

EVALUACIÓN DE UN PROCESO NOVEDOSO DE BENEFICIADO EN SECO DEL GRANO DE CAÑAHUA (*Chenopodium pallidicaule* Aellen), BASADO EN LA APLICACIÓN DE UN LECHO FLUIDIZADO TIPO SURTIDOR

ASSESSMENT OF A NOVEL METHOD FOR DRY PROCESSING OF CANIHUA (*Chenopodium pallidicaule* Aellen) GRAIN, BASED ON THE APPLICATION OF A SPOUTED BED

Carmen Carla Quiroga Ledezma¹, Adrián Jaime Ortiz Mérida¹ y Carlos Ramiro Escalera Vásquez²

¹Centro de Investigaciones Agrícolas y Agroindustriales (CIAA)

²Centro de Investigaciones en Procesos Industriales (CIPI)

Universidad Privada Boliviana

ccquiroga@upb.edu

(Recibido el 15 de Mayo 2018, aceptado para publicación el 26 de Junio 2018)

RESUMEN

En este trabajo se evaluó la aplicación de un lecho fluidizado tipo surtidor (LFTS) en el proceso de remoción del perigonio y episperma en el grano de cañahua (*Chenopodium pallidicaule* Aellen), variedad Illimani y ecotipo lasta rosada, provenientes de la provincia de Pacajes del departamento de La Paz. Para ello, se emplearon dos reactores de vidrio cilíndrico-cónicos de 7,44 y 14,34 cm de diámetro interno (D_c), con diámetros de ingreso de aire de 1 a 5 mm (d_i), conectados a un compresor de 400 L/min de capacidad y provistos de un medidor de flujo de 500 L_{estándar}/min. Muestras de cañahua fueron procesadas de acuerdo con un diseño experimental multifactorial de 32 corridas, evaluándose el efecto de los factores: variedad/ecotipo (Illimani y lasta rosada), D_c (7,44 y 14,34 cm), d_i (1 y 3 mm) y altura de lecho (H_L) (7,5 y 12,5 cm), sobre el porcentaje de remoción del perigonio y episperma, el consumo específico de energía y la calidad morfológica y nutricional del grano de cañahua. Los resultados del análisis de varianza multifactorial revelan que todos los factores estudiados son preponderantes en la remoción del perigonio y episperma del grano de cañahua, especialmente el factor d_i , y en el consumo específico de energía, principalmente los factores D_c y H_L . Las mayores eficacias de remoción de las capas que cubren el grano de cañahua corresponden a las condiciones de operación del LFTS con menores d_i y D_c y mayores H_L , aunque estas condiciones demandan precisamente los mayores consumos específicos de energía por unidad de masa de cañahua tratada. Los mayores porcentajes de remoción de masa de la superficie del grano de cañahua se dan en los primeros 5 minutos del proceso, siendo la variedad Illimani la que reporta mayores porcentajes de remoción. En las mejores condiciones de operación, a los 20 – 25 minutos de procesamiento se logra un grano libre de perigonio y episperma, llamado comúnmente “grano perlado”, sin daño aparente en la morfología del grano y con una calidad similar a una muestra escarificada y lavada que se comercializa en el mercado nacional e internacional, y con los mismos contenidos iniciales de proteínas y lípidos. El material removido que se colecta es un subproducto con altos contenidos de minerales y fibra dietética, que podría tener aplicaciones industriales, aunque hay que tener presente la existencia de saponinas en el mismo. Como conclusión general se puede afirmar que la aplicación de un LFTS a escala laboratorio es idónea para la remoción del perigonio y episperma del grano de variedades y ecotipos de cañahua y constituye una alternativa a los procesos tradicionales y convencionales que se usan actualmente.

Palabras Clave: Cañahua, Cañihua, *Chenopodium pallidicaule* Aellen, Lecho Fluidizado, Grano Andino, Pseudocereal.

ABSTRACT

In this work, the application of a spouted bed in the process of removal of the perigonium and episperm in the grain of canihua (*Chenopodium pallidicaule* Aellen) was assessed; variety Illimani and ecotype lasta rosada from the province of Pacajes of the department of La Paz were used. For the assessment, two glass cylindrical-conical reactors with an inner diameter (D_c) of 7,44 and 14,34 cm were used, with air inlet hole diameters (d_i) from 1 to 5 mm, which were connected to a compressor of 400 L/min of capacity and equipped with a flowmeter of 500 L_{standard}/min. Canihua samples were processed in accordance with an experimental design multifactorial of 32 trials. The effects of the following factors were evaluated: variety/ecotype (Illimani and lasta rosada), D_c (7,44 and 14,34 cm), d_i (1 and 3 mm) and height of bed (H_L) (7,5 and 12,5 cm), on the percentage of removal of the perigonium and episperm, the specific consumption of energy and the morphologic and nutritional quality of the grain of canihua. The results of the multifactorial analysis of variance reveal that all the studied factors are preponderant in the removal of the perigonium and episperm of the grain of canihua, especially the factor d_i , and in the specific energy consumption, mainly the factors D_c and H_L . The highest efficacies of removal of the coats/layers that the grain of canihua covers correspond to the conditions of operation of the spouted bed with minors d_i and D_c and majors H_L , although these conditions demand precisely the highest specific energy consumptions for unit of mass of treated canihua. The highest percentages of removal of mass from the surface of the grain of canihua happen in the first five minutes of the process, the Illimani being the variety that shows the major percentages of removal. In the best operation conditions, 20 – 25 minutes of

processing a grain free of perigonium and episperm is achieved, called commonly “pearly grain”, without apparent damage in the morphology of the grain and with a quality similar to a scarified and washed sample that is commercialized on the national and international market, and with the same initial protein and lipid contents. The removed material that is collected is a by-product with high mineral content and dietetic fiber, which might have industrial applications, although it is necessary to bear in mind the existence of saponins in this by-product. As a general conclusion, it is stated that the application of a LFTS to scale laboratory is suitable for the removal of the perigonium and episperm of the grain of varieties and ecotypes of canihua and constitutes an alternative to the traditional and conventional processes that are used at present.

Keywords: Kañiwa, Canihua, *Chenopodium pallidicaule* Aellen, Spouted Bed, Andean Grain, Andean Seeds, Pseudocereal.

1. INTRODUCCIÓN

La región circundante al lago Titicaca de Bolivia y Perú se considera como centro de origen y mayor variabilidad genética de especies cultivadas y silvestres de cañahua (*Chenopodium pallidicaule* Aellen), en el banco de germoplasma boliviano se tiene alrededor de 801 accesiones que fueron colectadas del altiplano y valles interandinos de los departamentos de La Paz, Oruro, Cochabamba y Potosí [1]. Esta especie fue importante para las culturas prehispánicas como la incaica y tiahuanacota, pero durante la época de la colonia fue relegada quedando casi en el olvido, *e.g.* en Bolivia se la cultiva principalmente para autoconsumo a pesar de sus propiedades nutricionales y resistencia a condiciones agroecológicas adversas de altitud (3200-4200 m s.n.m.), temperatura (heladas), humedad (sequias), salinidad del suelo y resistencia a plagas y enfermedades [2]. Al igual que la quinua es un cultivo estratégico interesante para la seguridad alimentaria y resiliencia al cambio climático, especialmente en aquellas zonas de producción de alto riesgo.

Principalmente si se lo compara con los cereales como el trigo, maíz, cebada, avena y arroz, el grano de cañahua tiene propiedades nutricionales importantes por la calidad y cantidad de sus proteínas (12,76-19 %), lípidos (2,11-14,50 %), fibra (5,45-11,12 %) y minerales (cenizas 3,12-5,77 %). Estos valores corresponden a los valores máximos y mínimos en base seca de 90 accesiones de cañahua en Bolivia [3].

La calidad de las proteínas de cañahua es bastante similar al de la leche entera en polvo y quinua, *i.e.* tiene un perfil de amino ácidos bastante interesante y superior al de los cereales, con contenidos altos de lisina (6 g/16 g N), isoleucina (6,8 g/16 g N), treonina (4,8 g/16 g N) y arginina (7,9 g/16 g N) y aunque con un contenido un poco más bajo de fenilalanina (3,6 g/16 g N) [4], los cuales son amino ácidos esenciales a excepción de la arginina. El grano también presenta altos contenidos de ácidos grasos insaturados (72,9 %), como el ácido linoléico (42,6 %), ácido oleico (23,5 %), y ácido linolénico (4,8 %). El contenido de ácidos grasos saturados como el ácido palmítico (17,94 %) es menor; sin embargo, el contenido de tocoferoles es interesante (788,4 ppm γ -tocopherol y 726 ppm α -tocopherol) [5]. Los minerales mayoritarios son el potasio (720 mg %), fósforo (390 mg %), magnesio (255 mg %), calcio (120 mg %), además del hierro (18,5 mg %) [6]. La cañahua tiene un alto contenido de fibra dietética, especialmente de fibra insoluble [7] y es una fuente natural de antioxidantes, polifenoles y otros compuestos bioactivos [8], [9], [10].

El fruto (grano) de cañahua es pequeño de forma lenticular (1-1,2 mm de diámetro), de color castaño o negro, revestido de una capa fina traslúcida denominada episperma y cubierto por otra capa gruesa llamada perigonio de color generalmente gris [11]. Al igual que en la quinua, es posible encontrar saponinas triterpenoidales en el episperma [12], aunque en concentraciones más bajas [13]. En caso de que el sabor amargo típico de las saponinas sea perceptible al paladar, el grano se somete a un proceso de lavado o escarificado previo a su consumo, lo que implica un incremento en el tiempo de procesamiento o beneficiado, consumo de agua y generación de efluentes contaminados con saponinas que deben ser tratados antes de ser descargados al medio ambiente, consumo de combustibles y generación de gases de efecto invernadero. Algunos autores consideran que la presencia de saponinas limita su uso en la elaboración de productos alimenticios [14]. El tamaño pequeño del grano tampoco favorece la remoción del perigonio y episperma, por lo que el consumo tradicional de la cañahua es en forma de harina (pito) mezclado con agua o leche, para lo cual el grano se tuesta y muele; aunque hoy en día, se puede encontrar algunos productos manufacturados a base de cañahua, *e.g.* galletas, panes, granolas, refrescos instantáneos. En las últimas décadas, la demanda y el precio por el grano de cañahua han incrementado gradualmente a nivel internacional debido a sus propiedades nutricionales, especialmente por el grano beneficiado, *i.e.* libre de perigonio y episperma y por tanto de saponinas. A pesar de su gran potencial agroindustrial, en Bolivia sólo se cultivan cerca a las 1000 ha y en Perú un poco más de 6000 ha, la cañahua boliviana se exporta principalmente a Estados Unidos de Norte América (3,44 \$US/kg) y Canadá (5,04 \$US/kg) [15].

Para la remoción de saponinas del grano de quinua, la Universidad Privada Boliviana (UPB) aplicó un novedoso proceso a escala laboratorio, mediante el empleo de un lecho fluidizado de tipo surtidor (LFTS), como alternativa a los

procesos de beneficiado tradicionales y convencionales [16]. Se alcanzaron niveles de remoción de saponinas por debajo de lo que establece la norma boliviana NB NA 0038 ($< 0,12\%$) en ecotipos de quinua real, sin sufrir ningún deterioro en la calidad nutricional y morfológica del grano [17]. En este sistema los granos de quinua se fluidizan mediante un flujo regulado de aire, generando un surtidor en el que la fricción y choques continuos entre granos permiten la remoción del perigonio y episperma, bajo la forma de un polvo fino rico en saponinas que es colectado y puede ser comercializado como un subproducto del proceso de beneficiado, de interés y valor comercial [18].

Por tanto, en este trabajo de investigación se evaluó la aplicabilidad de un LFTS en la remoción de las capas externas del grano de cañahua y obtención de un grano beneficiado libre de perigonio y episperma, conocido comúnmente con el nombre de “grano perlado”. Se determinaron las características básicas y condiciones óptimas de procesamiento en un lecho fluidizado de tipo surtidor, incluyendo la caracterización de la geometría óptima del lecho, la determinación de las condiciones aerodinámicas de operación, la evaluación de los rendimientos en la remoción del perigonio y episperma en 2 variedades/ecotipos de cañahua y la calidad del grano respecto a su composición nutricional y morfológica.

2. METODOLOGÍA

2.1 Caracterización de la materia prima y muestras procesadas

La materia prima (Illimani y lasta rosada) y una muestra de cañahua beneficiada por escarificación fueron provistas por la Fundación PROINPA, de la provincia de Pacajes del departamento de La Paz. El efecto de cada una de las variables estudiadas en el beneficiado de la cañahua se evaluó en la calidad del grano, a través del análisis de la cantidad de perigonio y episperma removido, composición nutricional y características morfológicas.

La remoción de las capas externas fue cuantificada a través de la pérdida de masa del grano procesado y el análisis de estéreo micrografías e imágenes procesadas con el editor de gráficos rasterizados de Adobe Photoshop. Este mismo análisis se realizó para evaluar la preservación o deterioro morfológico del grano.

Los métodos analíticos usados en el análisis proximal fueron preferentemente los de la AOAC [19], para la determinación del contenido de proteínas (Kjeldahl, AOAC 984.13 modificado), lípidos (Soxhlet con hexano, 4 h extracción, 8 – 10 min por sifonamiento), cenizas (AOAC 923.03) y humedad (AOAC 925.10), el contenido de carbohidratos se determinó por diferencia. Los reactivos químicos (grado analítico), comprados de Sigma-Aldrich y Merck, fueron empleados en la determinación del análisis proximal de la materia prima y de las muestras procesadas en las mejores condiciones de operación del reactor, *i.e.* en aquellas condiciones donde la remoción del perigonio y episperma fueron las mejores.

2.2 Caracterización del lecho fluidizado tipo surtidor

Se utilizó el equipo experimental de la UPB, provisto de: a) un compresor a pistón de 400 L/min de capacidad de flujo de aire a una presión manométrica de operación de 8 bar y un máximo de 12 bar, provisto de un tanque de 200 L y accionado por un motor de 5 hp; b) un regulador de presión de 1,5 a 9 bar y un máximo de 10 bar; c) un filtro de aire para remover la humedad y el aceite acoplado al regulador de presión; d) un medidor y controlador electrónico de flujo de aire de 500 L_{estándar}/min y una presión de operación máxima en línea de 1 MPa, que registra parámetros como la presión y temperatura absoluta del aire, velocidad del flujo volumétrico y flujo másico del aire; e) dos reactores de vidrio cilíndrico-cónicos, uno de 7,44 cm de diámetro interno, cono de 30° de inclinación respecto a la horizontal y una altura de 80 cm y el otro de 14,34 cm de diámetro interno, cono de 45° de inclinación y una altura de 93 cm, cada reactor con un tubo de entrada de aire de 2,58 y 2,96 cm de diámetro interno respectivamente, al que se le puede adaptar boquillas de diferente diámetro; f) un juego de boquillas cónicas de plástico entre 1 y 5 mm de diámetro interno; g) un filtro manga de tela para recolectar el material removido del grano durante el proceso; y h) un estante construido con angulares metálicos tipo mecano, provisto de tableros melamínicos que soportan los aparatos y accesorios, en la Figura 1 se puede apreciar el equipo experimental.

Se determinaron experimentalmente los intervalos de valores de las condiciones de operación requeridas para generar un surtidor, un lecho fluidizado estable y apropiado para la remoción del perigonio y episperma del grano de cañahua y las condiciones de colapso del lecho. Para ello se midieron: a) velocidades de flujo volumétrico de aire; b) velocidades lineales de aire a la salida de la boquilla; c) alturas de lecho posibles en función de la capacidad del equipo experimental; y d) masas de cañahua en función de la altura y diámetro de lecho.



Figura 1: Equipo experimental: (a) regulador de presión y filtro; (b) medidor de flujo; (c) reactor cilíndrico-cónico de 14,34 cm de diámetro interno; y (d) sistema de recolección de material particulado fino.

2.3 Evaluación del proceso de beneficiado

Se escogieron como variables independientes los siguientes factores: a) diámetro de ingreso de aire (d_i), que corresponde al diámetro de boquilla; b) diámetro de lecho en la columna cilíndrico-cónica de reactor (D_c); c) altura de lecho (H_L); y d) variedad/ecotipo. Se consideraron dos niveles para cada factor y una réplica por corrida. El factor tiempo se estableció en 25 min, de acuerdo con las pruebas preliminares de caracterización de lecho y evaluación de la cinética de remoción de las capas que cubren el grano. Como variable dependiente se consideró el porcentaje de remoción del perigonio y episperma del grano de cañahua. La concentración de proteínas, lípidos, cenizas y humedad se determinaron en las muestras más representativas.

El diseño experimental se elaboró con la ayuda del paquete estadístico Statgraphics, dando un total de 32 corridas experimentales para los cuatro factores, que se ejecutaron aleatoriamente como se puede ver en la Tabla 2. Los resultados se analizaron mediante el análisis de varianza multifactorial ANOVA para los factores seleccionados.

3. RESULTADOS

3.1 Caracterización de la materia prima y muestras procesadas

La cañahua denominada Illimani es una variedad liberada por la Fundación PROINPA para consumo humano, la planta en la floración tiene un color verde y en la madurez un color rosado-anaranjando, el color del grano con perigonio es blanquecino-plomizo. En cambio, el ecotipo local llamado lasta rosada se usa para consumo humano y forraje, en la floración la planta también presenta un color verde y en la madurez un color rosado, el color del grano con perigonio es gris-blanquecino. En ambos, variedad y ecotipo, el grano sin perigonio es de color café oscuro, el ciclo fenológico es semiprecoz (160 días), el hábito de crecimiento es lasta, *i.e.* presenta numerosas ramificaciones que inician en el cuello de la planta.

La densidad del grano beneficiado de la variedad Illimani es de 1340 kg/m^3 y del ecotipo lasta rosada de 1250 kg/m^3 , el tamaño de ambos es de aproximadamente 1,19 mm de diámetro y 0,49 mm de espesor. La evaluación morfológica de la materia prima revela que las capas que recubren el grano de la variedad Illimani son de mayor espesor que las del ecotipo lasta rosada, como se puede apreciar en la Figura 2.

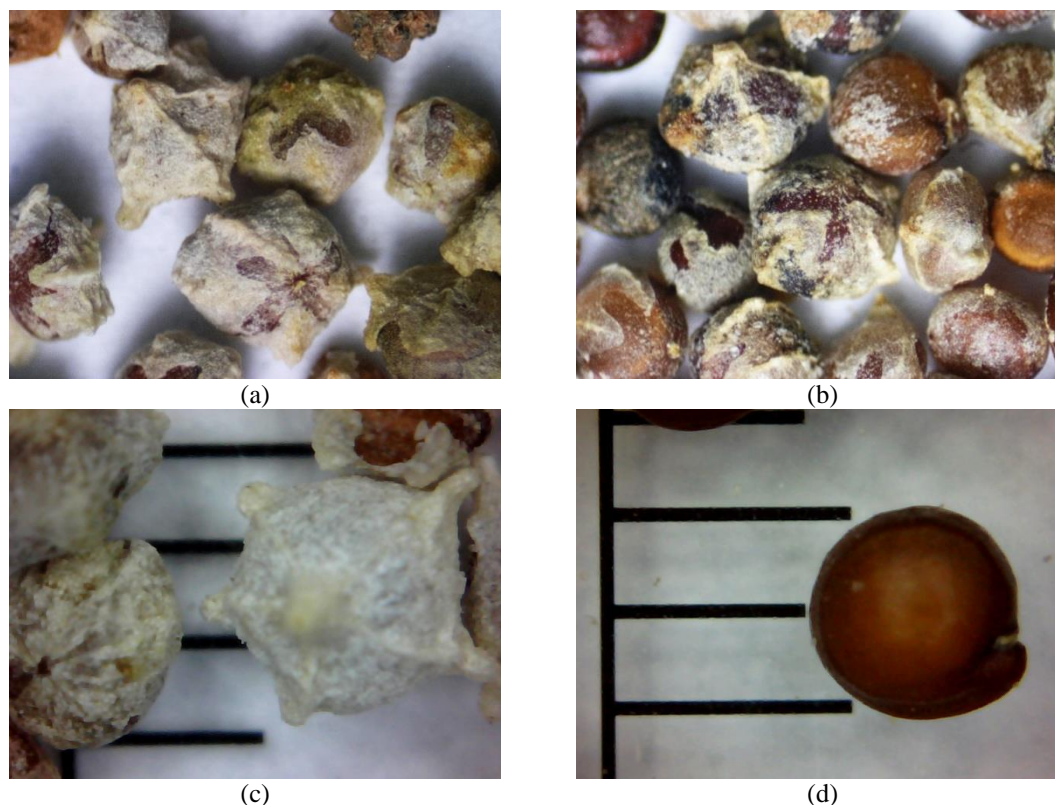


Figura 2: Micrografías de la materia prima variedad Illimani (a) (c), y ecotipo lasta rosada (b); y grano procesado variedad Illimani (d)

El contenido de proteínas (proteína cruda), lípidos (materia grasa), carbohidratos, cenizas y humedad de las muestras de cañahua sin beneficiar están dentro los rangos reportados en la literatura; la composición nutricional es similar entre la variedad Illimani y el ecotipo lasta rosada, con un grado de confiabilidad del 95 %. El proceso de remoción del perigonio y episperma del grano en el reactor LFTS no altera la composición nutricional del mismo, *i.e.* permanece constante. Como se puede observar en las muestras con mejores niveles de remoción, que corresponden a aquellas que fueron procesadas en un reactor de 7,44 cm de diámetro y con una boquilla de 1 mm de diámetro, las diferencias entre la materia prima y el grano procesada no son estadísticamente significativas ($P < 0,05$).

El material removido y recolectado en forma de un polvo fino presenta un contenido de minerales alto, siendo el contenido de cenizas de aproximadamente 20 %. Además, se sabe que es rico en fibra dietética, por lo que corresponde considerarlo como un subproducto del proceso de beneficiado con aplicaciones industriales y no como un residuo o desecho. Los resultados del análisis proximal de la materia prima y las muestras procesadas se presentan en la Tabla 1. La evaluación morfológica del grano procesado revela variabilidad del tamaño de grano y la presencia de granos de color negro provenientes de otra variedad o ecotipo de cañahua. Para homogenizar la materia prima se podría clasificar por tamaños. Aunque no es posible evitar la presencia de granos de otro color al estar estos completamente cubiertos por el episperma y perigonio, la clasificación de éstos sí es posible, pero después del procesamiento, por técnicas visuales u ópticas. Las muestras procesadas, según diseño experimental, no muestran desprendimiento del embrión, ni fragmentación del grano, a diferencia de lo que se observó con la quinua, *i.e.* la dureza del grano de cañahua es mayor.

TABLA 1 – ANÁLISIS COMPOSICIONAL DEL GRANO DE CAÑAHUA, VARIEDAD ILLIMANI Y ECOTIPO LASTA ROSADA, ANTES Y DESPUÉS DEL BENEFICIADO^a

	Materia Prima		Grano Beneficiado		Material Removido ^e
	Illimani [%]	Lasta Rosada [%]	Illimani [%]	Lasta Rosada [%]	Mezcla [%]
Humedad	9,93±0,30	10,01±0,07	10,51±0,16	10,62±0,04	7,65±0,09
Proteína (cruda) ^c	16,28±0,53	17,28±0,65	16,04±0,55	15,92±0,73	---
Lípidos (materia grasa) ^d	9,01±1,29	9,31±1,35	9,03±1,41	9,14±1,42	---
Carbohidratos	50,26	48,10	48,19	47,97	---
Cenizas	4,23±0,04 ^b	3,98±0,12 ^b	3,72±0,17	3,90±0,09	20,36±0,08

^aLos valores corresponden a la media \pm la desviación estándar de tres determinaciones expresados en base seca, excepto la humedad expresada en base húmeda. ^bLos valores son estadísticamente diferentes ($P < 0,05$) a un nivel de confianza del 95 %. ^cN x 6,5. ^dGrano entero sin procesar y procesado. ^ePerigonio y episperma

3.2 Caracterización del lecho fluidizado tipo surtidor

Un LFTS se caracteriza por un movimiento rápido ascendente de los granos de cañahua a través de una cavidad central denominada surtidor, que se abre al introducirse aire por un orificio en la base del cono, aunque una parte del aire asciende por la parte anular que rodea el surtidor. Los granos de cañahua al salir del surtidor generan una fuente y caen sobre la superficie de la sección anular de lecho, para posteriormente descender a una velocidad constante hacia la base del reactor, para después ser transportados nuevamente por el aire ascendente en el surtidor; algunos granos a lo largo de la periferia del surtidor podrían ser arrastrados hacia éste e impulsados de nuevo hacia arriba [20]. Para una mejor comprensión del funcionamiento y partes de un LFTS ver la Figura 3.

Para generar un LFTS apropiado, es preciso relacionar correctamente el flujo y el diámetro de ingreso de aire con la cantidad de masa a procesar y el tamaño de grano de cañahua. También es importante garantizar que todos los granos en el lecho reciban el mismo grado de contacto con el aire y recirculen a una misma velocidad para una remoción homogénea del perigonio y episperma.

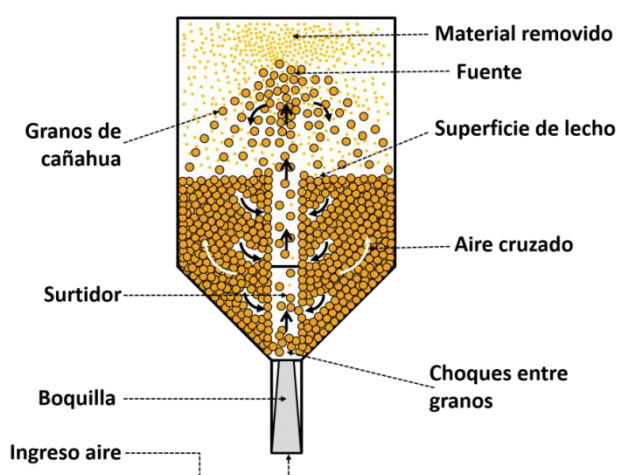


Figura 3: Esquema de un lecho fluidizado tipo surtidor.

Para pasar de un lecho estático o uno fluidizado tipo surtidor, en el reactor de menor diámetro ($D_c=7,44$ cm), se requieren velocidades entre 1400 – 1900 m/s para romper lechos entre 10 – 20 cm de altura, cuando el diámetro de ingreso de aire (d_i) es de 1 mm; disminuyendo significativamente este requerimiento a 60 – 70 m/s cuando d_i aumenta a 5 mm. Estas demandas aumentan con D_c , *i.e.* son mayores para el reactor de mayor diámetro ($D_c=14,34$ cm). En ambos casos, para un mismo d_i las velocidades de ingreso de aire incrementan en función a la altura de lecho (H_L), aunque estos incrementos son mayores en el reactor grande, como se puede apreciar en la Figura 4.

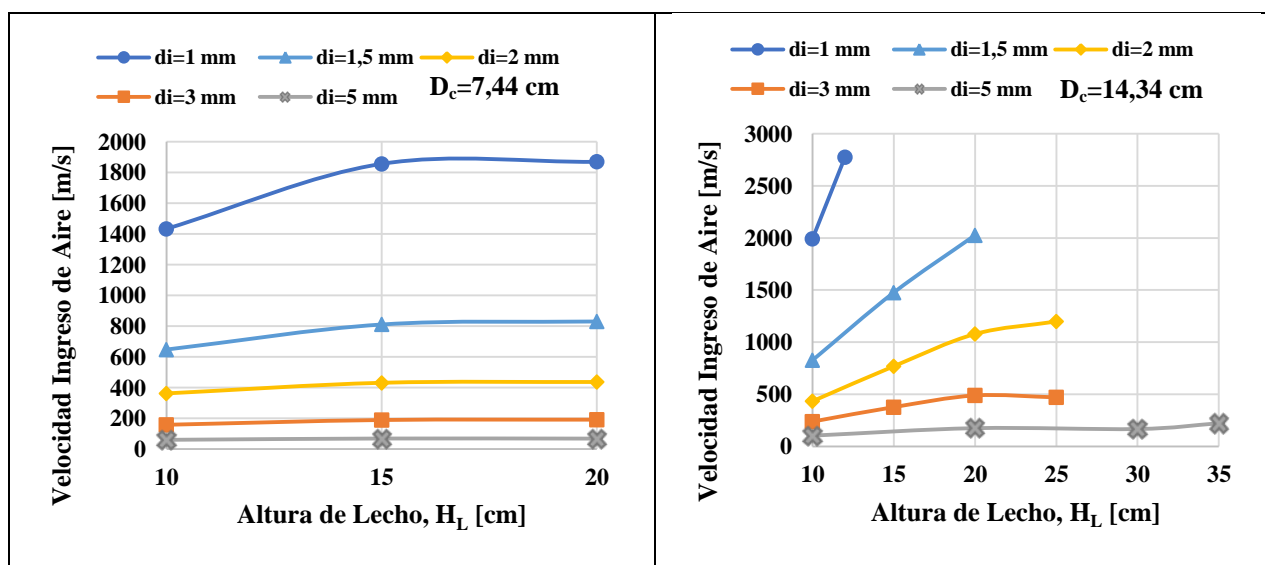


Figura 4: Velocidades mínimas de ingreso de aire requeridas para romper diferentes alturas de lecho (H_L) en reactores cilíndrico-cónicos de 7,44 cm y 14,34 cm de diámetro interno (D_c) provistos con diferentes diámetros de ingreso de aire (d_i).

Evidentemente, estas velocidades son iguales o mayores a la velocidad de sedimentación del grano de cañahua en los reactores, por lo que el material puede fluir satisfactoriamente en forma de surtidor [21]. Las velocidades superficiales de aire (flujo volumétrico de aire/área trasversal del reactor cilíndrico-cónico) están entre 0,26 – 0,34 m/s para el reactor pequeño y entre 0,10 – 0,27 m/s para el reactor grande. Los requerimientos de flujo volumétrico de aire (estándar) incrementan con la altura de lecho y diámetro de ingreso de aire; *e.g.* para H_L entre 10 – 20 cm en el reactor pequeño es de 50 – 70 L/min ($d_i=1 - 5$ mm) y para H_L entre 10 – 35 cm en el reactor grande es de 70 – 200 L/min ($d_i=1 - 5$ mm). Para generar el surtidor, *i.e.* romper el lecho, se requiere de una presión de aire suficientemente alta al ingreso al reactor; a menores diámetros de ingreso de aire la presión es significativamente mayor, para d_i igual a 1 mm y H_L igual a 10 cm es de aproximadamente 67 psia en el reactor pequeño y de 100 psia en el reactor grande, estos valores disminuyen considerablemente con el incremento de d_i , *e.g.* para d_i igual a 5 mm, la presión es de aproximadamente 11 psia, en ambos casos.

También se determinaron las velocidades mínimas de fluidización del lecho surtidor para las alturas de lecho estudiadas, que corresponden a las alturas máximas de lecho en que la velocidad de ingreso de aire iguala a la velocidad mínima de fluidización tipo surtidor, como se puede apreciar en la Figura 5.

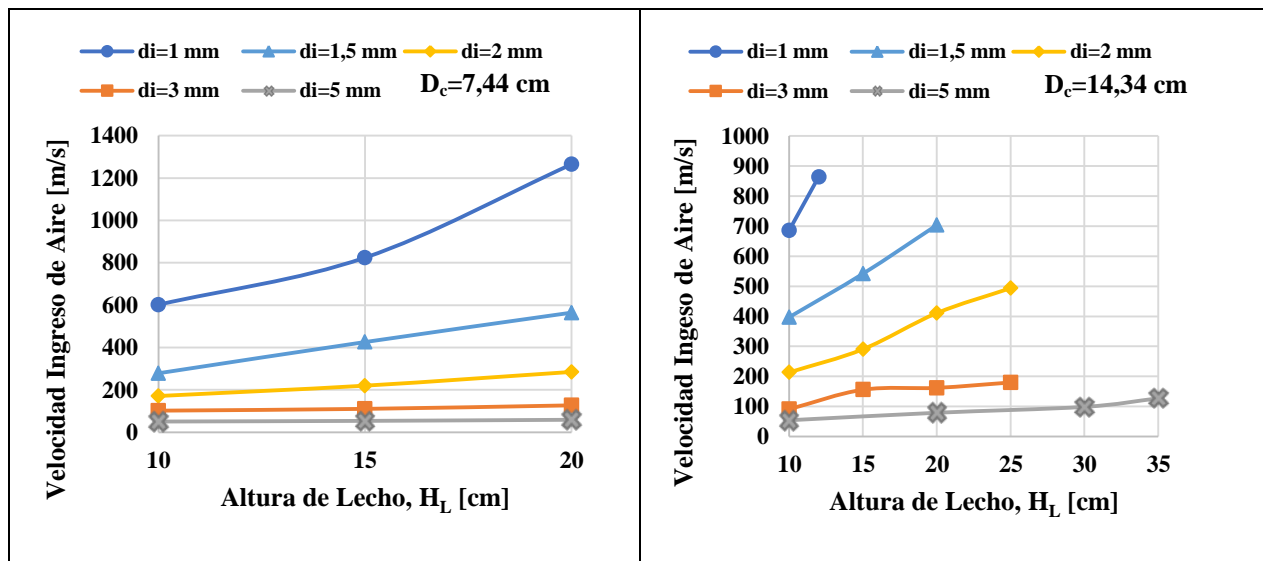


Figura 5: Velocidades mínimas de ingreso de aire requeridas para mantener alturas máximas de lecho fluidizadas tipo surtidor (H_L) en reactores cilíndrico-cónicos de 7,44 cm y 14,34 cm de diámetro interno (D_c) provistos con diferentes diámetros de ingreso de aire (d_i).

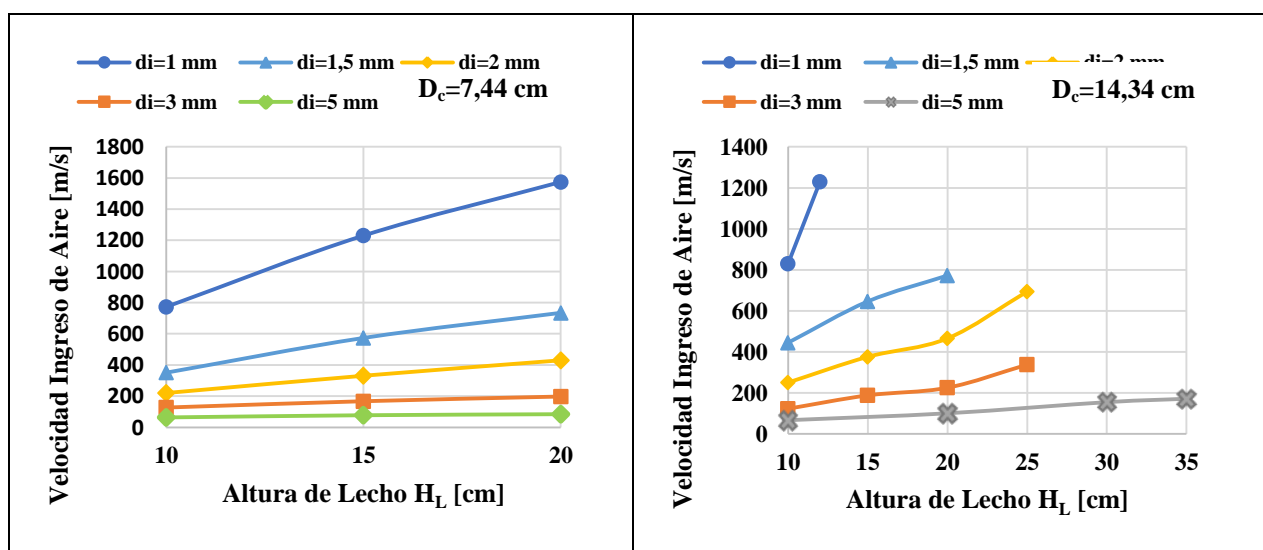


Figura 6: Velocidades de ingreso de aire para garantizar un surtidor estable a determinadas alturas de lecho (H_L) en reactores cilíndrico-cónicos de 7,44 cm y 14,34 cm de diámetro interno (D_c) provistos con diferentes diámetros de ingreso de aire (d_i).

Respecto de las velocidades de ingreso de aire, necesarias para mantener un surtidor estable, Figura 6, estas velocidades son en promedio aproximadamente un 50 % ($d_i=1$ mm) y 20 % ($d_i=5$ mm) menores en el reactor pequeño, para alturas de lecho entre 10 - 20 cm y un 70 % ($d_i=1$ mm) y 50 % ($d_i=5$ mm) menores en el reactor grande, para alturas de lecho entre 10 – 35 cm, porcentajes que concuerdan con los reportados en la literatura [22].

Estas velocidades mínimas corresponden a flujos volumétricos de aire estándar entre 20 – 50 L/min en el reactor pequeño y de 20 – 120 L/min en el reactor grande y una presión de aire al ingreso del reactor de aproximadamente de 33 psia ($D_c=7,44$ cm) y 37 psia ($D_c=14,34$ cm) para un d_i igual a 1 mm, sin embargo, las variaciones son mínimas cuando d_i es igual a 5 mm (11 psia) para el rango de H_L estudiados, en ambos reactores.

Las condiciones de operación para la remoción del episperma y perigonio en el grano de cañahua, se establecieron entre las condiciones requeridas para romper el lecho y generar un LFTS estable (no pulsante o caótico) y las mínimas para evitar que colapse. En la Figura 6 se presentan las velocidades de ingreso de aire, en la Figura 7 los flujos volumétricos de aire y en la Figura 8 la presión de ingreso de aire, a diferentes d_i y H_L en los dos reactores estudiados.

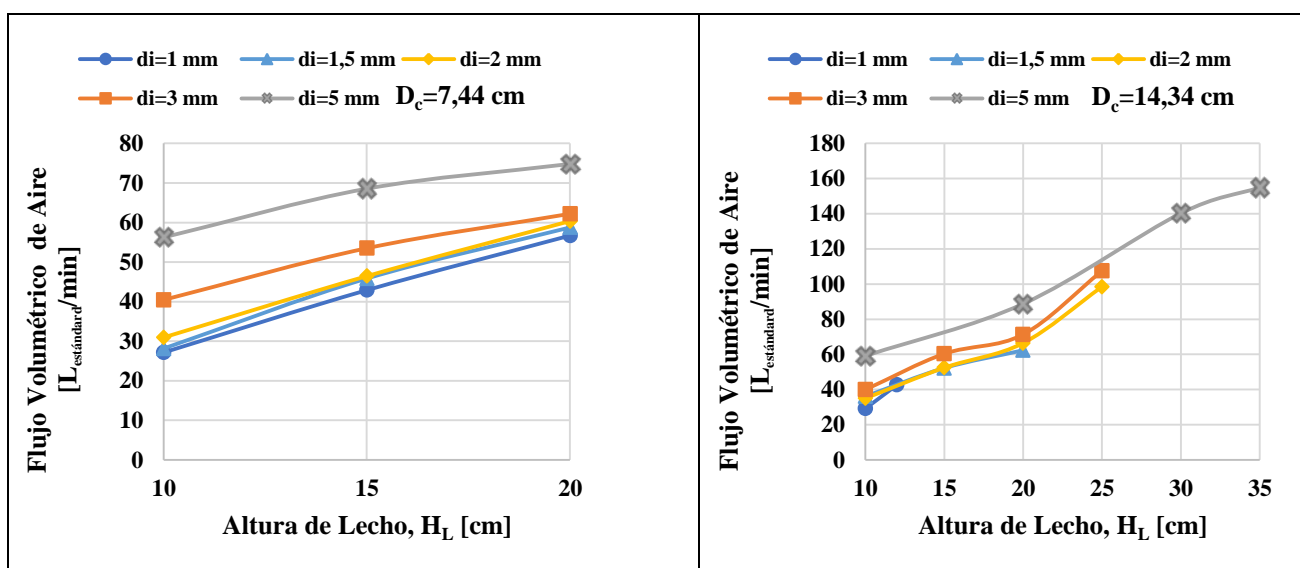


Figura 7: Flujos volumétricos de aire para garantizar un surtidor estable a determinadas alturas de lecho (H_L) en reactores cilíndrico-cónicos de 7,44 cm y 14,34 cm de diámetro interno (D_c) provistos con diferentes diámetros de ingreso de aire (d_i).

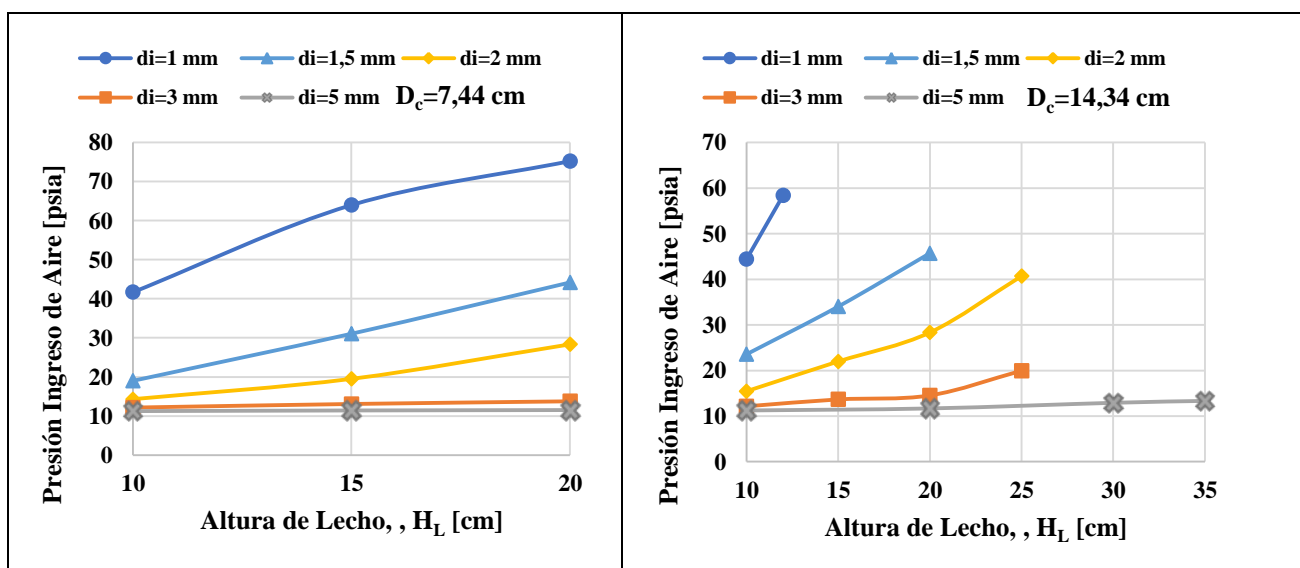


Figura 8: Presiones de ingreso de aire para garantizar un surtidor estable a determinadas alturas de lecho (H_L) en reactores cilíndrico-cónicos de 7,44 cm y 14,34 cm de diámetro interno (D_c) provistos con diferentes diámetros de ingreso de aire (d_i).

El movimiento de los granos de cañahua de la superficie del lecho hacia la base del LFTS es constante, la velocidad de retorno aumenta con el incremento de la altura de lecho, observándose que la velocidad de retorno en el reactor pequeño ($D_c=7,44$ cm) es mayor ($0,7 - 1,20$ cm/s) que en el reactor grande ($0,30 - 0,50$ cm/s) para los mismos d_i , como se puede ver en la Figura 9. La velocidad de retorno de los granos está relacionada directamente con la eficacia y homogeneidad del proceso de remoción de las capas externas del grano de cañahua, puesto que una mayor velocidad de retorno implica un mayor número de veces a través del surtidor, donde se dan los choques de fricción entre granos.

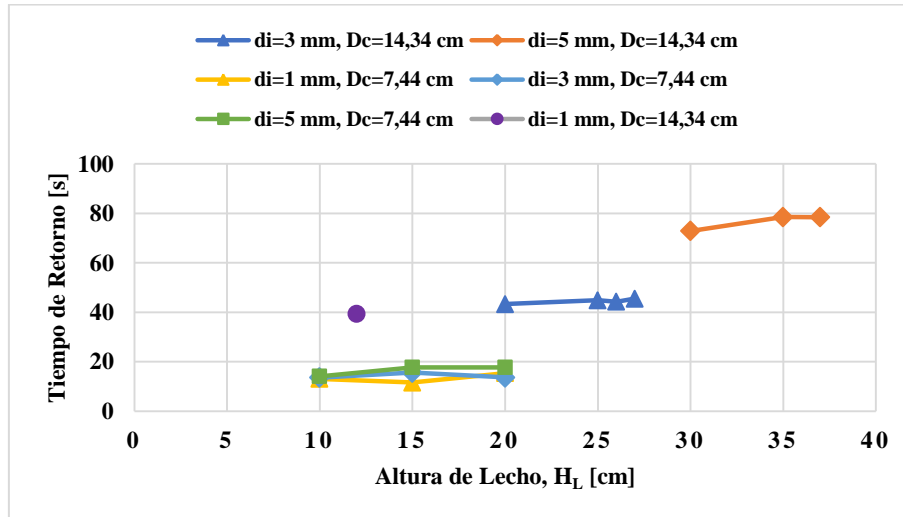


Figura 9: Tiempos de retorno del grano de cañahua de la superficie a la base del lecho, a diferentes alturas de lecho (H_L) en reactores cilíndrico-cónicos de 7,44 cm y 14,34 cm de diámetro interno (D_c) provistos con diferentes diámetros de ingreso de aire (d_i).

El grano de cañahua a pesar de ser pequeño ($d_p=1,9$ mm) fluye en forma de surtidor fácilmente porque su d_p está dentro del rango de tamaños de partículas que pueden hacerlo de manera satisfactoria, d_p entre $4,76 - 0,841$ mm que corresponde a una granulometría de número de malla entre $4 - 20$ mesh; la poca variabilidad en el tamaño de grano también favorece el proceso, el tamaño del grano de la variedad Illimani es mucho más uniforme que el del ecotipo lasta rosada [23].

Para garantizar un LFTS verdadero y estable en la remoción del perigonio y episperma del grano de cañahua, se cumplieron ciertas condiciones geométricas en los reactores cilíndrico-cónicos: *e.g.* H_L sea mayor a $D_c/2$; relación d_i/D_c sea menor a $0,10 - 0,35$ y relación d_i/d_p sea menor a $25 - 30$, caso contrario se hubiera tenido un lecho fluidizado pulsante y caótico. El valor crítico de d_i/D_c disminuye con el incremento de la temperatura del aire, parámetro que influye directamente en la densidad (ρ) y viscosidad (μ) del aire, y/o el decremento de la densidad del grano de cañahua (ρ_p) y d_p ; esta relación también disminuye cuando la fracción de volumen de vacío disminuye (ϵ), *e.g.* cuando se tiene una variabilidad en el tamaño del grano, heterogeneidad en d_i . La relación d_i/d_p no debe exceder el valor indicado. Finalmente, la forma cónica de la base del reactor cilíndrico evita la generación de espacios muertos [21].

3.3 Evaluación del proceso de beneficiado

Para no incluir el factor tiempo en el diseño experimental, se hizo un estudio de la cinética de remoción de las capas externas del grano de cañahua, *i.e.* del perigonio y episperma, en condiciones de operación próximas a las reportadas como las mejores para la desaponificación del grano de quinua: reactor pequeño ($D_c=7,44$ cm), diámetro ingreso de aire o boquilla pequeño ($d_i=1 - 1,5$ mm) y altura de lecho bajo ($H_L=10$ cm) [16]. Para este estudio se usó la variedad Illimani y el tiempo de procesamiento fue de 1 h, tomándose muestras cada 5 min los primeros 30 min y cada 10 minutos los restantes 30 min. En la Figura 10 se observa que el mayor porcentaje de remoción o pérdida de masa en el grano de cañahua se da en los primeros 5 min del proceso, siendo más efectivo el diámetro de ingreso de aire de 1 mm en los primeros 20 min; sin embargo, posterior a ese tiempo la efectividad de esta apertura es comparable a la de 1,5 mm. El análisis de las micrografías revela que se alcanza un porcentaje de remoción en el grano de cañahua de más del 98 % a los 20 - 25 min de procesamiento con el diámetro de ingreso de aire de 1 mm (Figura 11) y a los 50 min con el de 1,5 mm (Figura 12), sin daño aparente del grano y una calidad similar a la de la variedad Illimani que fue beneficiada en un planta de la Fundación PROINPA (Figura 13), cuya capacidad de procesamiento es de 1 qq/h e incluye las etapas de clasificación para eliminar impurezas como restos de planta y tierra, escarificación para remover las capas externas del grano, venteo para separar el material removido en la escarificación, densitometría para retirar piedrecillas y clasificación para separar el grano por tamaños. En el LFTS, un mayor tiempo de procesamiento a los indicados, conlleva una fragmentación del grano y daños en el embrión, como se puede apreciar en las Figuras 11 y 12.

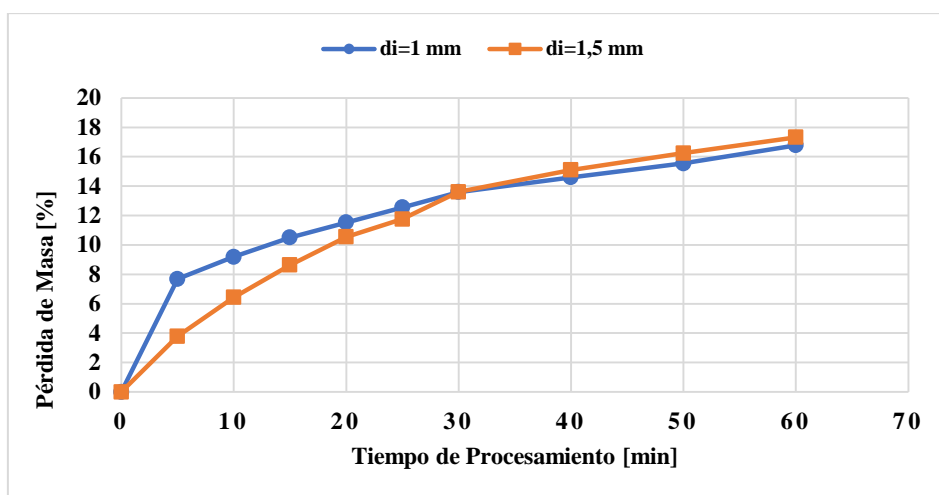


Figura 10: Cinética de la remoción del perigonio y episperma en el grano de cañahua, variedad Illimani, en un reactor de 7,44 cm de diámetro interno (D_c) y altura de lecho (H_L) de 10 cm.

Los resultados obtenidos sobre la remoción del perigonio y episperma en el grano de cañahua, el flujo de aire y consumo específico de energía requeridos para cada una de las corridas realizadas según el diseño experimental estadístico adoptado, se muestran en la Tabla 2.

TABLA 2 – MUESTRAS DE GRANO DE CAÑAHUA SOMETIDAS A DIFERENTES CONDICIONES DE PROCESAMIENTO, EFICACIA DE REMOCIÓN DEL PERIGONIO Y EPISPERMA Y CONSUMO DE ENERGÍA

Variedad/Ecotipo	Altura de Lecho [cm]	Diámetro de Ingreso de Aire [mm]	Diámetro de Reactor [mm]	Flujo de Aire [L/min]	Remoción de Masa [%]	Consumo Específico de Energía [kWh/kg]
Lasta Rosada	12,5	1	14,34	51,60	5,32	0,836
Lasta Rosada	7,5	1	14,34	17,30	4,23	1,577
Lasta Rosada	7,5	1	7,44	19,60	5,26	2,294
Lasta Rosada	12,5	3	14,34	57,00	2,94	0,539
Lasta Rosada	7,5	3	7,44	38,10	3,19	2,415
Illimani	12,5	3	7,44	43,90	4,98	1,528
Illimani	7,5	1	7,44	17,10	7,01	2,675
Illimani	12,5	1	7,44	29,30	9,77	1,370
Illimani	7,5	3	14,34	31,30	1,21	1,372
Lasta Rosada	7,5	3	14,34	34,00	1,42	1,319
Lasta Rosada	12,5	3	7,44	53,30	5,56	1,344
Illimani	7,5	1	14,34	15,20	6,59	1,628
Illimani	12,5	3	14,34	56,80	3,71	0,546
Lasta Rosada	12,5	1	7,44	47,80	5,83	1,200
Illimani	12,5	1	14,34	29,40	8,80	0,894
Illimani	7,5	3	7,44	33,30	3,11	2,596
Illimani	12,5	1	14,34	30,70	8,17	0,863
Illimani	7,5	3	14,34	31,30	1,18	1,382
Illimani	7,5	3	7,44	32,90	2,86	2,807
Lasta Rosada	12,5	3	7,44	53,70	3,52	1,312
Illimani	12,5	3	14,34	54,80	3,70	0,585
Illimani	12,5	3	7,44	45,20	4,89	1,535
Lasta Rosada	12,5	1	7,44	43,60	5,40	1,175
Illimani	7,5	1	7,44	15,10	9,37	2,779
Lasta Rosada	12,5	3	14,34	59,80	2,96	0,545
Lasta Rosada	7,5	1	14,34	17,10	4,09	1,538
Lasta Rosada	7,5	3	7,44	38,00	2,99	2,398
Lasta Rosada	7,5	1	7,44	18,90	5,39	2,436
Lasta Rosada	12,5	1	14,34	43,50	5,55	0,835
Illimani	12,5	1	7,44	32,40	9,69	1,349
Lasta Rosada	7,5	3	14,34	34,00	1,47	1,294
Illimani	7,5	1	14,34	15,10	6,64	1,655

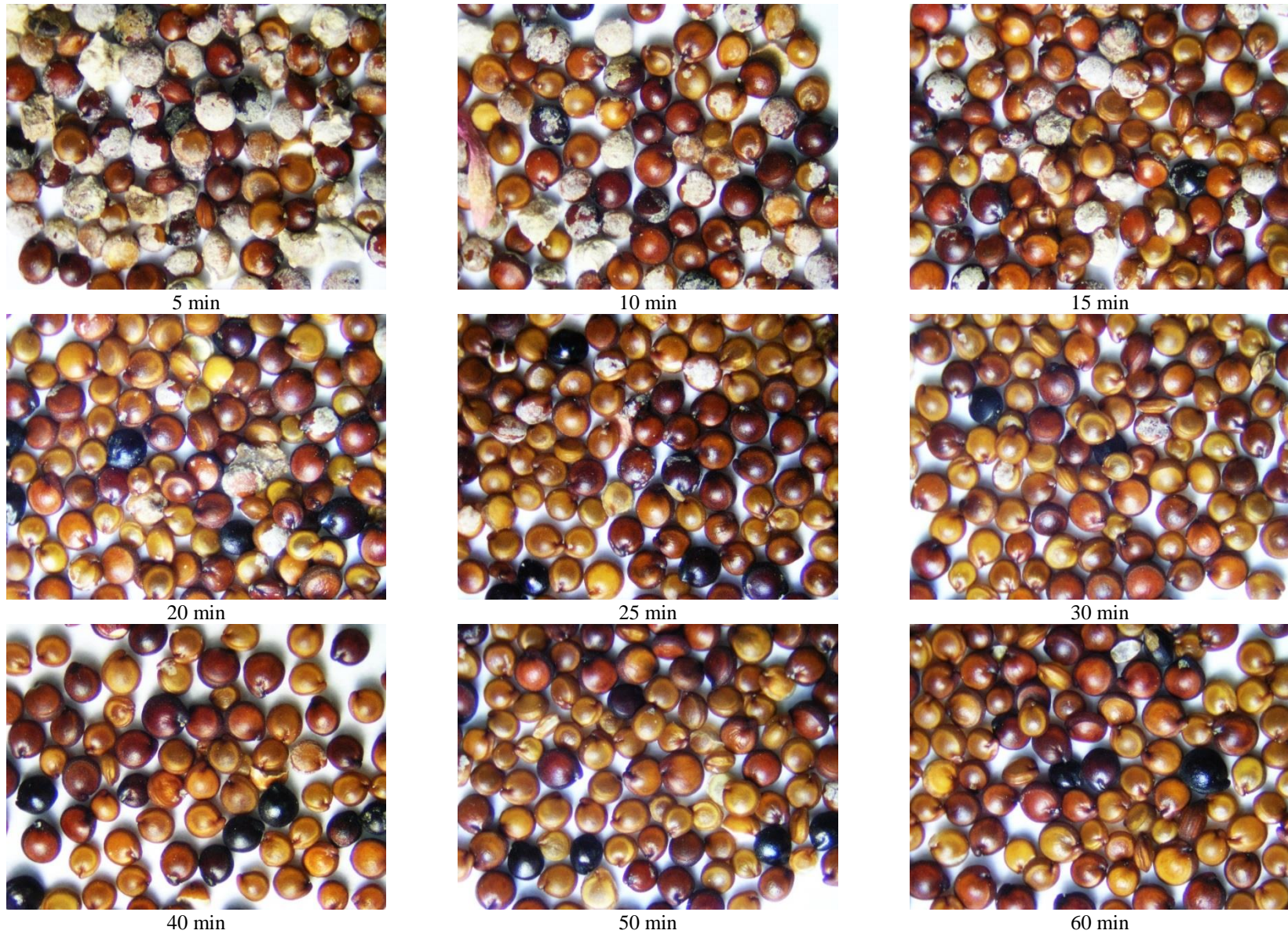


Figura 11: Micrografías de la cinética de la remoción del perigonio y episperma en el grano de cañahua, variedad Illimani, en un reactor de 7,44 cm de diámetro interno (D_c), diámetro ingreso de aire (d_i) de 1 mm y altura de lecho (H_c) de 10 cm

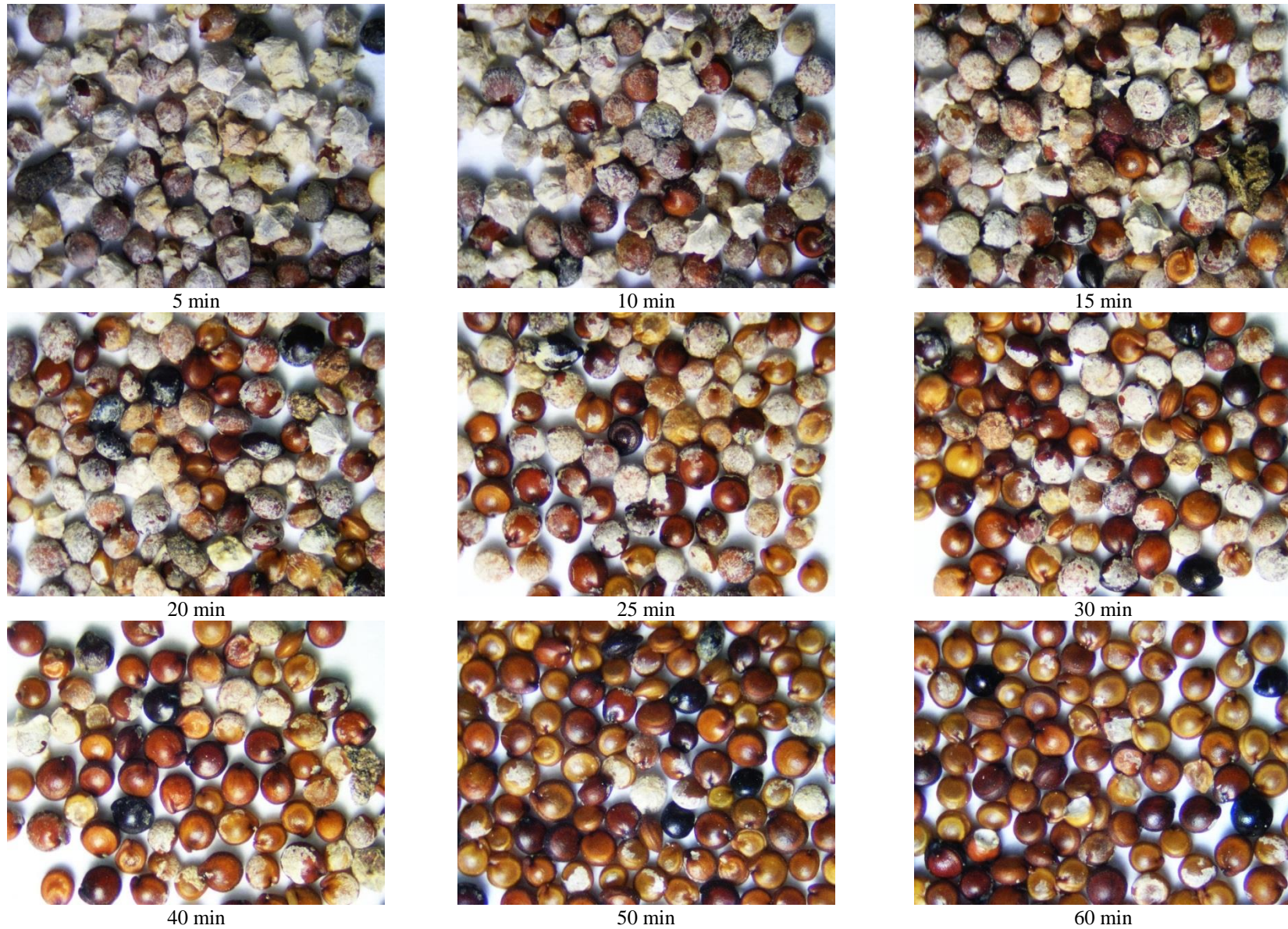


Figura 12: Micrografías de la cinética de la remoción del perigonio y episperma en el grano de cañahua, variedad Illimani, en un reactor de 7,44 cm de diámetro interno (D_c), diámetro de boquilla (d_i) de 1,5 mm y altura de lecho (H_L) de 10 cm.



Figura 13: Micrografía del grano de cañahua, variedad Illimani, beneficiada en un escarificador de la Fundación PROINPA.

Los efectos de cada uno de los factores seleccionados (d_i , D_c , H_L y variedad/ecotipo de cañahua) en la remoción de las capas externas que recubren el grano, se pueden apreciar en la Figura 14. La contribución de cada factor se evaluó excluyendo los efectos de los otros factores. Los resultados de la prueba de significancia (P), para cada uno de los factores estudiados, indican que todos ellos tienen efectos estadísticamente significativos ($P < 0,05$) en la remoción de material de la superficie del grano de cañahua, con un grado de confiabilidad del 95 %, siendo el factor más preponderante d_i .

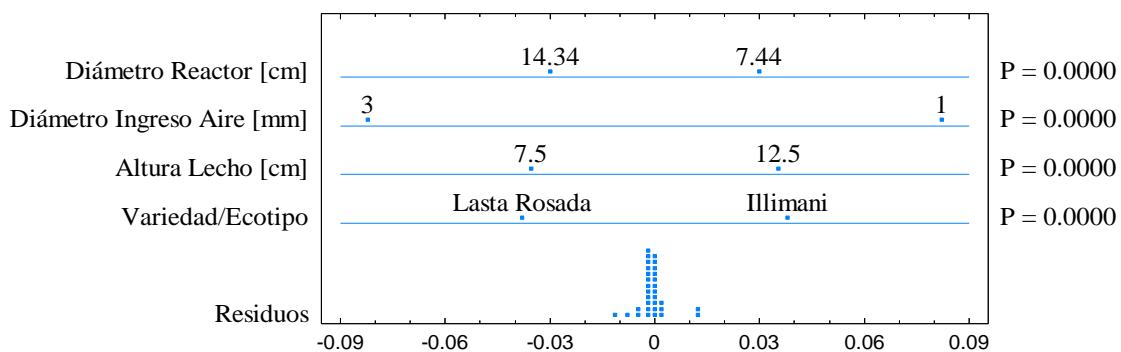


Figura 14: Significancia de los efectos de los factores seleccionados en la remoción del perigonio y episperma del grano de cañahua en un reactor de lecho fluidizado tipo surtidor ($P < 0,05$ y nivel de confianza de 95 %), según diseño experimental.

También se evaluó los efectos de las interacciones entre los factores, los valores de P revelan que las interacciones d_i – variedad/ecotipo de cañahua y H_L – variedad/ecotipo de cañahua tienen efectos estadísticamente significativos ($P < 0,05$), principalmente la primera interacción. En cambio, las otras interacciones $H_L - d_i$, $H_L - D_c$ y $d_i - D_c$ no tienen efectos significativos en la remoción del perigonio y episperma, con un nivel de confianza del 95 %; estas interacciones están relacionadas con las condiciones geométricas que fueron evaluadas en la caracterización del LFTS, cuyos valores están dentro los rangos que garantizan un surtidor verdadero y estable.

El análisis de residuos de los valores de las 32 corridas del diseño experimental, muestran un comportamiento aleatorio, sin tendencias positivas o negativas que pudieran originarse en errores sistemáticos debido a efectos de algún otro factor no contemplado (Figura 15) y nos permite concluir que los factores seleccionados para el presente estudio fueron los correctos.

Los efectos individuales de cada factor en la remoción del perigonio y episperma del grano de cañahua, en las 32 corridas realizadas de acuerdo con el diseño experimental, a dos niveles por factor, se muestran en la Figura 16. Las mejores remociones de las capas externas del grano se dan en la variedad Illimani y cuando se procesan a menores d_i , menores D_c y mayores H_L . Como se mencionó anteriormente, el análisis morfológico de la materia prima revela que las capas del grano de la variedad Illimani tienen espesores mayores y están más intactas que las del ecotipo lasta rosada, en la cual el perigonio y el episperma están fragmentados en una buena cantidad de granos (Figura 2); por tanto, la variedad Illimani tiene mayor material a remover. Las diferencias se deben a la genotipología del grano, la lasta rosada

es una especie silvestre, y probablemente a las prácticas de cosecha y poscosecha empleadas; en cambio, la variedad Illimani se la desarrolló para que pudiera cultivarse con fines comerciales y no sólo de subsistencia.

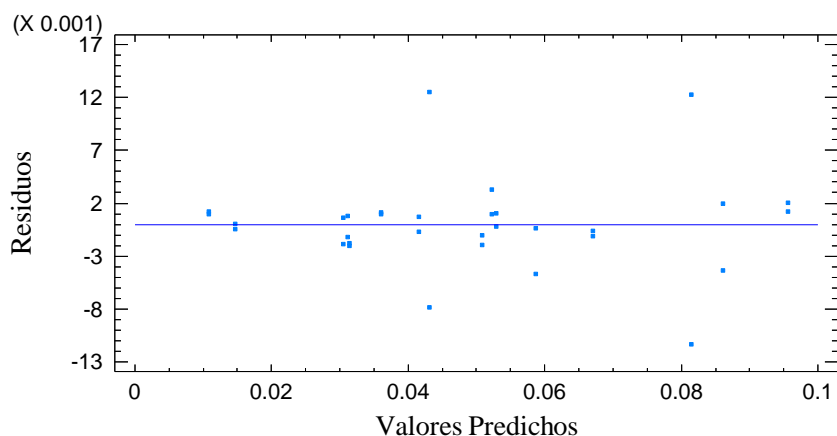


Figura 15: Valores residuales de los valores de la remoción del perigonio y episperma del grano de cañahua en un reactor de lecho fluidizado tipo surtidor ($P < 0,05$ y nivel de confianza de 95 %), según diseño experimental.

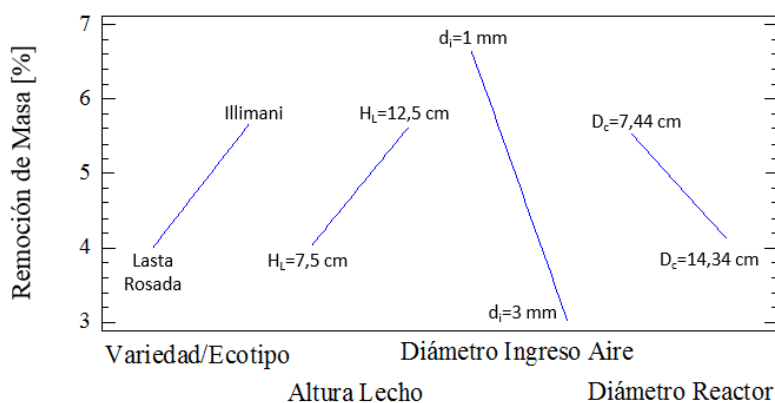


Figura 16: Efectos individuales de cada factor en la remoción del perigonio y episperma del grano de cañahua en un reactor de lecho fluidizado tipo surtidor ($P < 0,05$ y nivel de confianza de 95 %), según diseño experimental.

La eficacia del empleo de menores d_i se debe a que las fuerzas de choque y fricción entre granos de cañahua en el surtidor son mayores y más efectivas para fragmentar y desgastar las capas que recubren el grano, debido a las elevadas velocidades lineales que se producen (Figura 6); a menores d_i , se restringe la capacidad de procesamiento porque a mayores H_L se dificulta el rompimiento del lecho para generar un surtidor, *e.g.* en el reactor grande y con d_i igual a 1 mm no se logra generar un LFTS por encima de 12,5 cm de H_L .

El uso de reactores con menores D_c también favorecen el proceso de remoción del perigonio y episperma porque las velocidades de retorno de los granos de la sección anular del lecho, desde la superficie a la base del reactor, son mayores, *i.e.* los granos de cañahua son recirculados una mayor cantidad de veces a través del surtidor (Figura 9); manifestándose este hecho en la homogeneidad del proceso de remoción en las muestras tratadas en el reactor pequeño y heterogeneidad en aquellas tratadas en el reactor grande.

Mayores H_L también favorecen la eficacia del tratamiento del grano de cañahua, este hecho se explica como resultado de un incremento en la distancia que los granos deben recorrer en el surtidor, donde suceden los choques y fricción entre granos. La superficie de respuesta del porcentaje de material removido en el grano de cañahua con H_L igual a 10 cm en función a d_i y D_c se muestra en la Figura 17, los mayores porcentajes de remoción de material de la superficie del grano cañahua corresponden a menores d_i y D_c .

Los efectos de d_i , D_c , H_L y variedad/ecotipo de cañahua en el consumo específico de energía por unidad de masa procesada, se muestran en la Figura 18; la contribución de cada factor también se evaluó excluyendo los efectos de los otros factores. Los resultados de la prueba de significancia (P), para cada uno de los factores estudiados, indican que todos ellos tienen efectos estadísticamente significativos ($P < 0,05$) en el consumo específico de energía por unidad de

masa procesada, con un nivel de confiabilidad del 95 %, siendo los factores más importantes H_L y D_c . Estos factores están directamente relacionados con la cantidad de material a procesar. Las interacciones de los factores que tienen efectos en el consumo específico de energía por unidad de masa procesada son principalmente $H_L - D_c$ y $D_c - d_i$, seguidos por $D_c - \text{variedad/ecotipo}$ y $H_L - \text{variedad/ecotipo}$. Los residuos de los valores de las 32 corridas del diseño experimental para el consumo específico de energía por unidad de masa procesada, también muestra un comportamiento aleatorio (Figura 19).

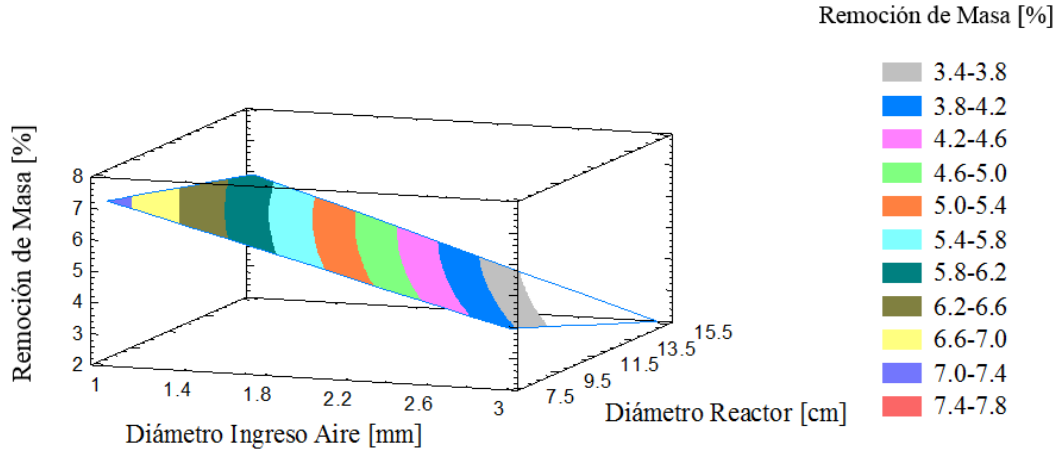


Figura 17 – Superficie de respuesta de la remoción del perigonio y episperma del grano de cañahua en un reactor de lecho fluidizado tipo surtidor, con una altura de lecho (H_L) de 10 cm ($P < 0,05$ y nivel de confianza de 95 %), según diseño experimental.

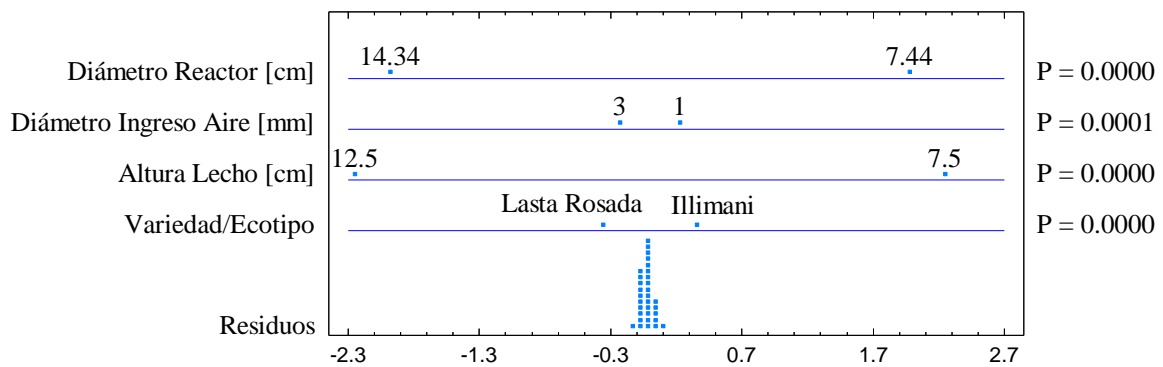


Figura 18: Significancia de los efectos de los factores seleccionados en el consumo específico de energía por unidad de masa de cañahua procesada en un reactor de lecho fluidizado tipo surtidor ($P < 0,05$ y nivel de confianza de 95 %), según diseño experimental.

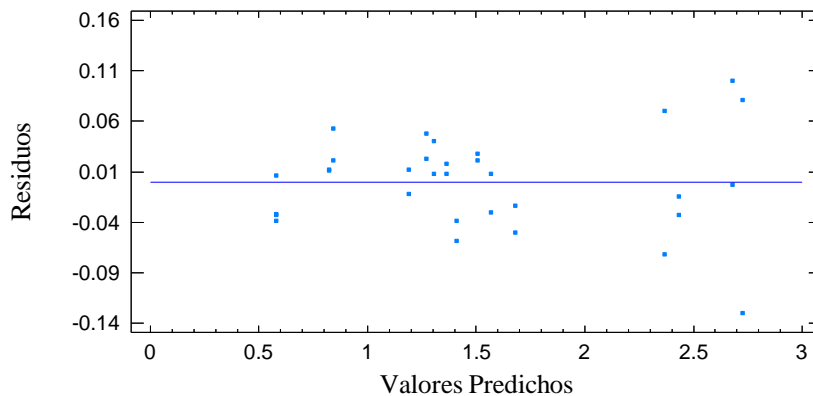
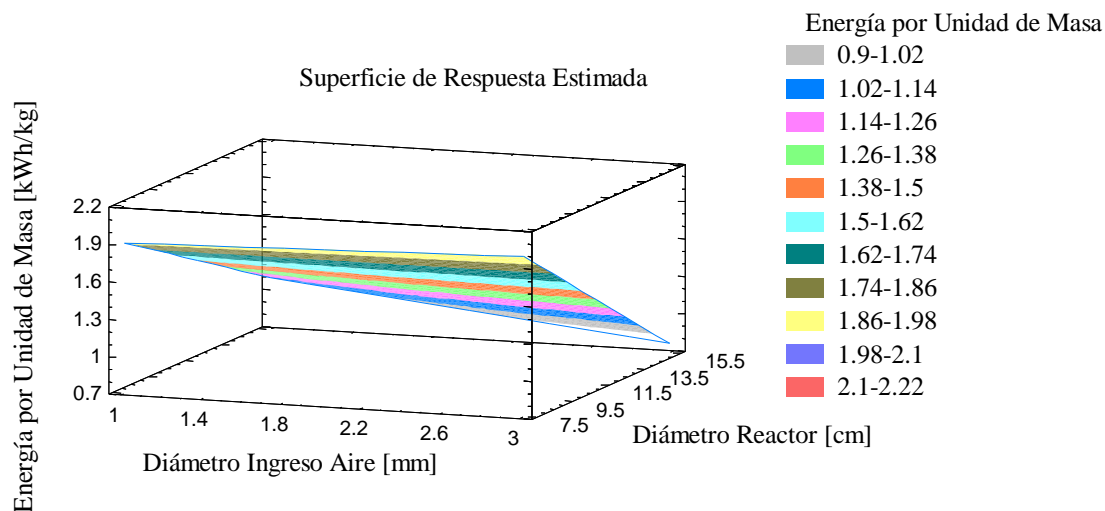


Figura 19: Valores residuales de los valores del consumo específico de energía por unidad de masa de cañahua procesada en un reactor de lecho fluidizado tipo surtidor ($P < 0,05$ y nivel de confianza de 95 %), según diseño experimental.

Finalmente, la superficie de respuesta del consumo específico de energía por unidad de masa procesada de cañahua con H_L igual a 10 cm en función a d_i y D_c se presenta en la Figura 20, los menores consumos corresponden principalmente a mayores D_c ; sin embargo, a mayores D_c disminuye la eficacia de la remoción del perigonio y episperma, así como a mayores d_i . Los porcentajes más altos de remoción de material de la superficie del grano de cañahua corresponden a las condiciones donde se tuvo un mayor consumo específico de energía ($D_c=7,44$ cm y $H_L=7,5$ cm), para la variedad Illimani fue de aproximadamente de 2,71 kWh y para la lasta rosada de 2,39 kWh por kilogramo de cañahua procesada.



4. CONCLUSIONES

En las mejores condiciones de operación del LFTS, los contenidos de proteínas y lípidos en el grano de cañahua de la variedad Illimani y el ecotipo lasta rosada son similares, antes y después del procesamiento; por otra parte, la integridad física del grano tratado tiene una calidad semejante al grano escarificado y lavado que se comercializa a nivel nacional e internacional. El material removido de la superficie del grano y colectado en el sistema de recolección de material particulado fino, tiene contenidos altos de minerales y fibra dietética y probablemente saponinas, por lo que este subproducto podría tener aplicaciones en el sector industrial.

Las relaciones geométricas D_c , d_i , H_L , d_p y ángulo de la sección cónica del reactor están dentro los parámetros que garantizan la fluidización tipo surtidor del grano de cañahua. Los flujos volumétricos de aire aumentan a mayores H_L y d_i , las presiones de ingreso de aire también incrementan a mayores H_L y menores d_i . Las velocidades de ingreso de aire no dependen de D_c e incrementan a menores d_i , las velocidades que se requieren para romper el lecho y generar un surtidor son mayores que las que se requieren para operar un lecho surtidor verdadero y estable.

Los mayores porcentajes de remoción de masa de la superficie del grano de cañahua se dan en los primeros 5 minutos del proceso, siendo la variedad Illimani la que reporta mayores porcentajes de remoción. En las mejores condiciones de operación del LFTS, el tiempo de procesamiento requerido para remover el perigonio y episperma del grano de cañahua se incrementa con d_i . Se precisan aproximadamente 25 min para remover el material de la superficie del grano de la variedad Illimani hasta niveles similares a la de la muestra de referencia, a mayores tiempos de procesamiento la integridad del grano se ve comprometida, con d_i igual a 1 mm. La remoción del perigonio y episperma sucede debido a las fuerzas de choque y fricción entre granos de cañahua en el surtidor.

Las muestras de cañahua procesadas de acuerdo con el diseño experimental multifactorial, cuatro factores y 2 niveles por factor: variedad/ecotipo (Illimani y lasta rosada), D_c (7,44 y 14,34 cm), d_i (1 y 3 mm) y H_L (7,5 y 12,5 cm) influyen significativamente en el porcentaje de remoción del perigonio y episperma, el consumo específico de energía y la calidad morfológica y nutricional del grano de cañahua, con un nivel de confianza del 95 %. Las mejores y mayores eficacias de remoción de las capas que cubren el grano de cañahua corresponden a las condiciones de operación del LFTS con menores d_i y D_c y mayores H_L , aunque estas condiciones demandan precisamente los mayores consumos específicos de energía por unidad de masa de cañahua tratada.

Como conclusión general se puede afirmar que la aplicación de un LFTS a escala laboratorio es idónea para la remoción del perigonio y episperma del grano de variedades y ecotipos de cañahua y es una alternativa a los procesos tradicionales y convencionales que se usan actualmente.

5. BIBLIOGRAFÍA

- [1] W. Rojas, M. Pinto and J. L. Soto, "Distribucion geografica y variabilidad genetica de los granos andinos," in *Granos Andinos: Avances, logros y experiencias desarrolladas en quinua, canahua y amaranto en Bolivia*, Roma, Bioversity International, 2010, pp. 11-38.
- [2] D. W. Gade, "Ethnobotany of Cañihua (*Chenopodium pallidicaule*), Rustic Seed Crop of the Altiplano," *Economic Botany*, vol. 24, no. 1, pp. 55-61, 1970.
- [3] W. Rojas, M. Pinto, J. L. Soto and E. Alcocer, "Valor nutricional, agroindustrial y funcional de los granos andinos," in *Granos Andinos: Avances, logros y experiencias desarrolladas en quinua, canahua y amaranto en Bolivia*, Roma, Bioversity International, 2010, pp. 151-164.
- [4] P. L. White, E. Alvistur, C. Días, E. Viñas, H. S. White and C. Collazos, "Nutrient Content and Protein Quality of Quinoa and Cañihua, Edible Seed Products of the Andes Mountains," *Agricultural and Food Chemistry*, vol. 3, no. 6, pp. 531-534, 1955.
- [5] R. Repo-Carrasco, C. Espinoza and S.-E. Jacobsen, "Nutritional Value and Use of the Andean Crops Quinoa (*Chenopodium quinoa*) and Kañiwa (*Chenopodium pallidicaule*)," *Food Reviews International*, vol. 19, no. 1 & 2, pp. 179-189, 2003.
- [6] A. de Bruin, "Investigation of the Food Value of Quinoa and Cañihua Seed," *Journal of Food Science*, vol. 29, no. 6, pp. 872-876, 1964.
- [7] B. Estrella and D. Elisa, "Propiedades nutricionales y antioxidantes de la cañihua (*Chenopodium pallidicaule* Aellen)," *Revista de Investigación Universitaria*, vol. 2, no. 1, pp. 47-53, 2013.
- [8] M. J. Peñarrieta, J. A. Alvarado, B. Åkesson and B. Bergenståhl, "Total antioxidant capacity and content of flavonoids and other phenolic compounds in canihua (*Chenopodium pallidicaule*): An Andean pseudocereal," *Molecular Nutrition & Food Research*, vol. 52, pp. 708-717, 2008.
- [9] L. Rastrelli, P. Saturnino, O. Schettino and A. Dini, "Studies on the Constituents of *Chenopodium pallidicaule* (Cañihua) Seeds. Isolation and Characterization of Two New Flavonol Glycosides," *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, vol. 43, pp. 2020-2024, 1995.
- [10] R. Repo-Carrasco-Valencia, J. K. Hellström, J.-M. Pihlava and P. H. Mattila, "Flavonoids and other phenolic compounds in Andean indigenous grains: Quinoa (*Chenopodium quinoa*), kañiwa (*Chenopodium pallidicaule*) and kiwicha (*Amaranthus caudatus*)," *Food Chemistry*, vol. 120, pp. 128-133, 2010.
- [11] R. Repo-Carrasco, *Cultivos Andinos. Importancia nutricional y posibilidades de procesamiento*, Cusco: Bartolomé de La Casas, 1988.
- [12] L. Rastrelli, F. De Simone, O. Schettino and A. Dini, "Constituents of *Chenopodium pallidicaule* (Cañihua) Seeds: Isolation and Characterization of New Triterpene Saponins," *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, vol. 44, pp. 3528-3533, 1996.
- [13] R. Repo-Carrasco-Valencia, A. Acevedo de La Cruz, J. C. Icochea Alvarez and H. Kallio, "Chemical and Functional Characterization of Kañiwa (*Chenopodium pallidicaule*) Grain, Extrudate and Bran," *Plant Foods for Human Nutrition*, vol. 64, pp. 94-101, 2009.
- [14] D. Y. Gallego Villa, L. Russo, K. Kerbab, M. Landi and L. Rastrelli, "Chemical and nutritional characterization of *Chenopodium pallidicaule* (cañihua) and *Chenopodium quinoa* (quinoa) seeds," *Emir. J. Food Agric.*, vol. 26, no. 7, pp. 609-615, 2014.
- [15] L. O. Ruiz Mita, "Estudio de Mercado de la Cañahua," Fundación PROINPA, La Paz, 2014.
- [16] C. C. Quiroga Ledezma, C. R. Escalera Vasqu ez, J. L. Arteaga Weill, J. F. Montaño Anaya and C. R. Nogales Carvajal, *Beneficiado en seco de la quinua. Proyecto de prefactibilidad para el beneficiado en seco de quinua con un lecho tipo surtidor*, La Paz: PIEB, 2011.
- [17] C. Quiroga Ledezma and R. Escalera Vasquez, "Evaluacion de la calidad nutricional y morfologia del grano de variedades amargas de quinua beneficiadas en seco, mediante el novedoso empleo de un reactor de lecho fluidizado de tipo surtidor," *Investigacion & Desarrollo*, vol. 1, no. 10, pp. 49-62, 2010.
- [18] C. R. Escalera Vasquez, C. C. Quiroga Ledezma and L. Arteaga Weill, "Desarrollo y desempeño de un proceso de beneficiado en seco de variedades amargas de quinua basado en la aplicación de un lecho fluidizado de tipo surtidor (LFTS)," *Investigación & Desarrollo*, vol. 1, no. 10, pp. 32-48, 2010.
- [19] A. O. A. C. International, *Official Methods of Analysis*, Maryland: AOAC, 1997.

- [20] X. Bi, "Initiaton of spouting," in *Spouted and Spout-Fluid Beds Fundamentals and Applications*, New York, Cambridge University Press, 2011, pp. 17-28.
- [21] N. Epstein, "Empirical and analytical hydrodynamics," in *Spouted and Spout-Fluid Beds Fundamentals and Applications*, New York, Cambridge University Press, 2011, pp. 29-56.
- [22] N. Epstein and J. R. Grace, "Introduction," in *Spouted and Spout-Fluid Beds Fundamentals and Applications*, New York, Cambridge University Press, 2011, pp. 1-16.
- [23] P. E. Gishler and K. B. Mathur, "Method of Contacting Solid Particles with Fluids". United States of America Patent 2,786,280, 26 March 1957.