

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



**PUNO – PERÚ**

**2015**

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

TESIS

EFFECTO DEL CONTENIDO DE HUMEDAD SOBRE EL  
COEFICIENTE DE FRICCIÓN ESTÁTICO Y ÁNGULO DE REPOSO  
DE CUATRO VARIEDADES DE QUINUA (*Chenopodium quinoa*  
Willd.) CULTIVADA EN PUNO

PRESENTADA POR:

MARITZA MAMANI MIRANDA

PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE:

INGENIERO AGROINDUSTRIAL

APROBADA POR EL SIGUIENTE JURADO:

PRESIDENTE

:

Ph. D. Angel, MUJICA SANCHEZ

PRIMER MIEMBRO

:

MSc. Victor F., CHOQUEHUANCA CACERES

SEGUNDO MIEMBRO

:

Ing. Marienela, CALSIN CUTIMBO

DIRECTOR DE TESIS

:

Dr. Wenceslao T., MEDINA ESPINOZA

ASESOR DE TESIS

:

M.Sc. Thomas, ANCCO VIZARRA

ASESOR DE TESIS

:

M.Sc. Nils L., HUAMAN CASTILLA

PUNO – PERU  
2015

Área: Ingeniería y tecnología

Tema: Propiedades físicas y estructurales

## DEDICATORIA

### ***A Dios.***

*Por haberme permitido llegar hasta este punto y haberme dado salud para lograr mis objetivos, además de su infinita bondad y amor.*

### ***A mis queridos padres***

*Lucio E. Mamani Gutiérrez y Nieves Miranda Mamani (QEPD); por sus consejos, sus valores, por la motivación constante que me ha permitido ser una persona de bien, pero más que nada, por su amor.*

### ***A mi familia.***

*A mi esposo Tomás, y tres adorados hijos (Smith, Dennys, Gary) quienes constituyeron el motor principal, de mi vida, por la paciencia y el tiempo que no les pude dedicar. A ellos mi eterna gratitud.*

## AGRADECIMIENTOS

*En primer lugar, Agradezco a Dios, ser maravilloso que me dio fuerza y fe para creer lo que me parecía imposible terminar.*

*A mi director de Tesis, Dr. Wenceslao T. Medina Espinoza, mi más amplio agradecimiento por haberme confiado este trabajo en persona, por su paciencia y valiosa dirección y apoyo para seguir este camino de Tesis y llegar a la conclusión del mismo. Cuya experiencia y educación han sido mi fuerte motivación durante este tiempo.*

*A mis asesores M.Sc. Thomas Ancco Vizcarra, MSc. Nils L. Huaman Castilla por sus consejos, sabiduría y paciencia, apoyo y animo que me brindaron, para culminar este trabajo de tesis.*

*A los integrantes del jurado, por la acertada orientación y apoyo incondicional para la ejecución y culminación del proyecto de investigación.*

*A todo el personal administrativo de la Universidad Nacional del Altiplano, y Universidad Nacional José María Arguedas, por el apoyo incondicional brindado.*

*Todo esto no hubiese sido posible sin el amparo incondicional que me otorgaron y el cariño que me inspiraron mis padres, y mi familia, que de forma incondicional, entendieron mis ausencias y mis malos momentos. Que a pesar de la distancia siempre estuvieron a mi lado para saber cómo iba mi proceso. Las palabras nunca serán suficientes para testimoniar mi aprecio y mi agradecimiento.*

*A todos Ustedes, mi mayor reconocimiento y gratitud.*

## ÍNDICE

	Pág.
ÍNDICE	
ÍNDICE DE TABLAS	
ÍNDICE DE FIGURAS	
ÍNDICE DE ANEXOS	
I. INTRODUCCION.....	11
II. REVISIÓN BIBLIOGRAFICA.....	12
2.1. Generalidades de la Quinoa.....	12
2.1.1. Definición.....	12
2.1.2. Variedades y Cultivares.....	13
2.2. Propiedades Físicas de los Materiales Biológicos.....	16
2.2.1. Humedad.....	16
2.2.2. Angulo de reposo.....	17
2.3. Propiedades Mecánicas de los Productos Biológicos.....	20
2.3.1. La fricción.....	20
2.3.2. Coeficiente de fricción.....	21
2.3.3. Leyes cuantitativas de la fricción.....	25
III. MATERIALES Y MÉTODOS.....	28
3.1. Lugar de Ejecución.....	28
3.2. Material Experimental.....	28
3.3. Materiales y Equipos.....	28
3.3.1. Materiales.....	28
3.3.2. Equipos de laboratorio.....	28
3.4. Metodología Experimental.....	29
3.4.1. Acondicionamiento de la humedad de los granos de quinoa.....	29
3.4.2. Determinación del ángulo de reposo.....	30
3.4.3. Determinación de coeficiente de fricción estático.....	31
3.4.4. Determinación del Coeficiente de fricción dinámico.....	32

3.5.	Método de Análisis .....	33
3.5.1.	Determinación de la humedad de los granos de quinua .....	33
3.6.	Unidades de Análisis y Observaciones .....	33
3.6.1.	Factores en estudio .....	33
3.6.2.	Variables de respuesta .....	33
3.7.	Diseño de Investigación .....	33
IV.	RESULTADOS Y DISCUSION .....	35
4.1.	Efecto del Contenido de Humedad y Variedad de Quinua sobre el Coeficiente de Fricción Estático .....	35
4.2.	Efecto de la Variedad y contenido de Humedad sobre el Coeficiente de Fricción Dinámico .....	37
4.3.	Efecto de la Variedad y Contenido de Humedad en el Ángulo de Reposo .....	40
4.4.	Correlación del Contenido de Humedad, Ángulo de Reposo, Coeficiente de Fricción Estático y Coeficiente de Fricción Dinámico en las Variedades de Quinua .....	43
	CONCLUSIONES .....	51
	RECOMENDACIONES .....	52
	BIBLIOGRAFIA .....	53
	ANEXOS .....	58

## ÍNDICE DE TABLAS

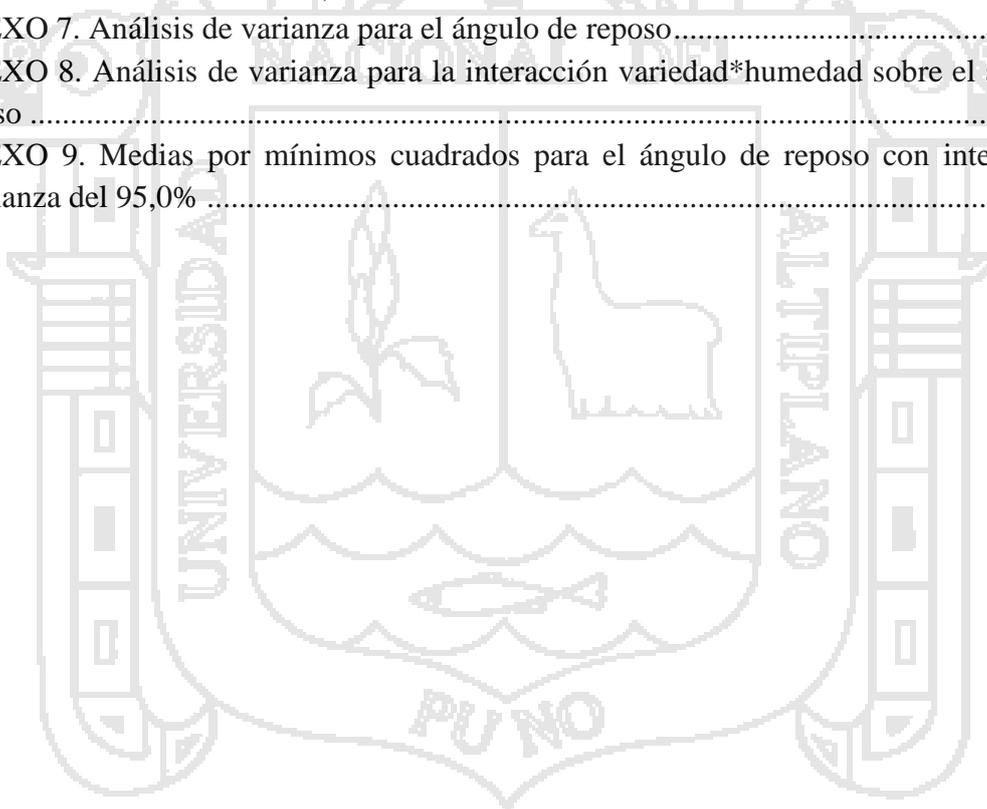
	Pág.
Tabla 1. Diámetro y espesor de los granos de quinua. ....	13
Tabla 2. Clasificación de los granos de quinua según el tamaño. ....	13
Tabla 3. Resumen de Ecotipos de quinua. ....	14
Tabla 4. Principales Características de la quinua Negra Collana. ....	15
Tabla 5. Ángulo de reposo de algunos granos en función a la humedad. ....	18
Tabla 6. Ángulos de reposo de materiales granulares dependiendo de su comportamiento	19
Tabla 7. Coeficiente de fricción estático de diferentes granos y semillas. ....	24
Tabla 8. Comparaciones múltiples para el efecto de la variedad sobre el coeficiente de fricción estático. ....	36
Tabla 9. Comparaciones múltiples para el efecto de la humedad en el coeficiente de fricción estático. ....	37
Tabla 10. Comparaciones múltiples para el efecto de la variedad sobre el coeficiente de fricción dinámico. ....	39
Tabla 11. Comparaciones múltiples para el efecto de la humedad en el coeficiente de fricción dinámico. ....	39
Tabla 12. Comparaciones múltiples para el efecto de la variedad sobre el ángulo de reposo. ....	42
Tabla 13. Comparaciones múltiples para el efecto de la humedad en el ángulo de reposo	43
Tabla 14. Coeficiente de fricción estático de las variedades de quinua según la humedad	43
Tabla 15. Coeficiente de fricción dinámico de las variedades de quinua según la humedad. ....	44
Tabla 16. Ángulo de reposo de las variedades de quinua según la humedad. ....	46
Tabla 17. Análisis global de los coeficientes de correlación global entre la humedad, ángulo de reposo, coeficiente de fricción estático y coeficiente de fricción dinámico de las variedades en estudio. ....	47
Tabla 18. Análisis de la correlación entre la humedad, ángulo de reposo, coeficiente de fricción estático y coeficiente de fricción dinámico en la variedad Salcedo INIA. ....	48
Tabla 19. Análisis de la correlación entre la humedad, ángulo de reposo, coeficiente de fricción estático y coeficiente de fricción dinámico en la variedad Pasankalla. ....	48
Tabla 20. Análisis de la correlación entre la humedad, ángulo de reposo, coeficiente de fricción estático y coeficiente de fricción dinámico en la variedad Negra Collana. ....	49
Tabla 21. Análisis de la correlación entre la humedad, ángulo de reposo, coeficiente de fricción estático y coeficiente de fricción dinámico en la variedad Kancolla. ....	49

## ÍNDICE DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1: Estructura anatómica del grano de quinua .....	12
Figura 2: Métodos para determinar el ángulo de reposo .....	17
Figura 3: Diagrama de equilibrio de un objeto en el plano inclinado .....	26
Figura 4: Diagrama Experimental .....	29
Figura 5: Equipo para determinar el ángulo de reposo.....	30
Figura 6: Representación física para determinar el coeficiente de fricción estático .....	31
Figura 7: Representación física para determinar el coeficiente de fricción dinámico.....	32
Figura 8: Interacción humedad en variedad sobre el coeficiente de fricción estático.....	35
Figura 9: Interacción variedad en humedad sobre el coeficiente de fricción estático.....	36
Figura 10: Interacción variedad en humedad sobre el coeficiente de fricción dinámico ....	38
Figura 11: Interacción humedad en variedad sobre el coeficiente de fricción dinámico ....	38
Figura 12: Interacción variedad en humedad sobre el ángulo de reposo.....	41
Figura 13: Interacción humedad en variedad sobre el ángulo de reposo.....	41
Figura 14: Relación del contenido de humedad en el coeficiente de fricción estático.....	44
Figura 15: Relación del contenido de humedad en el coeficiente de fricción dinámico. ....	45
Figura 16: Relación del contenido de humedad en el ángulo de reposo .....	46
Figura 17: Coeficientes de correlación parcial por variedad.....	50

## ÍNDICE DE ANEXOS

	Pág.
ANEXO 1. Análisis de Varianza para el coeficiente de fricción estático .....	59
ANEXO 2. Análisis de Varianza para la Interacción Variedad * Humedad sobre el coeficiente de fricción estático .....	59
ANEXO 3. Medias por mínimos cuadrados para coeficiente de fricción estático con intervalos de confianza del 95,0% .....	59
ANEXO 4. Análisis de varianza para el coeficiente de fricción dinámico .....	60
ANEXO 5. Análisis de varianza para la interacción variedad*humedad sobre el coeficiente de fricción dinámico .....	60
ANEXO 6. Medias por mínimos cuadrados para coeficiente de fricción dinámico con intervalos de confianza del 95,0% .....	60
ANEXO 7. Análisis de varianza para el ángulo de reposo.....	61
ANEXO 8. Análisis de varianza para la interacción variedad*humedad sobre el ángulo de reposo .....	61
ANEXO 9. Medias por mínimos cuadrados para el ángulo de reposo con intervalos de confianza del 95,0% .....	61



## RESUMEN

En el procesamiento agroindustrial, el conocimiento de las propiedades de transporte, juegan un papel importante en la evaluación de los modelos físicos y matemáticos, los que son empleados para determinar los parámetros geométricos y seleccionar las características de diseño de tolvas, canaletas, secadoras, recipientes de almacenamiento y sistemas de uso frecuente en la agroindustria de procesamiento de quinua. El objetivo del estudio fue determinar el efecto del contenido de humedad sobre el coeficiente de fricción y ángulo de reposo de cuatro variedades de quinua (*Chenopodium quinoa* Willd.) cultivadas en Puno para una superficie de acero inoxidable en función a cuatro variedades de quinua Salcedo INIA, Pasankalla, Negra Collana y Kancolla y tres contenidos humedad 12%, 16% y 20%. Los coeficiente de fricción estático y dinámico fueron determinados por el método de plano inclinado y horizontal según el método de Altuntas y Yildiz, (2007); el ángulo de reposo por el método del embudo según la ASTM y Jha, (1999). En función al contenido de humedad se determinó valores adimensionales de coeficiente de fricción estático de 0,964 para variedades Negra Collana; 0,957 Pasankalla; 0,951 Kancolla y 0,949 Salcedo INIA. También se determinó valores adimensionales de coeficiente de fricción dinámico de 0,41 para variedad Kancolla; 0,391 Salcedo INIA; 0,33 Pasankalla y 0,288 Negra Collana; y valores de ángulo de reposo de 29,87° para la variedad Salcedo INIA; 28,75° Kancolla; 28,57° Pasankalla y 25,34 Negra Collana. Finalmente se determinaron correlaciones entre variedad ángulo de reposo y coeficiente de fricción dinámico; coeficiente de fricción estático; según las variedad en estudio. Concluyéndose que la humedad influye en el coeficiente de fricción estático, coeficiente de fricción dinámico y ángulo de reposo, Para los cálculos de diseño y construcción de equipos y sistemas de transporte de quinua, donde las humedades de proceso varían en función a la variedad de quinua, los valores adimensionales a considerar son: coeficiente de fricción estático 0,95; coeficiente de fricción dinámico 0,35 y 28,63° como ángulo de reposo.

**Palabras clave:** quinua, propiedades físicas y mecánicas, ángulo de reposo, coeficiente de fricción estático, coeficiente de fricción dinámico.

## I. INTRODUCCION

El contenido de humedad en los granos de quinua determina la aptitud para determinado fin y afecta en las propiedades físicas y mecánicas y en conjunto define los procesos de recolección mecanizada, almacenaje e industrialización, por tanto estas tienen repercusión sobre el diseño de los equipos de recolección y manejo. La causa más importante del desgaste de los equipos y partes en contacto de los mismo son debidos a la fricción estática y dinámica sea por deslizamiento, rodamiento o impacto, ocasionado cuando los granos de quinua son vaciados sobre una superficie plana y entrar en contacto con la superficie del material.

El desconocimiento de las características físicas y mecánicas de los granos de quinua en sus diferentes variedades conduce a procesos agroindustriales poco eficientes, debido a que su dimensionamiento, diseño y construcción de equipos, estructuras y procesos agroindustriales están basadas en el conocimiento empírico, que trae como consecuencia un producto mal procesado con deficiente calidad, generando desconfianza en los equipos construidos en la localidad.

El conocimiento de las propiedades físicas y mecánicas de la semilla y granos de quinua permitirán un correcto dimensionamiento contribuyendo a mejorar eficientemente en el diseño y construcción de equipos y estructuras para el manejo, recolección, transporte, limpieza, clasificación, y procesamiento agroindustrial de la quinua.

En la comercialización y procesamiento de alimentos es de interés poner énfasis que la calidad de los productos agrícolas, y se ven garantizadas cuando los equipos están diseñados considerando las propiedades físicas, mecánicas, según la especie y que mejor según la variedad de quinua.

El estudio propuesto y desarrollado responde a la escasa información sobre los coeficientes de fricción tanto estático como cinético además del ángulo de reposo de semillas que la literatura científica no ofrece, más aun referida a granos de quinua en sus variedades más comerciales propios de la zona, que en alguna medida formará parte de la literatura para los diseñadores de equipos de procesamiento de quinua; en razón a ello se planteó los siguientes objetivos:

- Determinar y comparar el coeficiente de fricción estático a diferente humedad del grano de quinua en cuatro variedades.
- Determinar y comparar el ángulo de reposo a diferentes contenidos de humedad del grano de quinua en cuatro variedades.
- Establecer la relación entre el contenido de humedad y el Angulo de reposo en el coeficiente de fricción de los granos de quinua en cuatro variedades.

## II. REVISIÓN BIBLIOGRAFICA

### 2.1. Generalidades de la Quinua.

#### 2.1.1. Definición

Las especies del género *Chenopodium*, de la familia Chenopodiaceae, son plantas herbáceas dicotiledónea entre 0,5 a 2 metros de altura, de acuerdo a la variedad, posee una raíz ramificada de unos 20 a 25 cm, generalmente son hermafroditas y se autopolinizan; el nombre botánico de la quinua es *Chenopodium quinoa* Willd., conocido con los siguientes nombres comunes (National Research Council, 1989).

- Quechua: kiuna, quinua, parca
- Aymara: supha, jopa, jupha, jaira, ccallapi, aara, ajara
- Español: quinua, quinquá, kinoa, triguillo, trigo inca, arrocillo, arroz del Perú
- Português: arroz miúdo do Perú, espinafre do Peru, quinua
- Inglés: quinua, quinoa, kinoa, sweet quinua, White quinua, peruvian rice, Inca rice
- Alemán: Reisspinat, peruanischer Reisspinat, Reismelde, Reis-Gerwacks

Poseen semillas pequeñas de 2 mm de diámetro encerradas en el cáliz como se observa en la Figura 1, El diámetro y espesor de los granos de quinua varían según la variedad como se observa en la Tabla 1 (Mujica, *et al.*, 2007) por lo que su tamaño, forma y color se parece al cruce de una semilla de sésamo (ajonjolí) con una de mijo, tiene la forma de disco plano con una banda ecuatorial alrededor de su periferia, otros autores mencionan que existen cuatro formas de grano en la quinua: lenticular, cilíndrico, elipsoide y cónico, tiene un color amarillo sin brillo pero en algunas especies varían de casi blanco a rosa naranja o de rojo a púrpura y negro; estas semillas están cubiertas de saponina (sustancias amargas resinosas), que forman una solución jabonosa en el agua (Gandarillas, 1982).



Fuente: Gandarillas (1982)

**Figura 1: Estructura anatómica del grano de quinua**

**Tabla 1. Diámetro y espesor de los granos de quinua.**

Variedad	Diámetro de grano (mm)	Espesor (mm)
Blanca de Juli	1,73	1,05
Kancolla	1,75	1,09
Salcedo INIA	1,83	1,13
Pasankalla	1,87	1,15

Fuente: Mujica (2 007).

Según la NTP 205.062 los granos de quinua se clasifican según el tamaño de los granos, clasificación que se puede observar en la Tabla 2.

**Tabla 2. Clasificación de los granos de quinua según el tamaño.**

Tamaño de los granos	Diámetro promedio de los granos, expresado en mm	Malla
Extra grande	mayor a 2,0	85% retenido en la malla ASTM 10
Grande	mayor a 1,70 hasta 2,0	85% retenido en la malla ASTM 12
Medianos	mayor a 1,40 hasta 1,69	85% retenido en la malla ASTM 14
Pequeños	menor a 1,40	85% que pasa por la malla ASTM 14

Fuente: NTP 205.062 (2 009).

### 2.1.2. Variedades y Cultivares

Mujica *et al.*, (2 001) mencionan que actualmente existe gran cantidad de variedades y cultivares utilizados comercialmente en la producción de quinua. Especialmente en el Perú, las variedades Amarilla Maranganí, Kancolla, Blanca de Juli, Cheweca, Witulla, Salcedo- INIA, Quillahuaman-INIA, Camacani I, Camacani II, Huariponcho, Chullpi, Roja de Coporaque, Ayacuchana-INIA, Huancayo, Hualhuas, Mantaro, Huacataz, Huacariz, Rosada de Yanamango, Namora. En Bolivia tenemos: Sajama, Sayaña, Chucapaca, Kamiri, Huaranga, Ratuquí, Samaranti, Robura, Real, Toledo, Pandela, Utusaya, Mañiqueña, Señora, Achachino, Lipeña. En el Ecuador tenemos: INIAP-Tunkahuan, INIAP-Ingapirca, INIAP-Imbaya, INIAP-Cochasqui, ECU-420, Másal 389. En Argentina Jujuy cristalina y Jujuy amilacea. En Colombia: Nariño. En Chile: Canchones, Faro, Lito, Baer II, Atacama. En México: Huatzontle blanco, Huatzontle rojo., Huatzontle amarillo. En Holanda: NL-6, Carmen, Atlas. En Inglaterra: RU-2, RU-5. Dinamarca: G-205-95, E-DK-4.

Asimismo se ha adoptado varias clasificaciones del grano de quinua para diferenciar los grupos de plantas que se cultivan en zonas específicas y que tienen características morfológicas y agronómicas particulares que las distinguen, encontrándose además formas, eco tipos y variedades que se han mejorado con características sobresalientes. Las diferentes variedades pueden cultivarse

desde el nivel del mar hasta los 4000 m.s.n.m. Toleran suelos en un rango de pH que varía de 6 a 8,5. La variabilidad y diversidad de quinuas se resume en la Tabla 3.

Dentro de las variedades consideradas en el estudio a continuación describimos algunos aspectos de interés siendo estas las siguientes:

- a. **Kancolla:** Seleccionada a partir del eco tipo local de la zona de Cabanillas, Puno, planta de color verde, de tamaño mediano alcanzando 80 cm de altura, de ciclo vegetativo tardío, más de 170 días, grano blanco, tamaño mediano, con alto contenido de saponina, panoja generalmente amarantiforme, resistente al frío, granizo y al mildiu, rendimiento promedio de 2 500 kg/ha, segrega a otros colores desde el verde hasta el púrpura, muy difundida en el altiplano peruano. Se usa generalmente para sopas y elaboración de kispíño (panecillo frito en grasa animal que tiene una duración de varios meses) (Flores, 1 960). Es una variedad dulce, usado como una planta destinada a la preparación de alimentos, similar al trigo y el arroz, recientemente redescubierto por los investigadores agrícolas de las sociedades industrializadas (Schlick y Bubenheim, 1 996). Es muy nutritivo y las principales partes comestibles son las semillas (Koziol, 1 992).

**Tabla 3. Resumen de Ecotipos de quinua.**

Ecotipo	Detalle
Quinuas de valles	En los valles andinos. Crecen entre 2 000 y 3 000 m.s.n.m., tienen períodos largos de crecimiento y de porte alto.
Quinuas de altiplano	Alrededor del lago Titicaca. Tienen resistencia a las heladas y de período de crecimiento corto. Estas variedades no poseen ramas. Soportan heladas y relativa escasez de lluvias.
Quinuas de terrenos salinos	Adaptadas al altiplano Boliviano. Tienen resistencia a suelos salinos y alcalinos. Sus semillas son amargas y de alto contenido de proteínas.
Quinuas del nivel del mar	Encontradas en el sur de Chile. Son plantas pequeñas, sin ramas y con granos amargos, adaptadas a días largos.
Quinuas sub-tropicales	Adaptadas a los valles interandinos de Bolivia. Son de color verde intenso y anaranjado cuando están maduras, sus semillas son de color blanco o amarillo-anaranjado.

Fuente: Fuentes *et al.*, (2009); Rojas, *et al.*, (2 010).

- b. **Salcedo INIA:** Es una variedad obtenida del cruce de las variedades “Real Boliviana” por “Sajama”, liberada en 1 995, y tiene como características: grano grande (2,0 mm de diámetro), grano dulce, precocidad (150 días de periodo vegetativo), panoja glomerulada compacta, buen potencial de rendimiento, tolerante a mildiu presenta un contenido de saponina 0,014%, (grano dulce). Es tolerante a heladas y sequías, presenta mayor contenido de proteínas (14,5%). Esta variedad es requerida por la agroindustria y mercado exterior (Apaza y Delgado, 2005).

- c. INIA 420 – Negra Collana: Es un compuesto de 13 accesiones, comúnmente conocidos como “Quyту jiwras”. El proceso de pre mejoramiento (formación del compuesto y selección) se realizó en Illpa y Huañingora del 2003 a 2006 y los ensayos de validación entre el 2006 al 2008 en la comunidad campesina de Collana del distrito de Cabana (Provincia de San Román). El proceso de formación del compuesto, selección y validación fue realizado por el programa de Investigación en Cultivos Andinos – Puno, cuya liberación fue en el 2008. Tiene buen potencial de rendimiento, precocidad, tolerancia a bajas temperaturas y a enfermedades (Apaza y Delgado, 2005).

La variedad INIA 420 “Negra Collana”, es de amplia base genética ya que es un compuesto de 13 accesiones de 12 localidades, comúnmente conocidos como “Quyту jiwras”, que comercialmente se le asigna el nombre de INIA 420 “Negra Collana”, como resultado de las pruebas de identificación, adaptación y eficiencia desarrollados en el ámbito de la Estación Experimental Agraria Illpa del Instituto Nacional de Innovación Agraria (INIA), y evaluaciones participativas en campos, con agricultores de las Comunidades campesinas, Collana, Collpa, Cieneguilla, Vizcachani, Kallachoco y Corcoroni de los distritos de Cabana, Ilave, Mañazo y Pilcuyo de la Región Puno (INIA, 2008).

Su mejor desarrollo se logra en la zona agroecológica Suni del Altiplano, entre los 3815 y 3900 msnm, con clima frío seco, precipitación de 400 a 550 mm y temperatura de 4° a 15°C. Sus principales características de la quinua “Negra Collana” es como se muestra en la Tabla 4.

**Tabla 4. Principales Características de la quinua Negra Collana.**

Descriptor	Características
Color de Perigonio	Plomo claro
Color de epispermo	Negro opaco
Aspecto del perisperma	Opaco
Peso de 1,000 granos (g)	2,85 a 2,89
Contenido de saponina	0,015 a 0,018

Fuente: INIA (2008).

- d. Pasankalla: Es una raza de quinua, que estuvo en proceso de extinción. Pero, desde 1978, con el trabajo interinstitucional, entre el Ex Ministerio de Alimentación, Proyecto Quinua Fondo Simón Bolívar IICA, luego Ministerio de Agricultura, Universidad Nacional del Altiplano, el INIA, en los últimos 6 años con apoyo económico y técnico recibido de CARE Perú y con la participación activa de las comunidades campesinas se logra caracterizar su variabilidad genética y mejorar dos líneas promisorias por su adaptación regional y productividad, el nombre, pasankalla, es un

término aymará, tiene otros nombres, los que están siendo resguardados, de conformidad a la Ley N° 278115 CARE, Perú, desde 2001 (Canahua, 2 002). También es conocido como INIA 415 – PASANKALLA esta variedad fue obtenida en el 2006 por selección planta surco de ecotipos de la localidad de Caritamaya, distrito de Ácora, provincia de Puno. El proceso de mejoramiento se realizó entre los años 2000 al 2005, en el ámbito de la Estación Experimental Agraria (EEA) Illpa-Puno, por el Programa Nacional de Investigación en Cultivos Andinos. Su mejor desarrollo se logra en la zona agroecológica Suni del altiplano entre los 3 815 y 3 900 m.s.n.m. y soporta un clima frío seco, precipitaciones pluviales de 400 a 550 mm, y temperatura de 4°C a 15°C. Es una variedad óptima para la agroindustria, con alta productividad (rendimiento potencial de 4,5 t/ha) y buena calidad de grano (Apaza y Delgado, 2005).

## **2.2. Propiedades Físicas de los Materiales Biológicos**

El conocimiento de las propiedades físicas de los granos y semillas, constituyen una información fundamental de ingeniería para adecuar y operar máquinas, diseñar y construir estructuras de almacenamiento, montar sistemas adecuados de transporte, además, es un parámetro fundamental para el diseño de empaques, en el análisis de calidad y en el control de procesos (Ospina, 2001; Castro, 1996).

### **2.2.1. Humedad**

El contenido de humedad de los materiales biológicos tiene una variada influencia en sus propiedades mecánicas y su comportamiento en los procesos de molienda entre otros procesos, La humedad influye en la adherencia del producto se determina dependiendo de los procesos por los que pasa el material (Laskowski y Lysiak, 1 999; Dziki, 2007).

El contenido de humedad es el factor de mayor importancia en el comportamiento del grano durante el manejo de poscosecha, en especial en el almacenamiento y procesamiento, el alto contenido de agua es uno de los factores que pueden causar pérdidas en estos productos; su control inadecuado en las operaciones de poscosecha produce calentamiento de la masa del grano, así como genera infestaciones de hongos y ataque de insectos (Ospina, 2001).

En las semillas se identifican tres tipos de agua: el agua absorbida o libre, que es el agua que se encuentra en los espacios entre grano y grano, en la superficie, o dentro de los poros del material, sostenida por fuerzas capilares; este tipo de agua posee las mismas propiedades de agua libre. El agua adsorbida, que es el agua sostenida por atracción molecular; en este caso hay interacción entre las moléculas de agua y aquellas que componen el grano; también este tipo de agua es atraída por fuerzas intermoleculares llamadas fuerzas de Vander Waals. Por último, el agua de constitución, que es el agua combinada químicamente con la materia seca y sostenida por fuertes uniones químicas; esta

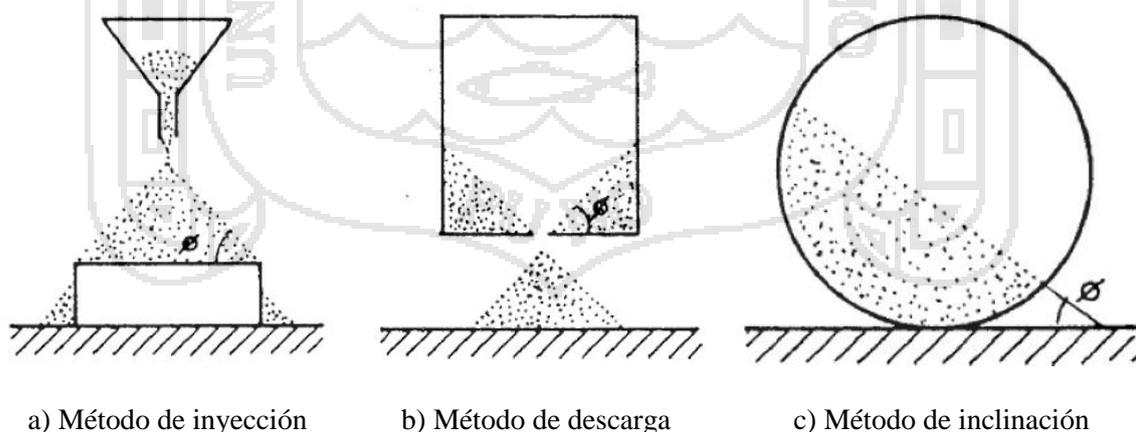
agua es de difícil remoción, pero pueden ser extraída en condiciones controladas mediante algunos métodos de determinación de humedad (Ospina, 2001).

### 2.2.2. Angulo de reposo

Cuando un grano es vaciado sobre una superficie horizontal plana el producto forma un montículo o pila similar a un cono invertido, el ángulo formado por la horizontal y la inclinación es definido como el ángulo de reposo, por lo que Pilpel (1966), define el ángulo de reposo como el ángulo de inclinación de una pila de polvo cuando esta empieza a deslizarse sobre sí misma, el mismo que disminuye a medida que el tamaño de la pila aumenta; Mientras que Taylor, (1962) indica que el ángulo de reposo es el ángulo de fricción del material bajo un esfuerzo prácticamente igual a cero, además indica que una pila cualquiera de material esta en equilibrio cuando los granos menos estables en su superficie estén en equilibrio, por lo tanto, el ángulo de reposo es determinado por los granos menos estables.

Train (1958) menciona que el ángulo de reposo de materiales granulares, presentan resistencia al movimiento entre partículas cuando son sometidos a fuerzas externas, y esta resistencia es debida a la fricción entre partículas.

El Angulo de reposo es un parámetro que cuantifica la resistencia que presenta el producto a fluir (Geldart *et al.*, 2006). Teniendo valores pequeños los productos con mayor fluidez, es posible encontrar el ángulo máximo de reposo de un material granular aplicando pruebas estandarizadas, obteniendo la limitación natural de la inclinación; algunos métodos para determinar el ángulo generado por el producto depositado en una base horizontal plana, se presenta en la Figura 2.



**Figura 2: Métodos para determinar el ángulo de reposo**

El ángulo de reposo varía con el contenido de humedad (Tabla 5) debido a la lámina superficial de humedad que rodea a cada partícula y a los efectos de tensión superficial que predomina sobre los productos granulares. Igualmente cuando se llena un silo, el ángulo de reposo puede variar dependiendo de la altura de llenado y el flujo del material (Ospina, 2001 y Mohsenin, 1986).

Kalman *et al.*, (1993) Publicaron su trabajo de investigación sobre la influencia de diferentes factores en el ángulo de reposo. Los factores analizados fueron: Rugosidad de la base, Cantidad de material, Tamaño de las partículas y distribución de tamaños, Efecto dinámico, rugosidad de las partículas, velocidad y altura de caída del material.

**Tabla 5. Ángulo de reposo de algunos granos en función a la humedad**

Producto	Contenido de Humedad	Ángulo de reposo
Cebada	10,70	30,50
	13,30	31,00
Maíz	19,50	33,00
	13,00	34,90
Lenteja	16,20	35,10
	19,50	39,00
	16,10	29,00
Trigo	11,00	29,30
	14,10	31,00
	17,10	35,60
Arroz con cascara	11,00	38,40
Arroz blanco	13,00	33,00
Frijol	13,00	25,00
	11,20	31,00
Sorgo	14,00	33,40
	17,60	35,40
Soya	13,00	33,90
Ajonjolí	13,00	29,00
	6,10	32,90
Cacao	10,50	33,00
	12,70	33,00
Amaranto sin reventar (acero)		29,45*
Amaranto reventado (acero)		29,7*
Amaranto reventado (malla)		47,35*

Fuente: Ospina (2001); (\*) Muñoz *et al.*, (2005).

Herle & Gudehus (1999) indican que al rodar las partículas en el proceso de formación de la pila, los granos grandes tienden a superar esfuerzos más altos. Esto puede explicar un incremento de ángulo crítico al aumentar el tamaño de los granos. Un incremento pequeño del ángulo crítico observado para granos con diámetro  $< 0,2$  mm puede deberse al agua capilar resultado de la humedad

del aire. A mayor angularidad de los granos, mayor ángulo de reposo. Asimismo menciona que cuando decrece el tamaño de los granos, es también influenciado por varios fenómenos fisicoquímicos y es más notoria cuando hay interacción o entrelace entre los granos.

Existen dos tipos de ángulo de reposo: el Angulo de reposo estático, ángulo que forma el material granular cuando se desliza sobre sí mismo, o aquel que adoptan los productos, y ángulo de reposo dinámico, que es el más importante y se presenta en todos los casos en que la masa granular se encuentra en movimiento o es aquel que se forma cuando el material estando en reposo entra en movimiento, como es el caso de las operaciones de cargue y descargue de un silo, una bodega o una máquina (Ospina, 2 001; Moshenin, 1 970).

El ángulo de reposo, estático o dinámico, es indicador útil para saber la fluidez del material que sirve para caracterizar el comportamiento del flujo de los alimentos en procesos continuos (Alvarado y Aguilera, 2 001). Entre menor sea el ángulo de reposo más fácil se desliza el grano (Ospina, 2 001). En la Tabla 6 se presenta valores referenciales para describir las propiedades del flujo de un material granular.

**Tabla 6. Ángulos de reposo de materiales granulares dependiendo de su comportamiento**

Angulo de Reposo	Comportamiento
25 - 30	Flujo muy libre
30 - 38	Flujo Libre
38 - 45	Fluidez
45 - 55	Cohesivo
> 55	Muy cohesivo

Fuente: Collin (2010).

Soto (2010) determino un ángulo de reposo de 42°, una densidad aparente de 617,3 g/L, un diámetro máximo promedio de  $131,3 \pm 30 \mu\text{m}$ , y mínimo de  $128 \pm 30 \mu\text{m}$ . en tanto Vilche *et al.*, (2003), indica que el ángulo de reposo de las semillas de quinua variaron entre 18 a 25°, la longitud, el diámetro medio y el espesor de las semillas fueron respectivamente de 1,889; 1,885 y 0,98 mm. Cerca de 1000 semillas muestreadas tuvieron tamaños que variaron entre 1,7 y 2,0 mm; mientras cerca del 27% tuvieron más de 2 mm. El diámetro promedio de 1a semilla varió entre 1,4 y 1,6 mm; mientras que la esfericidad fue cercana a 0.78. El contenido de humedad estuvo entre 4,6 y 25,8% en base seca; la masa de las 1000 semillas se incrementó de 2,53 a 3,11 g. La densidad verdadera aumentó con el contenido de humedad de 928 a 1188 kg m<sup>3</sup> (Cardozo *et al.*, 1979). Mencionan que el ángulo de reposo en granos de quinua fue de 30°, y la humedad 12,65%, para un diámetro mínimo de 1 a 2 mm.

### 2.3. Propiedades Mecánicas de los Productos Biológicos

Las propiedades mecánicas definen el comportamiento de un material en respuesta a la acción de cargas estáticas o cargas dinámicas, en tanto que la reología estudia la deformación y el flujo de la materia (Mohsenin, 1986; Sharma *et al.*, 2003).

Existen tres razones fundamentales para el estudio del comportamiento de los materiales; el conocimiento profundo de su estructura, el diseño de máquinas adecuadas que en su funcionamiento no produzcan daños y la determinación de la calidad de los productos para su aceptabilidad por el consumidor. Por lo que las propiedades mecánicas en los productos agrícolas son importantes en el diseño de equipos de operación con máxima eficiencia sin comprometer la calidad del producto final (Correa *et al.*, 2008). Los granos durante las operaciones de recolección transporte y almacenaje se someten a muchas presiones de fuerza estáticas y dinámicas como altas velocidades de impacto, las cuales causan magulladuras, arrugas y fracturas que incrementa la susceptibilidad al deterioro durante el almacenamiento (Bargale *et al.*, 1995).

Cuando los granos son sometidos a fuerzas que exceden su resistencia mecánica, el grano se rompe o se agrieta (Altuntas y Yildiz, 2007). La humedad altera el comportamiento mecánico de las semillas por los cambios de la matriz estructural del almidón y la proteína, volviendo el producto suave y plástico (Murty y Bhattacharya, 1998); Gupta y Das (2000). Manifiestan que los granos con altos contenidos de humedad muestran una baja resistencia a la compresión; debida al cambio gradual de la integridad de la matriz celular que ocurre con el incremento del contenido de humedad.

El efecto de varios factores sobre coeficiente de fricción ha sido reportado por algunos investigadores (Chung y Verma, 1989; Singh y Goswami, 1996; Nwakonobi y Onwualu, 2009). Según Stroshine (1998) el coeficiente de fricción puede ser afectado por las propiedades del material, tales como contenido de humedad, y el tipo de superficie sobre la que el material está en movimiento.

#### 2.3.1. La fricción

La fricción es la resistencia u oposición al movimiento de dos cuerpos que se encuentran en contacto. Es una respuesta del sistema a una determinada acción (García, 2010).

Matemáticamente se define fuerza de fricción como:

$$F = \mu * W \quad (\text{Ec. 1})$$

Donde F es la Fuerza de fricción, W es la carga normal sobre el contacto y  $\mu$  es una constante conocida como el coeficiente de fricción. Existen dos tipos de coeficiente de fricción: el estático ( $\mu_s$ ) y el cinético ( $\mu_k$ ). En el caso de fricción estática es posible expresar esta ley en términos del ángulo de reposo límite  $\theta$  definido por:

$$\mu * s = \tan\theta \quad (\text{Ec. 2})$$

En esta ecuación,  $\theta$  es el ángulo tal que un cuerpo de algún peso, colocado sobre un plano inclinado a un ángulo menor que  $\theta$  desde la horizontal permanecerá estacionario mientras que si se aumenta la inclinación del ángulo a  $\theta$ , el cuerpo empezará a deslizar hacia abajo.

El coeficiente de fricción puede variar en un amplio rango, desde valores muy pequeños de 0,02 a valores tan grandes como 10 o incluso mayores en el caso de metales blandos y limpios deslizando contra ellos mismos en vacío.

La segunda ley del rozamiento entre dos superficies planas, plantea que la fuerza de fricción (o el coeficiente de fricción) es independiente del área de la base del bloque entre los cuerpos en contacto, por este motivo un paralelepípedo de determinado peso sufrirá la misma fuerza de fricción apoyado sobre cualquiera de sus caras.

El científico Coulomb añade una propiedad más, conocida como ley de Coulomb, la cual estipula que el coeficiente de fricción cinético es independiente de la velocidad de deslizamiento una vez el cuerpo se encuentra en movimiento (García, 2010).

El coeficiente de fricción que fue propuesto por los primeros investigadores de la fricción incluyendo Amontons (1699), Coulomb (1699) y Morin (1833), apareció como una hipótesis de que la fricción era debido al bloqueo entre las asperezas de las superficies de los materiales en contacto, explicando así, que la fuerza de fricción es proporcional a la carga normal siendo independiente del área de contacto. Esta explicación al fenómeno de fricción se le conoce como la hipótesis de rugosidad.

### 2.3.2. Coeficiente de fricción

La fricción es la resistencia al movimiento que existe cuando un material se desplaza tangencialmente con respecto a otro, o cuando se hace el intento de producir dicho movimiento, es decir cuando un cuerpo es colocado sobre una superficie plana, éste puede ser desplazado únicamente si la fuerza de fricción es vencida. La fuerza requerida para iniciar el desplazamiento es denominada la fuerza de fricción estática. Después de iniciado el movimiento, la fuerza de fricción generalmente decrece y el movimiento puede ser mantenido por una fuerza, denominada fuerza dinámica de fricción (Ospina, 2001).

El coeficiente de fricción (CF) es un parámetro adimensional que indica la resistencia que pone la superficie de un material al deslizamiento de un objeto, en los procesos de conversión (Impresión, Laminación, Corte) y empaçado (Formado, Llenado y Sellado), los materiales entran en contacto con numerosas superficies (rodillos, guías, cuellos formadores.) sobre las cuales se generan fuerzas de roce que se oponen al desplazamiento de la misma; típicamente, se reportan dos índices de fricción del material: Estático; indica el nivel de resistencia que pone el material para iniciar el movimiento de un objeto y dinámico; indica el nivel de resistencia que pone al material para mantener el movimiento de un objeto a velocidad constante (Rabinowicz, 1995).

Existen cuatro principales problemas que incumben al estudio de la fricción, (1) bajarla cuando no se requiere, ya que se generan grandes pérdidas económicas debido a la fricción; (2) subirla a un nivel lo suficientemente alto cuando se requiere, como en las cuñas, tornillos y otros sujetadores, o en procesos de la vida diaria como el caminar o sujetar objetos con las manos; (3) mantener la fricción constante dentro de límites estrechos, como en los frenos de un auto o en la industria de laminación de metales; (4) el estudio de las oscilaciones debido a la fricción, las cuales se manifiestan como sonidos, éstos pueden ser indeseables como chillidos, rechinos, o en el caso opuesto donde sí se desean como en los instrumentos musicales de la familia del violín (Rabinowicz, 1995).

El Coeficiente de fricción es igual a la relación entre la fuerza de fricción y el peso del producto. La fuerza requerida para iniciar y mantener el movimiento puede ser también producida por un cuerpo situado sobre una pendiente de un ángulo determinado. Por lo tanto el coeficiente de fricción es debido a dos fuerzas principales: la fuerza requerida para deformar y algunas veces cortar las asperezas de las superficies en contacto y la fuerza requerida para vencer la adhesión y cohesión entre superficies (Ospina, 2001).

El coeficiente de fricción es una propiedad de los granos, fundamental para el diseño de máquinas agrícolas agroindustriales y estructuras de almacenamiento, así como operaciones de acondicionamiento, transporte y beneficio de granos. También es importante para determinar las pérdidas de potencia debidas a la fricción con las superficies de los equipos y disminución de daños mecánicos (Ospina, 2001 y Ruiz, 2000).

Dada la importancia de los parámetros de fricción en el desarrollo de modelos para la predicción de flujo descentramiento escombros (Hungry *et al.*, 2002; Rickenmann, 2005) muchas maneras diferentes de medir distintos tipos de ángulos de fricción de los materiales granulares han sido propuestas por diversos estudiosos (Metcalf, 1965; Hutter & Koch, 1991; Pudasaini y Hutter, 2007). Así, los valores de los ángulos de fricción medidos para un material determinado generalmente difieren de un estudio a otro.

#### **2.3.2.1. Coeficiente de fricción estático**

La fricción estática impide que un objeto inicie su movimiento, es igual a la fuerza neta aplicada sobre el cuerpo, solo que con sentido opuesto. El roce estático es siempre menor o igual al coeficiente de roce entre los dos objetos multiplicado por la fuerza normal, El estudio de la fricción ha tomado importancia en los últimos años, manifestándose en investigaciones en distintas áreas como la física, las ingenierías, ciencia de superficie y tribología Shigley (1990).

Las fuerzas de fricción estáticas que se producen por la interacción entre las irregularidades de las dos superficies se incrementarán para evitar cualquier movimiento relativo hasta un límite

donde ya empieza el movimiento. Ese umbral del movimiento, está caracterizado por el coeficiente de fricción estático y éste es típicamente mayor que el coeficiente de fricción dinámico.

En algunas investigaciones el coeficiente estático de fricción se incrementa linealmente cuando aumenta el contenido de humedad de las semillas en todas las superficies evaluadas y depende del material de la superficie. Según Dursun y Dursun (2005) en semillas alcaparra el mayor valor de coeficiente estático de fricción para estas semillas fue en la superficie de caucho, seguido de madera contrachapada, hierro galvanizado y lamina de aluminio, en un rango de humedad de 6,03 a 16,35% b.s. Bart-Plange y Baryeh (2003) en semillas de cacao encontraron el valor más alto fue en madera contrachapada, seguido de lámina de acero y caucho en un rango de humedad de 5 a 24% b.h. Singh y Goswami (1996) en semillas de comino halló que el valor más alto fue en acero templado, seguido de hierro galvanizado, acero inoxidable y aluminio en un rango de humedad de 7 a 22% b.s.

Altuntas y Yildiz (2007) en haba encontró que los valores de fricción fueron en el siguiente orden descendente; caucho, madera contrachapada, acero templado, madera aglomerada y hierro galvanizado, en un rango de humedad de 9,89 a 25,08% b.s. Sacilik *et al.*, (2003) en Hemp seed (*Cannabis sativa*); el valor más alto fue en la superficie de caucho, seguido de madera contrachapada y hierro galvanizado, en rango de humedad de 8,62 a 20,88% b.s.

Garnayak *et al.*, (2008) halló en *Jatropha* que el máximo valor de fricción fue en madera contrachapada, seguido de acero templado y aluminio, en un rango de humedad de 4,75 a 19,57% b.s. Isik y Unal (2007) para frijol Variedad “Barbunia” la mayor fricción fue en caucho, seguido de acero inoxidable, hierro galvanizado, y aluminio, en orden descendente, en un rango de humedad de 9,77 a 19,62% b.s. Coskun *et al.*, (2006) en maíz dulce el valor más alto fue en caucho, seguido de hierro galvanizado, aluminio y acero inoxidable, en un rango de humedad de 11,54 a 19,74% b.s. Karababa (2006) en Popcorn (*Zea Mays* var. *averta*), el máximo valor fue en la superficie de madera contrachapada, seguido de hierro galvanizado y aluminio en un rango de 8,95 a 17,12% b.s. Ogut (1998) determinó que en semillas de lupino blanco el coeficiente estático de fricción no varió significativamente en el rango de humedad evaluado de 8,3 a 19,2% y fue el mismo valor en las superficies de caucho y acero. Así mismo en estudios del coeficiente de rozamiento estático de semillas de girasol en contra de diferentes materiales (plástico, hierro galvanizado y madera contrachapada) aumentó con el aumento de contenido de humedad. El hierro galvanizado tuvo el mayor coeficiente estático de fricción. Incremento en el contenido de humedad como resultado un aumento lineal en ángulo de reposo de 41° a 57° (Reza, 2010).

Por lo descrito, indicamos que el coeficiente estático de fricción se utiliza para determinar el ángulo de las tolvas para conseguir un flujo constante de materiales a través de la misma. Esta información es útil para dimensionar los requerimientos del motor para el transporte de granos (Ghasemi Varnamkhasti *et al.*, 2007).

Ospina (2001) reporta valores de coeficiente de fricción estático para granos de diferentes especies las que se presentan en la Tabla 7.

**Tabla 7. Coeficiente de fricción estático de diferentes granos y semillas**

Producto	Contenido de Humedad (% bh)	Coeficiente de fricción estático		
		Acero	Concreto	Madera
Trigo	11,2		0,52	0,31
	13,0		0,52	0,31
	15,0		0,55	0,47
Arroz	15,7	0,44	0,68	0,48
	12,0	0,40	0,45	0,40
Paddy	16,0	0,50	0,60	0,45
Café triturado	12,0	0,17		0,31
	12,8	0,11		0,12
Cacao	18,0	0,16		0,20
	24,6	0,20		0,27
Ajonjolí	6,1		0,51	0,47
	10,5		0,52	0,45
Cebada	7,9			0,40
	10,7	0,27	0,56	0,40
	12,3	0,28	0,55	
Maíz	14,3	0,30	0,57	
	16,2	0,37	0,62	0,40
	9,9	0,24	0,59	0,31
Maíz ICA 508	12,2	0,25	0,60	0,33
	13,9	0,35	0,64	0,37
	12,6	0,22	0,36	0,32
	16,2	0,30	0,42	0,36
	22,8	0,32	0,51	0,39
Pasto Brachiaria brizantha	27,5	0,34	0,60	0,44
	14,0	0,48	0,39	0,24
	20,0	0,24	0,47	0,38
Sorgo	11,0	0,19	0,49	0,35
	20,0	0,27	0,52	0,42
	11,5	0,16	0,31	
Sorgo Sorghica	14,3	0,23	0,33	
	11,4	0,14	0,31	
	13,9	0,14	0,31	
	17,6	0,23	0,33	
Soya	20,6	0,33	0,41	
	7,1	0,21	0,39	0,29
	8,1	0,21	0,56	0,33
	12,2	0,26	0,55	0,35

Fuente: Ospina (2001).

### 2.3.2.2. Coeficiente de fricción dinámico

Esta fuerza se representa cuando se rompe el estado de reposo y el cuerpo inicia un movimiento. La magnitud de la fuerza de rozamiento dinámico disminuye y se define como la fuerza que se opone al movimiento de los cuerpos que están en contacto y su magnitud es directamente proporcional a la fuerza normal (Dowson, 1979).

El desgaste se presenta en la fricción dinámica, ocasionado por la superficie o la remoción del material de una o ambas superficies sólidas en el movimiento relativo, sea por deslizamiento, rodamiento o impacto.

Durante el movimiento relativo, el material en la superficie de contacto se desplaza, las propiedades del sólido, o cerca de la superficie, se alteran, pero muy poco o nada del material se pierde. Consecuente, el material puede ser removido de la superficie como resultado en la transferencia a otra superficie, o bien, se puede perder la partícula del desgaste. Al igual que la fricción, el desgaste no es una propiedad del material, es la consecuencia del movimiento (Gómez, 2005).

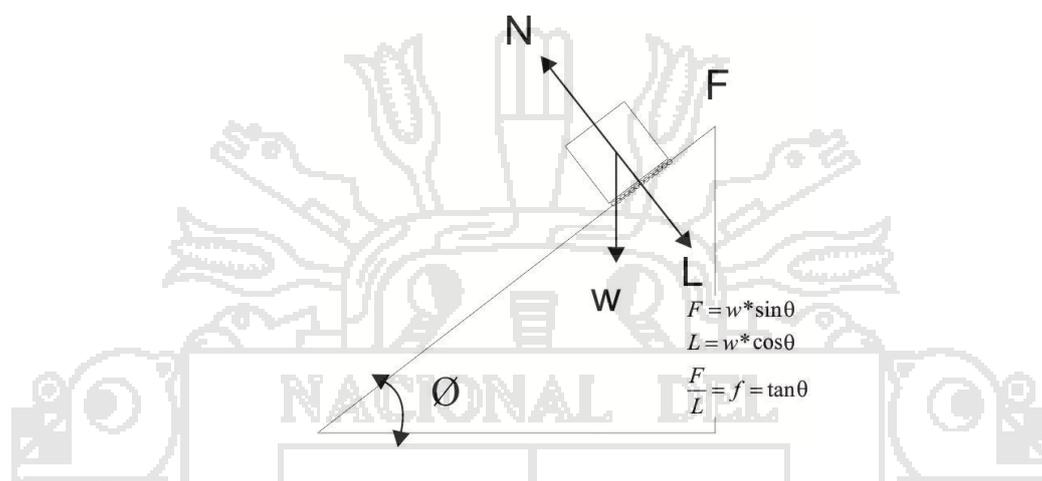
El deslizamiento entre superficies sólidas se caracteriza generalmente por un alto coeficiente de fricción y un gran desgaste debido a las propiedades específicas de las superficies (Jost, 1966), por ejemplo los coeficientes de fricción dinámicos de semillas de flor del sol aumentaron linealmente con la humedad, independientemente de la naturaleza de las superficies (Gupta y Das, 1998; Asli-Ardeh *et al.*, 2010).

### 2.3.3. Leyes cuantitativas de la fricción

La fricción se expresa cuantitativamente en términos de una fuerza, y se distinguen dos efectos, cuando la fuerza aplicada no causa movimiento y cuando sí lo causa; En el primer caso la fuerza aplicada es exactamente igual a la fuerza de fricción, esto lleva a la primera propiedad cualitativa de la fricción (Rabinowicz, 1995). En cualquier caso donde la resultante de la fuerza tangencial es menor que algún parámetro específico de fuerza para esa situación en particular, la fuerza de fricción será igual y opuesta a la resultante de la fuerza aplicada y no ocurrirá el movimiento tangencial. Excepciones a esta ley se encuentran a escala microscópica; La segunda propiedad cualitativa de la fricción es cuando la fuerza aplicada causa movimiento, aquí la fuerza de fricción actúa en dirección opuesta a aquella de la velocidad relativa de las superficies. Excepciones a esta propiedad son mínimas.

Las dos propiedades anteriores conciernen a la magnitud de la fuerza de fricción, se requieren tres relaciones cuantitativas para expresar la magnitud de la fuerza de fricción como una función de las variables macroscópicamente observables: la carga aplicada, el tamaño de la región de contacto y la velocidad de deslizamiento (Rabinowicz, 1995).

La fuerza de fricción ( $F$ ) es proporcional a la fuerza normal ( $L$ ), esta relación permite definir un coeficiente de fricción  $f$  (o  $\mu$ ). Es conveniente expresar esta ley en términos de un ángulo constante de reposo, o ángulo de fricción  $\theta$ , definido por  $\tan \theta = \mu$ . Donde  $\theta$  es el ángulo de un plano inclinado en el cuál cualquier objeto, independientemente de su peso, que esté sobre el plano, permanecerá en estado estacionario, pero si el ángulo se incrementa en cualquier cantidad, el objeto se deslizará (Fig. 3).



**Figura 3: Diagrama de equilibrio de un objeto en el plano inclinado**

La fuerza de fricción es independiente del área de contacto  $A$  (área aparente). Debido a que objetos grandes y pequeños, tienen el mismo coeficiente de fricción.

La fuerza de fricción es independiente de la velocidad de deslizamiento  $\mu$ . Esto implica que la fuerza requerida para iniciar el movimiento será la misma para mantener el deslizamiento a cualquier velocidad específica.

Solaque (2008) menciona que la fuerza de fricción depende directamente de la fuerza aplicada y del ángulo de fricción. Si alguno de los dos es igual a cero no habrá fuerza de fricción, menciona también que si el ángulo de oblicuidad de la fuerza aplicada es menor que el ángulo de fricción, solo actuara una parte de la fricción y por lo tanto no hay posibilidad de deslizamiento. Por tanto el ángulo de fricción es el limitante de la oblicuidad. Cuando la oblicuidad es igual a empezar a presentarse deslizamiento.

En materiales sin cohesión, la resistencia al deslizamiento sobre cualquier plano a través del material es similar a la fricción entre cuerpos sólidos (la resistencia depende de la presión directa que existe sobre el plano y del ángulo de fricción). Sin embargo, la resistencia friccionante de materiales granulares (arena) es más compleja; esta resistencia está compuesta por:

- Resistencia friccional entre los granos, esta es una combinación de fricción deslizante y fricción rodante.

- Entrelace de las partículas, que es un fenómeno que contribuye a la resistencia en arenas densas. Este fenómeno no ocurre en arenas sueltas. La pérdida gradual de resistencia después de que se ha pasado el punto máximo puede ser atribuido a una disminución gradual del entrelace, lo cual sucede debido a que la muestra disminuye en densidad.
- La densidad de la arena influye apreciablemente en el ángulo de fricción del material y el entrelace de las partículas. También varía con la magnitud del esfuerzo aplicado durante el ensayo.



### III. MATERIALES Y MÉTODOS

#### 3.1. Lugar de Ejecución

El trabajo de investigación se ejecutó en el laboratorio de Postcosecha de la Escuela Profesional de Ingeniería Agroindustrial de la Universidad Nacional del Altiplano ubicado a 3827 m.s.n.m. en la ciudad de Puno y el laboratorio de panificación de la Universidad Nacional José María Arguedas de la Ciudad de Andahuaylas ubicado a 2926 m.s.n.m.

#### 3.2. Material Experimental

Se empleó quinua del centro experimental Camacani en las siguientes variedades:

- Salcedo INIA
- Pasankalla
- Negra Collana
- Kancolla

#### 3.3. Materiales y Equipos

##### 3.3.1. Materiales

- Juego de tamices Tyler
- Juego de pesas patrón
- Probeta graduada, de 10 ml.
- Espátulas de melanina
- Piceta de polietileno boca angosta cap. 200 ml.
- Vaso de precipitados 50 y 250 ml.
- Frascos de vidrio con cierre hermético de 500 cc.
- Brocha de suarda fina
- Escalímetro
- Reglas metálicas de 20 y 30 cm.
- Medidor de nivel
- Depósitos de plástico
- Desecador de campana

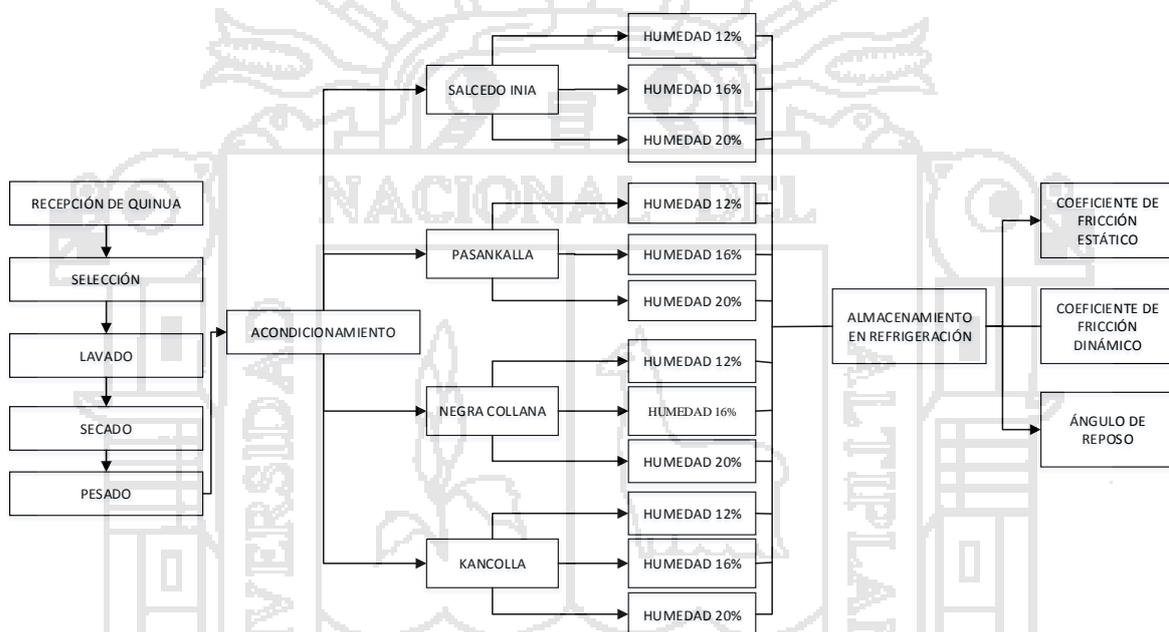
##### 3.3.2. Equipos de laboratorio

- Balanza analítica precisión marca TRAVELER Cap. 200 g, sensibilidad (0,01g)
- Balanza precisión marca IKEA HAJDEBY Cap. 500 g, sensibilidad (0,01g)

- Estufa Universal marca “MEMMERT” de 20 litros de capacidad
- Refrigeradora marca Samsung
- Equipo para determinar ángulo de reposo
- Equipo de Plano inclinado
- Equipo de Plano horizontal

### 3.4. Metodología Experimental

El presente trabajo de investigación se ha realizado según el diagrama experimental presentado en la Figura 4.



**Figura 4: Diagrama Experimental**

A continuación se describen las etapas propuestos en el estudio:

#### 3.4.1. Acondicionamiento de la humedad de los granos de quinua

La humedad inicial de los granos de quinua se determinó según la NTP 205.002. (1979); y AACC, (1995) en estufa a 80° C calculándose la humedad con la Ecuación 1. Conocido la humedad, los granos de quinua fueron acondicionadas a tres porcentajes de humedad (12, 16, 20% en base seca); se emplearon frascos de vidrio de cierre hermético donde se depositaron las semilla en sus distintas variedades, a las que se adicionó la cantidad de agua destilada necesaria determinada mediante la Ecuación 2. Posteriormente los frascos fueron agitados hasta lograr homogenizar el agua y se dejaron

en refrigeración a 5° C durante una semana, para lograr la distribución homogénea de la humedad Amin *et al.*, (2004); Carman (1996).

$$\text{Humedad} = \left[ \frac{\text{Peso}_{\text{inicial}} * \text{Peso}_{\text{final}}}{\text{Peso}_{\text{inicialf}}} \right] * 100 \quad (\text{Ec. 1})$$

$$y = \left[ \frac{H_f * M_s}{1 - H_f} - H_0 \right] * 1,05 \quad (\text{Ec. 2})$$

Dónde:

$y$  = Es la humedad a adicionar

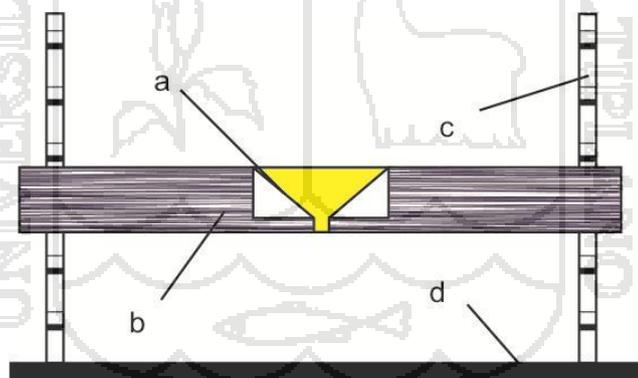
$H_f$  = Es la humedad deseada en los granos de quinua

$M_s$  = Es la materia seca de los granos de quinua

$H_0$  = Es la humedad de los granos de quinua

### 3.4.2. Determinación del ángulo de reposo

En la Figura 5 se presenta el esquema del equipo empleado para determinar el ángulo de reposo, el mismo que está compuesto por un embudo, un soporte (móvil) y una base plana horizontal. Para la lectura de la altura del cono y la base, se empleó una regla, una escuadra, y papel milimetrado, para la manipulación y vertido de las muestras de quinua se emplearon un cucharón de melanina y espátula metálica.



a) Embudo, b) Soporte, c) Soporte graduado, d) Base con papel milimetrado

**Figura 5: Equipo para determinar el ángulo de reposo.**

En primera instancia se ajustó el soporte a una altura tal, que la base del embudo tenga una separación de 10 cm de altura con respecto a la base o soporte del embudo.

Se pesaron los granos de quinua variedad Salcedo INIA, Variedad Pasankalla, Negra Collana y Kancolla. Se vierte en el embudo del equipo, luego se suspende el brazo que soporta el embudo hasta una altura de 10 cm, donde los granos de quinua forman un cono, en la que se determina el diámetro

de la base y la altura formada, con los valores obtenidos se proceden a calcular el ángulo de reposo con la Ecuación 3:

$$\text{tang}(\alpha) = \frac{2 \cdot h}{\text{Diametro}(D) - \text{diametro}(d)} \quad (\text{Ec. 3})$$

Dónde:

$\alpha$  = Ángulo de reposo

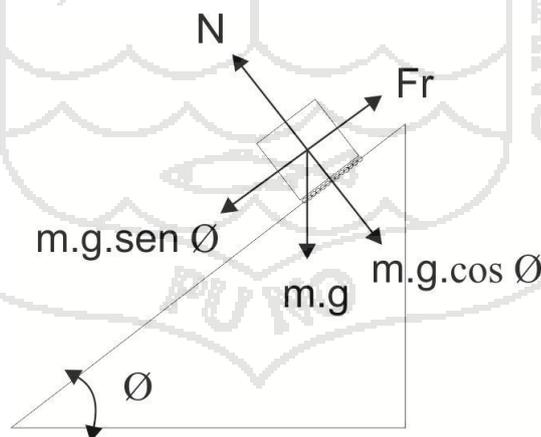
D= Diámetro formado por los granos de quinua

h = Altura del cono

d = Diámetro a la salida del embudo

### 3.4.3. Determinación de coeficiente de fricción estático

Los granos de quinua de las variedades consideradas por el estudio, previamente fueron pesados y depositados en la caja de madera, de dimensiones 90 x 90 x 90 mm. Previamente ubicada sobre la superficie del plano inclinado, preparado para las pruebas experimentales, seguidamente se levantó 3 mm para lograr que solo las semillas tengan contacto con la superficie y evitar que las paredes de la caja tuvieran contacto directo con la superficie de prueba, seguidamente se suspendió progresivamente el plano inclinado hasta lograr romper la máxima fuerza normal de la masa de semillas de quinua con el plano inclinado, cuya representación física se presenta en la Figura 6, logrado el desplazamiento de la masa de quinua se registra el valor del ángulo que permitió el desplazamiento de la masa en estudio, reemplazando los valores en la Ecuación 5 se procede a determinar el coeficiente de fricción estático:



**Figura 6: Representación física para determinar el coeficiente de fricción estático**

$$\mu_s = \frac{F_0}{W} \quad (\text{Ec. 4})$$

$$\mu_s = \frac{h}{b} * \frac{1}{\tan\theta} \quad (\text{Ec. 5})$$

Donde:

$\mu_s$ : Coeficiente de fricción estático (adimensional)

h: Altura del plano inclinado (cm)

b: Base del plano inclinado

W: Peso de las semillas kilogramos fuerza (kgf)

$\theta$ : Angulo formado por el plano inclinado

#### 3.4.4. Determinación del Coeficiente de fricción dinámico

La determinación del coeficiente de fricción dinámico se realizó en el plano horizontal, cuyo esquema del módulo empleado se presenta en la Figura 7. Donde M1 es la masa de quinua a evaluar, M2 es la fuerza que se requiere para mover M1.



**Figura 7: Representación física para determinar el coeficiente de fricción dinámico**

Para su determinación se pesó la masa de quinua y registró el valor obtenido según la variedad en estudio, seguidamente los grano de quinua se depositaron en el soporte de dimensiones 100 mm x 100 mm x 50 mm, dispuesta sobre el plano horizontal como se observa en la Figura 7, de modo que la polea quede libre y pueda permitir su deslizamiento por lo que paralelamente se colocaron cantidades de masa conocida a la base (M2) hasta que el bloque empieza a deslizarse lentamente a velocidad constante. Se registra la masa obtenidas, la prueba se repitió por diez veces, efectuando los cálculos respectivos del coeficiente de fricción dinámico con la Ecuación 6 (Altuntas y Yildiz, 2007).

$$\mu_c = \frac{f_c}{N} \quad (\text{Ec. 6})$$

Donde:

$\mu_c$  : Coeficiente de fricción dinámico (adimensional)

$f_c$  : Fuerza máxima requerida para mover la muestra, kilogramos fuerza (kgf)

N: Peso de las semillas, kilogramos fuerza (kgf)

### 3.5. Método de Análisis

#### 3.5.1. Determinación de la humedad de los granos de quinua

El contenido de humedad de las muestras de quinua se determinó por el método de horno de aire caliente. Se tomaron cinco muestras de cada tres gramo y se mantuvieron por una hora en el horno de aire caliente a  $130 \pm 2^\circ \text{C}$ , se tomaron las muestras y se coloca en el desecador de campana para su enfriamiento. Se calculó el contenido de humedad con la Ecuación 7 (NTP 205.002, 1979; AACC, 1995).

$$H\% = \frac{W_2 - W_3}{W_3 - W_1} * 100 \quad (\text{Ec. 7})$$

Donde:

W1 - peso inicial de la placa, g

W2 - Peso de la muestra antes del secado + peso de la placa, g

W3 - Peso de la muestra después del secado + peso de la placa, g

### 3.6. Unidades de Análisis y Observaciones

#### 3.6.1. Factores en estudio

- a. Variedad
  - Salcedo INIA
  - Pasankalla
  - Negra Collana
  - Kancolla
- b. Humedad (%)
  - Humedad 12%
  - Humedad 16%
  - Humedad 20%

#### 3.6.2. Variables de respuesta

- Ángulo de reposo
- Coeficiente de fricción estático
- Coeficiente de fricción dinámico

### 3.7. Diseño de Investigación

Para procesar y analizar los datos obtenidos según los objetivos planteados se consideró lo siguiente:

Para analizar los resultados del coeficiente de fricción estático, dinámica y ángulo de reposo del grano de quinua en cuatro variedades a diferente humedad, se hizo un arreglo factorial  $4 \times 3 \times 10$ , cuyo modelo matemático es:

$$Y_{ijk} = \mu + \alpha_i + \beta_j + (\alpha\beta)_{ij} + \varepsilon_{ijk}$$

Donde  $\mu$  es la medida general de las variables de respuesta,  $\alpha$  es el efecto debido al i-eximo nivel del factor Variedad(A),  $\beta_j$  es el efecto del j-esimo nivel del factor Humedad(B),  $(\alpha\beta)_{ij}$  representa al efecto al efecto de interacción en la combinación ij y  $\varepsilon_{ijk}$  es el error aleatorio que se supone sigue una distribución normal con media cero y varianza constante  $\sigma^2$  ( $N(0, \sigma^2)$ ) y son independientes entre sí.

Para establecer la relación entre el contenido de humedad y el ángulo de reposo sobre el coeficiente de fricción de los granos de quinua en cuatro variedades los datos se analizaron por regresión múltiple, para lo cual se planteó el modelo:

$$Y = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \varepsilon$$

Dónde:

$Y$  = Es la variable de respuesta, representa coeficiente de fricción estático ( $\mu_s$ ) y el coeficiente de fricción dinámico ( $\mu_c$ )

$X_1$  = Es la humedad del producto (H)

$X_2$  = Es el Angulo de reposo de los granos de quinua

$\beta_0, \beta_1, \beta_2$  = Son los parámetros desconocidos que han sido estimados

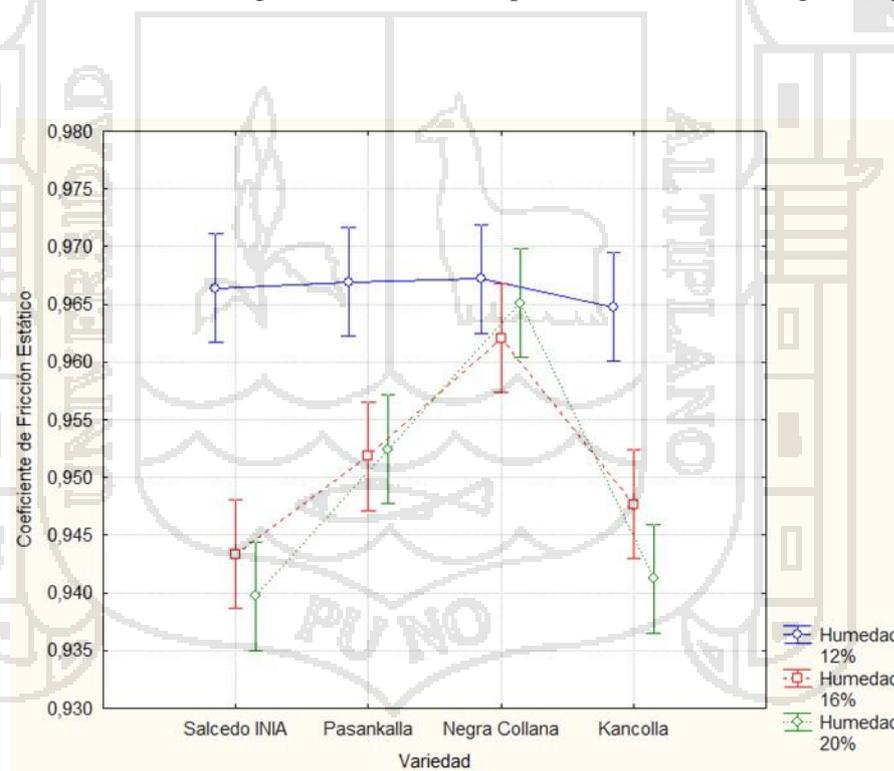
$\varepsilon$  = Es el error residual

Según los objetivos específicos planteados los resultados fueron sometidos a análisis de varianza (ANOVA), al 95 % de significancia y el test de efectos simples ( $P < 0,05$ ) para determinar las posibles diferencias en los porcentajes de humedad y variedad. La información se procesó con el programa estadístico Statgraphics®Centurion XVI (Statpoint Technologies Inc.) y el programa Statistic versión 8.

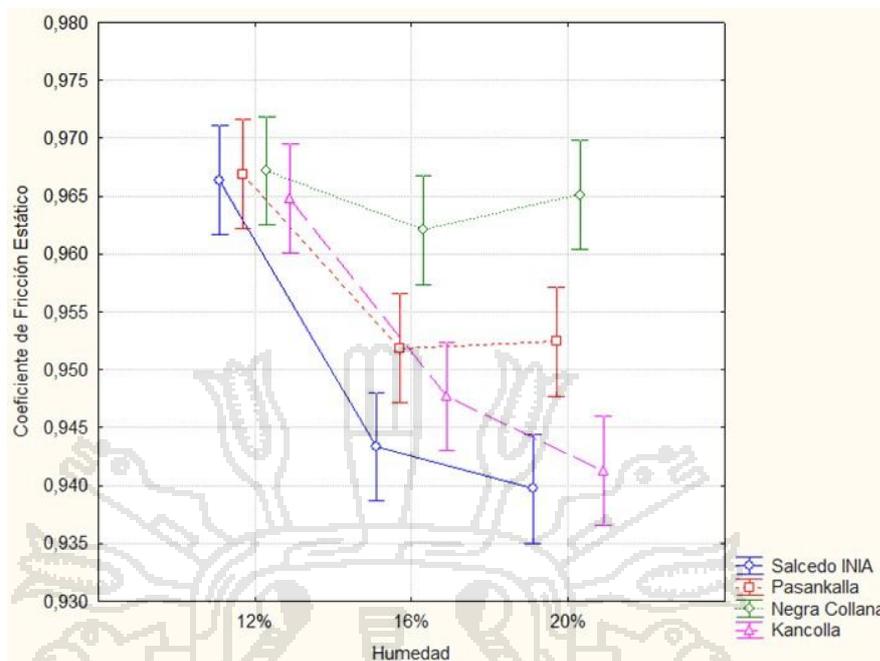
#### IV. RESULTADOS Y DISCUSION

##### 4.1. Efecto del Contenido de Humedad y Variedad de Quinua sobre el Coeficiente de Fricción Estático

El resultado del análisis de varianza se presenta en Anexo 1, donde se observa efecto altamente significativo al 95% de probabilidad, indicándonos que tanto la variedad y la humedad influenciaron en el coeficiente de fricción estático, asimismo la interacción variedad\*humedad resultó altamente significativos, lo que implica que el coeficiente de fricción estático está influenciado en forma asociada por los factores en estudio. Los resultados obtenidos son confiables debido a que el coeficiente de variación determinado es 0,79. En el Anexo 2, se presenta el análisis de varianza para la interacción variedad\*humedad, determinándose que para las interacciones variedad en 16% de humedad y variedad en 20% de humedad así como humedad en variedad Salcedo INIA, humedad en variedad Pasankalla y humedad en variedad Kancolla, el coeficiente de fricción estático determinado fue altamente significativo no así en las interacciones variedad en 12% de humedad y humedad en variedad Negra Collana, como se puede observar en las Figuras 8 y 9.



**Figura 8: Interacción humedad en variedad sobre el coeficiente de fricción estático.**



**Figura 9: Interacción variedad en humedad sobre el coeficiente de fricción estático.**

En la Tabla 8 se presenta el análisis de comparaciones múltiples de DUNCAN, donde observamos que entre variedades existe diferencias estadísticas significativas, mayor coeficiente de fricción estático presentó la variedad Negra Collana con 0,965, seguido la variedad Pasankalla con 0,957, en tanto entre las variedades Kancolla con 0,951 y variedad Salcedo INIA con 0,949 no se evidenciaron diferencias estadísticas significativas, la variación de los coeficientes de fricción estático, muy posiblemente sean atribuidos a la variedad ya que cada variedad presenta diferentes propiedades físicas y mecánicas como lo menciona Mohsenin (1978), Chung y Verma, (1989); Singh y Goswami, (1996); Nwakonobi y Onwualu, (2009). En de interés indicar que esta variación también es atribuida al tamaño de los granos de quinua, el tamaño determinara mayor o menor masa de producto, que hace que la fricción con la base sobre la que están expuestas los granos de quinua, generará distinto coeficiente de fricción estático como lo indica Kalman (1993).

**Tabla 8. Comparaciones múltiples para el efecto de la variedad sobre el coeficiente de fricción estático.**

Duncan	Promedio	Nº Datos	Variedad
a	0,964	30	Negra Collana
b	0,957	30	Pasankalla
c	0,951	30	Kancolla
c	0,949	30	Salcedo INIA

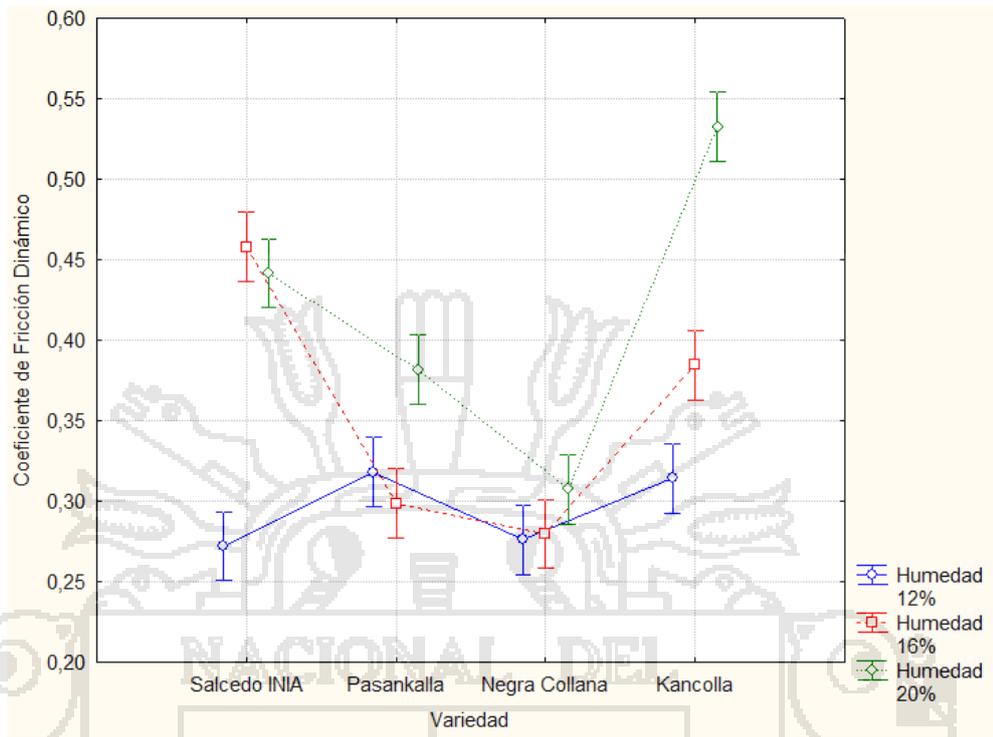
En la Tabla 9 se presenta los resultados de las comparaciones múltiples de DUNCAN, observándose diferencias estadísticas significativas, para el efecto de la humedad sobre el coeficiente de fricción estático, determinándose mayor coeficiente de fricción estático para los granos de quinua con 12% de humedad (0,966); seguido de 16% (0,951) y 20% de humedad (0,950); es necesario resaltar que entre el 16% de humedad y 20% de humedad de los granos de quinua no existe diferencias estadísticas al 95% de probabilidades a diferencia del 12 % de humedad. Variación que es directamente atribuido al contenido de humedad del grano como lo indica Stroshine (1998). Por la escasa información hacemos referencia a los estudios en coeficientes de fricción estático de semillas de *Helianthus annuus*, donde determinaron que el coeficiente de fricción aumentó linealmente con el aumento en el contenido de humedad, independientemente de la naturaleza de las superficies (Gupta y Das, 1998; Asli-Ardeh *et al.*, 2010). Asimismo los valores determinados comparados con los coeficientes de fricción estático de la soya, trigo, sorgo, cebada, ajonjolí fueron mayores a los valores determinados por Ospina, (200) confirmándose una vez más que el coeficiente de fricción es independiente de la variedad entre otras propiedades físicas del grano de quinua.

**Tabla 9. Comparaciones múltiples para el efecto de la humedad en el coeficiente de fricción estático**

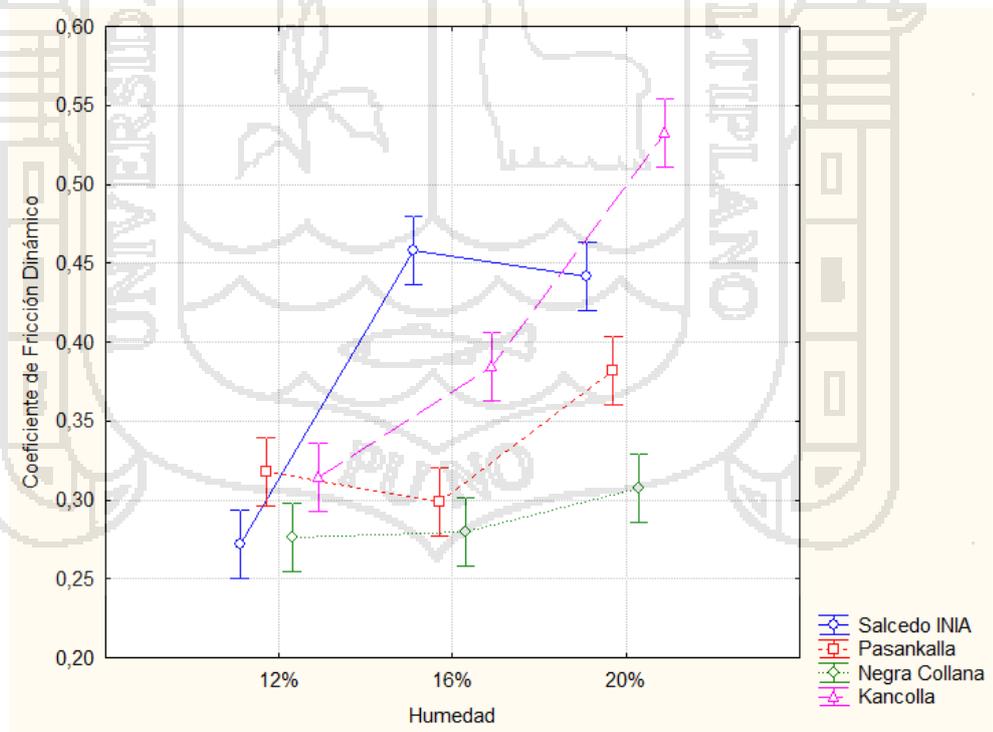
Duncan	Promedio	Nº Datos	Humedad %
a	0,966	40	12
b	0,951	40	16
b	0,949	40	20

#### 4.2. Efecto de la Variedad y contenido de Humedad sobre el Coeficiente de Fricción Dinámico

El resultado del análisis de varianza se presenta en Anexo 4; donde se observa efecto altamente significativo al 95% de probabilidad, indicándonos que tanto la variedad y la humedad influenciaron en el coeficiente de fricción dinámico (CFD), asimismo la interacción Variedad\*Humedad resultaron altamente significativos, lo que implica que el coeficiente de fricción dinámico está influenciado en forma asociada por los dos factores en estudio, los resultados obtenidos son confiables debido a que el coeficiente de variación determinado es de 9,655; en tanto en el Anexo 5, se presenta el análisis de varianza para la interacción Variedad\*Humedad, determinándose que para las interacciones variedad en 16% de humedad y variedad en 20% de humedad, así como humedad en variedad Salcedo INIA, humedad en variedad Pasankalla y humedad en variedad Kancolla, el coeficiente de fricción fue altamente significativo; no así en las interacciones variedad en 12% de humedad y humedad en variedad Negra Collana, como se observa en las Figuras 10 y 11.



**Figura 10: Interacción variedad en humedad sobre el coeficiente de fricción dinámico**



**Figura 11: Interacción humedad en variedad sobre el coeficiente de fricción dinámico**

En la Tabla 10 se presenta el análisis de comparaciones múltiples de DUNCAN, donde observamos que entre variedades existe diferencias estadísticas significativas, se determinó mayor coeficiente de fricción dinámico en el siguiente orden: variedad Kancolla con 0,410, variedad Salcedo INIA con 0,391, variedad Pasankalla con 0,333 y Negra Collana con 0,288.

**Tabla 10. Comparaciones múltiples para el efecto de la variedad sobre el coeficiente de fricción dinámico**

Duncan	Promedio	Nº Datos	Variedad
a	0,410	30	Kancolla
b	0,391	30	Salcedo INIA
c	0,333	30	Pasankalla
d	0,288	30	Negra Collana

En la Tabla 11 se presenta las comparación múltiple de DUNCAN, observándose que a diferentes contenidos de humedad el coeficiente de fricción dinámico presentó diferencias estadísticas significativas, determinándose mayor coeficiente de fricción dinámico para los granos de quinua con 20% de humedad (0,416), seguido del 16% de humedad (0,355) y finalmente los granos de quinua con 12% de humedad (0,295).

**Tabla 11. Comparaciones múltiples para el efecto de la humedad en el coeficiente de fricción dinámico**

Duncan	Promedio	Nº Datos	Humedad %
a	0,416	40	20
b	0,355	40	16
c	0,295	40	12

De los resultados obtenidos indicamos que las variaciones referidas al coeficiente de fricción dinámico, es debido a la adherencia de la humedad en los granos de quinua como lo menciona Laskowski y Lysiak (1999) y Dziki (2007) la que ocasionaría presión y mayor fuerza estáticas y dinámicas generando mayores o menores velocidades de impacto, como lo mencionan García (2010); Bargale *et al.* (1995); Murty y Bhattacharya (1998); Gupta y Das (2000) que muy posiblemente causarían magulladuras y fracturas que incrementarían la susceptibilidad de los granos de quinua al deterioro durante el almacenamiento como lo menciona Bargale *et al.*, (1995) así como ocasionaría en los equipos en las que están en contacto mayor o menor desgastes como lo menciona Gómez, (2005); Jost, (1966).

La influencia de la variedad también es atribuida al ángulo crítico que cada variedad presenta, ya que al rodar los granos de quinua en sus diferentes variedades los granos grandes tienden a superar esfuerzos más altos por la angularidad y oblicuidad propia de cada variedad de quinua y presentara según la variedad fricción deslizante y fricción rodante, ocasionado por el entrelace de los granos, la resistencia, que finalmente ocasiona que los granos de quinua tienden a deslizarse generando mayor o menor coeficiente de fricción dinámico como lo menciona Solaque (2008). Asimismo cada variedad al presentar propiedades físicas diferenciadas hacen que el coeficiente de fricción dinámico sufra cambios según la variedad en estudio, por lo que es de interés su determinación y conocimiento ya que nos permitiría estimar pérdidas de potencia en os equipos debidas a la fricción dinámica que los granos ejercen sobre el material donde se desplaza como lo menciona Ospina (2001) y Ruiz (2000).

#### **4.3. Efecto de la Variedad y Contenido de Humedad en el Ángulo de Reposo**

El resultado del análisis de varianza se presenta en Anexo 7; donde se observa un efecto altamente significativo al 95% de probabilidad, indicándonos que tanto la variedad y la humedad influenciaron en el ángulo de reposo, asimismo la interacción variedad\*humedad resultó altamente significativos, haciendo notar que el ángulo de reposo es influenciado en forma asociada por los factores mencionados. Asimismo en el Anexo 8, se presenta el análisis de varianza para la interacción variedad\*humedad, determinándose que para las interacciones variedad en 12% de humedad, variedad en 16% de humedad, variedad en 20% de humedad; humedad en variedad Salcedo INIA, humedad en variedad Pasankalla, humedad en variedad Negra Collana y humedad en variedad Kancola, los valores del ángulo de reposo fueron altamente significativo; efecto que puede observarse en las Figuras 12 y 13.

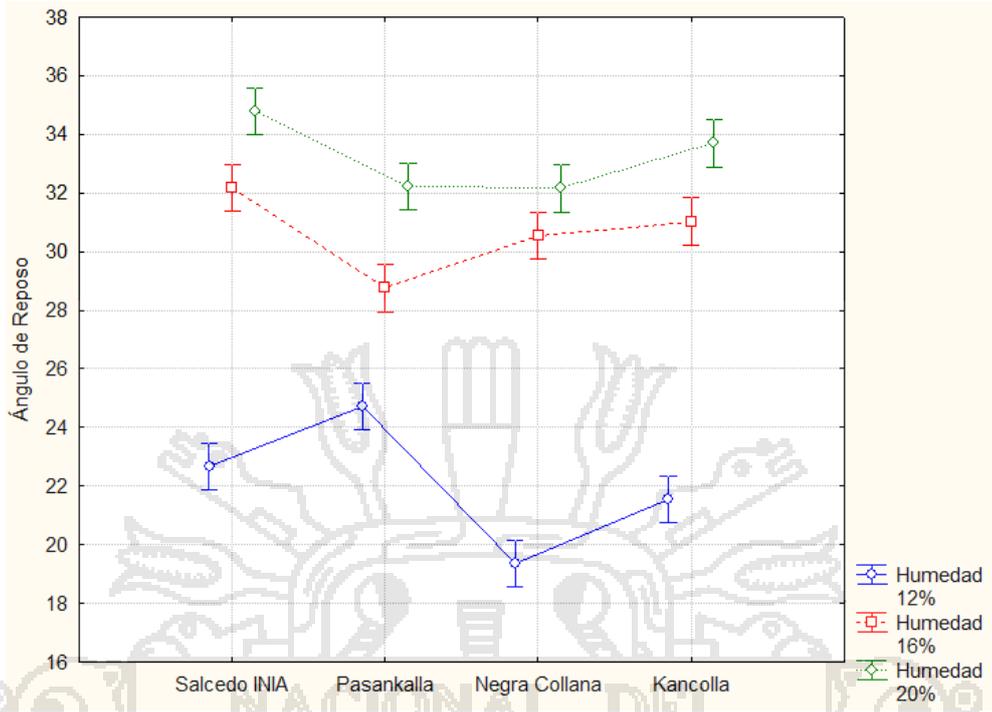


Figura 12: Interacción variedad en humedad sobre el ángulo de reposo

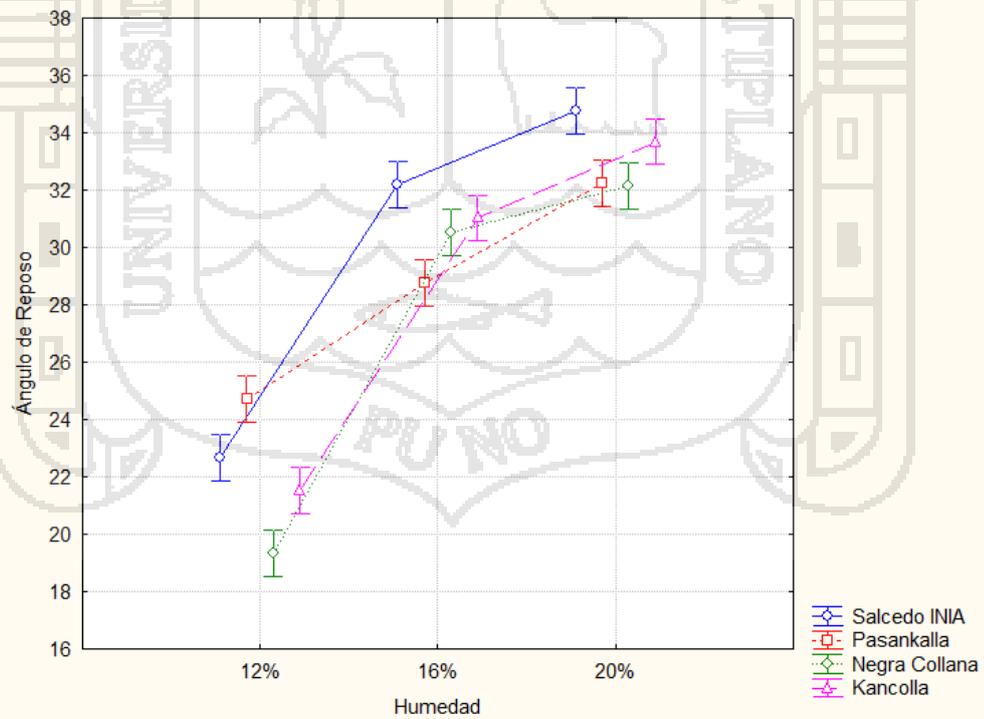


Figura 13: Interacción humedad en variedad sobre el ángulo de reposo

En la Tabla 12 se presenta el análisis para las comparaciones múltiples de DUNCAN, donde observamos que entre variedades existen diferencias estadísticas significativas, determinándose 29,871° de ángulo de reposo para la variedad Salcedo INIA, seguido de las variedades Kancolla con 28,752°, Pasankalla con 28,568° y finalmente Negra Collana con 27,343°, así mismo se determinó que entre la variedad Kancolla y variedad Pasankalla no existen diferencias estadísticas significativas en el ángulo de reposo a diferencia de la variedad Salcedo INIA y variedad Negra Collana respectivamente.

**Tabla 12. Comparaciones múltiples para el efecto de la variedad sobre el ángulo de reposo**

Duncan	Promedio	N° Datos	Variedad
a	29,871°	30	Salcedo INIA
b	28,752°	30	Kancolla
b	28,568°	30	Pasankalla
c	27,343°	30	Negra Collana

De los valores obtenidos del ángulo de reposo, que oscila entre un mínimo de 27,343° y un máximo de 29,871°, estos valores se asemejan al ángulo de reposo determinado Ospina, (2001). Los valores determinados y presentados en la Tabla 12 nos permiten caracterizar la fluidez de las semillas de quinua catalogándolo de flujo muy libre ya que oscila entre los rangos de 25 – 30 como lo indica Collin, (2010), asimismo podemos afirmar que la variedad que representa mayor fluidez es la variedad Negra Collana, seguido de la variedades Kancolla y Pasankalla, y finalmente Salcedo INIA; que al momento de diseñar equipos de flujo continuo estos valores de ángulo de reposo son necesarios para la fluidez que tendrá los granos de quinua durante el flujo de proceso a los que estará sometido como lo indica Alvarado y Aguilera, (2001) y Geldart *et al.*, (2006), asimismo afirmamos que los valores determinados del ángulo de reposo están por encima de los valores determinados por Vilche *et al.*, (2003) quien estableció un rango entre 18 a 25°, y por debajo del valor determinado por Cardozo *et al.*, (1979) quien determino 30° de ángulo de reposo en granos de quinua.

En la Tabla 13, se presenta los resultados de las comparación múltiple de DUNCAN, observándose diferencias estadísticas significativas, para el efecto de la humedad sobre el ángulo de reposo, determinándose 33,214° de ángulo de reposo para los granos de quinua con 20% de humedad, seguido de 16% con 30,622° y 12% de humedad con 22,065° respectivamente. El incremento en el ángulo de reposos es debido a que la humedad modifica el comportamiento mecánico de las semillas, ocasionando cambios de la matriz estructural del almidón y de las proteína; tornándose el producto suave y plástico como lo menciona Murty y Bhattacharya (1998); Gupta y Das (2000) además que la humedad incrementa la tensión superficial que predomina sobre los productos granulares como lo

menciona Ospina, (2001) y Mohsenin (1986) y en su conjunto modificarán los valores del ángulo de reposo.

**Tabla 13. Comparaciones múltiples para el efecto de la humedad en el ángulo de reposo**

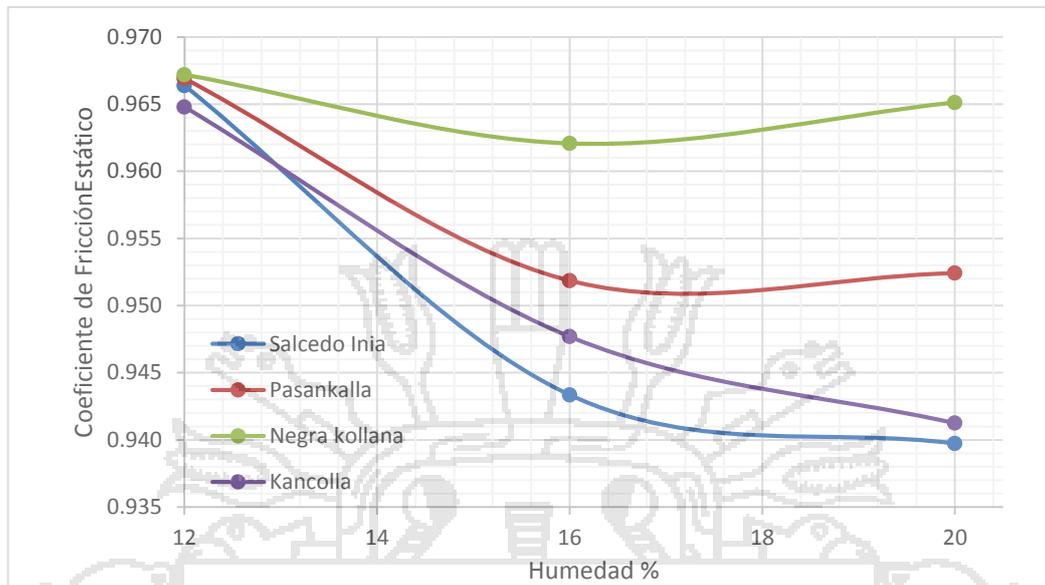
Duncan	Promedio	Nº Datos	Humedad %
a	33,214°	40	20
b	30,622°	40	16
c	22,065°	40	12

#### 4.4. Correlación del Contenido de Humedad, Ángulo de Reposo, Coeficiente de Fricción Estático y Coeficiente de Fricción Dinámico en las Variedades de Quinua

Los resultados del coeficiente de fricción estático se presentan en la Tabla 14, y en la Figura 14, donde se observa que a medida que incrementa la humedad en los granos de quinua en sus cuatro variedades el coeficiente de fricción estático disminuye dentro de los valores experimentales estudiados, determinándose que la variedad Salcedo INIA y Kancolla disminuye rápidamente el coeficiente de fricción estático a diferencia de las variedades Pasankalla y Negra Collana. Muy posiblemente estas variaciones sean debidas a las características propias de la variedad y estructura del grano, además atribuimos este comportamiento al material empleado en sus determinaciones como lo menciona Dursun y Dursun, (2005); Stroshine, (1998). Es necesario resaltar que la forma y tamaño, así como el volumen y peso hectolitrito propio de cada variedad, serán parámetros que también influyen sobre el máximo coeficiente de fricción estático, y en conjunto generarán una fuerza para iniciar y mantener en movimiento los granos de quinua, permitiendo deformar y algunas veces cortar las asperezas de las superficies en contacto para generar la fuerza requerida y vencer la adhesión y cohesión entre los granos de quinua y la superficie de acero inoxidable, contribuyendo a ello la humedad del grano (Ospina, 2001).

**Tabla 14. Coeficiente de fricción estático de las variedades de quinua según la humedad**

Humedad %	Variedad de Quinua			
	Salcedo INIA	Pasankalla	Negra Collana	Kancolla
12	0,966	0,967	0,967	0,965
16	0,943	0,952	0,962	0,948
20	0,940	0,952	0,965	0,941



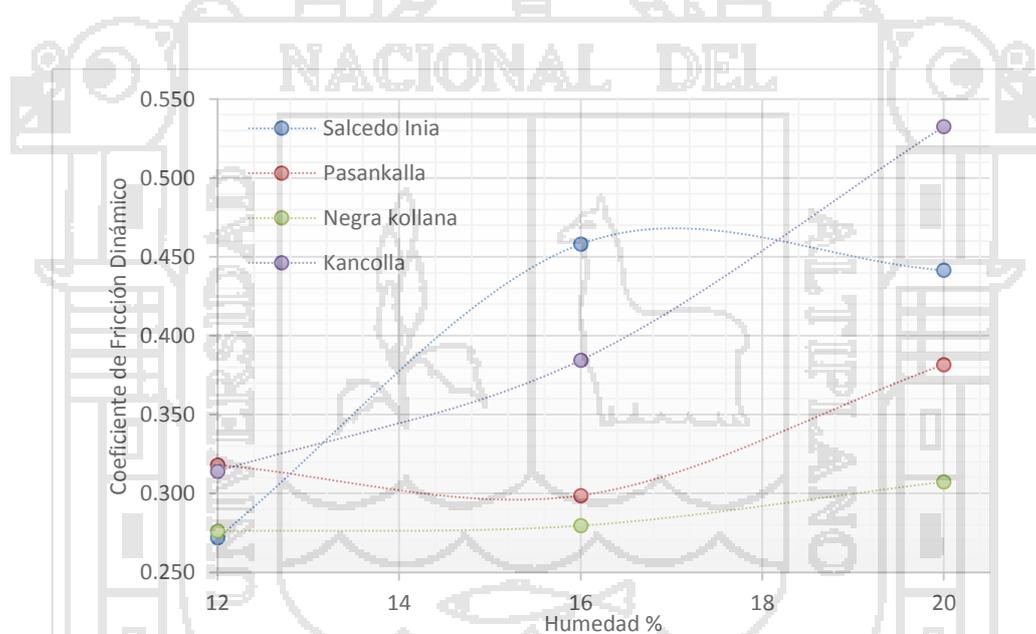
**Figura 14: Relación del contenido de humedad en el coeficiente de fricción estático.**

Los resultados del coeficiente de fricción dinámico se presentan en la Tabla 15, y en la Figura 15 se observa que a medida que incrementa la humedad en los granos de quinua en sus cuatro variedades el coeficiente de fricción dinámico incrementa dentro de los valores experimentales estudiados, observándose que en las variedades Negra Collana, Pasankalla y Kancolla a diferencia de la variedad Salcedo INIA, el coeficiente de fricción dinámico incrementa a mayor contenido de humedad de los granos de quinua, en tanto la variedad Salcedo INIA manifiesta un incremento hasta 16% de humedad y a partir de ello tiende a disminuir lentamente con una tendencia a mantenerse constante a partir de los 20% de contenido de humedad.

**Tabla 15. Coeficiente de fricción dinámico de las variedades de quinua según la humedad.**

Humedad %	Variedad de Quinua			
	Salcedo INIA	Pasankalla	Negra Collana	Kancolla
12	0,272	0,318	0,276	0,314
16	0,458	0,299	0,280	0,384
20	0,442	0,382	0,307	0,533

Atribuimos este comportamiento a la capacidad máxima de absorción de humedad de los granos de quinua en sus diferentes variedades, observándose en las variedades salcedo Inia y Kancolla, a contenidos de humedad mayores al 20% requieran la misma fuerza para desplazar los granos de quinua cuando están en contacto con la superficie de acero inoxidable, reduciendo el coeficiente de fricción estático; a diferencia de las variedades Salcedo Inia y Kancolla a contenidos de humedad mayores al 20% incrementan el coeficiente de fricción estático. Este comportamiento suigeneris del coeficiente de fricción estático de los granos de quinua bajo estudio, nos permite estimar el daño mecánico, en los granos de quinua, asimismo nos permitirá estimar tasas de desgaste por deformación plástica y fractura de los granos de quinua al estar en contacto con el material sobre el que se deslizan, daño mecánico conocido comúnmente como desgaste abrasivo, debido a que ocurre cuando las asperezas de una superficie dura o debris duro se desliza sobre una superficie más blanda o viceversa como lo mencionan (Bharat, 1999).



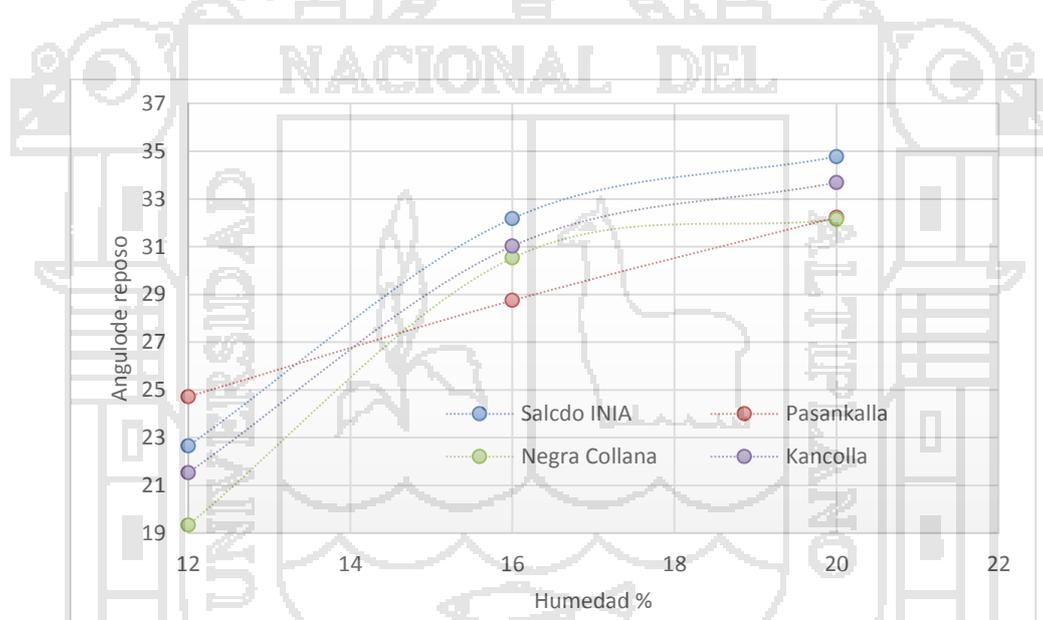
**Figura 15: Relación del contenido de humedad en el coeficiente de fricción dinámico.**

Los resultados del ángulo de reposo se presentan en la Tabla 16, y Figura 16, observamos que a medida que incrementa la humedad en los granos de quinua en sus cuatro variedades el ángulo de reposo incrementa, con mayor rapidez en la variedad Pasankalla a diferencia de las variedades Salcedo INIA, Negra Collana y Kancolla, efecto que se corrobora con los estudios de realizados por Haddad *et al.* 1999; Gupta y Das, 2000; Henry *et al.*, 2000; Molenda, *et al.*, 2005; Vursavus y

Ozguven, 2004, 2005; Baumler *et al.*, 2006; Altuntas y Yildiz, 2007; Andrejko y Grochowicz, 2007; Dziki, 2007; Correa *et al.*, 2008; Saiedirad *et al.*, 2008; Kılıçkan y Guner, 2008), quienes mencionan que las semillas en sus propiedades físicas son fuertemente influenciadas por el contenido de humedad.

**Tabla 16. Ángulo de reposo de las variedades de quinua según la humedad**

Humedad %	Variedad de Quinua			
	Salcedo INIA	Pasankalla	Negra Collana	Kancolla
12	22,659	24,721	19,344	21,537
16	32,182	28,75	30,53	31,027
20	34,773	32,234	32,156	33,692



**Figura 16: Relación del contenido de humedad en el ángulo de reposo**

A fin de evidenciar y determinar las correlaciones verdaderas entre la humedad del grano (HG), ángulo de reposo (AR), coeficiente de fricción dinámico (CFD) y coeficiente de fricción estático (CFE), se efectuaron análisis de correlación, y en la Tabla 17 se presentan los resultados del análisis global presentando las correlación parcial entre la humedad, ángulo de reposo, coeficiente de fricción estático y coeficiente de fricción dinámico de las cuatro variedades de quinua. Indicando que las correlaciones parciales han permitido medir estadísticamente la fuerza de la relación lineal entre las variables y juzgar que tan útil sería una variable para mejorar las predicciones de la segunda

variable, dada la información de todas las otras variables que ya han sido consideradas, asimismo en la Tabla 17, se observa que existen correlaciones reales entre HG y ARG, ARG y CFDG, así como CFDG y CFEG; con un nivel de confianza del 95,0%.

**Tabla 17. Análisis global de los coeficientes de correlación global entre la humedad, ángulo de reposo, coeficiente de fricción estático y coeficiente de fricción dinámico de las variedades en estudio**

	Humedad Global	Ángulo Reposo Global	Coeficiente de Fricción Dinámico Global	Coeficiente de Fricción Estático Global
Humedad Global		0,8134 (120)	0,0196 (120)	-0,0323 (120)
Ángulo Reposo Global	0,8134 (120)		0,2094 (120)	-0,1569 (120)
Coeficiente de Fricción Dinámico Global	0,0196 (120)	0,2094 (120)		-0,4454 (120)
Coeficiente de Fricción Estático Global	-0,0323 (120)	-0,1569 (120)	-0,4454 (120)	
Correlación (Tamaño de Muestra) Valor-P	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000

Para mejor análisis se presenta en las Tablas 18 al 21 y Figura 17, el análisis de la correlación que existe entre la humedad, ángulo de reposo, coeficiente de fricción estático y coeficiente de fricción dinámico, independientemente según las variedades estudiadas.

**Tabla 18. Análisis de la correlación entre la humedad, ángulo de reposo, coeficiente de fricción estático y coeficiente de fricción dinámico en la variedad Salcedo INIA**

	Ángulo de Reposo	Coeficiente de Fricción Dinámico	Coeficiente de Fricción Estático	Humedad
Ángulo de Reposo		0,4399 (30) 0,0192	-0,1966 (30) 0,3160	0,6296 (30) 0,0003
Coeficiente de Fricción Dinámico	0,4399 (30) 0,0192		-0,2995 (30) 0,1215	-0,1016 (30) 0,6070
Coeficiente de Fricción Estático	-0,1966 (30) 0,3160	-0,2995 (30) 0,1215		-0,3571 (30) 0,0621
Humedad	0,6296 (30) 0,0003	-0,1016 (30) 0,6070	-0,3571 (30) 0,0621	

Correlación  
(Tamaño de Muestra)  
Valor-P

**Tabla 19. Análisis de la correlación entre la humedad, ángulo de reposo, coeficiente de fricción estático y coeficiente de fricción dinámico en la variedad Pasankalla**

	Ángulo de Reposo	Coeficiente de Fricción Dinámico	Coeficiente de Fricción Estático	Humedad
Ángulo de Reposo		-0,2202 (30) 0,2601	0,1513 (30) 0,4421	0,8710 (30) 0,0000
Coeficiente de Fricción Dinámico	-0,2202 (30) 0,2601		0,3958 (30) 0,0371	0,4928 (30) 0,0077
Coeficiente de Fricción Estático	0,1513 (30) 0,4421	0,3958 (30) 0,0371		-0,4909 (30) 0,0080
Humedad	0,8710 (30) 0,0000	0,4928 (30) 0,0077	-0,4909 (30) 0,0080	

Correlación  
(Tamaño de Muestra)  
Valor-P

**Tabla 20. Análisis de la correlación entre la humedad, ángulo de reposo, coeficiente de fricción estático y coeficiente de fricción dinámico en la variedad Negra Collana**

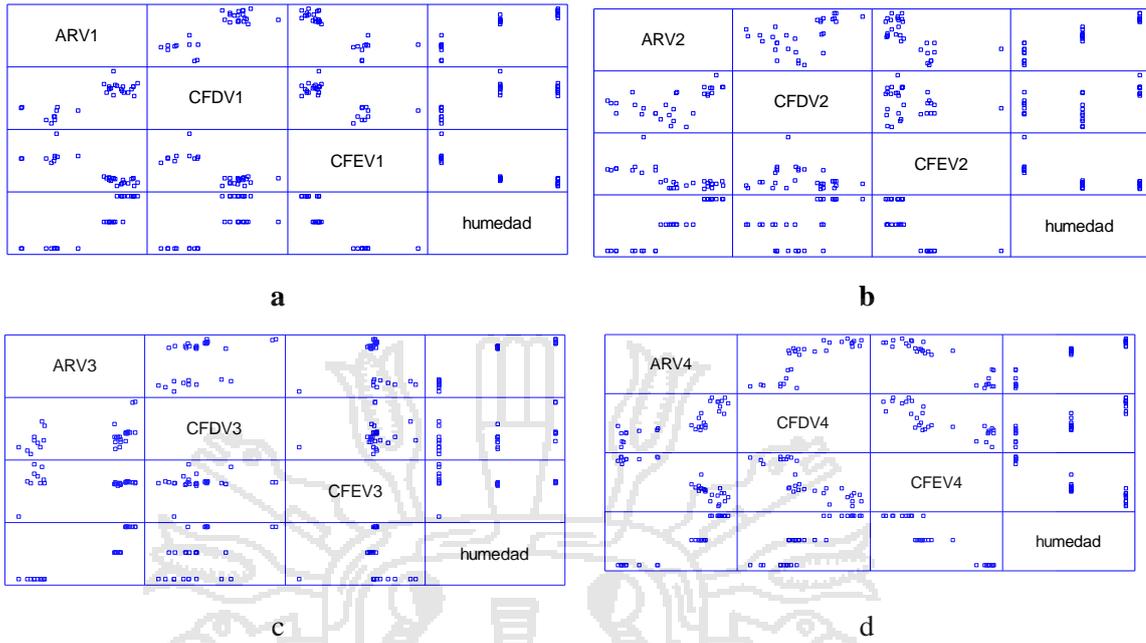
	Ángulo de Reposo	Coeficiente de Fricción Dinámico	Coeficiente de Fricción Estático	Humedad
Ángulo de Reposo		-0,0911 (30) 0,6446	0,0263 (30) 0,8944	0,8931 (30) 0,0000
Coeficiente de Fricción Dinámico	-0,0911 (30) 0,6446		0,2423 (30) 0,2142	0,2997 (30) 0,1213
Coeficiente de Fricción Estático	0,0263 (30) 0,8944	0,2423 (30) 0,2142		-0,1023 (30) 0,6046
Humedad	0,8931 (30) 0,0000	0,2997 (30) 0,1213	-0,1023 (30) 0,6046	

Correlación  
(Tamaño de Muestra)  
Valor-P

**Tabla 21. Análisis de la correlación entre la humedad, ángulo de reposo, coeficiente de fricción estático y coeficiente de fricción dinámico en la variedad Kancolla**

	Ángulo de Reposo	Coeficiente de Fricción Dinámico	Coeficiente de Fricción Estático	Humedad
Ángulo de Reposo		-0,1007 (30) 0,6101	-0,4719 (30) 0,0112	0,3645 (30) 0,0565
Coeficiente de Fricción Dinámico	-0,1007 (30) 0,6101		0,1701 (30) 0,3869	0,6889 (30) 0,0001
Coeficiente de Fricción Estático	-0,4719 (30) 0,0112	0,1701 (30) 0,3869		-0,5001 (30) 0,0067
Humedad	0,3645 (30) 0,0565	0,6889 (30) 0,0001	-0,5001 (30) 0,0067	

Correlación  
(Tamaño de Muestra)  
Valor-P



a) Coeficientes de correlación parcial en la variedad Salcedo INIA (V1), b) Coeficientes de correlación parcial en la variedad Pasankalla (V2), c) Coeficientes de correlación parcial en la variedad Negra Collana (V3), d) Coeficientes de correlación parcial en la variedad Kancolla (V4)

**Figura 17: Coeficientes de correlación parcial por variedad**

De las tabla 17 al 20, observando los análisis de correlación entre la humedad, ángulo de reposo, coeficiente de fricción estático y coeficiente de fricción dinámico, se determinó correlaciones significativas con un nivel de confianza del 95,0% en el siguiente orden: Para Salcedo INIA correlaciones entre ángulo de reposo (ARV1) y Coeficiente de Fricción Dinámico (CFDV1), entre ángulo de Reposo (ARV1) y humedad; para la variedad Pasankalla entre ángulo de Reposo (ARV2) y humedad, entre Coeficiente de Fricción Dinámico (CFDV2) y Coeficiente de Fricción Estático (CFEV2), entre Coeficiente de Fricción Dinámico (CFDV2) y humedad, y finalmente entre Coeficiente de Fricción Estático (CFEV2) y humedad; para la variedad Negra Collana entre Ángulo de Reposo (ARV3) y humedad, finalmente para la variedad Kancolla entre Ángulo de Reposo (ARV4) y Coeficiente de Fricción Estático (CFEV4), entre Coeficiente de Fricción Dinámico (CFDV4) y humedad; también entre Coeficiente de Fricción Estático (CFEV4) y humedad respectivamente.

## V. CONCLUSIONES

Del estudio se llega a las siguientes conclusiones:

1. El coeficiente de fricción estático y dinámico incrementa a medida que incrementa el contenido de humedad en los granos de quinua en sus cuatro variedades, presentando comportamientos independientes según la variedad.
2. El ángulo de reposo incrementa a medida que incrementa el contenido de humedad de los granos de quinua en sus cuatro variedades, presentando comportamientos independientes según la variedad.
3. Para los cálculos de diseño y construcción de equipos y sistemas de transporte de quinua, donde las humedades de proceso varían en función a la variedad de quinua en estudio, los valores adimensionales a considerar son: coeficiente de fricción estático 0,95; coeficiente de fricción dinámico 0,35 y  $28,63^\circ$  como ángulo de reposo
4. Las correlaciones entre humedad ángulo de reposo, coeficiente de fricción estático y coeficiente de fricción dinámico se dan independientemente según la variedad.

## VI. RECOMENDACIONES

Del estudio realizado y de las observaciones efectuadas, se recomienda lo siguiente:

1. Realizar determinaciones de propiedades físicas y mecánicas en las distintas variedades de granos de quinua tanto procesadas y sin procesar a fin de caracterizar y establecer valores propios y contribuir con el acervo documentario de la comunidad académica y científica.
2. Establecer un catálogo de las propiedades físicas y mecánicas de granos andinos y poner a disposición de los fabricantes de máquinas y equipos a fin de que estas puedan ser de utilidad al momento de la realización los cálculos de dimensionamiento de máquinas agroindustriales.
3. En futuras pruebas incrementar el número de observaciones a fin de determinar la correlación con más precisión y confiabilidad.



## VII. BIBLIOGRAFIA

ALTUNTAS, Ebubekir y YILDIZ, Mehmet. (2007). Effect of moisture content on some physical and mechanical Properties of faba bean (*Vicia faba* L.) grains. *Journal of Food Engineering* 2007; 78: 174–183.

ALVARADO, JUAN DE DIOS; AGUILERA, JOSÉ MIGUEL. (2001). Métodos para medir propiedades físicas en industrias de alimentos: tamaño y forma de partículas, Propiedades físicas de los alimentos en polvo, Zaragoza, España. P.p. 29-47, 135-147.

AMERICAN ASSOCIATION OF CEREAL CHEMISTS (1995). Approved methods of the AACC, 9th ed. AACC, St. Paul, MN. USA. 1268 p.

AMIN M.N., HOSSAIN, M.A., Roy K.C. (2004). Effects of moisture content on some physical properties of lentil seeds. *Journal of Food Engineering* 2004; 65: 83–87.

AMONTONS, G., (1699). On the resistance originating in machines, (in French), *Men. Acad. Roy.*, 206-222.

APAZA V., P. Delgado. (2005). Manejo y Mejoramiento de Quinoa Orgánica. Instituto nacional de Investigación y Extensión Agraria. INIA. Estación Experimental Agraria Illpa-Puno. pp 80-111. Puno-Perú.

ASLI-ARDEH, E.; ABBASPOUR-GILANDEH, Y., y SHOJAEI, S. (2010). Determination of Dynamic Friction Coefficient of Paddy Grains on Different Surfaces. *Int'l Agrophysics* 24:101-105.

BARGALE, Praven; IRUDAYARAJ, J. y Marquis B. (1995). Studies on reological behaviour of canola and wheat. *Journal Agriculture Engineering*. 61: 267-274.

BART-PLANGE, A. y BARYEH Y EDWARD A. (2003). The physical properties of Category B cocoa beans. *Journal of Food Engineering*; 60: 219-227.

CARDOZO, Armando y TAPIA, Mario (1979). La Quinoa y La Kañiwa Instituto Interamericano de ciencias agrícolas, Bogotá, Noviembre; p.149.

ÇARMAN K. (1966). "Some physical properties of lentil seeds". *Journal of Agricultural Engineering*. Re search. Vol 63, pp. 87-92.

CASTRO QUINTERO, G. (1996). Propiedades físicas de los productos vegetales, su sentido físico y aplicaciones Universidad Nacional de Colombia. Facultad de ciencias agropecuarias. Medellín: 103 p.

CHUNG, J. H. and VERMA, L. R. (1989). Determination of Friction Coefficients of Beans and Peanuts. *Transactions of ASAE* 32(2): 745 – 750.

COLLIN A. R. (2010). Estudio del Comportamiento de chorros granulares bajo rotación. Tesis para optar el grado de maestro en ingeniería de manufactura. Instituto Politecnico Nacional. Escuela Superior de Ingeniería Mecánica y Electrica. Unidad Azcapotzalco.

CORREA, P.C., O. RESENDE, R. MENEZES, C. Jarén y S. ARAZURI. (2008). Resistance of edible beans to compression. *Journal of Food Engineering* 86(2):172-177.

COSKUN, BULENT M.; YALCIN, Ibrahim y OZARSLAN, Cengiz. (2006). Physical properties of sweet corn seed (*Zea mays saccharata* Sturt.) *Journal of Food Engineering* 2006; 74: 523–528.

COULOMB, C- A. (1699). The theory of simple machines (in French) *Men. Math. Phys. Acad. Sci.*, 10, 161-331.

DOWSON, D. (1979). *History of Tribology*. Addison-Wesley Longman Ltd.

DURSON, I. y DURSON, E. (2005). Some Physical Properties of Caper Seed. *Biosystems Engineering* 2005; 92 (2):237–245.

DZIKI D., DAIRIUSZ. (2007). The crushing of wheat kernels and its consequence on the grinding process. *Powder Technology*. 2007:1–6.

GANDARILLAS H. (1982). *El cultivo de la quinua*. La Paz: Ministerio de Asuntos Campesinos y Agropecuarios, Instituto Boliviano de Tecnología Agropecuaria, Centro internacional de investigaciones para el desarrollo.

GARCÍA de la FIGAL, C., A. (2010). *Análisis de fricción suelo metal y plástico antifricción*, 21pp., Universidad Agraria de La Habana, Facultad de Mecanización, La Habana, (material digital).

GELDART D., ABDULLAH E.C., HASSANPOUR A., NWOKE L.C., WOUTERS I. (2006). Characterization of powder flowability using measurement of angle of repose, *China Particuology*, Volume 4, Issues 3-4. Pp. 104-107.

GHASEMI VARNAMKHASTI, M., MOBILI, H., JAFARI, A., RAFIEE, S., HEIDARY SOLTANABADI, M., & KHEIRALIPOUR, K. (2007). Some Engineering Properties of Paddy (var. *Sazandegi*). *International Journal of Agricultural and Biology*, 5: 763-766.

GÓMEZ BOTERO, M.A. (2005). *Caracterización de las propiedades tribológicas de los recubrimientos duros*. Memoria presentada para optar el grado de doctor. Universidad de Barcelona. Barcelona

GUPTA, R. K. y DAS, S. K. (1998). Friction Coefficient of Sunflower Seed and Kernel on Various Structural Surfaces. *Journal of Agricultural Engineering Research* 71: 175-180.

GUPTA, R.K. Y DAS, S.K. (2000). Fracture resistance of sunflower and kernel to compressive loading. *Journal food engineering*. 46:1-8.

HERLE, I. y GUDEHUS, G. (1999). Determination the parameters of a hypoplastic constitutive model from properties of grain assemblies. *Mechanics of cohesive-Frictional Materials*, 4:461–486.

HUNGR O., DAWSON R., KENT A., CAMPBELL D. & MORGENSTERN N.R. (2002). Rapid flow slides of coal mine waste in British Columbia, Canada. In: Evans S.G., De Graff J.V. (Eds.), *Catastrophic Landslides: Effects, Occurrence and Mechanisms*, 15. Geological Society of America, *Reviews in Engineering Geology*, 191–208.

- HUTTER K. & KOCH T. (1991). Motion of a granular avalanche in an exponentially curved chute: experiments and theoretical predictions. *Philosophical Transactions of the Royal Society* a 334: 93-138.
- INDECOPI (2009). Norma Técnica Peruana NTP 205.062:2009. Quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd.) requisitos. Primera edición. Lima, Perú, el instituto.
- INIA (Instituto Nacional de Investigación Agraria). (2008). Liberación de Nueva Variedad de Quinoa INIA-420 "NEGRA COLLANA. NOTA DE PRENSA 266-2008-INIA-PW.
- ISIK E. y UNAL H. (2007). Moisture- dependent physical properties of white speckled red kidney beans grains. *Journal of Food Engineering*. 82 (2) : 209- 216.
- KALMAN H.; GODER D.; RIVKIN M. AND BEN-DOR G. (1993). The effect of the particle-surface friction coefficient on the angle of repose. *Bulk Solids Handling*, 13:123 – 128.
- KARABABA, ERSAN. (2006). Physical properties of popcorn kernels. *Journal of Food Engineering* 72:100–107.
- KOZIOL M.J. (1992). Chemical composition and nutritional evaluation of quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd). *J. Food Compos. Anal.*, 5, 35-68.
- LASKOWSKI, JANUSZ Y LYSIK GRZEGORZ. (1999). Use of compression behavior of legume seeds in view of impact grinding prediction. *Powder Technology*; 105: 83–88.
- METCALF J.R. (1965). Angle of repose and internal friction. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Science*, 3: 155-161.
- MOHSENIN N.N. (1978). *Physical Properties of Plant and Animal Materials*. Gordon and Breach Science Publisher, New York-London-Paris.
- MOHSENIN, N. (1970). *physical properties of plant and animal materials*. New York: Gordon and Breach Science Publisher, p.587-593.
- MOHSENIN, N. (1986). *Physical properties of food and agricultural materials, a teaching manual*. Gordon and Breach Science Publishers, New York. 147 p.
- MORIN, A., (1833). New Friction experiments carried out at Metz in 1831-1833, (in French), *Men. Acad. Sci.*, 4, 1-128, 591-696.
- MUJICA, A., JACOBSEN, S., IZQUIERDO, J., MARATHEE, J. P. (2001). Quinoa: ancestral cultivo andino, alimento del presente y del futuro. FAO. Chile.
- MUJICA, A., ORTÍZ ROMERO, R., BONIFACIO, A., SARAVIA, R., CORREDOR, G., ROMERO, A., & JACOBSEN, S-E. (2007). Agroindustria de la Quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd.) en los Países Andinos: Proyecto Quinoa: Cultivo Multipropósito para los Países Andinos. INT/01/K01 Peru - Bolivia - Colombia. Puno, Perú: Editorial Altiplano E.I.R.L.
- MUÑOZ GÓMEZ, FRANCISCO, GAYTÁN RUELAS, J. G., LUGO ARREDONDO, M., MARTÍNEZ ROMERO, J., FLORES J., E. (2005). Fabricación de una máquina para reventar granos de Amaranto. *Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias*, vol. 14, núm. 4, 2005, pp. 1-8,

Universidad Agraria de La Habana Fructuoso Rodríguez Pérez Cuba, revisado en <http://www.redalyc.org/pdf/932/93214401.pdf>.

MUÑOZ GÓMEZ, FRANCISCO, GAYTÁN RUELAS, J. G., LUGO ARREDONDO, M., MARTÍNEZ ROMERO, J., FLORES J., E. (2005). Fabricación de una máquina para reventar granos de Amaranto. *Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias*, vol. 14, núm. 4, 2005, pp. 1-8, Universidad Agraria de La Habana Fructuoso Rodríguez Pérez Cuba, revisado en <http://www.redalyc.org/pdf/932/93214401.pdf>.

MURTHY, C. T. Y SUVENDU B. (1998). Moisture Dependant Physical and Uniaxial Compression Properties of Black Pepper. *Journal of Food Engineering* 7:193-205.

NATIONAL RESEARCH COUNCIL. (1989). Recommended dietary allowances, 10th ed. National Academy Press, Washington, DC. USA.

NORMA TÉCNICA PERUANA 205.002. (1979). Determinación del contenido de humedad, método usual. Lima: INDECOPI.

NWAKONOBI TU, ONWUALU AP (2009). Effect of moisture content and types of structural surfaces on coefficient of friction of two Nigerian food grains: Sorghum (*Sorghum bicolor*) and Millet (*Pennisetum glaucum*) *Agricultural Eng Int*, 11:pp Manuscript 1152., <http://www.cigrjournal.org/index.php/Ejournal/arti>, Accessed 20 July 2010

OGUT, H. (1998). Some Physical Properties of White Lupin. *Journal Agricultural engineering* 69: 273-277.

OSPINA MACHADO, JULIO E. (2001). Características físico mecánicas y análisis de calidad de granos. Universidad Nacional de Colombia. Facultad de Ciencias Agrícolas. Departamento de Ingeniería Agrícola Bogotá: 2001; P. 225.

PILPEL, N. (1966). "The flow of powders and granular solids". H 7. pp. 699-702.

PUDASAINI S.P. & HUTTER K. (2007). *Avalanche dynamics*. Springer Verlag Berlin Heidelberg.

RABINOWICZ E. (1995). "Friction and Wear of materials", editorial John Wiley and Sons, ISBN 0-471-83084-4.

REZA SEIFI, MOHAMMAD. (2010). *Moisture-Dependent Physical Properties of Sunflower Seed*. Published by Canadian Center of Science and Education 135.

RICKENMANN D. (2005). Runout prediction methods. In: Jakob M. & Hungr O. (eds), *Debris-Flow Hazards and Related Phenomena*, 263-282. Praxis-Spring Heidelberg.

RUIZ, ALTISENT. (2000). Propiedades físicas de productos agrícolas. Documento fotocopia: pp. 2

SCHLICK G. & BUBENHEIM D.L. (1996). Quinoa: candidate crop for NASA's controlled ecological life support systems. In: Janick J., ed. *Progress in New Crops*. Alexandria, USA: ASHS Press, 632-640.

- SHARMA SHRI K; MULVANEY, STEVENJ Y RIZVI, SYED S.H. (2003). Ingeniería de alimentos. México: Limusa: 20-44.
- SHIGLEY, J. E. (1990). Diseño en Ingeniería Mecánica, McGraw-Hill Interamericana de México, S.A. de C.V. Inc., México.
- SINGH, K. K. AND GOSWAMI, T. K. (1996). Physical Properties of Cumin Seed. Journal of Agricultural Engineering Research 64: 93 – 98.
- SOLAQUE G., D. P. (2008). Comparación del ángulo de fricción crítico con el ángulo de reposo. Análisis de la influencia de algunos factores en la determinación del ángulo de reposo. UNIVERSIDAD DE LOS ANDES. Grupo de Investigación en Geotecnia. Facultad de Ingeniería. Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental. Bogota D.C.
- SOTO SCHMIDT, P. (2010). Desarrollo de una bebida instantánea en base a semilla de quínoa (*Chenopodium quinoa* Willd.) y su caracterización fisicoquímica y nutricional. Disponible en <http://www.tesis.uchile.cl/handle/2250/111627>, revisado el 22 noviembre del 2014.
- STROSHINE, R. (1998). Physical Properties of Agricultural Materials and food products. Course Manual, Purdue University, West Lafayette.
- TAYLOR, DONALD W. (1962). Principios fundamentales de mecánica de suelos.
- TRAIN, D. 1958. Some aspects of the property of angle of repose of powders. pages 127 – 135.
- VILCHE, C.; M. GELY Y E. SANTALLA. (2003). Physical Properties of Quinoa Seeds. Biosystems Engineering 86 (1): 59-65. Disponible en [http://www.bvcooperacion.pe/biblioteca/bitstream/123456789/835/12/BVCI0000138\\_2.pdf](http://www.bvcooperacion.pe/biblioteca/bitstream/123456789/835/12/BVCI0000138_2.pdf), revisado el 22 noviembre del 2014.



# ANEXOS

ANEXO 1. Análisis de Varianza para el coeficiente de fricción estático

F DE V	GL	S.C	C.M	F <sub>Cal</sub>	Pr>F
Model	11	0,0129	0,0012	20,84	<,0001
Variedad	3	0,0042	0,0014	24,71	<,0001
Humedad	2	0,0068	0,0034	60,22	<,0001
Variedad*Humedad	6	0,0019	0,0003	5,77	<,0001
Error	108	0,0061	0,0001		
Total	119	0,0189			

R-Cuadrado                      Coeff Var                      CFE Promedio  
0,679730                      0,785055                      0,955728

ANEXO 2. Análisis de Varianza para la Interacción Variedad \* Humedad sobre el coeficiente de fricción estático

F DE V	GL	S.C	C.M	F <sub>Cal</sub>	Pr>F
Variedad en 12%	3	0,00003477	0,00001159	0,07	0,9738
Variedad en 16%	3	0,00192674	0,00064225	141,40	<,0001
Variedad en 20%	3	0,00416198	0,00138733	209,30	<,0001
Humedad en V1*	2	0,00417969	0,00208984	79,61	<,0001
Humedad en V2*	2	0,00145805	0,00072903	28,11	<,0001
Humedad en V3*	2	0,00013262	0,00006631	0,40	0,6738
Humedad en V4*	2	0,00296004	0,00148002	197,23	<,0001
Error	108	0,00607985	0,00005629		

(\*) V1: Salcedo INIA; V2: Pasankalla; V3: Negra Collana; V4: Kancolla

ANEXO 3. Medias por mínimos cuadrados para coeficiente de fricción estático con intervalos de confianza del 95,0%

Variedad	Humedad (%)	N	Coeficiente de fricción estático	
			Mean	Std Dev
Salcedo INIA	12	10	0,96637800	0,00825483
Salcedo INIA	16	10	0,94334600	0,00124709
Salcedo INIA	20	10	0,93972600	0,00300868
Pasankalla	12	10	0,96691500	0,00821553
Pasankalla	16	10	0,95185700	0,00233857
Pasankalla	20	10	0,95241100	0,00220121
Negra Collana	12	10	0,96719200	0,02220902
Negra Collana	16	10	0,96207300	0,00162914
Negra Collana	20	10	0,96512300	0,00075741
Kancolla	12	10	0,96478400	0,00140713
Kancolla	16	10	0,94768700	0,00291373
Kancolla	20	10	0,94124300	0,00347020

ANEXO 4. Análisis de varianza para el coeficiente de fricción dinámico

F DE V	GL	S.C	C.M	FCal	Pr>F
Model	11	0,785	0,071	60,59	<,0001
Variedad	3	0,280	0,093	79,39	<,0001
Humedad	2	0,291	0,146	123,78	<,0001
Variedad*Humedad	6	0,213	0,035	30,13	<,0001
Error	108	0,127	0,001		
Total	119	0,912			

R-Cuadrado  
0,860557

Coeff Var  
9,655451

CFD Promedio  
0,355366

ANEXO 5. Análisis de varianza para la interacción variedad\*humedad sobre el coeficiente de fricción dinámico

F DE V	GL	S.C	C.M	FCal	Pr>F
Variedad en Humedad 12%	3	0,017	0,005	4,66	0,0075
Variedad en Humedad 16%	3	0,203	0,067	49,62	<,0001
Variedad en Humedad 20%	3	0,272	0,091	101,26	<,0001
Humedad en V1*	2	0,212	0,106	74,98	<,0001
Humedad en V2*	2	0,037	0,019	19,14	<,0001
Humedad en V3*	2	0,005	0,003	4,75	0,0171
Humedad en V4*	2	0,248	0,124	73,44	<,0001
Error	108	0,127	0,001		

(\*) V1: Salcedo INIA; V2: Pasancalla; V3: Negra Collana; V4: Kancolla

ANEXO 6. Medias por mínimos cuadrados para coeficiente de fricción dinámico con intervalos de confianza del 95,0%

Variedad	Humedad (%)	N	Coeficiente de fricción dinámico	
			Mean	Std Dev
Salcedo INIA	12	10	0,27206200	0,04104167
Salcedo INIA	16	10	0,45808400	0,04354779
Salcedo INIA	20	10	0,44155600	0,02569941
Pasankalla	12	10	0,31804100	0,02495140
Pasankalla	16	10	0,29873200	0,04357527
Pasankalla	20	10	0,38158000	0,02059311
Negra Collana	12	10	0,27612800	0,02438092
Negra Collana	16	10	0,27966000	0,01627750
Negra Collana	20	10	0,30744800	0,03161379
Kancolla	12	10	0,31404700	0,04667482
Kancolla	16	10	0,38448000	0,03748225
Kancolla	20	10	0,53257100	0,03871536

ANEXO 7. Análisis de varianza para el ángulo de reposo

F DE V	GL	S.C	C.M	FCal	Pr>F
Model	11	2982,376	271,125	166,490	<,0001
Variedad	3	96,444	32,148	19,740	<,0001
Humedad	2	2723,039	1361,519	836,080	<,0001
Variedad*Humedad	6	162,893	27,148	16,670	<,0001
Error	108	175,873	1,628		
Total	119	3158,251			

R-Cuadrado 0,944313      Coeff Var 4,456674      REPOSO Promedio 28,63372

ANEXO 8. Análisis de varianza para la interacción variedad\*humedad sobre el ángulo de reposo

F DE V	GL	S.C	C.M	FCal	Pr>F
Variedad en Humedad 12%	3	150,869	50,289	13,19	<,0001
Variedad en Humedad 16%	3	61,083	20,361	41,96	<,0001
Variedad en Humedad 20%	3	47,384	15,794	26,84	<,0001
Humedad en V1*	2	813,823	406,912	140,91	<,0001
Humedad en V2*	2	282,781	141,390	105,85	<,0001
Humedad en V3*	2	973,048	486,524	903,46	<,0001
Humedad en V4*	2	816,279	408,139	232,98	<,0001
Error	108	175,873	1,628		

(\*) V1: Salcedo INIA; V2: Pasankalla; V3: Negra Collana; V4: Kancolla

ANEXO 9. Medias por mínimos cuadrados para el ángulo de reposo con intervalos de confianza del 95,0%

Variedad	Humedad (%)	N	Angulo de reposo	
			Mean	Std Dev
Salcedo INIA	12	10	22,6590000	2,61829277
Salcedo INIA	16	10	32,1816800	0,83786113
Salcedo INIA	20	10	34,7730600	1,05162106
Pasankalla	12	10	24,7205470	1,68645493
Pasankalla	16	10	28,7502320	0,87759367
Pasankalla	20	10	32,2343330	0,62684618
Negra Collana	12	10	19,3440260	1,10651066
Negra Collana	16	10	30,5301680	0,34324224
Negra Collana	20	10	32,1558210	0,52282607
Kancolla	12	10	21,5373030	2,07913508
Kancolla	16	10	31,0266660	0,59254725
Kancolla	20	10	33,6918360	0,76254756