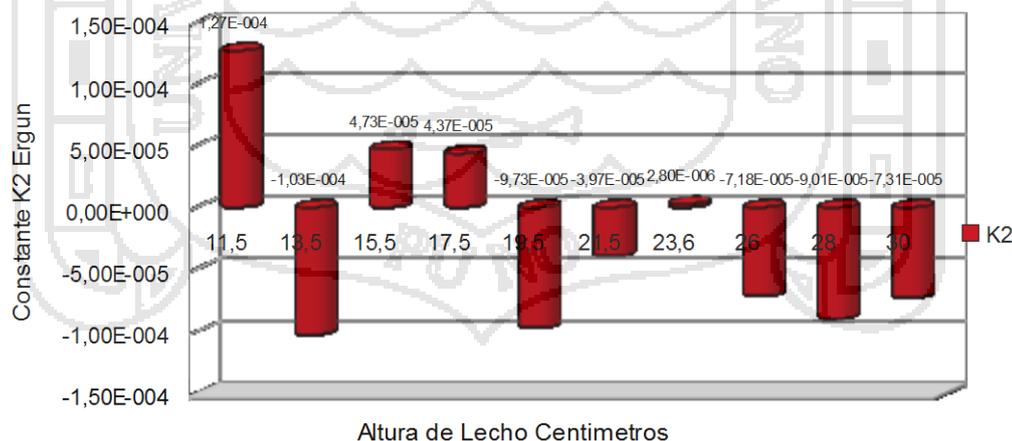
**Figura 20. Valores de las constantes  $K_0$  de Kozeny-Carman para cada altura de lecho de grano de Kiwicha (cm) en la Columna a2**

Los valores de las constantes  $K_0$  de Kozeny-Carman se encuentran en el rango de (3,72-4,52), se hallan dentro del rango teórico de la teoría mencionada por Foust (1998) se encuentra entre 3,5 y 5,5. Que contrasta resultados teóricamente correctos.



**las constantes  $K_1$  de Ergun para cada altura de lecho de grano de Kiwicha (cm) en la Columna a2**

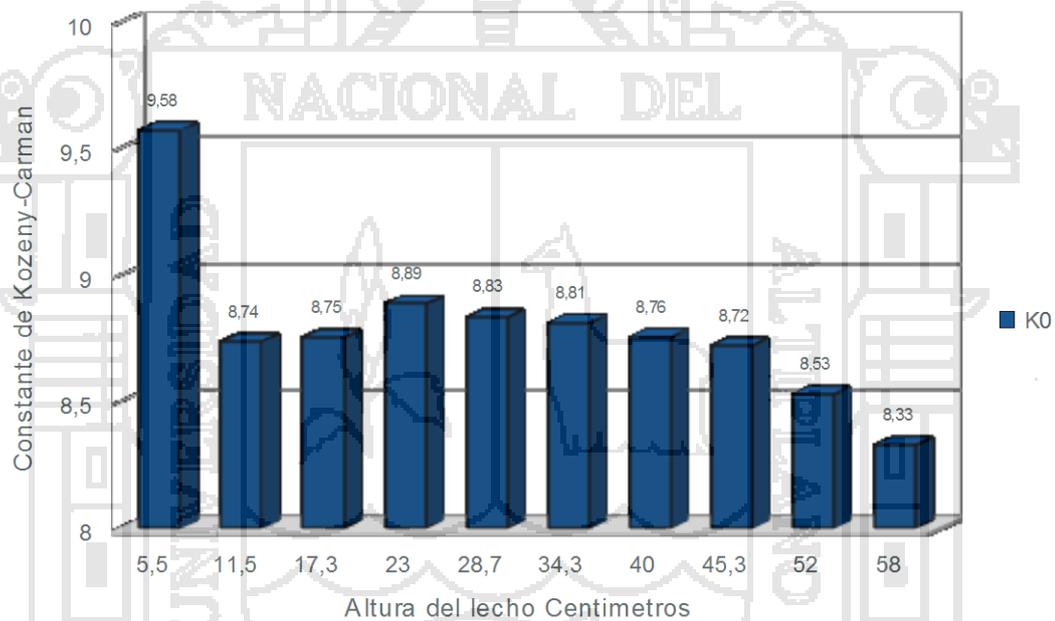
Observamos que los valores de las constantes  $K_1$  de Ergun son similares a los de  $K_0$  estando en un rango de (3,35-4,81), Esto se debe que según la teoría mencionada por Levenspiel (1993) La ecuación de Ergun es la combinación de la ecuación de Kozeny-Carman para la región de flujo laminar mas la ecuación de Blake-Plumer para la región turbulenta.



**Figura 22. Valores de las constantes  $K_2$  de Ergun para cada altura de lecho de grano de Kiwicha (cm) en la Columna a2**

los valores de las constantes  $K_2$  de Ergun para la columna  $a_2$  no reflejan el comportamiento del flujo estudiado puesto que el segundo miembro de la ecuación de Ergun detallado en la ecuación (36) vendría a ser la ecuación de Blake-Plumer para la región turbulenta (Levenspiel 1993), en el experimento no se llegó a tener flujo turbulento.

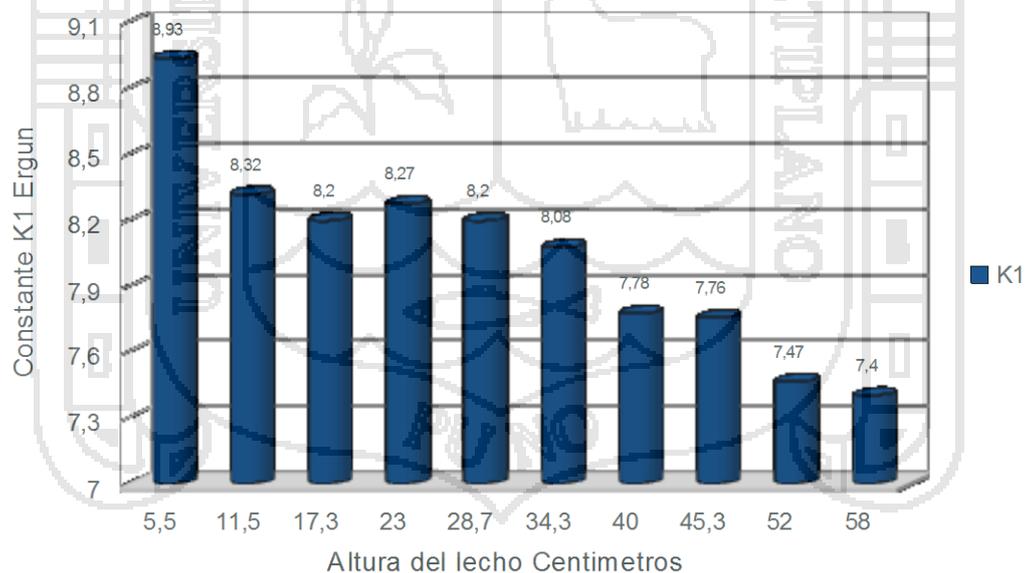
#### 4.2.3.1. QUINUA



**Figura 23. Valores de las constantes  $K_0$  de Kozeny-Carman para cada altura de lecho de grano de Quinoa (cm) en la Columna  $a_1$**

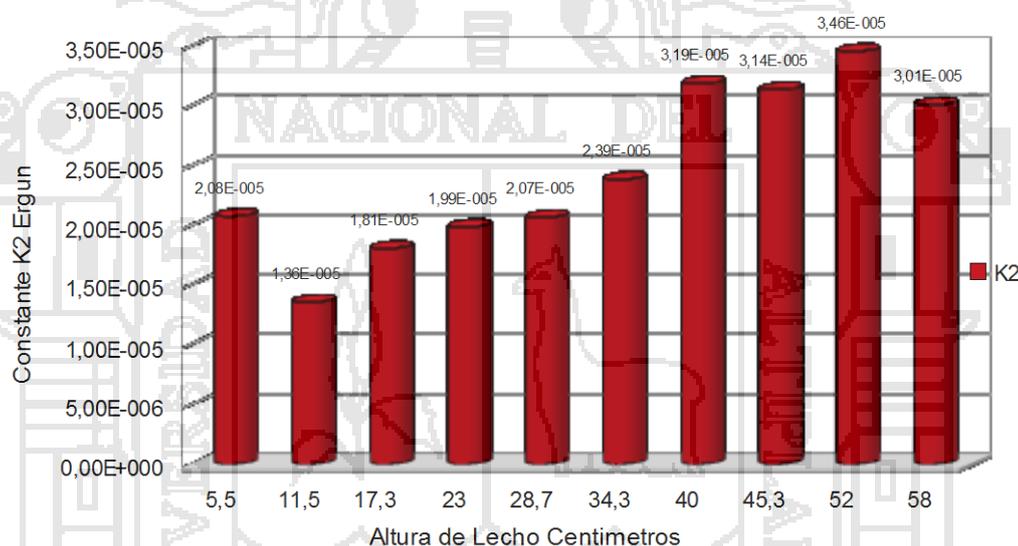
Los valores de las constantes de Kozeny-Carman obtenidos para Quinoa en la columna  $a_1$  se encuentran en el rango de (8,33-9,58), en teoría los valores deberían encontrarse

entre en rango de (3,5-5), lo que puede haber sucedido en este caso de igual manera que en los lechos de granos de Cañihua para la columna  $a_1$  la forma no esférica perfecta de los granos que influye sobre la orientación de los mismos al constituir el lecho, y que afecta a la sinuosidad e irregularidad de los canales por los que a de circular el aire, circunstancias que no están previstas en las ecuaciones de Kozeny-Carman, por lo tanto deberían reflejarse en los valores de  $K_0$ ; además de esto la rugosidad de los granos influye sobre la caída de presión del aire al circular a través de los canales mas o menos sinuosos del lecho de grano. Por dos motivos: a) un aumento de rugosidad en las paredes de los canales, implica un aumento de  $\Delta P$ ; la influencia de esta variable tampoco esta prevista en las ecuaciones de Kozeny-Carman ni Ergun; (Escardino et al 1970).



**Figura 24.** Valores de las constantes K1 de Ergun para cada altura de lecho de grano de Quinoa (cm) en la Columna  $a_1$

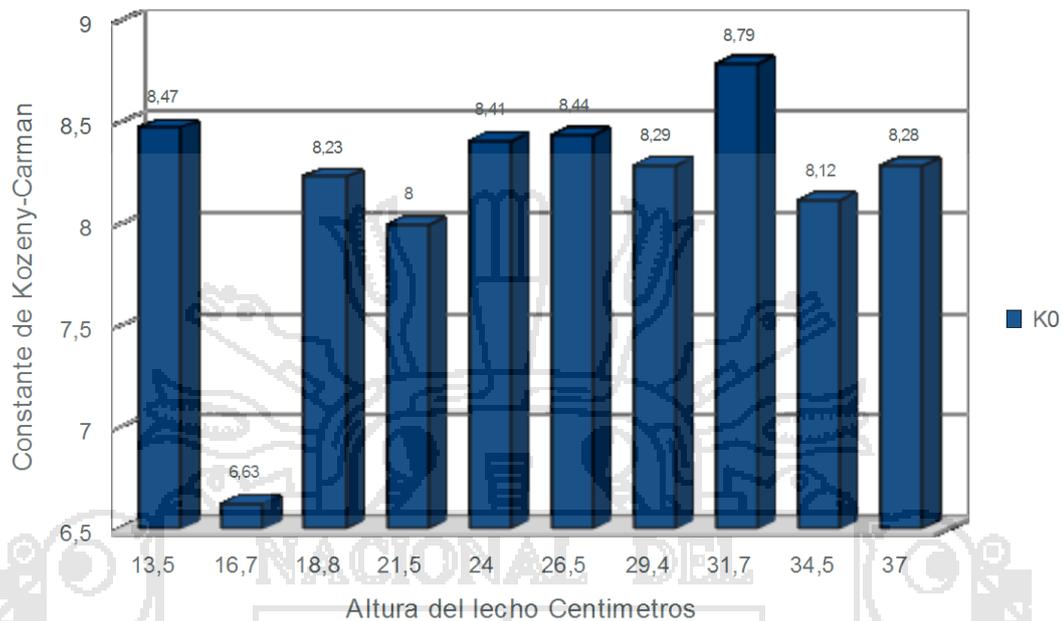
Podemos observar que los valores de la constante de Ergun  $K_1$  están en un rango de  $(7,4-8,93)$ ; son relativamente similares a los valores de la constante de Kozeny  $K_0$ , Esto se debe que según la teoría mencionada por Levenspiel (1993) La ecuación de Ergun es la combinación de la ecuación de Kozeny-Carman para la región de flujo laminar mas la ecuación de Blake-Plumer para la región turbulenta, en este caso los valores de  $K_1$  vendrían a ser relativamente los mismos que  $K_0$ .



**Figura 25. Valores de las constantes  $K_2$  de Ergun para cada altura de lecho de grano de Quinoa (cm) en la Columna a1**

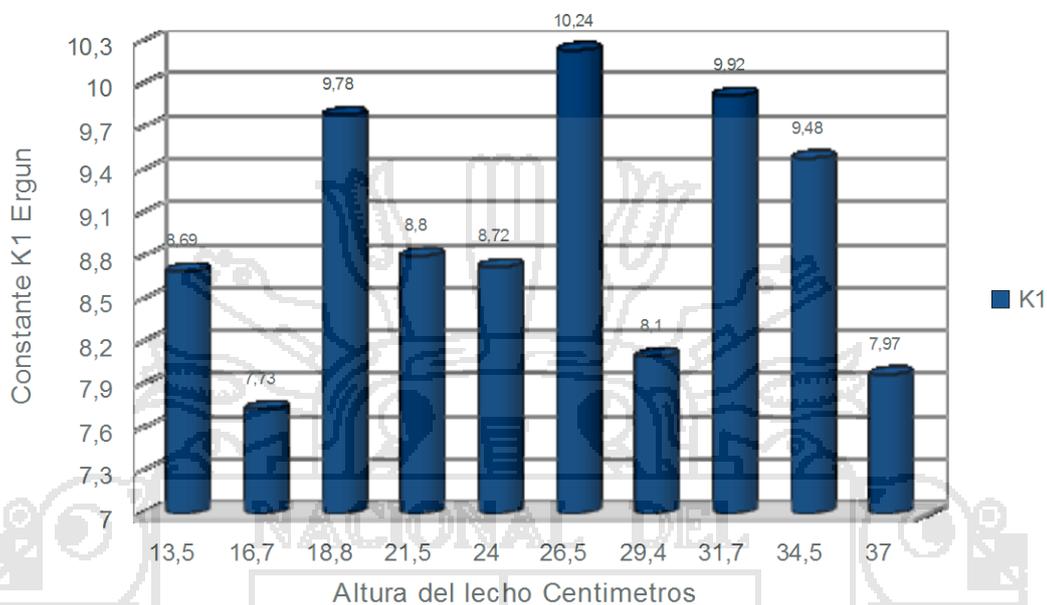
Los valores de las constantes  $K_2$  de Ergun para la columna a1 no reflejan el comportamiento del flujo estudiado puesto que el segundo miembro de la ecuación de Ergun detallado en la ecuación (36) vendría a ser la ecuación de Blake-Plumer para la región turbulenta (Levenspiel

1993), en el experimento no se llegó a tener flujo turbulento.



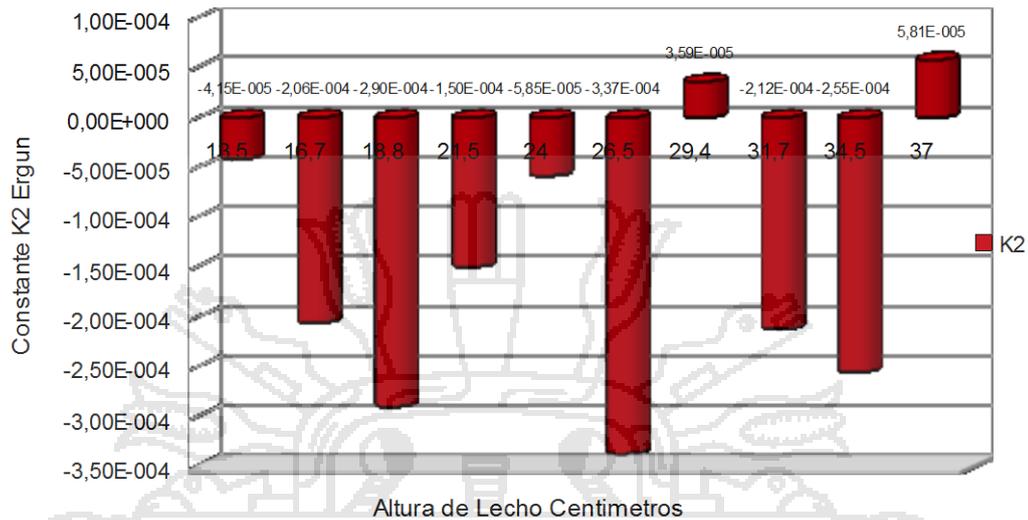
**Figura 26. Valores de las constantes  $K_0$  de Kozeny-Carman para cada altura de lecho de grano de Quinoa (cm) en la Columna  $a_2$**

Observamos que los valores de  $K_0$  están dentro del rango (6,63-8,79) estos son superiores a los teóricos mencionados por Foust (1998) de similar manera puede haber ocurrido lo mismo que sucedió en la columna al mencionados por (Escardino et al 1970); la disminución de precisión del instrumento medidor de presión (Anexo 1) al estar en los límites de su rango de registro de datos como podemos observar en el apéndice 6 el registro de caídas de presión.



**Figura 27. Valores de las constantes  $K_1$  de Ergun para cada altura de lecho de grano de Quinoa (cm) en la Columna a2**

Los valores obtenidos de la constante  $K_1$  se encuentran entre el rango de (7,73-10,24) para la columna a2 estos resultados no contrastan la teoría mencionada por Levenspiel (1993) La ecuación de Ergun es la combinación de la ecuación de Kozeny-Carman para la región de flujo laminar mas la ecuación de Blake-Plumer para la región turbulenta; lo que probablemente sucedió en esta columna se puede deber a la disminución de precisión del instrumento medidor de presión (Anexo 1) al estar en los limites de su rango de registro de datos como podemos observar en el apéndice 6 el registro de caídas de presión.



**Figura 28. Valores de las constantes  $K_2$  de Ergun para cada altura de lecho de grano de Quinoa (cm) en la Columna a2**

Los valores de las constantes  $K_2$  de Ergun para la columna  $a_1$  no reflejan el comportamiento del flujo estudiado puesto que el segundo miembro de la ecuación de Ergun detallado en la ecuación (36) vendría a ser la ecuación de Blake-Plumer para la región turbulenta (Levenspiel 1993), en el experimento no se llegó a tener flujo turbulento.

## V. CONCLUSIONES

- Las densidades de los granos de cañihua variedad Cupi, Kiwicha variedad Oscar Blanco, Quinua variedad Real tienen un promedio de 1181,2; 1202,5; 1242,7 para densidad real y 768,96; 763,59; 695,91 para la densidad aparente se encuentran dentro de los rangos reportados para granos de quinua, cañihua y kiwicha. Los valores de porosidad son (0,349; 0,365; 0,440) siendo menor para cañihua y mayor para quinua. Los diámetros de partículas se encuentran dentro de los rangos reportados para cada grano.
- La adecuación de los modelos de Kozeny-Carman y de Ergun nos facilitó el cálculo de las constantes de Kozeny-Carman y de Ergun. Los valores obtenidos de las constantes reflejan el comportamiento del flujo de aire en lechos de granos empacados para un régimen de flujo de aire laminar.

## VI. RECOMENDACIONES

\*Se recomienda hacer investigaciones asociadas al flujo de aire en granos andinos.

\*Se recomienda hacer estudios con mayor caudal de aire.

\*Se recomienda utilizar instrumentos de mayor rango de medición para análisis de flujo turbulento.



**NOMENCLATURA:**

- a** = Área,  $\text{pie}^2$  o  $\text{m}^2$ ;  $a_p$  área proyectada de la partícula;  $a_s$  área total de las partículas del lecho.
- $a_e$**  = Aceleración de la partícula a partir de una fuerza externa,  $\text{pies}/\text{s}^2$  o  $\text{m}/\text{s}^2$ .
- D** = Diámetro,  $\text{pies}$  o  $\text{m}$ ;  $D_p$  diámetro de la partícula esférica o de una esfera que tiene el mismo volumen que la partícula;  $D_e$  diámetro medio efectivo para la mezcla de partículas.
- f** = Factor de fricción de Fanning, adimensional;  $f_P$ , factor de fricción para lechos de relleno.
- g** = Aceleración de la gravedad,  $\text{pies}/\text{s}^2$  o  $\text{m}/\text{s}^2$
- $g_c$**  = Factor de proporcionalidad de la ley de Newton,  $32,174 \text{ pies}\cdot\text{lb}/\text{lbf}\cdot\text{s}^2$  o  $9,80665 \text{ m}\cdot\text{kg}/\text{kgf}\cdot\text{s}^2$
- m** = Masa,  $\text{lb}$  o  $\text{Kg}$
- $K_0$**  = Constante de la ecuación de Kozeny-Carman.
- $k_1$   $k_2$**  = Constantes de la Ecuación de Ergun.
- $N_{ReP}$**  = Número de Reynolds de la partícula, adimensional.
- $N_i$**  = Número de partículas en cada intervalo de tamaños.
- $N_P$**  = número total de partículas del lecho
- P** = presión  $\text{N}/\text{m}^2$ ;  $p_a$ ,  $p_b$ , presión en los puntos a y b;  $p_s$ , en el punto de estancamiento;  $p_o$  en el fluido no distorsionado.
- r** = Radio del camino de la partícula,  $\text{pies}$  o  $\text{m}$ .
- S** = Área de la sección transversal del lecho,  $\text{pie}^2$  o  $\text{m}^2$ ;  $S_0$  área de la torre vacía.
- $S_p$**  = Área de una sola partícula,  $\text{pie}^2$  o  $\text{m}^2$

$T$  = Temperatura °F, °C, °R o K.

$\bar{V}$  = Velocidad volumétrica del fluido, pies/s  
 $\bar{V}_o$  o m/s;

,velocidad superficial.

$V_p$  = Volumen de una sola partícula, pie<sup>3</sup> o m<sup>3</sup>.

$h$  = Altura sobre el plano de referencia Pies o m.

$\rho$  = Densidad lb/pie<sup>3</sup> o Kg/m<sup>3</sup>.

$\Delta p$  = Caída de presión.

$\phi$  = Esfericidad.

$L$  = Altura de relleno del lecho.

$V_o$  = Velocidad superficial volumétrica o másica del  
aire.

$\mu$  = Viscosidad.

$\epsilon$  = Porosidad.

$G$  = Velocidad másica del fluido que se acerca a la  
partícula, lb/pie<sup>2</sup>-s o kg/m<sup>2</sup>-s; también velocidad  
másica superficial en un lecho de relleno.

(PVC) = Polivilino de cloruro

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Alvarez, M., J. Pavón y S. Von Rütte. 1990. Caracterización. Pp. 7-29. Cap. I. En: C. Wahli (Ed), "Quinoa hacia su cultivo comercial", Latin Reco S.A. Quito, Ecuador.
2. Atwell, WA., BM. Patrick LA. Johnson and RW. Glass. 1983. "Characterization of quinoa starch". Cereal Chemistry 60(1):9-11.
3. Brennan, JG., Butters, JR., Cowell, ND. y Lilly, AEU., 1980. Las Operaciones de la Ingeniería de los Alimentos. 2da. ed. Acribia, Zaragoza, España.
4. Carman, K. 1996. Some Physical Properties of Lentil Seeds. J. Agric. Eng. Res. 63:87-92.
5. CENAN (Centro Nacional De Alimentación Y Nutrición) 1993: "Tabla de Composición de los Alimentos". Instituto Nacional de Salud. Ministerio de Salud. Lima-Perú.
6. Collazos C. 1960: "La Composición de los Alimentos Peruanos". Ministerio de Salud. Instituto de Nutrición. Lima-Perú.
7. Cheftel, JC & Cheftel, H. 1987: "Introducción a la Bioquímica y Tecnología de los Alimentos". VolII. Ed. Acribia S.A. Zaragoza España.
8. Earle, RL. 1998, "Ingeniería de Alimentos", Editorial Acribia, Zaragoza - España.
9. Ergun, S., 1952. Fluid flow through packed columns. Chem. Eng. Prog.
10. Escardino, A., F. Ruiz y P. Barbero. 1970. "Circulación de aire a través de lechos formados

- por granos de cereales". Agroquímica y Tecnología de Alimentos. Madrid-España.
11. Fennema, O. 2000: "Química de los Alimentos", Editorial Acribia, Zaragoza-España.
  12. Foraquita, L. & Lipa, W. 2005: "Evaluación de las Propiedades Físicas y Termales de dos Variedades de Cañihua (*Chenopodium canihua* Cook)", Universidad Nacional del Altiplano, Puno-Perú.
  13. Foust, A., 1998. "Principios de Operaciones Unitarias". Compañía editorial Continental, México, México.
  14. Geankoplis, CJ., 1998. "Procesos de transporte y operaciones unitarias". 3a ed. México.
  15. Geankoplis, CJ., 1993. "Procesos de transporte y operaciones unitarias Teoría de la difusión molecular". Ed. México, D.F.
  16. Hermida BJ, Fundamentos de Ingeniería de Procesos Agroalimentarios, Ed. Mundi Prensa, España, 2000.
  17. Ibarz, A. & Barbosa, G. 2003: Unit operations in food engineering. Inc. Madrid-España.
  18. Kent, N. 1983. "Technology of Cereals". Third Edition Pergamon Press. Oxford, New York.
  19. Kozeny, J. 1927. Ueber kapillare Leitung des Wassers im Boden. Sitzungsber Akad. Wiss.
  20. Koziol, MJ. 1992. Composición química. Pp. 139-159. Cap. VIII. En: C. Wahli (Ed.), Quinoa hacia su cultivo comercial, Latinreco S.A. Quito, Ecuador.
  21. Kunii D. & Levenspiel O., 1991. "Fluidization Engineering". Edit. Butterworth-Heinemann Series Editors, 2nd. Edition.

22. León, J. 2003. "Cultivo de la Quinua",. Universidad Nacional del Altiplano Puno-Perú.
23. Lescano, JL. 1980. "Avances en la Genética de la Quinua. En: Primera Reunión sobre Genética y Fitomejoramiento de la Quinua". Universidad Nacional Técnica del Altiplano, Instituto Interamericano de Ciencias Agrícolas / Centro de Investigación Internacional para el Desarrollo. Puno, Perú.
24. Levenspiel 1993. "Flujo de Fluidos e Intercambio de Calor". Editorial Reverte. Barcelona - España.
25. Lewis, MJ. 1993: Propiedades Físicas de los alimentos y de los sistemas de procesado. Ed. Acribia, Zaragoza España.
26. Linares L. y Velezmore C. 2005. "Modelización del flujo de aire a través de un lecho de granos de kiwicha (*Amaranthus caudatus* Linnaeus)". Universidad Agraria La Molina, Lima-Perú
27. Mazariegos, BD., 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.
28. Mc Cabe, W.; Smith, R.; Harriot, P. 1991: "Operaciones Básicas de Ingeniería Química", Mc Graw-Hill, Inc. Madrid-España.
29. Meyhuay, M. 1997. Ch. XXI. In "Post Harvest Operations,". AGSI/FAO: D. Mejia, B. Lewis, C. Bothe (Ed.) Instituto de desarrollo Agroindustrial

- (INDDA) Perú. <http://www.fao.org/inpho/>. (Consulta 18 de Junio del 2009).
30. Medina, W, 2000: "Determinación de las propiedades físicas, mecánicas y termales de Quinoa (*Chenopodium quinoa wild*) variedad Blanca de Juli y Kamiri". Tesis. Universidad de Concepción. Chillan - Chile.
  31. Mohsenin, NN. 1970. "Physical Properties of Plant and Animal and Materials", Gordon and Breach Science Publishers, USA.
  32. Mujica, A. & otros. 2002: "La Cañihua (*Chenopodium pallidicaulle Aellen*) en la nutrición humana del Perú".
  33. Mujica A. 1993 "Cultivo de Quinoa. Instituto Nacional de Investigación Agraria".
  34. Potter, N. & Hotchkiss, J., 1995: "Food Science, 5<sup>th</sup> ed." Internacional Thomson Publishing. New York-USA.
  35. Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación, FAO 2000: "Manual sobre la utilización de los cultivos andinos subexplotados en la alimentación", Santiago-Chile.
  36. Rodríguez F, Aguado J, Calles JA, et al. "Ingeniería de la industria alimentaria (II)", Ed. Síntesis España, 2003.
  37. Ritva Repo, R. 1998: "Introducción a la Ciencia y Tecnología de cereales y granos andinos". Lima-Perú.
  38. Schlueter, EM. y Witherspoont, PA. 1994: "Note on the Validity of the Kozeny-Carman Formulas For

- consolidated Porous Media" Department of Materials Science and Mineral Engineering; University of California, Berkeley.
39. Singh, P. & Heldman, R. 1998. "Introducción a la Ingeniería de los Alimentos". 2da. Ed. Zaragoza - España.
  40. Solano, M. (2001). "Botanica Sistemática". Universidad Nacional Del Altiplano.
  41. Summar L. 1997. "La Kiwicha y su cultivo. Centro de Estudios Regionales Andinos" "Bartolome de las Casas". Cusco - Perú.
  42. Tapia, M. 1990. "Cultivos Andinos Subexplotados y su aporte a la alimentación". Organización de la Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación, Oficina Regional para América Latina y el Caribe.
  43. Telis, JR, Sobral, PJ. "Caída De Presión En Lecho Fijo De Cubos De Papa, Remolacha Y Zanahoria Considerando Encogimiento", Ciencia Tecnología de Alimentos, Campinas, 23(supl): 110-115, dez. 2003. (Brasil).
  44. Torres, HA. & Minaya, I. 1980. "Escarificadora de Quinua Publicaciones Miscelaneas" Nro. 243, IICA. Lima, Perú.
  45. Trigos SP, Prieto JM. 2000. "Diseño Construcción Y Simulación De Un Secador Con Circulación De Aire En Lechos Empacados Y Lechos Fluidizados Y Su Evaluación En El Secado De Quinua (Chenopodium Quinoa Wild)", Tesis, Universidad Nacional del Altiplano, Facultad de Ciencias Agrarias, Escuela

profesional de Ingeniería Agroindustrial, Puno-Perú.

46. Vallenas, M & Carpio, F. 1974. "La Cañihua y su cultivo". Boletín N°25. Ministerio de Agricultura, Zona Agraria XII, Puno, Perú.
47. Varriano E. & De Francisco A. 1984. "Ultraestructure of Quinoa Fruit (*Chenopodium Quinoa Wild*)". Food Microestructure (3) 165-173.
48. Warren L, McCabe CJ, Smith HP, "Operaciones Unitarias En Ingeniería Química", Cuarta edición, Ed. Mc Graw Hill España, Traducido de la cuarta edición en inglés de Unit Operations of Chemical Engineering, 1991.
41. <http://www.freestudy.co.uk/fluid/20mechanics/t4203.pdf> consulta (junio 2007)
42. <http://www.clarkson.edu/subramanian/ch301/notes/packuidbe d.pdf> (consulta junio 2007)