

ARTICULOS ORIGINALES

INGENIERÍA QUÍMICA Y METALURGIA

PRODUCCIÓN SOSTENIBLE DE PROTEÍNAS DE DESCARTE DE GRANOS DE QUINUA (*Chenopodium quinoa Willd*) POR FRACCIONAMIENTO SECO

Cipriano Mendoza Rojas, Alejandro Tineo Morote¹

Unidad de Investigación e Innovación de Ingeniería Química y Metalurgia

Programa: Procesos industriales - Área: Operaciones y procesos químicos

E-mail: cmendozar71@hotmail.com

RESUMEN

La quinua presenta propiedades nutricionales notables debido a su contenido de proteínas, que le dan un gran potencial para aplicaciones alimentarias. Este trabajo tuvo como objetivo explorar la tecnología de fraccionamiento por vía seca para obtener fracciones ricas en proteínas de la quinua de una manera más suave y sostenible en comparación con el fraccionamiento húmedo convencional. El fraccionamiento en seco de la quinua implicó la molienda y posterior clasificación del aire, generando una fracción embrionaria enriquecida en proteínas. La molienda se realizó a una sola velocidad de rotación. La harina obtenida se clasificó con aire en un clasificador prototipo construido con una velocidad de rotor constante de 3500 rpm, de donde se obtiene harina fina rica en proteína y harina gruesa pobre en proteína. Del análisis del resultado con un contenido típico de proteína del 14% de alimentación, se obtuvieron fracciones enriquecidas en proteínas de hasta el 27.57% y fracciones reducidas en proteínas hasta el 5.85%, lo que demuestra que es posible lograr enriquecer el contenido de proteínas para incorporar en la dieta alimenticia. Este valor mostrado se puede incrementar mejorando el diseño del prototipo propuesto.

Palabras clave: Proteína de quinua, fraccionamiento en seco. Rendimiento de proteína.

SUSTAINABLE PRODUCTION OF DISCARD PROTEINS FROM QUINOA GRAINS (*Chenopodium quinoa Willd*) BY DRY FRACTION

ABSTRACT

Quinoa has remarkable nutritional properties due to its protein content, which gives it great potential for food applications. The objective of this work was to explore dry fractionation technology to obtain quinoa protein-rich fractions in a milder and more sustainable way compared to conventional wet fractionation. Dry fractionation of quinoa involved grinding and subsequent air classification, generating an embryonic division enriched with proteins. Grinding was performed at a single rotational speed. The flour obtained is classified with air in a classifier built with a constant rotor speed of 3500 rpm, from which fine flour rich in protein and coarse flour poor in protein are obtained. From the analysis of the result with a typical protein content of 14% of the feed, protein-enriched fractions of up to 27.57% and reduced protein fractions of up to 5.85% are obtained, demonstrating that it is possible to enrich the protein content for incorporation in the food diet. This demonstrated value can be improved by improving the proposed prototype design.

.Keywords: Quinoa protein, dry fractionation, protein yield.

INTRODUCCIÓN

Actualmente a nivel mundial hay mucha preocupación por el crecimiento de población que va requerir mucha proteína de origen animal y que en el tiempo no va ser sostenible para satisfacer la gran demanda de la alimentación por parte de la población (García, 2018), por tanto, existe una necesidad de encontrar otras alternativas, pero de origen vegetal que puede aportar proteínas con los aminoácidos esenciales, dentro de esta categoría los granos de quinua dada por su alto nivel nutricional, fuente de proteínas, fibra, grasas poliinsaturadas y minerales (calcio, hierro, fósforo o potasio), elevados en comparación con los de otros granos de consumo más habitual, es una esperanza para la alimentación del mundo, donde cada vez más la superpoblación y el consumo de recursos

¹Colaborador

naturales hacen necesarias nuevas salidas más sostenibles (Abogoch, 2006, Guzmán 2014). En la actualidad existe muchos estudios referentes a la obtención de proteínas a partir de granos de quinua empleando el método convencional (Brinegar and Goundan 1993; Brinegar et al.1996; Chauhan et al. 1999; Aluko and Monu 2003; Lindeboom 2005; Abogoch et al. 2008; Valenzuela et al. 2013; Barrial, A., 2014; Föste et al. 2015).

La implementación de nuevas tecnologías más sostenibles, con reducción de agua y energía (Schutyser, M. A, Van der Goot, A. J., 2011), en la producción de proteínas por vía seca a partir de los granos de quinua considerados como descarte, se ve limitado por diferentes factores como la poca información bibliográfica, carencia de investigación sobre equipos separadores de proteína en nuestra región y la no disponibilidad de equipos adecuados en el mercado nacional, todo estos factores restringen en el aparato productivo del sector empresarial exportadora de quinua, limitando solo a la comercialización de la quinua como materia prima semiprocesada limpia y seleccionada sin ninguna valor agregado, por falta de tecnología y equipos requeridas, por otro lado los descartes producidos durante el procesamiento de la quinua no se aprovechan adecuadamente y constituyen un desecho sin valor agregado, y representa como una pérdida de 3 % del volumen de procesamiento, causando así mismo problemas de disposición.

Para los alimentos con proteínas, una alta calidad se refiere a un alto valor nutricional, pero también incluye otros aspectos como: atractivo, sabroso y seguro de consumir. La calidad de los alimentos es un factor importante que está influenciado por el procesamiento. Se han investigado nuevas tecnologías de procesamiento para mejorar la calidad de los alimentos en comparación con las técnicas tradicionales (Guzmán, 2004). Algunos ejemplos son el procesamiento a alta presión, campos eléctricos pulsados, radiofrecuencia y plasma frío. Antes de poder aplicar una nueva tecnología de procesamiento en la producción de alimentos, la pregunta principal que debe responderse es: ¿pueden las nuevas tecnologías de procesamiento mejorar la calidad de los alimentos con proteínas?

De acuerdo a la revisión bibliográfica, existe otra alternativa tecnológica de **fraccionamiento en seco** en pleno desarrollo para la obtención de proteínas de quinua, siendo este método más suave y más sostenible para la producción de concentrados de proteínas de cereales (trigo, cebada, etc.) y leguminosas (guisantes, lupinos, garbanzos, etc.), aunque en general, los valores obtenidos en cuanto a proteínas no son tan altos (Wu and Stringfellow 1992; Pelgrom, et al.2013a, 2015a y 2025b). **Una gran ventaja de esta técnica es que las propiedades** funcionales nativas de las proteínas se conservan (Pelgrom et al. 2015a). **El fraccionamiento en seco implica la molienda fina** de las semillas para liberar las partículas ricas en proteínas y la posterior separación en seco de harina en fracciones de diferentes tamaños de partículas utilizando clasificadores de aire aprovechando su densidad del polvo. La **disociación de componentes de semilla es crítica** para permitir la separación y es dependiente de la estructura de la semilla y las condiciones de molienda

Con relación a las proteínas de semilla de quinua se pueden aislar mediante extracción alcalina seguida de precipitación ácida, llamado vía húmeda, y existe varios trabajos de investigación a nivel regional nacional e internacional, sin embargo, hay mucha menos experiencia con la preparación de concentrados y aislados de proteína de quinua que con la preparación de tales productos, por ejemplo, Soja, lupino y guisante. Por lo tanto, existe aún la necesidad de determinar las condiciones de procesamiento óptimas para la producción a gran escala de productos de proteína de quinua de manera sostenible, es así la otra alternativa planteada para la obtención de la proteína es **la vía seca**, incorporando la molienda y clasificador de aire para separar la proteína en base a su densidad, esta técnica de separación es la más adecuada y sostenible reduciendo el consumo de agua, reactivo y energía. Para aplicar este método de fraccionamiento, es necesario entender la estructura del grano y su comportamiento para diferentes condiciones de procesamiento de una manera eficiente. En el trabajo desarrollado por **Scalin y Lewis, (2017)**, presenta un análisis completa de la estructura y composición de la quinua.

Así, Las semillas de la quinua tienen forma de disco, con un diámetro de 1 a 3 mm. Las principales partes anatómicas son el pericarpio (la cubierta de la semilla), el embrión y el perispermo El embrión que rodea el perispermo es parte de la fracción de salvado (cascara) de la semilla y es rico en proteínas, lípidos, cenizas, fibra y saponina. Se encontró que la fracción de salvado (pericarpio, cubierta de semilla y embrión) representa el 48 % del peso de la semilla y contiene 16 % de proteína, 8 % de fibra 7 % aceite, 6 % de azúcar y 3 % ceniza en base seca (db). Por el contrario, el perispermo representa el 52% del peso de la semilla y contiene 60 % de almidón (db). La proporción de salvado rico en proteínas y perispermo rico en almidón es más alta que los granos de cereales verdaderos. A nivel local existen estudios de la determinación de las características de la quinua de variedades quinua blanca, roja, amarilla y negra, siendo la composición de la saponina. A nivel local existen estudios de la determinación de las características de la quinua de variedades quinua blanca, roja, amarilla y negra (Anaya et al, 2019), Los valores obtenidos para las cuatro variedades, el contenido de las proteínas varía para quinua blanca (14,13-15,17%), amarilla (13,17-14,30 %), rojo (12,70 -12,90 %) y la negra (11,66,11,96 %)

Actualmente el interés mundial en la quinua ha crecido rápidamente debido a su calidad proteica, versatilidad culinaria, estado libre de gluten, lo que motiva desarrollar nuevos recursos proteicos basados en plantas empleando nueva alternativa tecnológica de fraccionamiento por vía seca a partir de fuentes alternativas y los cultivos ricos en proteínas como la quinua. Para cumplir este objetivo fue necesario desarrollar un prototipo experimental para obtener proteína a partir del descarte de los granos de quinua de manera sostenible, con la finalidad de evaluar los parámetros operacionales a través de análisis granulométrico, densidad de la harina, velocidad de rotación del rodete de clasificador de aire

Los resultados presentados en este trabajo representan evaluaciones preliminares con el prototipo propuesto y requiere continuar con más estudios de investigación para mejorar el diseño del equipo y las condiciones de operación.

MATERIALES Y MÉTODOS

Materia prima. La materia prima como grano de quinua blanca fue proporcionada por la Empresa Wiracocha SAC Ayacucho. Esta materia prima es quinua partida considerada como sub-producto del procesamiento de la limpieza de la quinua para la exportación.

Equipo: Molienda y clasificación

Molienda de los granos. Esta operación se realizó a escala de laboratorio empleando un molinillo de granos Yae Tek (Fig. 1a), con las siguientes características:

- Voltaje: 110 V.
- Velocidad del motor: 36000 r/min.
- Capacidad: 17.64 oz.
- Potencia: 2500 W.
- Material: acero inoxidable, material de buena calidad que hace que la máquina sea duradera.

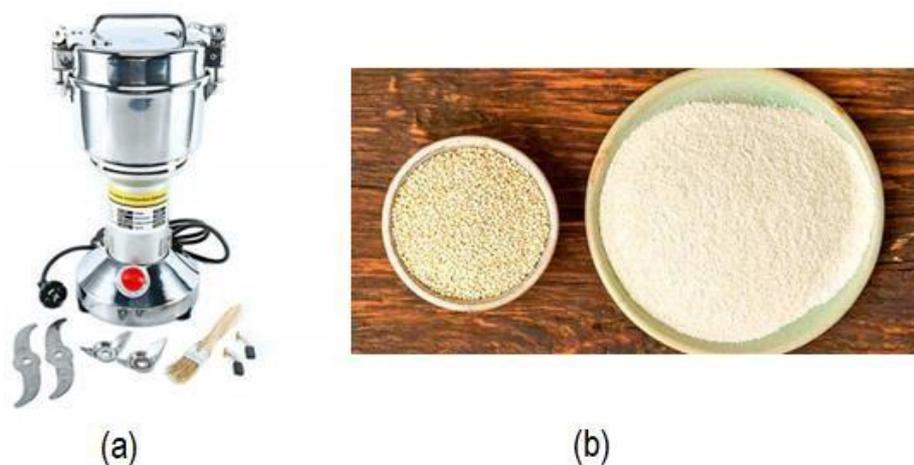


Figura 1. (a) Molinillo de granos, (b) harina de quinua blanca.

A nivel industrial existe varios tipos de maquinarias sea de fabricación nacional o de procedencia China con son: molinos pulverizadores de martillo y turbo pines. Resultado de la molienda se obtiene harina de quinua, tal como se muestra en la siguiente Figura 1 b.

Clasificadores del aire

A través de este equipo se realiza la clasificación de la harina de quinua en fracciones de diferentes tamaños de partículas, y por lo general la fracción más fina generalmente tiene mayor contenido de proteína que la harina inicial. Como no se cuenta con este equipo experimental fue necesario adaptar un equipo que puede cumplir la función semejante a un equipo importado. El fabricante de este tipo de equipos es la empresa alemana Hosokawa 100-AFG Multimill, Augsburg, que ofrece equipos incorporados de molienda (pulverizador) y clasificador de aire. Para el presente trabajo no se cuenta con este equipo y fue necesario desarrollar un equipo individual de prototipo clasificador de aire, la que fue construido en el taller mecánico Holger K. Hansen- UNSCH, con los materiales y

equipos disponibles. El equipo construido tipo clasificador horizontal tiene los siguientes componentes básicos como son: un motor monofásico de 1 hp de 3500 rpm, un tanque de plástico de 20 litros, un rotor horizontal de acero inoxidable con venas rectas horizontales, tubo de plástico de 2 pulgadas de diámetro para la alimentación y descarga de los polvos. Este equipo es una adaptación que presenta ciertas deficiencias en cuanto a su construcción por el limitado disponibilidad de los materiales en Ayacucho, pero cumple su función como clasificador de polvo.

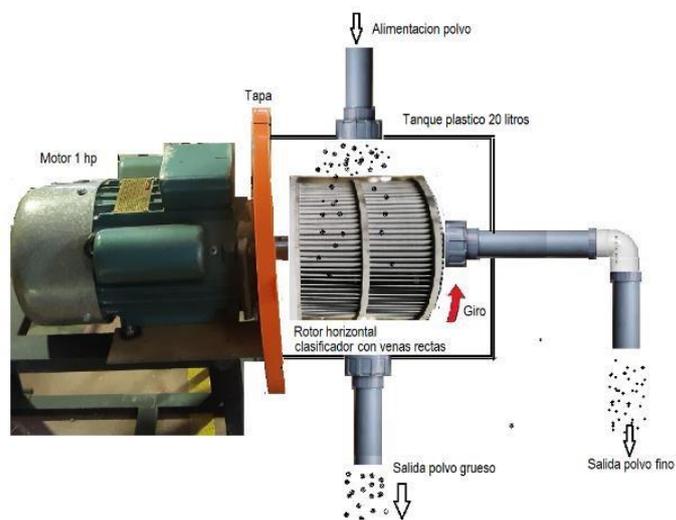


Figura 2. Clasificador de aire

Metodología

La metodología del trabajo se realizó en base al siguiente esquema Figura 3 y 4

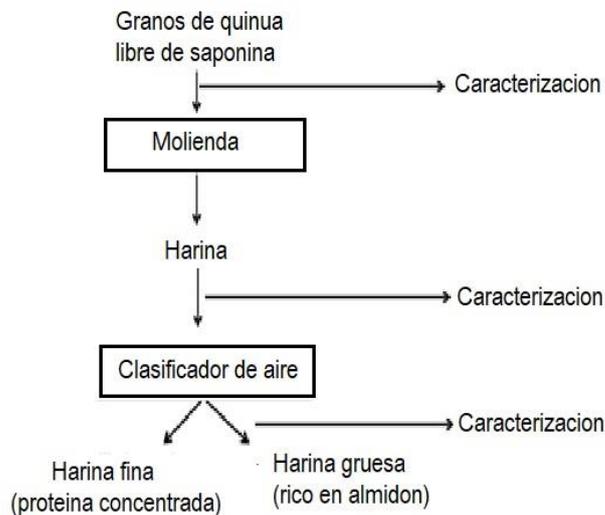


Figura 3. Esquema del proceso de fraccionamiento por vía seca

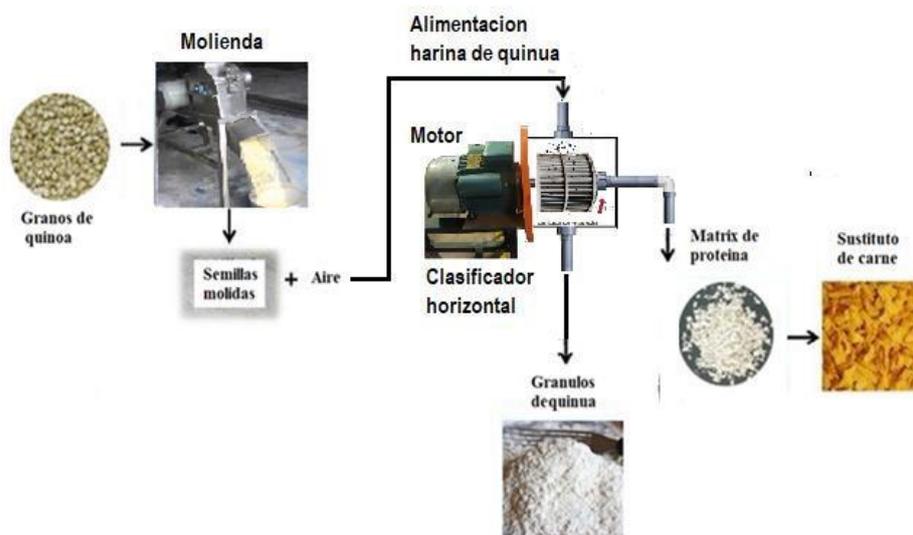


Figura 4. Esquema del proceso de obtención de proteína por fraccionamiento vía seca.

Caracterización física de los granos de la quinua

Análisis granulométrico empleando un tamiza estándar

Este método consiste en tomar una determinada masa de una muestra cuarteada, cuyos resultados se presentan a continuación:

Masa de quinua = 500 gramos,

Vibración grado 5

Tiempo de vibración 10 minutos.

Las mediciones experimentales se presentan en la siguiente Tabla 1.

Tabla 1. Análisis granulométrico de 500 gramos de quinua seca.

Abertura de malla	peso tamiz	tamiz + quinua	quinua retenida
(mm)	(g)	(g)	(g)
2.5	244	251.8	7.8
2	438.2	443.8	5.6
1.5	216	694	478
1	452.5	459.6	7.1
0	333.1	334.6	1.5
			500

Propiedades gravimétricas

Se determinó las propiedades gravimétricas relacionados a densidad aparente, densidad real y porosidad, empleando las siguientes ecuaciones:

Densidad aparente (ρ_a): definida como la relación entre una masa de granos y el volumen total ocupado por los mismos, determino empleando una balanza analítica y una probeta graduada de 250 ml. Se tiene los siguientes resultados experimentales:

Masa de granos de quinua (m_p) = 76,6 g

Volumen enrasado de granos de quinua (V_a) = 199 ml

La ecuación para calcular la densidad aparente es el siguiente:

$$\rho_a = \frac{m^p}{V_a} \quad (1)$$

La densidad real (ρ_{real}), definida como la relación de la masa de una muestra a su volumen real, se determinó por método picnómetro de volumen conocido (25 ml) pesando una determinado granos de quinua en un líquido orgánico tolueno a la temperatura de 20 °C. Los resultados experimentales son:

$$\rho_{real} = \left[\frac{(W_{ps} - W_p)}{(W_{pl} - W_p) - (W_{pls} - W_{ps})} \right] \rho_l \quad (2)$$

Dónde: W_{ps} = masa de picnómetro con la muestra
 W_p = masa de picnómetro vacío.
 W_{pl} = masa del picnómetro con el liquido
 W_{pls} = masa del picnómetro con la muestra y el liquido
 ρ_l = densidad del liquido

La porosidad (ϵ), definida como la fracción de huecos en el lecho de granos, se calculó mediante la Ec. (3) a partir de las densidades real y aparente

$$\epsilon_o = \left(1 - \frac{\rho_a}{\rho_{real}} \right) \times 100 \quad (3)$$

Molienda de los granos de quinua

Los granos de quinua fueron molidos en un molinillo de granos tipo batch. Materia prima procesada fue de 2 kilos tipo batch. Esta molienda se realizó con la finalidad de liberar las proteínas localizadas en el embrión de la quinua, una molienda muy fina permitirá la liberación de almidón que está localizada en el perisperma de los granos de la quinua, tal como se ilustra en el esquema morfológico de la quinua (Figura 5).

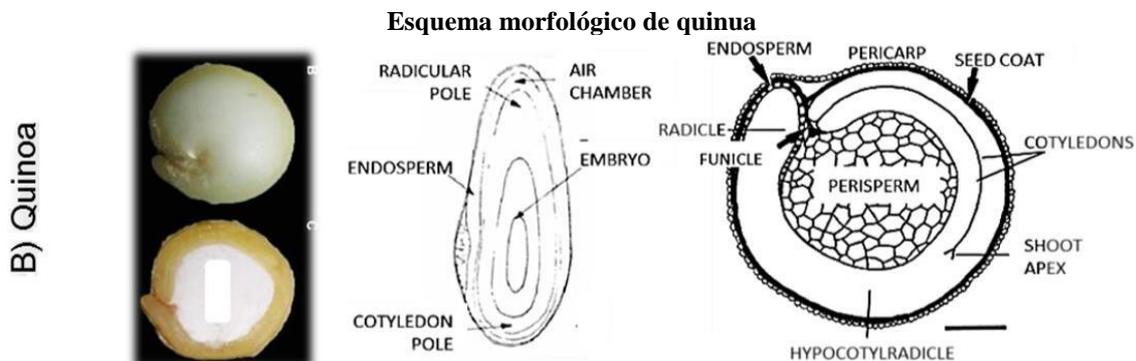


Figura 5. Esquema morfológico de la quinua.

Preparación de la harina y Clasificación con aire

Características físicas de la materia prima

a) **Determinación del contenido de humedad- Método infrared.** Contenido de humedad de la harina. Este parámetro se ha determinado en triplicado el contenido de la humedad, cuyos resultados se muestra en la siguiente tabla:

Tabla 2. Contenido de humedad de la harina de quinua base húmeda.

Muestra	Peso (g)	% Humedad base húmeda
No 1	3,219	10,55
No 2	3,321	9,53
No 3	3,323	9,58

De los resultados se observa que el contenido de la húmeda del polvo de harina de quinua se encuentra por debajo de 11 % base húmeda, con lo cual cumple la normatividad del mercado de polvo.

b). **Determinación de la densidad aparente (o global) y real de la harina.** Densidad aparente (ρ_b) o global se determinó según la relación masa/volumen en probeta de 50 ml y con balanza electrónica con precisión 0,1 g. Se realizó dos mediciones.

Tabla 3. Parámetro físico densidad aparente polvo de harina de quinua.

Muestra	Volumen (ml)	Peso (g)	Densidad global (kg/m ³)
No 1	50	23,10	462,0
No 2	50	21,80	436,0

La densidad real (ρ_r) se midió por psicometría, utilizando benceno como solvente y balanza electrónica con precisión 0,1 g. La densidad del benceno es 876 kg/m³.

Tabla 4. Parámetro físico densidad real de la harina de quinua.

Muestra	Volumen desalojado (ml)	Peso (g)	Densidad real (kg/m ³)
No 1	1,6057	2,53660	1 579
No 2	1,4586	1,4586	1 395

c). **Determinación de la porosidad del polvo de harina de quinua:** La siguiente tabla muestra la porosidad del polvo de harina de quinua, en base a la densidad real y densidad global de partícula. Los resultados se muestran en la siguiente tabla.

Tabla 5. Parámetro físico porosidad de la harina de quinua sin aglomerar.

Muestra	Densidad real (kg/m ³)	Densidad global (kg/m ³)	Porosidad ((-))
No 1	1 579	462,0	0.7074
No 2	1 395	436,0	0,6874

d). **Determinación del tamaño medio de la harina de quinua- Método análisis granulométrico.**

Se empleó el Ro-Tap de laboratorio para el cual se pesó una muestra de 100 gramos y se realizó la operación de tamizado por un periodo de 10 minutos. Los resultados se muestran en la Tablas 6. De los resultados del análisis se determinó el tamaño medio de los granos de la quinua.

Tabla 6. Análisis granulométrico de polvo de harina de quinua blanca.

Tamaño malla (mm)	Tamaño Malla (micrones)	Peso retenido (g)	% Material retenido	% Material acumulado	% de material que pasa la malla
2,0	2 000	-			
1,6	1 600	-			
1,0	1 000	-			
0,8	800	0,50	0,99	0,99	99,01
0,63	630	0,10	0,19	1,18	98,82
0,55	550	0,10	0,19	1,37	98,63
0,25	250	5,50	10,93	12,30	87,70
0,106	106	40,0	79,52	91,82	8,18
Fondo		4,1	8,15	99,97	0,03
Σ		50,3	99,98		

e) Determinación de contenido de proteína de la harina

En la siguiente tabla muestra el contenido de la proteína según la distribución granulométrica.

Tabla 7. Contenido de proteína de acuerdo a la distribución granulométrica.

Malla	Diámetro (mm)	Diámetro (micrones)	% de proteína variedad quinua blanca
10	2,0	2000	0,00
40	0,42	420	22,94
60	0,25	250	26,21
80	0,177	177	14,79
200	0,074	74	15,28
>200 (tapa ciega)	0,000	0,00	19,81

Clasificación del aire

El objetivo de la clasificación del aire es encontrar la mejor velocidad del rodete para obtener el contenido de proteína más alto posible en los materiales finos de la harina de la quinua. Este objetivo no se cumplirá con el presente trabajo de investigación puesto que el equipo tiene limitada en su operación en cuando a la regulación de la velocidad por carecer de un equipo de variador de velocidad que no se dispone, por lo que para el presente estudio se realiza a una velocidad fija de revolución de 3500 rpm, obteniendo dos productos del clasificador de aire como es la fracción fina y gruesa. Las fracciones finas y gruesas de cada recipiente se pesan y se analiza para determinar el contenido de proteína

Determinación de contenido de proteína. El contenido de proteína de las harinas se calculó en base al contenido de nitrógeno determinado de acuerdo con el método de combustión Dumas (AOAC International, 2005) utilizando un analizador de nitrógeno FP 528 (Leco Corporation, St. Joseph, MI, EE. UU.). La ecuación para determinar el contenido de proteína viene dada por la siguiente expresión.

Tabla 8.

Material	Yield (%)	Protein yield (%)	Protein purity (w/dw%)	Starch purity (w/dw%)	$D_{0.5}$ (μm)
Whole flour	100.0	100.0	14.5±0.6	53.7	996.1±18.5
Coarse fraction	48.3±1.8	17.1	6.6±3.6	70.6	1035.3±10.5
Fine fraction	50.4±2.5	82.9	23.9±1.3	24.9	558.5±6.2

$$\%N = \frac{Vx14 \times 100x \ xNxFactor}{mx1000}$$

Donde:

V= volumen gastado de ácido sulfúrico

N = normalidad de ácido sulfúrico

m = peso de la muestra en gramos

F = Factor de conversión específico = 5,85, para el amaranto y la quinua se utilizó (según Valcárcel-et. Al. 2012

RESULTADOS Y SU DISCUSIÓN

Caracterización física de granos de la quinua

- a) **Análisis granulométrico empleando un tamiza estándar.** Este método consiste en tomar una determinada masa de una muestra cuarteada, cuyos resultados se presentan a continuación: Masa de quinua = 500 gramos, Vibración grado 5, Tiempo de vibración 10 minutos.

Las mediciones experimentales se presentan en la siguiente Tabla 1, y cuyos resultados se visualiza a través de Figura 6 en un papel logarítmico de porcentaje peso retenido versus la apertura del tamaño de la malla. De los resultados de este análisis se observa que el tamaño medio de la partícula se encuentra aproximadamente en el rango de 1 a 2 mm siendo un diámetro promedio de partícula de quinua de 1,5 mm.

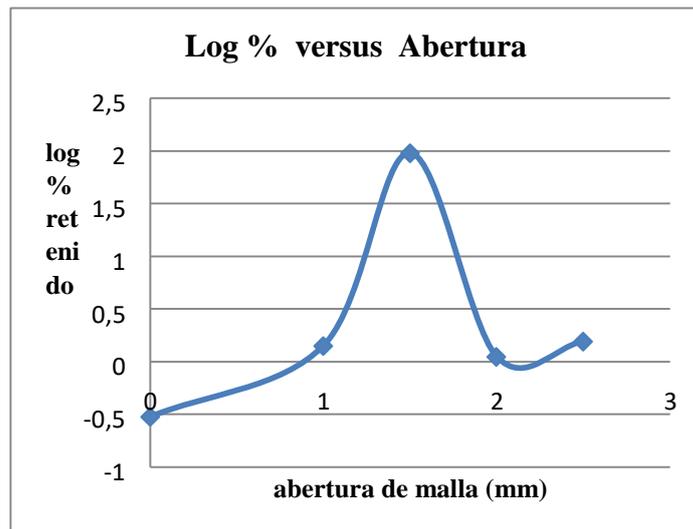


Figura 6. Distribución de tamaño de partículas de granos de quinua.

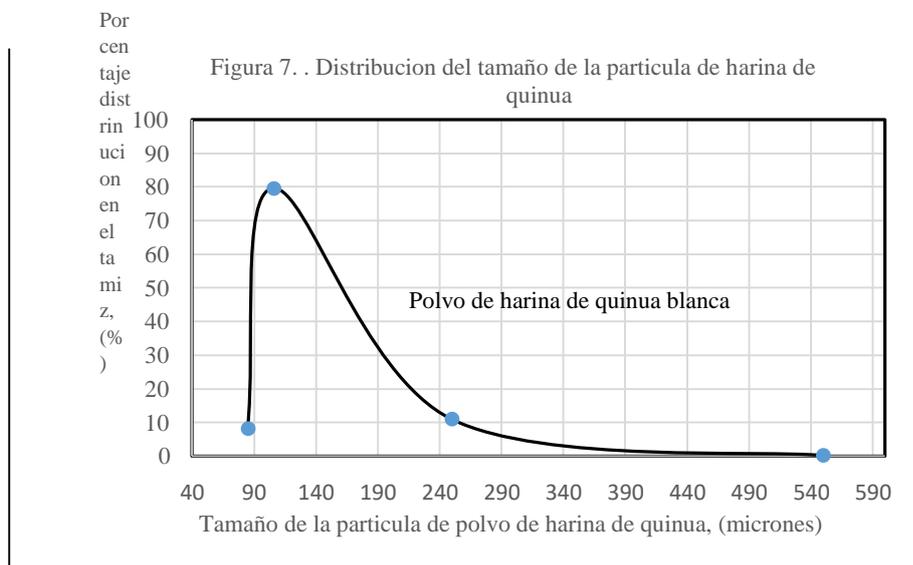
Tabla 9. Densidad aparente densidad real y porosidad de los granos de quinua.

Densidad aparente (kg/m ³)	Densidad real (kg/m ³)	Porosidad (-)
776	11035	0,3858

Los resultados presentados fueron corroborados con la información bibliográfica, donde señala que la densidad aparente varía en el rango de 667-747 kg/m³, la densidad real se halla en el rango de 928-1188 kg/m³ y la porosidad de 0,19-0,44. De la comparación de los resultados se observa que los valores determinados experimentalmente se aproximan, por tanto, la evaluación está bien determinada.

Caracterización física de la harina de quinua.

Distribución granulométrica: En la Figura 7 se muestra la distribución granulométrica de la harina de quinua. De la figura se observa que mayor distribución del tamaño de la partícula de polvo fino de la harina de quinua varía en el rango de 90 a 300 micrones, y la mayor concentración del polvo fino (70 – 80 %) se encuentra en el tamaño de 100 micrones (0,1 mm) y la poca concentración del polvo fino se muestra por encima 240 micrones, que representa harina gruesa.



La tabla 10 muestra la evaluación de la densidad aparente, densidad real y porosidad de la harina de quinua.

Tabla 10. Densidad aparente densidad real y porosidad de los granos de quinua.

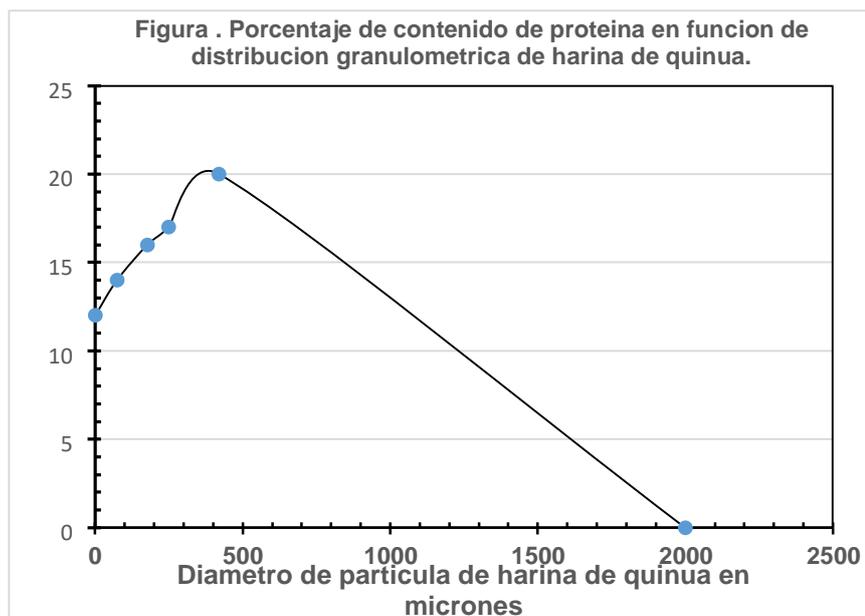
Densidad aparente (kg/m ³)	Densidad real (kg/m ³)	Porosidad (-)
436 – 462	1395 - 1570	0,6874

Los resultados de densidad aparente que varía en el rango de 436 a 462 kg/m³, se han corroborado con los resultados de trabajos de investigación de otros autores (Cerezal, et al, 2011), (densidad global 460 kg/m³), lo que confirma que los resultados obtenidos están bien determinados.

Los resultados de densidad real de la harina de quinua varían entre 1395 a 1579 kg/m³. Este valor depende del contenido de humedad de la harina y los aditivos adicionales añadidos en formulación de harina de quinua. De la literatura se ha reportado valores que varían en el rango de 1190 a 1270 kg/m³ como intervalo de confianza (Cervilla, 2011) pero para los granos de quinua no se reporta densidad real de harina de quinua en la literatura.

Los resultados muestran que la porosidad varía en el rango de 0,60 a 0,70 para la harina de quinua. Estos valores se han determinado en función de la densidad aparente y densidad real. Para corroborar los datos no se encontró información en la literatura.

Contenido de Proteína de la harina de quinua. La siguiente Figura 8, muestra el contenido de proteína expresado en porcentaje en función de la distribución granulométrica de las partículas de la harina de quinua. De la figura se observa que el mayor contenido de proteína se observa en el tamaño menores a 500 micrones (0,5 mm), se supone a este tamaño se produjo la mayor liberación de proteína del embrión, en cambio para diámetros menores a 500 micrones el contenido de proteína disminuye, la razón de eso es que a menor tamaño se llega alcanzar la liberación de almidón que está ubicado en el núcleo central de la quinua que viene a ser el pericarpio. Con este antecedente se puede concluir que la molienda de quinua es fundamental para lograr una mayor concentración de la proteína de quinua.



Clasificación de la harina de quinua y determinación de contenido de humedad.

El objetivo de la clasificación del aire fue encontrar la mejor velocidad del rotor para obtener el contenido de proteína más alto posible en los materiales de la harina de quinua. Para el presente estudio no consideró el efecto de la variación de la velocidad del rotor, puesto que el equipo solo trabaja a una velocidad de rotación constante de 3500 rpm, esto debido a que no está incorporado el equipo de variador de velocidad, por tanto, para una realidad actual, las plantas que procesan harina de quinua solo operan a una velocidad de rotación constante que depende del motor. Tomando en consideración esta situación se ha construido un clasificador de aire con rotor horizontal, alimentado 500 gramos de harina en un tiempo de 10 minutos, obteniendo dos productos, una fracción fina y una fracción gruesa del clasificador de aire, como se puede apreciar en la siguiente tabla.

Tabla 11. resultados experimentales de caracterización de harina clasificada con aire.

Material	Cantidad (g)	Rendimiento de proteína en porcentaje	Pureza de proteína (w/dw%)
Harina entera	500,0 (14,5% proteína inicial)		14,5 %
Fracción fina	250,2	65,20	45,20 %
Fracción gruesa	200,8	34,8	9,8 %
Perdida	49,0		

De los resultados experimentales de esta tabla se puede observar que resultado de la operación de clasificación se obtiene tres productos, una fracción fina de 250,2 gramos, una fracción gruesa de 200,8 gramos y pérdidas de 490 gramos. Esta pérdida constituye por las fugas ocasionadas por el arrastre del aire hacia el ambiente. El contenido de proteína inicial fue de 14,5 % para la harina blanca y después de la operación de clasificación se logra alcanzar una pureza de proteína de 45,20 % en partículas finas menores a 500 micrones. Si bien es cierto que esta pureza es menor al método húmedo que alcanza valores mayores a 60 %, sin embargo, este dato inicial muestra que es factible alcanzar valores mayores manipulando adecuadamente las variables de operación.

CONCLUSIONES

De los estudios realizados en la planta se ha determinado que uno de los problemas que se presenta durante el procesamiento de la quinua es la merma que ocasiona por la ruptura de los granos de quinua por efectos de impacto, lo que representa un 3 % del volumen de descarte (150 kilos por volumen de procesamiento de 5,0 toneladas). Actualmente se comercializa como quinua tercera para alimento balanceado para animales.

Desde el punto de vista tecnológico, el fraccionamiento en seco, empleando el clasificador de aire, es relativamente simple, pero su operación no es sencilla por las condiciones restringidas en su diseño con el prototipo construido, fundamentalmente a la variación de velocidad de rotación del rotor, puesto que opera a una velocidad de rotación constante de 3500 rpm. Es fundamental analizar el efecto de velocidad de rotación en la eficiencia de separación de la proteína.

De acuerdo a la caracterización la harina de quinua debe presentar un tamaño de partícula menores a 500 micrones, mayores a este valor significa que no hubo una buena disociación durante la molienda, lo que conduce a una baja recuperación de la proteína y requiere nuevamente a someter a la nueva molienda.

De los resultados de análisis de propiedades físicas como es la densidad, porosidad se corroboraron con datos de la literatura y los valores obtenidos están dentro de los rangos establecidos. De igual manera la eficiencia de recuperación de la proteína para estos primeros ensayos es aproximadamente 65 % valor muy bajo en comparación con los datos de la literatura respecto a la extracción por vía húmeda, sin embargo, este resultado motiva a continuar con el trabajo a fin de mejorar el diseño del equipo para alcanzar valores que se aproximan a otros trabajos de investigación realizados.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Abugoch L.E. Romero, N., Tapia, C.A., Silva, J., & Rivera. (2008). Study of some *physicochemical* and functional properties of quinoa (*Chenopodium quinoa Willd*) protein isolates. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 56(12), 4745–4750.

Aluko, R. E., & Monu, E. (2003). Functional and bioactive properties of quinoa seed protein hydrolysates. *Journal of Food Science*, 68(4), 1254–1258.

Brinegar, C., & Goundan, S. (1993). Isolation and characterization of chenopodin, the 118 seed storage protein of quinoa (*Chenopodium quinoa*). *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 41(2), 182–185.

Chauhan, G.S., Cui, W., & Eskin, N.A.M. (1999). Effect of saponin on the surface properties of quinoa proteins. *International Journal of Food Properties*, 2(1), 13–22.

Föste, M., Elgeti, D., Brunner, A.-K., Jekle, M., & Becker, T. (2015). Isolation of quinoa protein by milling fractionation and solvent extraction. *Food and Bioprocess Processing*, 96, 20–26

García, M., (2018), “El gran negocio alimentario de las proteínas”, https://elpais.com/economia/2018/03/22/actualidad/1521721700_390520.html

Gusman, M (2004), Thesis, “Evaluation of technical feasibility of dry fractionation as a method to obtain novel proteins foods from quinoa”, Wageningen University & Research Centre MSc thesis Food Technology – Product Design Food Process Engineering Department, Germany.

Pelgrom, P. J. M., Vissers, A. M., Boom, R. M., & Schutyser, M. A. I. (2013a). Dry fractionation for production of functional pea protein concentrates. *Food Research International*, 53(1), 232–239.

Pelgrom, P. J. M., Boom, R. M., & Schutyser, M. A. I. (2015a). Functional analysis of mildly refined fractions from yellow pea. *Food Hydrocolloids*, 44, 12–22.

Pelgrom, P. M., Boom, R., & Schutyser, M. I. (2015b). Method development to increase protein enrichment during dry fractionation of starch-rich legumes. *Food and Bioprocess Technology*, 8(7), 1495–1502.

Schutyser, M. A. I., & van der Goot, A. J. (2011). The potential of dry fractionation processes for sustainable plant protein production. *Trends in Food Science & Technology*, 22(4), 154–164.

L. Scanlin, L and Lewis K., (2017), *Quinoa as a Sustainable Protein Source: Production, Nutrition, and Processing*, <http://dx.doi.org/10.1016/B978-0-12-802778-3.00014-7>

Valenzuela, C., Abugoch, L., Tapia, C., & Gamboa, A. (2013). Effect of alkaline extraction on the structure of the protein of quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd.) and its influence on film formation. *International Journal of Food Science and Technology*, 48(4), 843–849.

Wu, Y. V., & Stringfellow, A. C. (1992). Air classification of flours from wheats with varying hardness: protein shifts. *Cereal Chemistry*, 69(2), 188–191.