

Universidad Nacional Rosario
Facultad de Ciencias Exactas, Ingeniería y Agrimensura



Tesis doctoral

Optimización de las condiciones del proceso de acondicionamiento y obtención de harina integral del grano de quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd.) en relación a su capacidad antioxidante y antimicrobiana

Julia Luisetti

Directora: Dra. María Cristina Ciappini

Co-director: Dr. Pablo Luis Faccendini

*Tesis presentada en la Facultad de Ciencias Exactas, Ingeniería y Agrimensura,
en cumplimiento parcial de los requisitos para optar al título de*

Doctor en Ingeniería

Junio 2022

Certifico que el trabajo incluido en esta tesis es el resultado de tareas de investigación originales y que no ha sido presentado para optar a un título de postgrado en ninguna otra Universidad o Institución.



Julia Luisetti

Agradecimientos

En primera instancia quiero agradecerle a Roque Masciarelli, quien me sumergió en el camino de la investigación y me invitó a ser parte del Centro de Investigación y Desarrollo en Tecnología de los Alimentos (CIDTA). Junto con él, agradezco profundamente a Silvia Stancich y Fernando Stoppani, que desde un principio me apoyaron y alentaron en mis elecciones. A Héctor Lucero por su amistad y apoyo incondicional, por enseñarme y acompañarme desde un principio junto con Roque a lo largo de todos estos años.

A mi directora de Tesis y actual directora del CIDTA, María Cristina Ciappini, que estuvo en todo momento para guiarme, apoyarme, brindarme su tiempo, supervisión, conocimientos y experiencias. A María Florencia Balzarini, por su generosidad y siempre buena predisposición para alentarme con este trabajo, como así también dedicarme su tiempo.

A las personas que integran el CIDTA por compartir conmigo el trabajo diario.

Agradezco enormemente a mi familia, la que me acompaña desde siempre en todo lo que me propongo. A mis padres por brindarme amor y apoyo incondicional, mostrándome siempre los valores y el ejemplo del trabajo. A mis amigas, hermanos ya mi compañero de vida Martin, por su gran amor, compañía, paciencia y por acompañarme en este camino que transitamos juntos.

Resumen

La quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd) es considerada un pseudocereal. Constituye un cultivo estratégico para contribuir a la seguridad y soberanía alimentaria debido a su calidad nutritiva, amplia variabilidad genética, adaptabilidad y bajo costo de producción. Contiene compuestos bioactivos, como los compuestos fenólicos que contribuyen a diversas actividades fisiológicas, antimicrobianas, antiinflamatorias y anticancerígenas. El grano entero puede incorporarse a sopas, ensaladas y guisos, pero también puede ser molido para obtener una harina, que se emplea en la elaboración de diversos panificados o pueden maltearse y fermentar para obtener cerveza. Además, las semillas pueden ser germinadas (brotes para ensaladas), tostadas o infladas para elaborar alimentos para desayuno y snacks. En general, es necesario exponer los granos de cereales y pseudocereales al secado, con el propósito de adecuar el contenido de humedad para asegurar su conservación. Asimismo, las condiciones de secado de estos granos pueden originar variaciones en el rendimiento de la molienda, concomitantes con la cantidad y el valor de los productos y subproductos que se obtengan. Los alimentos deshidratados siempre han sido utilizados para consumo directo en épocas de escasez, sin embargo, actualmente están siendo muy utilizados para la formulación de otros tipos de alimentos, ya sea como ingredientes de alimentos funcionales, de ahí su importancia. En consecuencia, es necesario evaluar el efecto de la operación de secado y los parámetros que la regulan, sobre el rendimiento y sobre las propiedades antioxidantes y antimicrobianas de la harina de quinoa, obtenida por molienda de los granos secados. Con el objetivo de preservar la retención de componentes funcionales, como los antioxidantes, una herramienta adecuada para definir las condiciones operativas de secado es el uso de modelos matemáticos de simulación y optimización validados. En este contexto, se propuso optimizar las condiciones del proceso de acondicionamiento y obtención de harina integral del grano de Quínoa (*Chenopodium Quínoa* Willd variedad Hualhuas) en relación a su capacidad antioxidante y antimicrobiana. Para ello se realizaron experiencias de secado a las temperaturas de 40°, 60° y 80°C y dos velocidades de aire de secado, 0,2 y 0,7 m/s. Se aplicó un modelo de difusión de Fick de transferencia de humedad, para estimar la evolución temporal de la distribución radial del contenido de humedad local en los granos de quinoa durante el secado. Fue posible modelar esta operación unitaria, obteniendo una alta precisión entre los datos experimentales y los estimados mediante la aplicación del modelo. Se obtuvo el coeficiente de difusividad efectiva, que resultó influenciado por la temperatura del grano y el coeficiente de transferencia de masa que resultó afectado por la velocidad del aire de secado. Los coeficientes de difusión obtenidos para los granos de quinoa se encuentran dentro de los intervalos reportados por la bibliografía. Los resultados de los tratamientos térmicos a diferentes condiciones de temperatura y velocidad aplicados sobre las semillas,

mostraron que los mayores incrementos en los niveles de actividad antioxidante y en el contenido de compuestos fenólicos totales, se alcanzaron utilizando temperaturas de secado de 80°C. En cambio, el aumento de la temperatura de secado produjo una disminución en el contenido de flavonoides. Ninguno de los extractos hidroalcohólicos obtenidos a partir de las harinas de quinoa presentó actividad antimicrobiana, para las concentraciones ensayadas. Para el modelo, se obtuvieron valores de Error Cuadrático Medio (ECM) bajos y altos de R^2 , siendo el modelo satisfactorio para describir el proceso de secado. Como se esperaba, el uso de temperaturas de secado más altas promueve una mayor movilidad del agua en los sistemas alimentarios desde el interior hasta la superficie y aumenta la difusividad efectiva de la transferencia de masa.

Palabras clave: quinoa, secado convectivo, modelo matemático, harina de quinoa, antioxidantes.

Abstract

Quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd) is considered a pseudocereal. It constitutes a strategic crop to contribute to food security and sovereignty due to its nutritional quality, extensive additional genetics, adaptability and low production cost. It contains bioactive compounds, such as phenolic compounds and flavonoids that contribute to physiological, antimicrobial, anti-inflammatory and anticancer activities. The whole grain can be added to soups, salads, and stews, but it can also be ground into flour, which is used in various baked goods, or can be malted and fermented into beer. In addition, the seeds can be sprouted (sprouts for salads), roasted or puffed to make breakfast foods and snacks. In general, it is necessary to dry cereals and pseudocereals grains, in order to adjust the moisture content to ensure their conservation. Likewise, the drying conditions of these grains can cause variations in the milling yield, concomitant with the quantity and value of the products and by-products that are obtained. Dehydrated foods have always been used for direct consumption in times of scarcity, however, they are currently being widely used for the formulation of other types of food, either as functional food ingredients, hence their importance. Consequently, it is necessary to evaluate the effect of the drying operation and the parameters that regulate it, on the yield and on the antioxidant and antimicrobial properties of quinoa flour, obtained by grinding the dried grains. In order to preserve the retention of functional components, such as antioxidants, a suitable tool to define the drying operating conditions is the use of validated mathematical simulation and optimization models. In this context, it was proposed to optimize the conditions of the process of conditioning and obtaining whole grain Quinoa flour (*Chenopodium Quinoa* Willd var. Hualhuas) in relation to its antioxidant and antimicrobial capacity. For this, drying experiences were carried out at temperatures of 40°, 60° and 80°C and two drying air speeds, 0.2 and 0.7 m/s. A Fick diffusion model of moisture transfer was applied to estimate the time evolution of the radial distribution of local moisture content in quinoa grains during drying. It was possible to model this unitary operation, obtaining a high precision between the experimental data and the estimates through the application of the model. The effective diffusivity coefficient was obtained, which was influenced by the grain temperature and the mass transfer coefficient, which was affected by the speed of the drying air. The diffusion coefficients obtained for the quinoa grains are within the intervals reported by the bibliography. The results of heat treatments at different temperature and speed conditions applied to the seeds showed that the highest increases in antioxidant activity levels and in the content of total phenolic compounds were achieved using drying temperatures of 80°C. On the other hand, the increase in the drying temperature produced a decrease in the flavonoid content. None of the hydroalcoholic extracts obtained from the quinoa flours presented antimicrobial activity, for the concentrations tested. For the model, low and high Mean Squared

Error(MSE) values of R^2 were obtained respectively, being the model satisfactory to describe the drying process. As expected, the use of higher drying temperatures promotes greater mobility of water in food systems from the interior to the surface and increases the effective diffusivity of mass transfer.

Keywords: quinoa, convective drying, mathematical model, quinoa flour, antioxidants.

ÍNDICE

Figuras	iv
Tablas	vii
Abreviaturas y símbolos	viii
1. Introducción	1
2. Objetivos	
2.1. Objetivos generales	3
2.2. Objetivos específicos	3
3. Antecedentes	
3.1. La quinoa	4
3.1.1. Generalidades	4
3.1.2. Origen	5
3.1.3. Cultivo	6
3.1.4. Producción	8
3.1.5. Aportes potenciales de la quinoa a la seguridad y soberanía alimentaria	11
3.1.6. Aspectos nutricionales	11
3.1.7. Saponinas	12
3.1.8. Compuestos bioactivos	13
3.1.9. Usos en la alimentación	15
3.2. Acondicionamiento del grano	15
3.2.1. Secado convectivo	17
3.2.1.1. Curvas de secado	18
3.2.1.2. Factores que afectan la velocidad de secado	21
3.2.1.3. Modelado matemático de la operación de secado	22
3.2.1.4. Difusividad efectiva de la humedad	23
3.2.2. Molienda y tamización	26
3.2.2.1. Equipos utilizados para la reducción de tamaño	27
3.2.2.2. Equipos utilizados para la reducción de tamaño en granos de quinoa. Molinos	27
3.2.2.3. Harina de quinoa	32

4. Desarrollo	
4.1. Materia prima	34
4.2. Experiencias de secado	34
4.3. Sistema de modelado algebraico general (GAMS) y consideraciones para su aplicación al secado de granos de quinoa	35
4.3.1. Coeficiente de difusividad efectiva	38
4.3.2. Modelo de transferencia de masa en granos de quinoa	38
4.3.3. Estrategias de resolución	39
4.3.4. Parámetros del modelo de secado para el grano de quinoa	40
4.3.5. Validación del modelo aplicado	41
4.4. Molienda del grano	41
4.5. Tamizado de la harina	42
4.6. Determinaciones fisicoquímicas	43
4.6.1. Determinación de la humedad del grano	43
4.6.2. Determinación de saponinas del grano	43
4.6.3. Determinación de grasas totales en la harina	44
4.6.4. Determinación de proteínas totales en la harina	45
4.6.5. Determinación de cenizas en la harina	46
4.6.6. Determinación de la capacidad antioxidante y antimicrobiana	47
4.6.6.1. Preparación de los extractos	47
4.6.6.2. Determinación de los compuestos fenólicos totales	49
4.6.6.3. Determinación de flavonoides en los extractos en los extractos	51
4.6.6.4. Capacidad antioxidante de los extractos	52
4.6.6.5. Capacidad antimicrobiana de los extractos	53
4.7. Análisis estadístico de los datos	54
5. Resultados y discusión	
5.1. Humedad del grano	55
5.2. Contenido de saponinas	55
5.3. Resultados experimentales del secado de quinoa	56
5.4. Aplicación del modelo de secado	59

5.4.1. Efecto de las condiciones de secado sobre la difusividad efectiva y el coeficiente de transferencia de materia	60
5.4.2. Validación del modelo	62
5.5. Caracterización de la harina de quinoa	63
5.6. Contenido de grasa total en la harina de quinoa	67
5.7. Contenido de proteínas totales en la harina de quinoa	67
5.8. Contenido de cenizas en la harina de quinoa	69
5.9. Contenido de compuestos fenólicos totales	69
5.10. Contenido de flavonoides	75
5.11. Capacidad antioxidante	79
5.12. Capacidad antimicrobiana	83
6. Conclusiones	87
Publicaciones y presentaciones a congresos	88
Bibliografía	90
ANEXO	109

Índice de figuras

3.1. Planta de quinoa	6
3.2. Planta de quinoa y sus partes	7
3.3. a) Anatomía del grano de quinoa b) Corte longitudinal del grano	7
3.4. Comparación de la participación en la producción de Quinoa	9
3.5. Principales productores de Quinoa en 2019	9
3.6. Principales países importadores de quinoa de Bolivia y Perú	10
3.7. Expansión en la producción del cultivo de quinoa	10
3.8. Algunos fenoles identificados en quinoa	14
3.9. Movimiento de la humedad durante el secado	18
3.10. Curva de los datos de humedad libre en función del tiempo	19
3.11. Curva de velocidad de secado en función del contenido de humedad	19
3.12. Tipos de fuerza utilizados en equipos de reducción de tamaño	26
3.13. Molino de martillos	28
3.14. Molino de rodillos	29
3.15. Molino de atrición. a) de un disco; b) doble disco	30
3.16. Molino de volteo	31
4.1. Estufa de secado de convección forzada	35
4.2. Mediciones del largo, ancho y espesor del grano de quinoa	37
4.3. Molino de cuchillas	42
4.4. Equipo tamizador Ro Tap	42
4.5. Equipo Soxhlet para determinación de grasas totales	44
4.6. Bloque de digestión y de destilación del equipo Kjeldahl	45
4.7. Mufla eléctrica	46
4.8. Equipo de extracción Batch	48
4.9. Contenido de compuestos fenólicos totales para diferentes tiempos de extracción	49
4.10. Extractos obtenidos para distintos tiempos de extracción	49
4.11. Diagrama del método de cuantificación de compuestos fenólicos totales de extractos de harina de quinoa	50
4.12. Curva de calibración para la determinación de compuestos fenólicos totales en los extractos de harina de quinoa	50

4.13. Diagrama del método de cuantificación de flavonoides de los extractos de harina de quinoa	51
4.14. Curva de calibración para la determinación de flavonoides en los extractos de harina de quinoa	52
4.15. Diagrama del método de determinación de la capacidad antioxidante de los extractos de harina de quinoa	53
4.16. Curva de calibración para la determinación de la capacidad antioxidante de los extractos de harina de quinoa	53
5.1. Variación del contenido de humedad con el tiempo de secado para los granos de quinoa a diferentes condiciones de operación a) $v_1 = 0,2$ m/s; b) $v_2 = 0,7$ m/s)	57
5.2. Resumen del modelo matemático del proceso que representa la cinética de secado de granos de quinoa	59
5.3. Prueba de comparación de Tukey para el coeficiente de difusión considerando las tres temperaturas y las dos velocidades del aire de secado	60
5.4. Prueba de comparación de Tukey para el coeficiente de transferencia de materia considerando las tres temperaturas y las dos velocidades del aire de secado	61
5.5. Curvas de secado experimentales y estimadas por el modelo para las tres temperaturas de secado ensayadas. a) velocidad del aire de secado, $v_1 = 0,2$ m/s; b) velocidad del aire de secado, $v_2 = 0,7$ m/s	63
5.6. Harina obtenida en la molienda	63
5.7. Curva granulométrica para la harina de quinoa obtenida	64
5.8. Prueba de comparación de Tukey para el rendimiento de la molienda para las dos velocidades del aire de secado	66
5.9. Prueba de comparación de Tukey para el rendimiento de la molienda para las tres temperaturas del aire de secado	66
5.10. Test de comparación de Tukey para el contenido de compuestos fenólicos totales en las distintas velocidades del aire de secado ensayadas	72
5.11. Test de comparación de Tukey para el contenido de compuestos fenólicos totales en las distintas temperaturas del aire de secado ensayadas	72
5.12. Contenido de compuestos fenólicos totales para la harina sin tratar y la harina procesada a temperaturas de 40 °C. 60 °C y 80 °C a la velocidad $v_1 = 0,2$ m/s del aire	73

de secado. Letras diferentes indican diferencias significativas	
5.13. Contenido de compuestos fenólicos totales para la harina sin tratar y la harina procesada a temperaturas de 40 °C, 60 °C y 80 °C a la velocidad $v_2=0,7$ m/s del aire de secado. Letras diferentes indican diferencias significativas	73
5.14. Gráfico de barras del contenido de flavonoides de la harina de quinoa sin tratar y procesada. Velocidad del aire de secado $v_1= 0,2$ m/s y temperaturas de secado: 40 °C, 60 °C y 80 °C. Letras diferentes indican diferencias significativas	76
5.15. Gráfico de barras del contenido de flavonoides de la harina de quinoa sin tratar y procesada. Velocidad del aire de secado $v_2= 0,7$ m/s y temperaturas de secado: 40 °C, 60 °C y 80 °C. Letras diferentes indican diferencias significativas	77
5.16. Test de comparación de Tukey para el contenido de flavonoides en función de las velocidades del aire de secado	77
5.17. Test de comparación de Tukey para el contenido de flavonoides en función de las temperaturas del aire de secado	78
5.18. Correlación entre el contenido de flavonoides y compuestos fenólicos totales	78
5.19. Gráfico de barras de la capacidad antioxidante de la harina de quinoa sin tratar y procesada. Velocidad del aire de secado $v_1= 0,2$ m/s y temperaturas de secado: 40 °C, 60 °C y 80 °C. Letras diferentes indican diferencias significativas ($p < 0,05$)	81
5.20. Gráfico de barras de la capacidad antioxidante de la harina de quinoa sin tratar y procesada. Velocidad del aire de secado $v_2= 0,7$ m/s y temperaturas de secado: 40 °C, 60 °C y 80 °C. Letras diferentes indican diferencias significativas ($p < 0,05$)	81
5.21. Correlación entre el contenido de compuestos fenólicos totales y la capacidad antioxidante de los extractos hidroalcohólicos de harina de quinoa	82
5.22. Test de comparación de Tukey para la capacidad antioxidante de la quinoa en función de las velocidades del aire de secado	83
5.23. Test de comparación de Tukey para la capacidad antioxidante de la quinoa en función de la temperatura de los tratamientos térmicos	84
5.24. Determinación de la capacidad antimicrobiana de los extractos frente a la bacteria <i>Escherichia coli</i>	84

Índice de tablas

3.1. Granulometría de harina de quinoa	33
4.1. Dimensiones y esfericidad del grano de quinoa	37
4.2. Parámetros del modelo matemático	41
5.1. Porcentaje de saponinas obtenidos en el grano de quinoa	56
5.2. Tiempos de secado de los granos para los tratamientos ensayados	58
5.3. Datos de ajuste obtenido por aplicación del modelo de secado para los ensayos con quinoa	60
5.4. Rendimiento obtenido para la molienda de la harina de quinoa	64
5.5. Rendimientos de la harina de quinoa para los distintos tratamientos ensayados para el retenido en malla 50	65
5.6. Valores del contenido de fenoles totales en extractos hidroalcohólicos de harina de quinoa obtenida mediante distintos tratamientos de secado	70
5.7. Contenido de flavonoides en extractos hidroalcohólicos de harina de quinoa obtenida mediante distintos tratamientos de secado	75
5.8. Capacidad antioxidante de los extractos hidroalcohólicos de harina de quinoa obtenida mediante distintos tratamientos de secado	79
5.9. Codificación de las muestras de extractos hidroalcohólicos para los ensayos de actividad antimicrobiana en función de los tratamientos térmicos ($v_1= 0,2$ m/s; $v_2= 0,7$ m/s)	84

Abreviaturas y símbolos

Símbolos

A	Coeficiente empírico (Eq. (4.3)) (s^{-1})
B	Coeficiente empírico (Eq. (4.3)) (K)
C	Coeficiente empírico (Eq. (4.3)) (g de muestra seca . g de agua ⁻¹)
a	Coeficiente empírico adimensional (Eq. (3.10))
b	Coeficiente empírico adimensional (Eq. (3.10))
c	Coeficiente empírico adimensional (Eq. (3.10))
cp	Calor específico (J. g ⁻¹ °C ⁻¹)
D ₀	Coeficiente de difusión de Arrhenius (m ² . s ⁻¹)
D _{eff}	Difusividad efectiva (m ² . s ⁻¹)
D _g	Diámetro medio geométrico (mm)
d _{eq}	Diámetro equivalente (cm)
D _w	Coeficiente de difusión de vapor de agua en el aire (cm ² . s ⁻¹)
AS	Área de evaporación
E _a	Energía de activación para la difusión de la humedad (KJ. mol ⁻¹)
ECM	Error cuadrático medio
G	Flujo másico de aire (g. cm ⁻² . min ⁻¹)
HS	Contenido local de humedad (g de agua. g de muestra seca ⁻¹)
\overline{HS}	Contenido radial de humedad promedio (g de agua. g de muestra seca ⁻¹)
k	Coeficiente de transferencia de masa (cm. min ⁻¹)
A	Ancho (mm)
e	Espesor (mm)
L	Largo (mm)

M	Número de nodos en la dirección radial
m	Masa (Kg)
N	Número de nodos ten la dirección temporal
R	Constante universal de los gases ($J. \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1} . \text{mol}^{-1}$)
R_p	Radio de la partícula (mm)
r	Coordenada radial (m)
Δr	Intervalo en la dirección radial (m)
T	Temperatura ($^{\circ}\text{C}$)
t	Tiempo (min)
Δt	Intervalo de tiempo entre los nodos temporales en el secado (min)
V	Volumen (m^3)
v	velocidad del aire ($\text{m} . \text{s}^{-1}$)

Abreviaturas

CPT	Contenido de Fenoles totales (mg/ml o kg/ m^3)
AGE	Ácido Gálico Equivalente
QE	Quercetina Equivalente
TE	Trolox Equivalente
DPPH	2,2-diphenyl-1-picrilhidrazil

Grupos adimensionales

Nu	Número de Nusselt
Pr	Número de Prandtl
Re	Número de Reynolds
Sc	Número de Schmidt
Sh	Número de Sherwood

Símbolos griegos

μ	Viscosidad ($\text{g} \cdot \text{cm}^{-1} \text{min}^{-1}$)
ρ	Densidad ($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)
ϕ	Esfericidad adimensional

Subíndices

a	aire
eq	equilibrio
f	condición final
o	condición inicial
s	sólido
prom	promedio

Capítulo 1

Introducción

1. Introducción

En la actualidad es universalmente aceptado el término alimento funcional para señalar a aquellos que además de presentar propiedades nutricionales contienen compuestos bioactivos, que producen efectos benéficos y/o reducen el riesgo de enfermedades crónicas (Barazarte *et al.*, 2015).

La quínoa (*Chenopodium quínoa* Willd) contiene gran cantidad de compuestos bioactivos, como compuestos fenólicos (Valencia *et al.*, 2017; Abderrahim *et al.*, 2012; Fischer *et al.*, 2013; Stikicet *et al.*, 2012). Estos, incluyendo los ácidos fenólicos, flavonoides y taninos, son compuestos bioactivos que hacen que los metabolitos secundarios de la planta contribuyan a diversas actividades fisiológicas antimicrobianas, antiinflamatorias, antitumorales y anticancerígenas. Las propiedades antioxidantes de los preparados naturales protegen a las biomoléculas frente al daño oxidativo, a través de diferentes mecanismos.

Su uso como alimento humano está habilitado por el Código Alimentario Argentino (CAA, 2020), en el Artículo 682 (Resolución Conjunta SPR N°261/2014 y SAGyP N° 228/2014), entendiéndose por quinoa o quinua a las semillas sanas, limpias y bien conservadas del género *Chenopodium quinua* Willd. Se utiliza habitualmente como grano o como harina, definida el Artículo 682 bis (CAA, 2020).

Su consumo también aporta carbohidratos, proteínas, lípidos y es rica en fibra; posee un alto contenido de vitaminas del complejo B, C y E y de minerales, tales como: hierro, fósforo, potasio y calcio. Sin embargo, posee saponinas, triterpenoides glucosídicos de alto peso molecular que le otorgan gusto amargo y deben eliminarse antes de su consumo como alimento (Portillo, 2020). Estos contenidos varían de acuerdo a la variedad de quinoa de la cual se trate. Los antecedentes publicados no siempre indican la variedad de quinoa que utilizaron como material de trabajo.

Para su adecuada conservación, como ocurre con los cereales y oleaginosas, se requiere adecuar su humedad a valores que eviten su deterioro. Aun es frecuente la práctica del secado artesanal, que se realiza de forma natural, exponiendo los granos al aire y al sol, en una capa fina (Meyhuay, 2013).

Se considera de utilidad generar información nutricional del grano y de la harina de quinoa de alguna variedad conocida y cultivada en Argentina, integrada con datos fehacientes acerca del acondicionamiento del grano, su secado industrial y la molienda.

Argentina no tiene variedades propias de quinua, si bien posee una colección de 90 accesiones de quinuas nativas en la Red de Bancos de Germoplasma de INTA, que se encuentran en proceso de caracterización (Vidueiros *et al.*, 2015).

En el INTA de Bordenave, Buenos Aires, se estudian variedades que provienen de Chile. En San Juan, el Instituto ha trabajado en sus campos experimentales, con cuatro ecotipos chilenos: Villarica (originaria del sur), Faro y Cahuil (zona costera central), Cancosa (altiplano norte) (Rodríguez, 2019) y Regalona (Rivas, 2013). Otras variedades detectadas son Sajama y Ratuqui (González, 2013) y KVL, de origen chileno (Astiz, 2013). Las más utilizadas en Salta son las variedades CICA 17 y CICA 19, seleccionada en Puno, Perú, de donde también es originaria la variedad Hualhuas. Esta última, por sus características agronómicas, tiene ventajas para el agricultor, se industrializa y se comercializa ampliamente en América (Ramos Gómez y Peña Rivera, 2019). Se encontraron escasos antecedentes publicados para esta variedad (Cerrón Mercado, 2013; Bonilla *et al.*, 2019), por lo que fue seleccionada para llevar a cabo este trabajo de tesis.

Capítulo 2

Objetivos

2. Objetivos

2.1. Objetivos generales

Considerando el valor nutricional y el impacto que puede producir la quinoa si se la incorpora en la dieta cotidiana, en este trabajo de Tesis se propuso optimizar las condiciones del proceso de acondicionamiento y obtención de harina integral del grano de Quinoa (*Chenopodium Quinoa* Willd var. Hualhuas) en relación a su capacidad antioxidante y antimicrobiana.

2.2. Objetivos específicos

- Optimizar las condiciones de pretratamiento del grano de quinoa (*Chenopodium Quinoa* Willd var. Hualhuas) para la eliminación de saponinas y la adecuación del contenido de humedad, evaluando la influencia de las distintas variables de proceso y su impacto en el producto final.
- Establecer condiciones para la molienda del grano de quinoa (*Chenopodium Quinoa* Willd var. Hualhuas) para la obtención de harinas y caracterizarlas.
- Determinar la concentración de compuestos fenólicos presentes en los extractos hidroalcohólicos de las harinas integrales obtenidas a partir del grano de quinoa (*Chenopodium Quinoa* Willd var. Hualhuas) acondicionado, para caracterizar las harinas obtenidas.
- Determinar la capacidad antioxidante de extractos hidroalcohólicos obtenidos a partir de las harinas.
- Determinar la capacidad antimicrobiana de los diferentes extractos hidroalcohólicos obtenidos a partir de las harinas.

Capítulo 3

Antecedentes

3. Antecedentes

3.1. La quinoa

3.1.1. Generalidades

La Organización de las Naciones Unidas (ONU) declaró al año 2013 como el “Año Internacional de la quinoa”, con el propósito de generar iniciativas en investigación acerca de las prácticas ancestrales en el cultivo, su propagación, producción, manejo pos-cosecha, agroindustria, comercialización e introducción en los sistemas agroalimentarios sostenibles, con el fin de perfilar este cultivo como principal alimento para la seguridad alimentaria en varias regiones del mundo (Bazile y Santivañez, 2014), logrando así incluirlo dentro de la lista de cultivos promisorios más importantes de las producciones agrícolas sostenibles (Cogliatti y Heter, 2016).

Actualmente, la industria de los alimentos ha mostrado un importante cambio en sus tendencias de desarrollo hacia la generación de nuevos productos, siendo algunos de ellos los llamados alimentos funcionales, productos nutracéuticos, fitoquímicos y alimentos prebióticos. El creciente interés en los productos fitoquímicos se ha dado principalmente por la cada vez mayor desaprobación y desuso de aditivos y conservadores sintéticos en los alimentos y en los procesos alimenticios (Svoboda *et al.*, 2006). Asimismo, se ha incrementado el interés de utilizar productos fitoquímicos en dietas para consumo humano por su reconocido efecto benéfico en la salud (Nash, 2004).

Su uso como alimento humano está habilitado por el Código Alimentario Argentino (CAA), en el Artículo 682 (Resolución Conjunta SPReI N°261/2014 y SAGyP N° 228/2014), entendiéndose por quinoa o quínoa a las semillas sanas, limpias y bien conservadas del género *Chenopodium quínoa* Willd. El Artículo 682 bis, define a la harina de quinoa o quínoa como “el producto obtenido por la molienda de las semillas desecadas, sanas y limpias de *Chenopodium quínoa* Willd, privadas mecánicamente o por acción de álcalis de sus tegumentos”.

Una de las áreas más promisorias para el desarrollo de alimentos funcionales se fundamenta en la posibilidad de modular los sistemas redox y antioxidante del organismo (Roberfroid, 2000). Por esta razón, en la actualidad muchos alimentos funcionales tienen como finalidad incrementar el aporte de antioxidantes naturales en la dieta. En este contexto, la adición de extractos vegetales ricos en compuestos fenólicos, ha sido propuesta como una estrategia factible para el desarrollo de alimentos funcionales con una actividad antioxidante incrementada (Larrosa *et al.*, 2002). De hecho,

en el campo del desarrollo de nuevos ingredientes, se está produciendo un aumento en la producción de este tipo de extractos vegetales, en los cuales los compuestos bioactivos son aislados y concentrados para su uso como suplementos y/o para la formulación de alimentos funcionales (Pszczola, 2003).

El amplio espectro de flavonoides y ácidos fenólicos colocan a la quinoa como un potencial “nutracéutico” o “alimento funcional”, al proporcionar beneficios médicos o para la salud, incluyendo la prevención y tratamiento de enfermedades o padecimientos crónicos (Razzeto *et al.*, 2019).

3.1.2. Origen

La quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd) es un pseudo-cereal domesticado de origen andino, perteneciente a la familia Amaranthaceae, originaria de la región sur de América, principalmente de países como Perú, Ecuador, Chile, Bolivia y Colombia, caracterizada por ser la base económica, social y alimentaria de pueblos indígenas desde hace 4000 años.

Ha sido descrita por primera vez en sus aspectos botánicos por Willdenow en 1778, como una especie nativa de Sudamérica, cuyo centro de origen, se encuentra en los Andes de Bolivia y Perú (Cárdenas, 1944).

Heisser y Nelson (1974) indican hallazgos arqueológicos en Perú y Argentina alrededor del inicio de la era cristiana, mientras que Bollaerd y Latcham, citados por Cárdenas (1944), también hallaron semillas de quinoa en las tumbas indígenas de Tarapacá, Calama, Tiltel y Quillagua, demostrando este hecho que su cultivo data de tiempos muy remotos.

Según Jacobsen (2003), la quinoa es uno de los cultivos más antiguos de la región Andina, con aproximadamente 7000 años, en cuya domesticación y conservación han participado grandes culturas como la Tiahuanacota y la Incaica.

La quinoa fue ampliamente cultivada en la región Andina por culturas precolombinas y sus granos han sido utilizados en la dieta de los pobladores tanto de valles interandinos, zonas más altas (superiores a 3500 msnm), frías (temperaturas promedio de 12 °C) y áridas (350 mm de precipitación promedio), como en el altiplano. Su marginación y reemplazo se inició con la conquista y con la introducción de cereales como la cebada y el trigo (Mujica *et al.*, 2001; Jacobsen y Stolen, 1993). Al respecto, Risi (1997) señala que el cultivo nunca estuvo perdido entre los pobladores andinos, sino que pasaba desapercibido entre los pobladores urbanos de la región, por razones, sobre todo, económicas y sociales.

Risi (1997) señala que la crisis económica de los países andinos que tuvo lugar en la década de los 80, estableció modelos de desarrollo económico diferentes a los tradicionales. Estos contemplaron el desarrollo de sistemas de exportación no tradicionales, teniendo en cuenta la apertura de nuevos mercados en los países de Europa y en los Estados Unidos, sobre todo de productos alimenticios como la quinoa. El bienestar alcanzado por los países desarrollados ha hecho que su mercado se expandiera hacia la búsqueda de alimentos nuevos, muchas veces ligados a cultivos ancestrales. Esta situación ha hecho que la quinoa pasara de ser un cultivo de auto-subsistencia a un producto con potencial de exportación.

3.1.3. Cultivo

La quinoa es una planta anual, dicotiledónea, usualmente herbácea, que alcanza una altura de 0,2 a 3,0 m. El nombre quinoa se aplica tanto a la planta como a la semilla o grano. El color del grano es usualmente amarillo pálido, pero puede variar desde rosa hasta negro de acuerdo a la variedad (Figura 3.1).



Figura 3.1. Planta de quinoa

Fuente: <https://www.flordeplanta.com.ar/plantas/quinoa-caracteristicas-cultivo-y-cuidados/>

Entre las partes de la planta de quinoa se encuentran: el tallo, las hojas, la inflorescencia y el fruto que contiene la semilla o grano (Figura 3.2). Estos últimos tienen formas diferentes: cónicos, cilíndricos y elipsoidales, pudiendo medir desde 1,5 hasta 4 mm de diámetro.

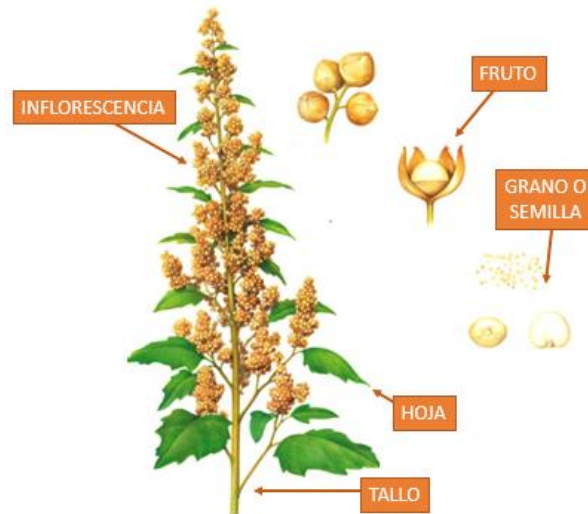


Figura 3.2. Planta de quinoa y sus partes

Prego *et al.* (1998) han diferenciado en el grano tres partes bien definidas, desde el exterior al interior: episperma, embrión y perisperma (Figura 3.3).

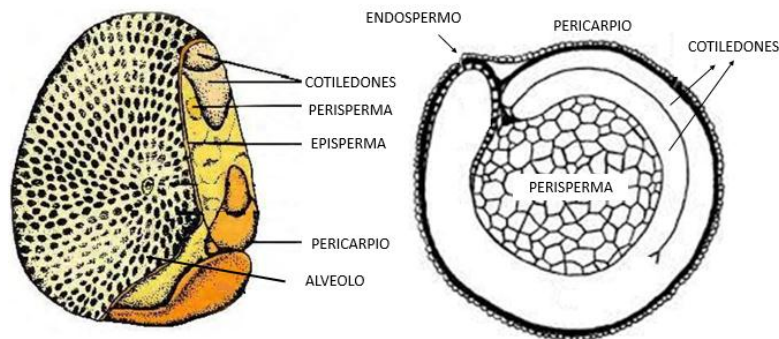


Figura 3.3. a) Anatomía del grano de quinoa b) Corte longitudinal del grano

Fuente: Tapia (1979); Prego *et al.* (1998)

El episperma es una membrana delgada que envuelve la semilla y el perisperma es almidonoso y normalmente de color blanco. El pericarpio del grano está pegado a la semilla y presenta alvéolos. Contiene saponinas, triterpenoides glucosídicos, que es necesario quitar de las semillas antes de su utilización para la alimentación humana (Bazile *et al.*, 2015; Gómez Caravaca *et al.*, 2014; Repo-Carrasco *et al.*, 2009). Algunas poblaciones andinas separan el pericarpio tostando primeramente el grano y frotándolo después en un mortero. Otras formas de extracción de las saponinas, de carácter más industrial, son el método húmedo o combinación de ambos.

El cultivo se adapta a condiciones extremas de clima y suelo, lo que ha permitido colonizar zonas improductivas (Carrasco, 2016). Los cruzamientos naturales que se generaron con *C. carnosulum*, *C. petiolare* y *C. pallidicaule*, le confirieron la capacidad de soportar estrés por salinidad y resistencia a heladas, en mayor proporción (Mujica y Jabobsen, 2006).

Tapia (1979), sostuvieron que la tolerancia al frío depende de la etapa de desarrollo en la que la helada ocurre y de la protección natural de las serranías. Según Espíndola (1986), citado por PROINPA (2011), se hallaron plantas de quinoa que toleran hasta -5°C , cuando se encuentran en la etapa de formación de grano. Estudios realizados indicaron que la quinoa sobrevivió a $-7,8^{\circ}\text{C}$ en etapas iniciales, en Montecillo, México, que se encuentra a 2,245 metros sobre el nivel del mar. Asimismo, tolera suelos de diferente textura y pH, e incluso crece en suelos muy ácidos o fuertemente alcalinos (Mujicay Jacobsen, 1998).

La región Andina y en particular el Altiplano que comparten Perú y Bolivia, presentan una de las ecologías más difíciles para la agricultura moderna (Tapia, 1979). Sin embargo, en ese medio ecológico de escasa interacción biótica, la quinoa pervive. Los límites altitudinales del Altiplano son de 3.000 a 4.000 metros sobre el nivel del mar, donde los suelos son frecuentemente aluviales y de escaso drenaje (Espíndola, 1986 citado por PROINPA, 2011) y las precipitaciones varían mucho. En los Andes ecuatorianos son de 600 a 880 mm, en el Valle de Mantaro, de 400 a 500 mm y en la zona del Lago Titicaca, de 500 a 800 mm. Desplazándose al sur del Altiplano boliviano y al norte chileno, la precipitación disminuye hasta niveles de 50 a 100 mm, condiciones en las que también se produce quinoa. Por otro lado, entre la octava y novena regiones de Chile también se produce quinoa, con precipitaciones superiores a los 2.000 mm y a nivel del mar (PROINPA, 2011).

La gran adaptación a las variaciones climáticas y su eficiente uso del agua, convierten a la quinoa en una excelente alternativa de cultivo, frente al cambio climático que está alterando el calendario agrícola y provocando temperaturas cada vez más extremas. El Instituto Nacional de Innovación Agropecuaria y Forestal de Bolivia (INIAF) ha clasificado a la quinoa entre las 21 semillas más resistentes al cambio climático.

3.1.4. Producción

Según FAOSTAT, en el período 2009-2019 la superficie cultivada y la producción total de quinoa en los principales países productores -Bolivia, Perú y Ecuador- se duplicó. En el año 2019 la producción de Quinoa fue de 161.415 toneladas, siendo el principal productor Perú (56 %), seguido por Bolivia (41 %) y Ecuador (3 %) (Figura 3.4).

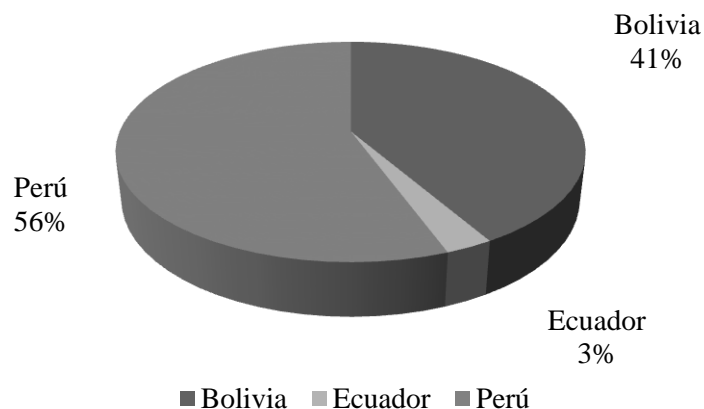


Figura 3.4. Comparación de la participación en la producción de Quinoa
Fuente: FAOSTAT 2019

En los últimos años, se constata un progresivo aumento en la producción de quinoa, especialmente en los países que han sido tradicionalmente los principales productores. Según FAOSTAT, en el periodo 2009 - 2019, la producción de Bolivia aumentó de 34.156 a 67.135 toneladas, en Perú de 39.397 a 89.775 toneladas y de 800 a 4.505 toneladas en Ecuador (Figura 3.5).

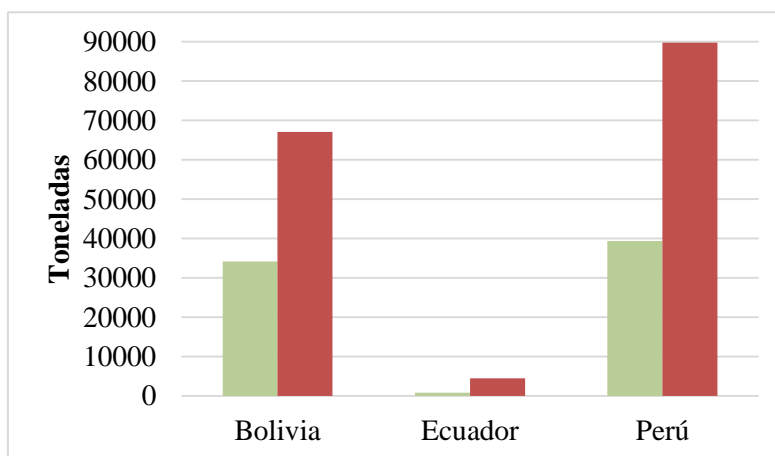


Figura 3.5. Principales productores de Quinoa en 2019
Fuente: FAOSTAT 2019

Así como la producción y exportación de quinoa se encuentran concentradas en estos tres países de la Asociación Latinoamericana de Integración (ALADI), su demanda mundial también lo está (Figura 3.6); siendo EEUU (68 %), Canadá (18 %) y Francia (14 %) los que explicaron el 52 % de las importaciones totales entre 2009-2019.

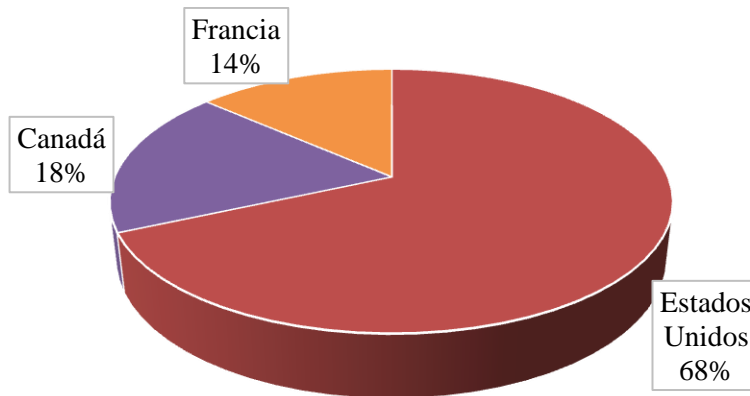


Figura 3.6. Principales países importadores de quinoa de Bolivia y Perú

Fuente: FAOSTAT 2019

En los últimos años el cultivo se extendió a más de sesenta países, entre ellos Estados Unidos, Canadá, Chile, Argentina, Uruguay, Francia, Inglaterra, Suecia, Dinamarca, Holanda, Italia, Kenia e India (Coulibaly *et. al*, 2014). Tal como se observa en el Mapa de la producción mundial (Figura 3.7), existen países fuera de la zona andina que están produciendo una cantidad significativa de quinoa.

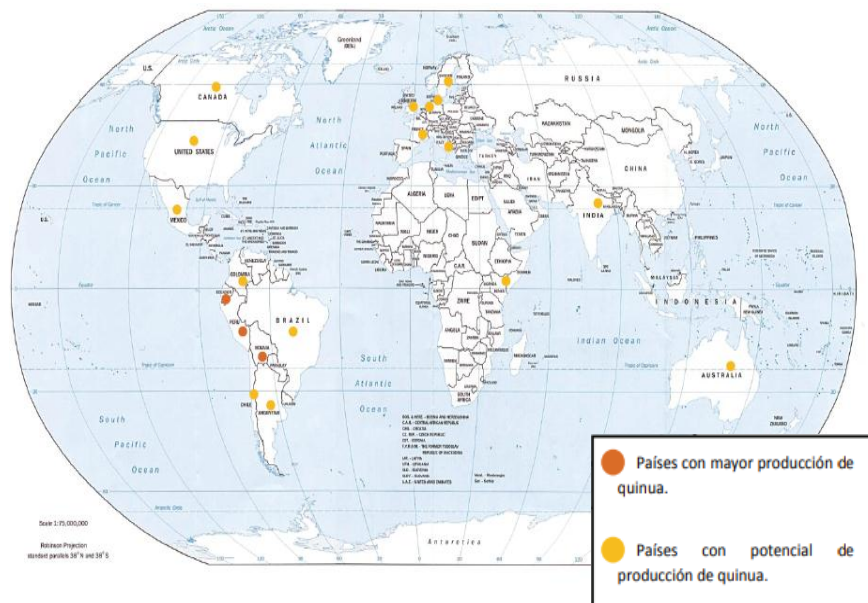


Figura 3.7. Expansión en la producción del cultivo de quinoa

Fuente: PROINPA, 2011.

En Argentina la siembra se realiza a partir de septiembre y se cosecha manualmente en abril. El Noroeste Argentino (NOA) se constituye como la zona tradicional de cultivo. La producción se localiza en la Quebrada de Humahuaca y alrededores, donde existen pequeños productores que cultivan quinoa para consumo propio. En la provincia de Jujuy se produce quinoa con rendimientos aproximados de 2.000 kg/ha, de variedades desconocidas por el productor (Gianna, 2013). En esta provincia, como en otras zonas andinas, el cultivo de quinoa se realiza con el propósito del autoconsumo de la familia campesina; sin embargo, es incipiente la producción de tipo comercial.

3.1.5. Aportes potenciales de la quinoa a la seguridad y soberanía alimentaria

La quinoa se constituye en un cultivo estratégico para contribuir a la seguridad y soberanía alimentaria debido a su calidad nutritiva, su amplia variabilidad genética, su adaptabilidad y su bajo costo de producción (PROINPA, 2011).

El cultivo de la quinoa se constituye en una alternativa para que los países que tienen limitaciones en la producción de alimentos, y por lo tanto se ven obligados a importarlos o recibir ayuda alimentaria, puedan producir su propio alimento. Debido a las bondades nutritivas y la versatilidad agronómica de la quinoa, es un cultivo con alto potencial para contribuir a la seguridad alimentaria de diversas regiones del planeta, especialmente de aquellos países donde la población no tiene acceso a fuentes de proteínas o donde las condiciones de producción son limitadas por la escasa humedad, la baja disponibilidad de insumos y la aridez.

3.1.6. Aspectos nutricionales

Una característica fundamental de la quinoa es que el grano, las hojas y las inflorescencias son fuentes de proteínas de muy buena calidad. La semilla es la parte más apreciada de la planta. Su contenido de proteínas varía entre 12 y 21 % (Comai *et al.*, 2007), siendo rico en los aminoácidos lisina y azufrados, mientras que, por ejemplo, las proteínas de los cereales son deficientes en estos aminoácidos (PROINPA, 2011). En general, si se hace una comparación entre la composición de nutrientes de la quinoa y los del trigo, arroz y maíz (que tradicionalmente se mencionan en la bibliografía como los “granos de oro”), se puede corroborar que los valores promedios que reportan para la quinoa son superiores a los de los tres cereales mencionados, con respecto al contenido de proteínas, grasas y ceniza (Rojas *et al.*, 2010).

Un aspecto notable de las proteínas de la quinoa es su calidad nutricional, la que viene dada por su composición aminoacídica. Presenta todos los aminoácidos esenciales con un adecuado balance, con mayores contenidos de lisina (5,1- 6,4 %) y metionina (0,4 - 1 %) que los cereales tradicionales

(Bhargava *et al.*, 2006; Vega Gálvez *et al.*, 2010). Además, no contiene proteínas formadoras de gluten (Nowak *et al.*, 2016, Alvarez Jubete *et al.*, 2009).

Es importante recalcar la cantidad relativamente alta de aceite en la quinoa, aspecto que ha sido muy poco estudiado y que la convierte en una fuente potencial para la obtención de aceite (Repo Carrasco *et al.*, 2003). Su contenido de grasa se encuentra entre 2 y 9,5 % (García Parra *et al.*, 2018). Contiene ácidos grasos esenciales como los ácidos grasos insaturados, destacando su alto contenido de ácido linoleico (48,2 - 56 %) y linolénico (3,8 – 8,3 %) (Valcárcel Yamani y Caetano, 2012).

Los carbohidratos de las semillas de quinoa contienen entre un 58 y 68 % de almidón y un 5 % de azúcares, lo que la convierte en una fuente óptima de energía, que se libera en el organismo de forma lenta por su importante cantidad de fibra (Llorente, 2008), la que varía entre 8,8 y 14,1 % (Navruz Varli y Sanlier, 2016).

Si se hace una comparación entre trigo, maíz, arroz, cebada, avena, centeno y quinoa, en esta última resalta el alto contenido de zinc, magnesio y calcio. Este último se encuentra en la misma concentración que en la leche descremada. Asimismo, posee un alto contenido de vitaminas del complejo B, C y E y de otros minerales, tales como hierro, fósforo y potasio. Contiene una amplia variedad de compuestos antioxidantes, como carotenoides (Eberhardt *et al.*, 2000), vitamina C y compuestos fenólicos, los cuales ejercen una importante acción preventiva y protectora contra el cáncer, alergias, procesos inflamatorios y enfermedades cardiovasculares (Dini *et al.*, 2010).

3.1.7. Saponinas

Las saponinas son el principal factor antinutritivo de la quinoa. Son glicósidos triterpenoides que se encuentran en la cubierta exterior del grano y le confieren al mismo el sabor amargo característico, que impide su consumo directo. Estas son solubles en agua, alcohol metílico y etílico e insolubles en otros solventes orgánicos.

Los diferentes ecotipos de quinoa pueden ser clasificados de acuerdo a la concentración de saponinas en variedades “dulces”, cuando el contenido en saponinas libres es menor al 0,11 % (peso fresco) y “amargas” cuando este valor es superior (Soliz Guerrero *et al.*, 2002). Según Bacigalupo y Tapia (1990), el contenido de saponinas es el factor limitante del consumo del grano de quinoa, donde resultados de pruebas sensoriales determinaron que el nivel máximo aceptable de saponinas para consumo humano es 0,12 %.

Los métodos tradicionales de desamargado se pueden clasificar en húmedos (solubilización de las saponinas con agua), secos (abrasión del episperma) y combinados (abrasión y lavado). El lavado reduce en mayor proporción el contenido de saponinas que el método abrasivo, siendo los valores remanentes iguales a 0,32 % y 1,05 %, respectivamente (Chauhan *et al.*, 1992). Los métodos húmedos se basan en someter al grano de quínoa a un proceso de remojo y turbulencia, en agua circulante o fija, donde la saponina se elimina por solubilización en el agua de lavado. Al realizar experiencias variando la temperatura del agua de lavado entre 40 y 70 °C, se comprobó que a mayor temperatura la extracción era más eficiente; sin embargo, a 70 °C las semillas alteraban su aspecto y muchas de ellas perdían su embrión o germen, debido a la gelatinización del almidón. Por este motivo, no es conveniente superar los 50 °C durante el proceso de extracción (Portillo, 2021; Scarpati y Briceño, 1980).

El método seco consiste en la eliminación del pericarpio por abrasión, ya sea a temperatura ambiente o con calor seco. Frecuentemente, en este tratamiento se desprende el germen del grano, disminuyendo su calidad proteica. El proceso que combina los dos anteriores, consiste en escarificar la semilla en primer término y luego lavarla con agua, para eliminar los restos de saponinas (Bacigalupo y Tapia, 1990).

3.1.8. Compuestos bioactivos

Entre las sustancias bioactivas que se encuentran en la quínoa, se destacan particularmente los compuestos fenólicos, incluyendo los ácidos fenólicos, flavonoides y taninos. El perfil de compuestos fenólicos en las plantas es muy diverso y depende de la especie vegetal, de la variedad, del cultivar (Tang *et al.* 2015), de la parte de la planta considerada (semilla, fruto, tallo, hojas, etc.), de las condiciones agroclimáticas de cultivo, del grado de maduración, como así también de su procesamiento y almacenamiento (Naczki y Shahidi, 2006).

El término “fenólico” o “polifenol” puede definirse químicamente con precisión como una sustancia que posee uno o más anillos aromáticos que lleva un sustituyente hidroxilo, incluyendo derivados funcionales (ésteres, éteres metílicos, glucósidos, etc.). La mayoría de los compuestos fenólicos tienen dos o más grupos hidroxilo y se derivan de uno u otro de los fenoles dihidrícos o trihidrícos comunes (Harborne, 1989).

En la quínoa, al igual que en el resto de los alimentos de origen vegetal, los compuestos fenólicos existen como formas solubles e insolubles (Acosta Estrada *et al.*, 2014; Pérez Jiménez *et al.*, 2013). Las formas solubles, también llamadas extraíbles, son compuestos de peso molecular bajo o medio,

que pueden extraerse empleando solventes acuosos o mezclas acuoso-orgánicas. En la quinoa, entre los compuestos fenólicos extraíbles identificados como mayoritarios (Figura 3.8), se encuentran flavonoles (quercetina y kaempferol) pertenecientes al grupo de los flavonoides, y ácidos fenólicos, principalmente ácido vanílico, ferúlico y sus derivados (Tang y Tsao, 2017). Por otro lado, las formas insolubles o no extraíbles, son compuestos de alto peso molecular como los taninos condensados o formas unidas a macromoléculas de la pared celular como los compuestos fenólicos hidrolizables (Ballester Sánchez, 2020).

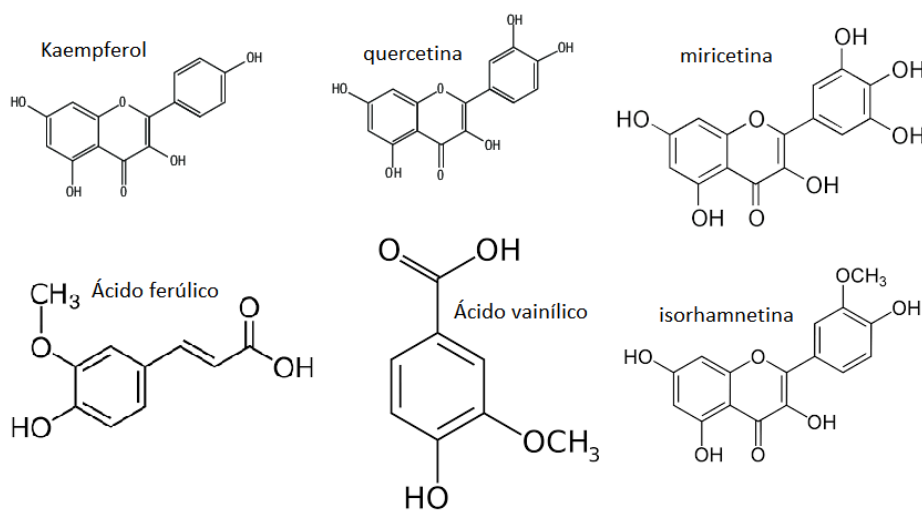


Figura 3.8. Algunos fenoles identificados en quinoa.

Fuente: Viña, 2013

Los compuestos polifenólicos pueden presentar actividad antioxidante en virtud, entre otros factores, de su capacidad donadora de electrones, es decir de su carácter reductor (Hossain *et al.*, 2011; Svoboda *et al.*, 2006). La actividad reductora de los compuestos fenólicos se debe a la presencia de los grupos hidroxilo en el anillo aromático y su capacidad para deslocalizar los electrones del radical fenólico (Paladino, 2008). Diferentes estudios han probado la capacidad antioxidante y el contenido fenólico de la semilla de quinoa (Abderrahim *et al.*, 2012; Tang y Tsao, 2017; Pellegrini *et al.*, 2018). Además, han mostrado tener propiedades antimicrobianas, anticarcinogénicas, antivirales, hipolípídicas, antimutagénicas, antiinflamatorias y protectoras de enfermedades vasculares (Lampe, 2003; Srinivasan, 2005). Estos efectos son de gran potencial benéfico y de interés para el hombre, por sus aplicaciones biotecnológicas (Babu y Savithramma, 2013; Odhiambo *et al.*, 2014). La amplia variedad de propiedades biológicas que presentan los compuestos fenólicos, los hace un interesante objetivo para optimizar su extracción a partir de sus fuentes naturales.

3.1.9. Usos en la alimentación

Las semillas desaponificadas pueden utilizarse enteras o procesadas de diferentes maneras. El grano entero puede incorporarse a sopas, ensaladas, guisos o como reemplazo del arroz. Puede ser molido para obtener una harina que se emplea en la elaboración de diversos panificados en combinación con harina de trigo (pan, galletitas, tortas, etc.) o pueden maltearse y fermentar para obtener cerveza (Mena Reinoso, 2015). Otras formas en las que se puede consumir incluyen hojuelas, sémola o polvo instantáneo, pudiendo ser un ingrediente para preparar una enorme cantidad de recetas tanto tradicionales como innovadoras. Además, las semillas pueden ser germinadas (brotes para ensaladas), tostadas o infladas para elaborar alimentos para el desayuno y snacks (Repo Carrasco *et al.*, 2003, Pellegrini *et al.*, 2018). Muchas de las aplicaciones de la quinoa son posibles gracias a que ha demostrado tener buenas propiedades de gelificación, capacidad de absorción de agua, capacidad emulsificante y estabilizante (Abugoch James, 2009).

Así como el género *Chenopodium* proporciona semillas comestibles, también suministra hojas sabrosas y nutritivas (Ahamed *et al.*, 1998). En particular, las hojas del grano inca, hasta ahora tratadas como residuos sin valor, son comestibles y pueden ser consumidas en ensaladas. Se utilizan como reemplazo de las hortalizas de hoja (acelga, espinaca, repollo, etc.) (Bhargava *et al.*, 2006) y pueden ser usadas como suplementos valiosos para los alimentos funcionales (Gawlik Dziki *et al.*, 2013).

En alimentación animal, se utiliza la planta completa en estado fresco o ensilado (Carciochi, 2014) o en forma de *pellets*. Con las partes de la planta que quedan después de la cosecha finamente picadas o molidas, se elaboran concentrados y suplementos alimenticios para animales. Los granos también se usan para la crianza de aves en general (Mujica *et al.*, 2001).

3.2. Acondicionamiento del grano

La cosecha y pos-cosecha de la quinoa comprende las labores de corte, secado, trilla, venteo y almacenamiento del grano. Con la aplicación de buenas prácticas en estas labores se logra obtener un grano que cumpla los parámetros de calidad (PROINPA, 2011).

En nuestro país normalmente el inicio de cosecha se demora hasta que el grano alcanza 14 g agua/100 g sólido húmedo, que es la base de comercialización y el límite de humedad del grano para almacenajes temporarios, ya sea en silos comunes o bien en silo-bolsas. La demora en la recolección aumenta la probabilidad de que el cultivo sea afectado por precipitaciones. A medida

que se atrasa la cosecha y se reduce la humedad del grano, aumentan las pérdidas de precosecha. Por este motivo, se suele recurrir a la cosecha anticipada aplicando desecantes químicos (herbicidas de contacto), cuando la humedad del grano se encuentra alrededor del 30 %, para secar el tejido vegetal y acelerar el proceso de senescencia natural (Cuniberti, 2014) o recurrir al secado del grano pos-cosecha.

En general, es necesario exponer los granos de cereales y pseudo-cereales al secado, con el propósito de adecuar el contenido de humedad para asegurar su conservación. En el caso de la quinoa, también resulta necesario someterla a secado cuando los granos fueron desaponificados por el método húmedo. En Argentina, el secado de granos se realiza mayoritariamente en secadoras de alta temperatura (también llamadas de alta capacidad) que operan a más de 60 °C (Abadía *et al.*, 2013).

En el acondicionamiento pos-cosecha del grano, el aire utilizado en el secado se encuentra a altas temperaturas. Para las humedades observadas, se utilizan de 40 °C a 120 °C por períodos de 0,5 a 4 horas (Garnero, 2006). Para el trigo, la temperatura máxima recomendada para no deteriorar las proteínas es 90 °C, de modo que la temperatura del grano no supere los 50 °C o 60 °C. De esta manera, mantendrá una calidad aceptable para la industria. El grano de soja, que se seca más rápidamente debido a la menor interacción del agua con los componentes de grano (alto contenido de lípidos), posee una temperatura óptima de secado inferior a 80 °C, temperaturas más altas destruyen cierto contenido de lisina. Como norma general aceptada, en la mayoría de los países se ha establecido una temperatura máxima del aire de secado de 90 °C (Garnero, 2006).

Durante el secado, el proceso térmico facilita la digestibilidad de la proteína y de los almidones del grano (gelatinización). Se entiende por desnaturalización de una proteína a la alteración irreversible de la conformación nativa (estructura secundaria, terciaria, cuaternaria), que se produce sin la ruptura de enlaces covalentes (con excepción de los enlaces disulfuro). Las proteínas de la quinoa están expuestas a alteraciones químicas que dependen de su variedad y condiciones de procesamiento. Los resultados de estas reacciones pueden alterar el valor biológico de la proteína, transformando los aminoácidos esenciales en compuestos derivados que no pueden ser utilizados por el organismo, disminuyendo la digestibilidad y/o destruyendo aminoácidos esenciales (De la Cruz Quispe, 2009).

Asimismo, las condiciones de secado de estos granos pueden originar variaciones en el rendimiento de la molienda, concomitantes con la cantidad y el valor de los productos y subproductos que se

obtengan. En consecuencia, es necesario evaluar la operación de secado y los parámetros que la regulan.

El secado (o deshidratación) se define como la aplicación de calor en condiciones controladas, para eliminar por evaporación, la mayor parte del agua normalmente presente en un alimento. El objetivo principal de la deshidratación es prolongar la vida útil de los alimentos mediante la reducción de la actividad del agua. De esta manera se detiene la actividad enzimática y microbiológica, para así evitar el deterioro (Fellows, 2000).

Los mecanismos de remoción de agua por secado involucran dos procesos simultáneos, uno es la transferencia de calor hacia el alimento para la evaporación de agua y el otro es el transporte del vapor de agua formado en el alimento. Por ello, el secado es una operación basada en la transferencia simultánea de calor y de masa (Jongen, 2002; Smith y Hui, 2004).

3.2.1. Secado convectivo

El calor del aire de secado es absorbido por los alimentos y proporciona el calor latente necesario para evaporar el agua de la superficie. La cantidad de vapor de agua en el aire se expresa como humedad absoluta (masa de vapor de agua por unidad de masa de aire seco) o humedad relativa (HR, relación entre la presión parcial de vapor de agua en el aire y la presión de vapor de agua saturado a la misma temperatura). La temperatura del aire, medida con un termómetro, se denomina temperatura de bulbo seco. Si el bulbo del termómetro está rodeado por un paño húmedo, el calor se elimina mediante la evaporación del agua del paño y la temperatura desciende. Esta temperatura más baja se llama temperatura de bulbo húmedo. La diferencia entre las dos temperaturas se usa para encontrar la humedad relativa del aire en el diagrama psicrométrico. Un aumento de la temperatura del aire, o una reducción de la HR, hace que el agua se evapore más rápidamente de una superficie húmeda y por lo tanto produce una mayor caída de temperatura (Fellows, 2000).

Existen factores externos e internos que afectan el transporte de humedad durante el secado convectivo. Los primeros están relacionados con las propiedades del aire circundante, como la temperatura, la presión, la humedad, la velocidad y el área de la superficie expuesta. Mientras que los segundos corresponden a los parámetros relacionados con las propiedades del alimento, como la difusividad de la humedad, el coeficiente de transferencia de humedad, la actividad del agua, la estructura y composición, etc. (Dincer *et al.*, 2002).

Se define la velocidad de secado como la pérdida de humedad del sólido húmedo en la unidad de tiempo operando en condiciones constantes de secado, es decir con aire cuyas condiciones

(temperatura, presión, humedad y velocidad) permanecen constantes en el tiempo (Ocon y Tojo, 1970). La velocidad de secado, está controlada por la temperatura, la humedad del aire y la velocidad del aire (Fellows, 2000).

Cuando se sopla aire caliente sobre alimentos húmedos, el vapor de agua se difunde a través de una película límite de aire que rodea el alimento y es arrastrado por el aire en movimiento (Figura 3.9). Se establece un gradiente de presión de vapor de agua entre el aire húmedo en el interior del alimento y el aire de secado. Este gradiente proporciona la "fuerza impulsora" para la eliminación de agua de los alimentos.

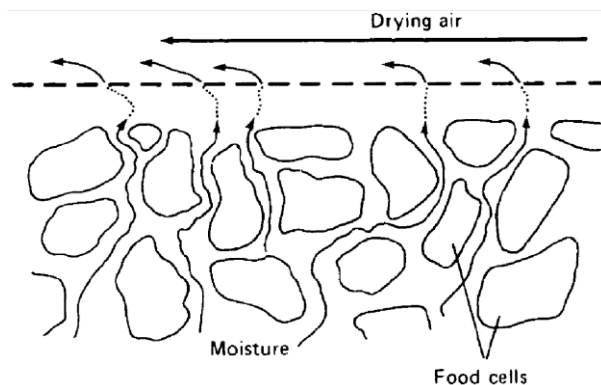


Figura 3.9. Movimiento de la humedad durante el secado.

Fuente: Fellows, 2000

La película límite que rodea el alimento actúa como una barrera, tanto para la transferencia de calor como para la eliminación del vapor de agua durante el secado. El espesor de la película está determinado principalmente por la velocidad del aire; si la velocidad es baja, la película límite es más gruesa y esto reduce tanto el coeficiente de transferencia de calor como la tasa de eliminación del vapor de agua. El vapor de agua sale de la superficie de los alimentos y aumenta la humedad del aire circundante, lo que provoca una reducción del gradiente de presión del vapor de agua y, por lo tanto, la velocidad de secado. Por lo tanto, cuanto mayor es la velocidad del aire, más delgada es la película límite y, por lo tanto, más rápida es la velocidad de secado.

3.2.1.1. Curvas de secado

Al deshidratar experimentalmente un producto, se obtienen datos que relacionan su contenido de humedad con el tiempo de secado (Figura 3.10). La humedad del alimento en base seca para cada tiempo se define como la cantidad de agua en el producto por unidad de masa de producto seco.

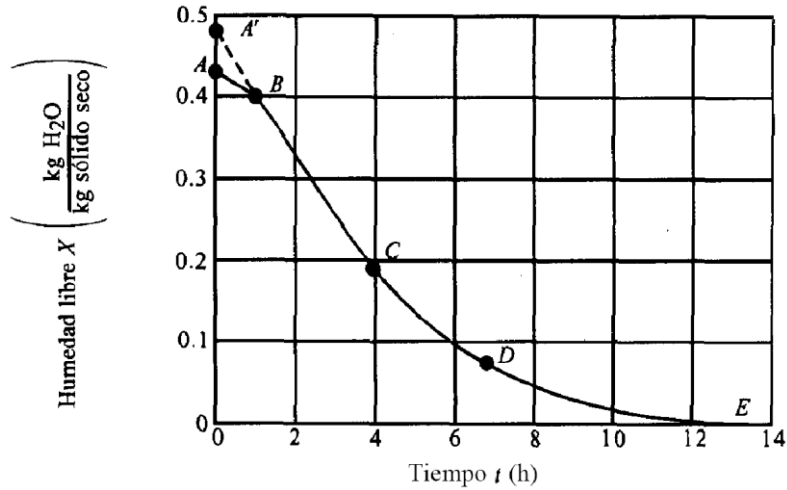


Figura 3.10. Curva de los datos de humedad libre en función del tiempo
Fuente: Geankoplis, 1998

Al representar las curvas de velocidad de secado en función del contenido de humedad, se observa que el proceso no se comporta con suavidad. En la Figura 3.11, se representa una curva típica de velocidad de secado, en la que se distinguen tres regiones: AB, periodo de inducción; BC, periodo de velocidad de secado constante; CD, periodo de velocidad de secado decreciente.

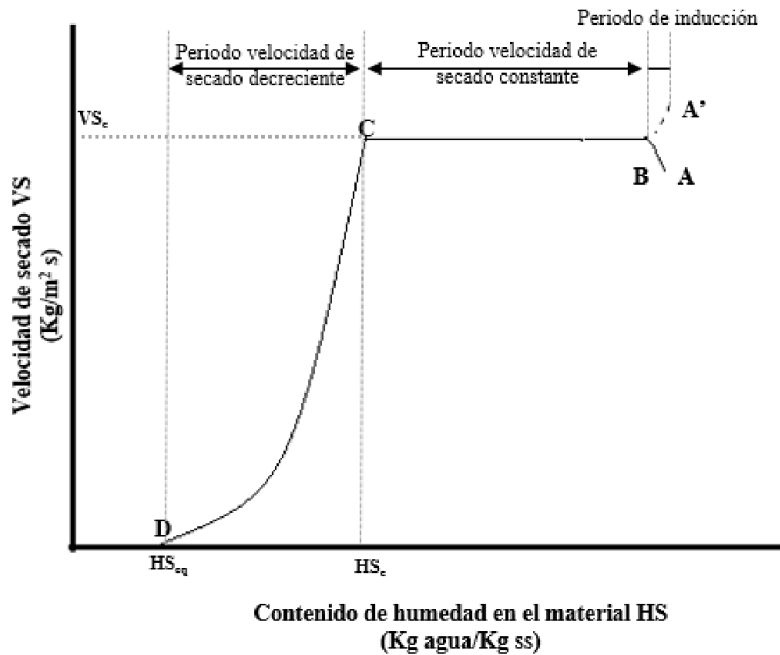


Figura 3.11. Curva de velocidad de secado en función del contenido de humedad
Fuente: Geankoplis, 1998

Período de inducción

Cuando los alimentos se colocan en un secadero, hay un breve período inicial de asentamiento y adaptación del mismo a las condiciones de operación, a medida que la superficie se calienta hasta la temperatura de bulbo húmedo (Figuras 3.10 y 3.11, AB). Por otra parte, si el sólido está bastante caliente al principio de la operación, la velocidad de secado puede iniciarse en el punto A'. La duración de este periodo será función del contenido inicial de humedad del producto, de su temperatura, de la velocidad del aire, entre otras variables. Generalmente este período es corto y a menudo se desprecia en los cálculos de tiempo de secado (Geankoplis, 1998).

Periodo de velocidad constante de secado

En este período, el agua se mueve desde el interior de los alimentos al mismo ritmo que se evapora de la superficie haciendo que esta permanezca húmeda. Debido a esto, la velocidad de secado está controlada por la velocidad de transmisión de calor a la superficie de evaporación. Este proceso continúa hasta que se alcanza un contenido crítico de humedad (Figuras 3.10 y 3.11, BC). La humedad crítica es característica de cada alimento y, además, depende de otros factores que controlan la velocidad del movimiento de humedad interno/externo. En la mayoría de los alimentos, los valores obtenidos para el contenido de humedad crítica suelen estar muy cerca de los valores del contenido de humedad inicial, de manera que el periodo de velocidad de secado constante en alimentos es muy pequeño. En éstos, la velocidad de transferencia interna de calor y materia determina la velocidad a la cual el agua está disponible en la superficie de evaporación (Mujumdar y Devahastin, 2000).

La temperatura de la superficie del alimento permanece cercana a la temperatura de bulbo húmedo del aire de secado, hasta el final del período de velocidad constante, debido al efecto de enfriamiento de la evaporación de agua. En la práctica, diferentes áreas de la superficie del alimento se secan a diferentes velocidades y, en general, la velocidad de secado disminuye gradualmente hacia el final del período de velocidad "constante" (Fellows, 2000).

En este período, la velocidad de secado se determina mediante la siguiente ecuación (Chirife, 1983):

$$\frac{dHS}{dt} = -k \frac{AS}{ms} (H_{Ro} - H_{Ra}) \quad (3.1)$$

Donde, HS es el contenido de humedad medio, t es el tiempo, ms es el contenido en materia seca, AS es el área de evaporación, k es el coeficiente de transferencia de materia, H_{Ro} es la humedad relativa en la película de evaporación y H_{Ra} es la humedad relativa ambiente.

La magnitud de la velocidad constante depende de tres variables externas (Perry, 1992):

1. El coeficiente de transmisión de calor o de transferencia de materia.
2. El área expuesta de secado.
3. La diferencia de temperatura o humedad entre la corriente de aire de secado y la superficie mojada del sólido.

Periodo de velocidad decreciente de secado

Durante este período, el contenido de humedad de los alimentos cae por debajo del contenido crítico de humedad. La velocidad de secado disminuye lentamente hasta que se acerca a cero en el contenido de humedad de equilibrio (Figuras 3.10 y 3.11, CD). Los alimentos no higroscópicos tienen un solo período de tasa de caída, mientras que los alimentos higroscópicos tienen dos o más períodos. En la primera etapa, el plano de evaporación se mueve desde la superficie hacia el interior del alimento y el vapor de agua se difunde a través de los sólidos secos hacia el aire de secado. La segunda etapa (DE) ocurre cuando la presión parcial del vapor de agua está por debajo de la presión de vapor saturado y el secado es por desorción. Ahora, la velocidad de secado está regida por la velocidad del movimiento interno de la humedad y la influencia de las variables externas va en disminución (Perry, 1992).

3.2.1.2. Factores que afectan la velocidad del secado

Los factores que afectan a la velocidad de secado son (Paquita Ninaraqui, 2015):

- Superficie del producto. La subdivisión acelera el secado, porque una mayor área proporciona más superficie en contacto con el medio de calentamiento.
- Temperatura. Cuanto mayor sea la diferencia de temperatura entre el medio de calentamiento y la muestra, mayor será la velocidad de transferencia de calor.
- Velocidad del aire. El aire en movimiento absorbe el vapor de agua de la superficie del alimento, previniendo así la creación de una atmósfera saturada. La velocidad de aire actúa aumentando los coeficientes globales de transferencia de materia y de calor, lo que disminuye el tiempo de deshidratado de los alimentos.
- Humedad del aire. El aire seco absorbe y retiene la humedad, cuanto más seco se encuentre, mayor será la velocidad del proceso de secado. Para muchos productos la velocidad de secado al principio es constante y posteriormente decrece, a veces a velocidades distintas.

Respecto al agua perdida, el mayor porcentaje se elimina en un tiempo relativamente corto, pero cuesta mucho más eliminar la humedad restante (Ratti, 2009).

3.2.1.3. Modelado matemático de la operación de secado

El conocimiento de la cinética de secado de los materiales biológicos es esencial para el diseño, la optimización y el control del proceso de secado (Sacilik *et al.*, 2006). El uso de modelos matemáticos de simulación y optimización validados, es una herramienta adecuada para definir las condiciones operativas de secado, con el objetivo de preservar la retención de componentes funcionales, como antioxidantes, para el caso particular aquí discutido. Por lo tanto, es importante obtener un modelo matemático completo y riguroso.

En el campo del modelado de secado con aire, se presentan diferentes tipos de modelos matemáticos. Los modelos más simples sólo implican ecuaciones de transferencia de masa (Azzouz *et al.*, 2002; Hassini *et al.*, 2004; Velic *et al.*, 2004), suponiendo que el gradiente de temperatura es demasiado pequeño y que no tiene efecto en la velocidad de transferencia de masa. Otro conjunto que abarca a la mayoría de los modelos matemáticos de secado que se encuentran en la literatura, se basa en ecuaciones de transferencia de calor y masa usando condiciones iniciales y de contorno ideales.

Los modelos monofásicos de transferencia de calor y masa se utilizaron ampliamente para describir el movimiento del agua y el calor durante el secado. A menudo, los alimentos se modelan como un medio homogéneo. Lewis (1921) y Sherwood (1929) son conocidos como pioneros en el desarrollo de modelos matemáticos de secado mediante la aplicación de la ecuación de Fourier de la conducción de calor al secado de sólidos, utilizando la Ley de Fick (Shahari, 2012). El transporte de humedad implica dos procesos dependientes: la evaporación de la humedad en la superficie sólida que obtiene calor del aire y la difusión interna del líquido a la superficie. La ecuación que rige la transferencia dinámica o en estado no estacionario (por eso la dependencia temporal) de la humedad $HS(t)$ en un alimento isotrópico sin fuentes internas de humedad, viene dada por la siguiente ecuación:

$$\frac{\partial HS}{\partial t} = \nabla(D_{eff} \nabla HS) \quad (3.2)$$

Donde D_{eff} es el coeficiente de difusión efectivo.

La ecuación (3.2) representa el movimiento de humedad en el interior del producto durante el secado.

Dependiendo de la geometría que tiene el material antes del secado, la ecuación (3.2) aplicada a la descripción del período de velocidad de secado decreciente, adopta la siguiente forma (Luikov, 1970):

- Geometría plana con transporte en una única dirección

$$\frac{\partial HS}{\partial t} = D_{eff} \frac{\partial^2 HS}{\partial x^2} \quad (3.3)$$

$$t > 0, -L < x < +L$$

- Geometría cilíndrica

$$\frac{\partial HS}{\partial t} = D_{eff} \left(\frac{\partial^2 HS}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial HS}{\partial r} + \frac{\partial^2 HS}{\partial z^2} \right) \quad (3.4)$$

$$t > 0, 0 < r < R, -h < z < +h$$

- Geometría esférica

$$\frac{\partial HS}{\partial t} = D_{eff} \left(\frac{\partial^2 HS}{\partial r^2} + \frac{2}{r} \frac{\partial HS}{\partial r} \right) \quad (3.5)$$

$$t > 0, 0 < r < R$$

- Geometría paralelepípedica con transporte multidireccional

$$\frac{\partial HS}{\partial t} = D_{eff} \left(\frac{\partial^2 HS}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 HS}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 HS}{\partial z^2} \right) \quad (3.6)$$

$$t > 0, -Lx < x < +Lx, -Ly < y < +Ly, -Lz < z < +Lz$$

El modelado riguroso y detallado es una tarea difícil debido a la complejidad de los mecanismos subyacentes y a la obtención de datos experimentales confiables. Los modelos basados en los primeros principios tienen la ventaja de que las geometrías multidimensionales para diferentes formas de alimentos, pueden resolverse en el contexto de diversas operaciones unitarias, abordando condiciones de contorno realistas y otras ecuaciones que describen el equipo del proceso. Por lo general, estos modelos consisten en un conjunto de ecuaciones diferenciales algebraicas, parciales y ordinarias, que dan como resultado problemas no lineales.

3.2.1.4. Difusividad efectiva de la humedad

En los materiales biológicos con un alto contenido de humedad inicial, esta humedad puede ser transportada por difusión de agua, difusión de vapor, difusión de Knudsen, evaporación y efectos internos de condensación, flujo capilar y flujo hidrodinámico. A menudo hay una combinación de

varios mecanismos de transporte de humedad y las contribuciones de dichos mecanismos varían durante el progreso del secado (Bruin y Luyben, 1980). Por lo tanto, para el segundo período de secado el coeficiente de difusión del agua describe el transporte completo de humedad y recibe el nombre de difusividad efectiva. Los valores de coeficiente de difusión efectiva para materiales biológicos son reportados en la literatura dentro del rango de $10^{-13} - 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$ (principalmente próximos a $10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$) (Doulia *et al.*, 2000; Maroulis *et al.*, 2001).

Sin embargo, estudios experimentales sugieren que los procesos físicos a veces no son lineales y que las propiedades de transporte dentro de los alimentos dependen del contenido de humedad y la temperatura. Basándose en una recolección de datos experimentales, se sugiere que durante el secado el coeficiente de difusión efectiva D_{eff} puede considerarse función de la humedad, $D_{eff} = f(HS)$, o de la temperatura $D_{eff} = f(T_s)$ o de la temperatura y humedad $D_{eff} = f(T_s, HS)$, lo que conduce a un modelo más general (Crank, 1975). La funcionalidad de la difusión del agua con la temperatura es ampliamente considerada como una dependencia del tipo Arrhenius. Típicamente, la difusión efectiva, en este sentido, está dada por:

$$D_{eff} = D_o e^{\left(\frac{-E_A}{RT}\right)} \quad (3.7)$$

Donde D_o es el factor de Arrhenius (m^2/s), E_A es la energía de activación (kJ/mol), T es la temperatura ($^{\circ}\text{K}$) y R la constante de los gases (kJ/mol). Los valores de D_o y E_A usualmente se estiman a partir de datos experimentales (Villa Corrales *et al.*, 2010; Janjai *et al.*, 2008; Simal *et al.*, 2005).

Mulet *et al.* (1989 a, b) expresó el coeficiente de difusión del agua mediante la siguiente fórmula empírica:

$$D_{eff} = a e^{\left(\frac{-b}{T}\right)} \quad (3.8)$$

El coeficiente de difusión de agua en función del contenido de humedad y la temperatura fue descrito por Mulet *et al.* (1989a, b):

$$D_{eff} = e^{\left(a + \frac{b}{T} + cHS\right)} \quad (3.9)$$

Parti and Dugmanics (1990), establecieron la siguiente ecuación:

$$D_{eff} = a e^{\left(\frac{-b}{T} + cHS\right)} \quad (3.10)$$

Donde, a , b y c son constantes y R es la dimensión característica del material que se está secando.

3.2.1.5. Coeficiente de transferencia de masa

El coeficiente de transferencia de masa, k , utilizado en la ecuación de contorno del modelo de transferencia de masa (4.7), se determina empleando el número de Sherwood, Sh , calculado a partir de la ecuación adimensional reportada por Mills (1995) junto con las ecuaciones de la 3.11 a la 3.16:

$$Sh(t) = \frac{D \cdot k}{D_w} = 2 + 0,6 \cdot Re^{0,5} \cdot Sc^{0,33} \quad (3.11)$$

$$Re = \frac{D \cdot G_a}{\mu_a} \quad (3.12)$$

$$Sc = \frac{\mu}{\rho_a \cdot D_w} \quad (3.13)$$

$$\mu_a = \frac{0,000001 \cdot 1,4592 \cdot (T + 273)^{1,5}}{109,10 + (T + 273)} \quad (3.14)$$

$$\rho_a = \frac{Ma \cdot Pa}{R \cdot (T + 273)} \quad (3.15)$$

$$G_a = \frac{Ma \cdot v \cdot Pa}{R \cdot (T + 273)} \quad (3.16)$$

Donde D es el diámetro promedio del grano.

3.2.1.6. Contenido de humedad promedio

La estimación del contenido de humedad promedio en cada instante de tiempo en los granos de quinoa se obtiene al integrar el contenido de humedad local sobre el volumen. Específicamente, el contenido de humedad promedio se expresa como se establece en la ecuación (3.17), que se puede resolver mediante la regla del Trapecio.

$$\overline{HS}(t) = \frac{\int_0^V \overline{HS}(r,t) \, dV}{\int_0^V dV} ; t \geq 0 \quad (3.17)$$

3.2.1.7. Validación de los modelos

En general, los modelos se validan con resultados experimentales obtenidos en el laboratorio, para distintas condiciones de ensayo.

3.2.2. Molienda y Tamización

En muchos procesos alimentarios es necesario reducir el tamaño de materiales sólidos para diferentes propósitos. La reducción de tamaño puede ayudar a otros procesos, como la extracción, o puede acortar los tratamientos térmicos, como el escaldado y la cocción (Barbosa *et al.*, 2005).

La molienda de granos tiene por objetivo transformar el endospermo en harinas y sémolas y la separación, lo más íntegras posible, de las cubiertas del grano (fibra o salvado) y el germen. Se trata de una operación unitaria que se define como la reducción del tamaño de partículas sólidas a partir de la aplicación de fuerzas mecánicas: de compresión, de impacto o de cizalla (Figura 3.12). Las fuerzas de compresión se utilizan para la trituración gruesa de materiales duros hasta alcanzar un tamaño de 3 mm aproximadamente. Las fuerzas de impacto pueden considerarse como fuerzas de propósito general y pueden estar asociadas con la molienda gruesa, media y fina de una variedad de materiales alimenticios, como durante la rotura de nueces. Las fuerzas de cizallamiento o desgaste se aplican en la pulverización fina, cuando el tamaño de los productos puede alcanzar el rango de micrómetros (Barbosa *et al.*, 2005). Finalmente, el corte da un tamaño de partícula definido e incluso puede producir una forma definida. En la maquinaria, pueden o no actuar conjuntamente los tres tipos de fuerzas, pero generalmente predomina una sobre las otras (Fellows, 1994). La molienda implica una transformación física que debe conservar las características de la materia prima inicial (Berk, 2009).

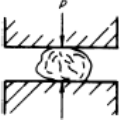
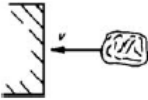
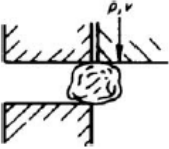

Force	Schematic diagram	Principle	Example of equipment
Compressive		Nutcracker	Crushing rolls
Impact		Hammer	Hammer mill
Attrition		File	Disc attrition mill
Cut		Scissors	Rotary knife cutter

Figura 3.12. Tipos de fuerza utilizados en equipos de reducción de tamaño.

Fuente: Barbosa *et al.*, 2005

Como resultado de la molienda, se obtienen y separan fracciones de diferente granulometría y composición. Posteriormente, se utilizan tamices para la clasificación y purificación de las distintas fracciones. La distribución de tamaño de partículas depende de las características del molino, condiciones de funcionamiento y propiedades del material molido, pero es casi independiente del tamaño de las partículas en la alimentación (Berk, 2009).

Es importante conocer con claridad el tipo de harina que se pretende obtener, pues de ello depende el tipo de molino que se emplee y las características físico-químicas y nutricionales del producto final. La especificación de un producto terminado requerirá que no contenga partículas mayores o menores a un tamaño determinado. En la práctica, el tamaño de las partículas se denomina tamaño de abertura de malla (Barbosa *et al.*, 2005).

3.2.2.1. Equipos utilizados para la reducción de tamaño

Los equipos para reducción de tamaño se dividen en trituradores, molinos, molinos de ultrafinos y máquinas de corte. Los trituradores realizan el trabajo pesado de romper las piezas grandes de materiales sólidos en pequeños pedazos. Un triturador, opera con un material extraído de una mina, rompiéndolo en pedazos de 150 a 250 mm (6 a 10 pulgadas). Un triturador secundario reduce estos pedazos a partículas quizá de tamaño de 6 mm (1/4 pulgada). Los molinos reducen el producto del triturado hasta formar un polvo. El producto procedente de un molino intermedio puede pasar a través de un tamiz de 40 mallas; la mayor parte del producto que sale de un molino fino pasará a través de un tamiz de 200 mallas con una abertura de 74 μm . Un molino ultrafino acepta como alimentación partículas no mayores de 6 mm (1/4 pulgadas); el tamaño del producto generado es típicamente de 1 a 50 μm . Las cortadoras producen partículas de tamaño y forma definidos, de 2 a 10 mm de longitud. Estas máquinas realizan su trabajo en formas muy diferentes. La compresión es la acción característica de los trituradores. Los molinos emplean el impacto y frotación, algunas veces combinados con compresión; los molinos de ultrafinos operan en principio por agotamiento. Una acción de cortado es la característica de cortadoras, troceadores y rajadores (McCabe *et al.*, 2007).

3.2.2.2. Equipos de reducción de tamaño de granos en quinoa. Molinos

El término molino se utiliza para describir una gran variedad de máquinas de reducción de tamaño para servicio intermedio. Se dividen en molinos de martillos, máquinas de rodadura-compresión, molinos de frotación y molinos de volteo.

Molinos de martillos

El Molino de Martillos (Figura 3.13) contiene un rotor de alta velocidad que gira dentro de una caja cilíndrica. El rotor tiene acoplado una serie de martillos alrededor de su periferia. Por la acción de rotación, los martillos giran a través de una trayectoria circular dentro de la carcasa que contiene una placa de recubrimiento.

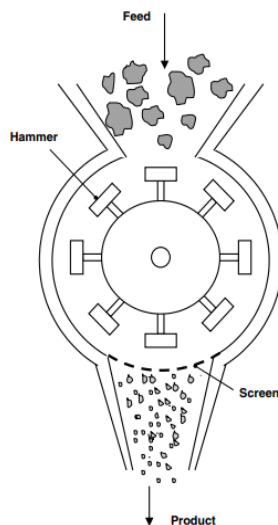


Figura 3.13. Molino de martillos
Fuente: Barbosa Cánovas *et al.* (2005)

El material que ingresa al molino, atraviesa la zona de los martillos y se rompe en pedazos, que se proyectan contra la placa yunque estacionaria situada dentro de la coraza, rompiéndose todavía en fragmentos más pequeños. Éstos a su vez son pulverizados por los martillos y son impulsados a través de una rejilla o un tamiz que cubre la abertura de descarga (Barbosa Cánovas *et al.*, 2005; McCabe *et al.*, 2007). Los martillos pueden ser barras rectas de metal con los extremos planos o alargados, o bien afilados para formar un borde cortante, constituyendo los denominados molinos de cuchillas.

La reducción se debe principalmente a las fuerzas de impacto, aunque en condiciones de alimentación de estrangulamiento, las fuerzas de cizalla también pueden desempeñar un papel en dicha reducción (Fellows, 1994). Los molinos de martillo con reducción de tamaño intermedio forman un producto con un tamaño de partículas de 25 mm (1 pulgada) a malla 20. Los molinos de martillo para una molienda fina reducen el material a tamaños más finos que malla 200. El molino de martillos brinda altas relaciones de reducción y puede manejar una amplia variedad de materiales, desde duros y abrasivos hasta fibrosos y pegajosos.

En la industria alimentaria, sus aplicaciones son muy variadas. Se han empleado en la molienda seca de trigo, así como en la molienda húmeda de maíz para la separación del gluten y almidón de las cáscaras. Otras aplicaciones incluyen la rotura de granos de cacao, la preparación de cacao en polvo, la desgerminación del maíz, la producción de harina de pescado, la fabricación de chocolate y la molienda de azúcar, nuez moscada, clavo de olor, nueces tostadas, entre otras (Barbosa Cánovas *et al.*, 2005).

Las variables de operación de este equipo son: la velocidad de alimentación, velocidad de giro, la separación, el número de martillos (o cuchillas) y el diámetro de la criba (Brennan *et al.*, 1998; McCabe, 2007).

Molino de rodillos

En los molinos de rodillos, los sólidos son atrapados y triturados entre rodillos cilíndricos verticales (Figura 3.14). Los rodillos se mueven a velocidades moderadas en trayectoria circular. Los enrasadores levantan los trozos de sólidos desde el piso del molino y los conducen entre el anillo y los rodillos, donde ocurre la reducción (McCabe, 2007).

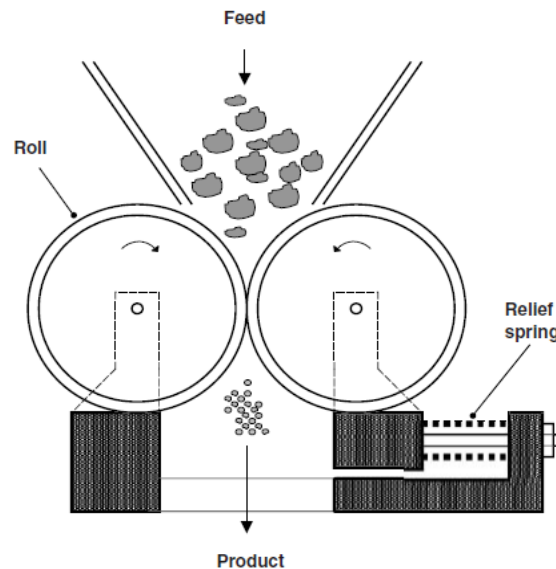


Figura 3.14. Molino de rodillos.

Fuente: Barbosa Cánovas *et al.* (2005)

El producto es barrido al exterior del molino por medio de una corriente de aire hacia un separador-clasificador, desde el cual las partículas que superan el tamaño deseado regresan al molino para una nueva reducción. Cuando se utiliza un clasificador, el producto puede llegar a refinarse hasta que pase la malla 200 (McCabe, 2007).

Molinos de atrición (o desgaste)

En un molino de atrición, las partículas de sólidos blandos son frotadas entre las caras planas estriadas de unos discos circulares rotatorios.

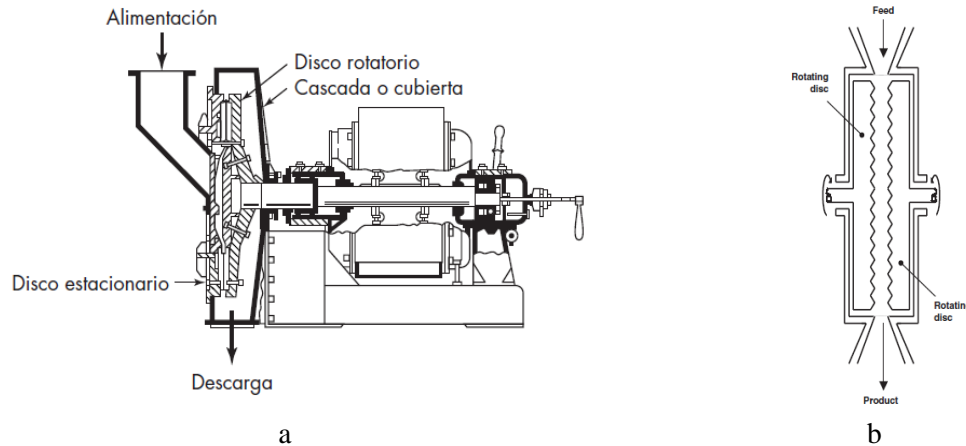


Figura 3.15. Molino de atrición. a) de un disco; b) doble disco.

Fuente: McCabe *et al.*, 2007; Barbosa *et al.*, 2005

En un molino de rotación simple (Figura 3.15. a) uno de los discos es estacionario y el otro gira; en una máquina de doble rotación, ambos discos giran a alta velocidad en sentido contrario (Figura 3.15. b). La alimentación ingresa a través de una abertura situada en el centro de uno de los discos: pasa hacia fuera a través de la separación entre los discos y descarga por la periferia en una carcasa estacionaria. La separación entre los discos es ajustable dentro de ciertos límites (McCabe *et al.*, 2007).

Los discos pueden ser de piedra esmeril o roca de esmeril, metálicos y de acero inoxidable dependiendo del material a tratar. Son provistos de diferentes tipos de estrías, rugosidades o dientes y realizan operaciones de molienda, troceado, granulación y desmenuzamiento. Pueden obtenerse productos que pasan a través de un tamiz de 200 mallas.

Molino de volteo

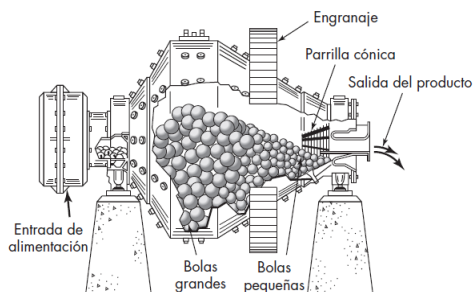


Figura 3.16. Molino de volteo

Fuente: McCabe *et al.*, 2007

Están conformados por una carcasa cilíndrica que gira muy lento alrededor de un eje horizontal y está llena, aproximadamente hasta la mitad de su volumen, con un medio sólido de molienda (Figura 3.16). La carcasa es por lo general de acero, con un recubrimiento de una lámina placa de acero al alto carbono, porcelana, roca de sílice o caucho. El medio de molienda consiste en barras metálicas en un molino de barras, tramos de cadenas o bolas de metal, caucho o madera en un molino de bolas, esferas de circonia o porcelana o guijarros. Los molinos de volteo resultan inadecuados para la reducción intermedia y fina de materiales abrasivos (McCabe *et al.*, 2007).

Los molinos explicados anteriormente requieren alimentación de forma continua, mientras que los molinos de volteo pueden ser tanto de forma continua o discontinua. En una máquina discontinua, una cantidad medida del sólido que será molido se deposita dentro del molino a través de una abertura en la carcasa. Después la abertura se cierra y el molino se mantiene girando durante varias horas, se detiene y el producto se descarga. En un molino continuo, el sólido circula estacionariamente a través de la coraza giratoria (McCabe *et al.*, 2007).

En un molino de barras, la mayor parte de la reducción se realiza por compresión rodante y por frotación a medida que las barras se deslizan hacia abajo y rodando entre sí. En un molino de bolas, la mayor parte de la reducción se realiza por impacto de la caída de las bolas o guijarros cercanos a la parte superior de la carcasa. Los molinos tubulares son excelentes para la molienda de polvos muy finos en un solo paso cuando la cantidad de energía consumida no es de importancia principal. Si se colocan divisiones transversales ranuradas en un molino tubular, éste se convierte en un molino de compartimiento. Un compartimiento puede contener bolas grandes, otras bolas pequeñas y un tercero, guijarros. Esta segregación de los medios de molienda en elementos de diferente tamaño y peso ayuda considerablemente evitando una pérdida de energía, pues hace que las bolas grandes y pesadas rompan sólo las partículas grandes, sin interferencia de las finas. Al girar el

molino, las bolas se adhieren a la pared del molino y son llevadas cerca de la parte superior, donde se despegan de la pared y caen al fondo para ser elevadas de nuevo. La fuerza centrífuga mantiene las bolas en contacto con la pared y entre ellas durante el movimiento de elevación. Mientras están en contacto con la pared, las bolas realizan algo de molienda deslizando y rodando entre ellas, pero la mayor parte de la molienda ocurre en la zona de impacto, en la que las bolas que caen libremente chocan contra el fondo del molino (McCabe *et al.*, 2007).

3.2.2.3. Harina de quinoa

El CAA, en su Art. 682 bis, define a la harina de quinoa o quinoa como el producto obtenido de la molienda de las semillas desecadas, sanas y limpias del *Chenopodium quinoa* Willd, privadas mecánicamente o por acción de álcalis de sus tegumentos. Su contenido de agua no será superior al 14 g agua/100 g de sólido húmedo a 100 °C - 105 °C, la fibra bruta no será mayor de 0,6 % y su materia grasa no excederá del 1 %.

La harina de quinoa se obtiene a través de la molienda de granos que previamente han sido sometidos a un proceso de selección y limpieza, desaponificados por vía seca, húmeda o mixta y secados. Es utilizada en gran parte de los productos de la industria harinera. Puede adicionarse a recetas de pan en proporciones que van desde 10, 15, 20 y hasta 40 %, 40 % en las pastas, 60 % en bizcochos y hasta 70 % en galletas (Mujica *et al.*, 2006; Padrón Pereira *et al.*, 2014; PROINPA, 2011). Álvarez Jubete *et al.* (2009) encontraron que la adición de estas fuentes alternativas de harinas incrementaba significativamente el contenido de proteínas, grasa, fibra y minerales con relación al pan control, constituyéndose así en una fuente saludable de nutrientes para la elaboración de productos sin gluten. Como se muestra en la Tabla 3.1, de acuerdo a la granulometría obtenida a través de la molienda de granos de quinoa, la harina se clasifica en: afrecho, harina gruesa y harina fina (PROINPA, 2011).

Tabla 3.1. Granulometría de harina de quinoa.

Tamaño de los gránulos (mm)	Clasificación	Posibles usos
de 0,487 a 0,23	Afrecho (D)	Alimentos balanceados. Panes integrales. Panificación, bizcochería, pastas, purés, sopas, cremas
de 0,23 a 0,125	Harina gruesa (C)	Panes integrales. Panificación, bizcochería, pastas, purés, sopas, cremas.
de 0,125 a 0,075	Harina gruesa (B)	Panes integrales. Panificación, bizcochería, pastas, purés, sopas, cremas.
menor a 0,075	Harina fina (A)	Alimento para niños como papillas, mazamorras, cremas. Panes integrales. Panificación, bizcochería, pastas, purés, sopas, cremas.

En la molienda industrial del grano de quinoa, se suelen emplear molinos con rodillos dentados para la trituración. En esta molienda es preciso realizar un remojo previo a fin de ablandar las capas superficiales del grano y permitir una eficiente separación del endospermo. Las variables de molienda son el número de rodillos, tipo de malla y la humedad del grano que debe ser de 14 % para facilitar la eliminación de la cáscara o salvado (Cervilla, 2016).

El grado de uniformidad del tamaño de partículas, es importante cuando las especificaciones del producto lo requieren. Por otro lado, una harina con alta uniformidad en su granulometría promueve una mejor calidad sensorial de textura, sabor y apariencia visual al producto final, ya que absorbe el agua de manera homogénea y promueve una cocción uniforme (Bezerra *et al.*, 2018). Según Rosentrater y Evers (2018), para cumplir con los requisitos en la elaboración de pastas alimenticias, las harinas deben presentar una granulometría de tamaños entre 150 μm y 450 μm (en la escala ASTM, malla 100 y 40 respectivamente).

Los compuestos fenólicos presentes en el grano original, se encuentran en la harina obtenida por la molienda. Las operaciones de molienda y secado, se proponen como alternativa a la conservación y/o potenciación de dichos compuestos bioactivos con actividad antioxidante.

Capítulo 4

Desarrollo

4. Desarrollo

4.1. Materia prima

Las semillas de quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd. var Hualhuas) utilizadas para las experiencias realizadas en la presente tesis fueron obtenidas de la Distribuidora Zucchi (Rosario, Santa Fe). Se adquirió un lote de 5 kg de semillas aptas para consumo, con una humedad de almacenamiento de $11,8 \pm 0,1$ g agua/100 g quinoa seca. Las mismas fueron fraccionadas en bolsas plásticas y almacenadas en un contenedor plástico hermético, hasta su uso, a temperatura ambiente (22 ± 5 °C).

La variedad de quinua Hualhuas, fue registrada con la clave UNC-H20 B-74 en Perú, tiene su origen en el UNC H-20-P-69 y fue obtenida por selección en el año 1974. Se realizó una rigurosa selección masal y genealógica, por sus características agronómicas ideales para el agricultor. El aspecto del grano es opaco, con perigonio y pericarpio crema, episperma y perisperma blanco y rendimiento de semillas por planta de 52,80 g (Apaza, 2013).

4.2. Experiencias de secado

Para abordar esta parte del estudio, se seleccionó un rango de temperaturas y tiempos tomando como referencias las condiciones publicadas en la bibliografía para diferentes granos de consumo. Gely y Santalla (2005) realizaron el secado de granos de quinoa provenientes de Salta. Emplearon un secador de bandejas con convección forzada y ensayaron temperaturas de 30 °C, 50°C, 70°C y 90°C. Ramos Gómez y Peña Rivera (2019) realizaron el secado de granos de quinoa a 40 °C, 50 °C y 60 °C. Almada, Cáceres, Machaín Singer, y Pulfer (2005) indican que los factores claves para un buen secado son: (1) el aire caliente a una temperatura de 40 a 70 °C, (2) el aire con un bajo contenido de humedad y (3) un movimiento constante del aire. Ninaraqui (2015), empleó para el secado de la variedad Salcedo Inia de quinoa, temperaturas de 50, 60 y 70 °C. Algunos autores, trabajaron a temperaturas mayores de secado. Carciochi (2014) empleó temperaturas de 100 °C, 145°C y 190 °C. De la Riva Tapia (2010) tostó los granos a temperaturas de 120°C.

Considerando los antecedentes mencionados y lo expresado en la introducción (T máxima 90 °C), se seleccionaron para este estudio las temperaturas de 40°C, 60°C y 80°C.

En los secaderos industriales de túnel y de bandeja, la velocidad del aire se regula según convenga al material. Esta no debe ser tan alta como para provocar el arrastre de sólidos. Las velocidades corrientes del aire de secado en secaderos industriales, oscilan entre 0,7 y 3,0 m/s (Perry, 1992). Gely y Santalla (2005), en sus estudios del secado de granos de quinoa a diferentes temperaturas, utilizaron una velocidad del aire de secado de 0,3 m/s. El secadero de laboratorio seleccionado para

este trabajo de tesis, opera a dos velocidades 0,2 y 0,7 m/s. Se consideró apropiado su uso, considerando el pequeño tamaño del grano de quinoa.

Las muestras se colocaron en una bandeja de malla de acero inoxidable para facilitar la circulación del flujo de aire. Los tratamientos de secado se realizaron utilizando una estufa de convección forzada (Tecno Dalvo, Modelo CHC/F/I, Argentina), como la que se muestra en la Figura 4.1. Las experiencias de secado se realizaron por triplicado, utilizando la combinación de las condiciones propuestas.



Figura 4.1. Estufa de secado de convección forzada.

Para calcular el contenido de humedad, los pesos de los productos parcialmente deshidratados se registraron a intervalos de tiempo regulares, usando una balanza digital (Scout Pro SP2001, NJ USA) con una precisión de $\pm 0,1$ miligramo. El proceso de secado continuó hasta que se alcanzó el contenido de humedad en equilibrio (HSeq), el que quedó establecido cuando no se observó un cambio de peso discernible para las muestras secas.

Las mediciones de los cambios de temperatura en el interior y en la superficie de las muestras sometidas a secado convectivo, se llevaron a cabo utilizando un termómetro de sonda digital (TFA, Alemania). Se realizaron seis corridas de secado para cada combinación de temperatura-velocidad. Los promedios de las tres primeras, se utilizaron para calcular los parámetros del modelo y el resto se utilizó para validar el modelo propuesto.

4.3. Sistema de modelado algebraico general (GAMS) y consideraciones para su aplicación al secado de granos de quinoa

GAMS (Sistema de Modelado Algebraico General) es un sistema de modelado de alto nivel para programación y optimización matemática. Consiste en un compilador de lenguaje y una variedad de solucionadores asociados.

Dado que en la mayoría de los alimentos el periodo de velocidad de secado constante es muy pequeño y la humedad crítica es prácticamente igual a la humedad inicial, a la hora de modelizar el secado se considera únicamente el periodo de velocidad decreciente.

Para describir el perfil de humedad dentro de las muestras durante el proceso de secado, se propone un modelo matemático, considerando la ley de conservación de masa bajo las siguientes hipótesis:

- El agua se difunde a la superficie de cada partícula según la segunda ley de Fick.
- El proceso de difusión es el mecanismo de transferencia de masa dominante.
- La evaporación del agua tiene lugar sólo en el nivel de la superficie.
- La humedad en la superficie está en equilibrio con el aire de secado.
- La temperatura del aire se mantiene constante. Hay suficiente flujo de aire para evaporar el contenido interno de humedad, a través de la malla utilizada.
- La difusividad del agua depende del contenido de humedad y de la temperatura del grano.
- El secado tiene lugar en toda la superficie del grano, ya que se usa una bandeja de malla de acero inoxidable dentro de ambas cámaras.
- El caudal de aire es lo suficientemente grande para que las condiciones de secado (humedad, temperatura) se mantengan constantes en todo el material. El grano alcanza la temperatura del aire de secado.
- La generación de calor dentro del material y los efectos de la radiación son insignificantes.
- El aire está perfectamente mezclado dentro de la estufa y las características de flujo del aire son invariables.
- Debido al pequeño tamaño que tiene el grano, se considera constante la densidad del mismo durante el proceso de secado.
- Los granos se consideran esferas de 1,99 mm de diámetro.

La esfericidad es el grado de aproximación de una semilla a una esfera y en cualquier semilla es una función de sus dimensiones básicas (largo, ancho y espesor). Se calculó la esfericidad del grano de quinoa utilizando las siguientes expresiones (Önen *et al.*, 2014, Tarighi *et al.*, 2011, Koocheki *et al.*, 2007):

$$\phi = \frac{D_g}{L} \quad (4.1)$$

$$D_g = (L \cdot A \cdot e)^{\frac{1}{3}} \quad (4.2)$$

Dónde:

ϕ , es la esfericidad adimensional

Dg, es el diámetro medio geométrico del grano en milímetros

L, es el largo en milímetros

A, es el ancho en milímetros

e, es el espesor en milímetros

Para el cálculo de la esfericidad, las mediciones para el largo, ancho y espesor se realizaron por triplicado con calibre (precisión 0,05 mm) sobre un total de 30 granos seleccionados al azar, como se muestra en la Figura 4.2.



Figura 4.2. Mediciones del largo, ancho y espesor del grano de quinoa.

Los resultados obtenidos y el valor de esfericidad, se muestran en la tabla 4.1.

Tabla 4.1. Dimensiones y esfericidad del grano de quinoa

L	$1,99 \pm 0,05 \text{ mm}$
A	$1,99 \pm 0,05 \text{ mm}$
e,	$1,08 \pm 0,06 \text{ mm}$
ϕ	$0,82 \pm 0,05 \text{ mm}$

Un valor de esfericidad de 0,7 o mayor es considerado esférico para una semilla (Bande *et al.*, 2012). En semillas de quinua, Vilche *et al.* (2003), determinaron valores de 0,77 a 0,88 en función del incremento de humedad. Esto coincide con lo obtenido por Işık y Unal, (2011) y Tarighi *et al.*, (2011). Çalışır *et al.* (2005), para otro género de semilla, analizaron la disminución de la esfericidad al aumentar la humedad de la semilla. Cervilla *et al.* (2012), realizaron sus investigaciones en granos de quinua provenientes del Departamento Molinos en la Provincia de Salta (Argentina). Para

granos con humedad de 10,1 g agua/100 g de sólido húmedo, obtuvieron valores de largo, ancho y espesor de 2,06, 2,06 y 1,12 mm respectivamente. Para granos de humedad 8,85 g agua/100 g de sólido húmedo provenientes del Departamento La Poma en la misma provincia, informaron valores de 2,15, 2,14 y 1,11 mm, cabe destacar que para el departamento anterior los autores publican para granos con humedad 7,93 g agua/100 g de sólido húmedo valores de: 2,44, 2,37 y 1,35 mm. Valores menores han sido informadas para quinua: 1,889, 1,885 y 0,98 mm (Vilche *et al.*, 2003; Mujica *et al.*, 2006).

Para la aplicación del modelo, se consideraron a los granos como esferas de 1,99 mm de diámetro.

4.3.1. Coeficiente de difusividad efectiva

Es ampliamente aceptado que el coeficiente de difusividad efectiva puede describirse como una función exponencial del contenido de humedad y de la temperatura del material (Karathanos, 1990; Parti y Dugmaniscs, 1990; Wang y Brennan, 1995; Białobrzewski y Markowski, 2004; Ruiz López *et al.*, 2004), de acuerdo con la ecuación (4.3), en la cual los valores de los parámetros A, B y C serán estimados por el modelo.

$$D_{eff}(t) = A \cdot e^{\left(\frac{-B}{273,15+T}\right)} \cdot e^{(C \times \overline{HS}(t))} \quad (4.3)$$

donde D_{eff} es la difusividad del agua en m^2/s ;

Por lo tanto, el coeficiente de difusividad efectivo de la humedad, D_{eff} (ecuación 4.3), es una función de la temperatura del sólido (T) y del contenido de humedad del sólido (HS) durante el proceso de secado.

4.3.2. Modelo de transferencia de masa en granos de quinua

La ecuación utilizada para describir la transferencia de masa en estado no estacionario, en granos de quinua húmedos sometidos a condiciones de contorno convectivas, se aplica y escribe en coordenadas esféricas, que se fijan en el centro geométrico de la esfera.

Se aplica un modelo de difusión de Fick de transferencia de humedad para estimar la evolución temporal de la distribución radial del contenido de humedad local en un grano de quinua de radio R durante el secado:

$$\rho_s \cdot \frac{\partial HS(r, t)}{\partial t} = D_{eff}(t) \cdot \rho_s \cdot \left(\frac{\partial^2 HS(r, t)}{\partial r^2} + \frac{2}{r} \frac{\partial HS(r, t)}{\partial r} \right) \quad (4.4)$$

$$t > 0, \quad 0 < r < R$$

Se adoptan las siguientes condiciones iniciales y de contorno para resolver la ecuación:

- Condición inicial

Al inicio del proceso de secado el contenido de humedad del producto es uniforme.

$$HS(r, 0) = HSo \quad (4.5)$$

$$t = 0, \quad 0 < r < R$$

- Condición de simetría

Debido a la simetría, no habrá un gradiente de humedad, por lo cual las condiciones límites en el centro son:

$$-D_{eff}(t) \cdot \rho_s \cdot \frac{\partial HS(0, t)}{\partial r} = 0 \quad (4.6)$$

$$t > 0, \quad r = 0$$

- Condición de contorno en la interfase para el secado convectivo

$$-D_{eff}(t) \cdot \rho_s \cdot \frac{\partial HS(r, t)}{\partial r} = k \cdot \rho_s \cdot (HS(r, t) - HSeq) \quad (4.7)$$

$$t > 0, \quad r = R$$

La ecuación (4.7) establece que se considera un mecanismo convectivo de transferencia de masa desde la superficie del producto al volumen de aire para el método de secado convectivo, donde k y $HSeq$ son el coeficiente de transferencia de masa externa y el contenido de humedad de equilibrio del sólido seco, respectivamente.

4.3.3. Estrategias de resolución

Dado que el modelo se pretende implementar en la herramienta de optimización GAMS (Sistema de Modelado Algebraico General), el cual solo resuelve modelos basados en ecuaciones algebraicas, las ecuaciones diferenciales deben discretizarse para transformarse en ecuaciones algebraicas.

Por lo tanto, las ecuaciones (4.4 - 4.7) se discretizaron utilizando el método de diferencias finitas central (CFDM) implícito. Este esquema, que tiene precisión de primer orden en el tiempo y de segundo orden en el espacio, es incondicionalmente estable y convergente.

Las ecuaciones 4.8 y 4.9 definen las variaciones espaciales y temporales, respectivamente, con $M = 9$ y $N = 100$. Los valores de M y N han sido probados previamente y aseguran la estabilidad de la solución con la menor demanda computacional.

$$\Delta r = \frac{r}{M} \quad (4.8)$$

$$\Delta t = \frac{tf}{N} \quad (4.9)$$

El modelo de programación no lineal propuesto se implementó en GAMS y se resolvió utilizando CONOPT (Singh and Heldman, 1993), un algoritmo basado en el método de gradiente reducido.

Como primer paso, el modelo se usa para estimar los parámetros del coeficiente de difusión (ecuación (4.3)).

El objetivo de este paso es evaluar el rendimiento del modelo y las correlaciones implementadas, utilizadas para describir la transferencia de masa durante el secado. Luego, se fijan los valores obtenidos de los parámetros del coeficiente de difusión y se implementa la función objetivo (FO) basada en la minimización del error cuadrático medio (ECM) de los datos experimentales y estimados de contenido de humedad.

$$FO = Min\{ECM\} = Min\left\{\frac{1}{N}\left(\sum_{to}^{tf} (\overline{HS} \exp(t) - \overline{HS}(t))\right)^2\right\} \quad (4.10)$$

Donde $\overline{HS} \exp$ es la humedad promedio experimental, \overline{HS} la humedad promedio estimada por el modelo y N el número de valores de datos.

La función objetivo basada en la minimización del error cuadrático medio (ECM) de los datos experimentales y estimados de contenido de humedad se implementa de acuerdo con la ecuación (4.10) para evaluar los parámetros del modelo y la bondad del ajuste. Además, se calcula el coeficiente de determinación (R^2).

Para estimar los coeficientes de transferencia de masa, se adoptan correlaciones informadas anteriormente (3.2.1.3 y subsiguientes), con el fin de reducir los grados de libertad del modelo y facilitar la resolución de los modelos NLP. El modelo resultante involucra 4052 variables y 3547 restricciones.

4.3.4. Parámetros del modelo de secado para el grano de quinoa

Los principales parámetros de entrada del modelo clasificados como propiedades fisicoquímicas y condiciones de operación se enumeran en la Tabla 4.2.

Tabla 4.2. Parámetros del modelo matemático

Propiedad o variable de forma	Valor	Fuente
HS_o (g agua. g muestra seca ⁻¹)	0,353	Resultado experimental
r_o (cm)	0,0995	Resultado experimental
ρ grano de quinoa(40°C)(g/cm ³)	1,578	Choi Okos (1986)
ρ grano de quinoa (60°C)(g/cm ³)	1,575	Choi Okos (1986)
ρ grano de quinoa (80°C)(g/cm ³)	1,849	Choi Okos (1986)
Cp_a (40°C) (J g ⁻¹ °C ⁻¹)	1,0058	Moran y Shapiro (2004)
Cp_a (60°C) (J g ⁻¹ °C ⁻¹)	1,0070	Moran y Shapiro (2004)
Cp_a (80°C) (J g ⁻¹ °C ⁻¹)	1,0083	Moran y Shapiro (2004)
D_w (40°C) (cm ² . s ⁻¹)	0,276	Pakowski <i>et al.</i> (1991)
D_w (60°C) (cm ² . s ⁻¹)	0,309	Pakowski <i>et al.</i> (1991)
D_w (80°C) (cm ² . s ⁻¹)	0,343	Pakowski <i>et al.</i> (1991)
R (J . °C ⁻¹ mol ⁻¹)	0,8315	Geankoplis (1998)
P_a (Pa)	101325	Geankoplis (1998)

4.3.5. Validación del modelo aplicado

Los modelos fueron validados con resultados experimentales de laboratorio a diferentes temperaturas y velocidades de secado.

4.4. Molienda del grano

Para la molienda del grano, se utilizó un molino seco de cuchillas (IKA, Alemania) indicado en la Figura 4.3. Los granos se procesaron durante 15 segundos y la harina obtenida se reservó en bolsas herméticas de plástico hasta su uso.



Figura 4.3. Molino de cuchillas

4.5. Tamizado de la harina

Para determinar la granulometría de las harinas se empleó un tamizador RoTap (Tyler, EE.UU.), como el que se observa en la Figura 4.4. Las mallas utilizadas fueron de 16 (1000 μm), 25 (679 μm), 50 (289 μm), 100 (149 μm), 200 (74 μm) y 270 (53 μm) U.S. El tamizado se realizó tomando muestras de 100 g y agitándolo durante 5 min, para realizar la separación de las partículas. Finalmente se pesaron las fracciones de harinas retenidas en cada tamiz y se calculó el porcentaje de retención. El valor del tamaño medio final de cada harina fue obtenido por triplicado.



Figura 4.4. Equipo tamizador Ro Tap.

4.6. Determinaciones fisicoquímicas

4.6.1. Determinación de la humedad del grano

El contenido de humedad se determinó gravimétricamente según la técnica de la AOAC 945.15 (1990) para cereales. Para ello, se pesaron $2,0 \pm 0,1$ g de harina en cápsulas de aluminio previamente taradas, las cuales fueron secadas en estufa (Sific, Argentina) durante 3 h a 103-104 °C. La muestra se enfrió hasta temperatura ambiente en un desecador, antes de determinar su peso. El contenido de humedad se expresó como porcentaje en base seca según la ecuación:

$$\% \text{ humedad} = \frac{P_h - P_s}{P_s} \cdot 100 \quad (4.11)$$

Dónde: Ph: peso húmedo de la muestra, Ps: peso seco de la muestra.

4.6.2. Determinación de saponinas del grano

En los laboratorios de Latinreco, ubicados en Ecuador, se ha desarrollado y estandarizado un método físico para determinar las saponinas de la quinoa. Cuando se disuelven en agua y se agitan, las saponinas forman una espuma estable, cuya altura está correlacionada con el contenido de saponinas en los granos. Las investigaciones han consistido en la elaboración de un estándar y la estimación del contenido mediante un método normal y otro rápido (Koziol, 1991). Además, se ha logrado realizar una evaluación sensorial que permitió clasificar la quinoa en dulce y amarga, en relación con la cantidad de espuma formada. Cáceres Ríos (2016), en su tesis doctoral, relacionó los resultados obtenidos del análisis sensorial realizado por evaluadores entrenados, que determinaron la intensidad del gusto amargo y las alturas de espuma resultantes del método afrosimétrico. Para ello estudió 12 accesiones provenientes de la sierra de Marcará (Perú) y 12 accesiones provenientes de la costa La Molina (Perú). Para las muestras de quinua provenientes de la costa, las intensidades de gusto amargo en el nivel bajo fueron de 2,9 hasta 5,4 cm; en el nivel medio, de 6,2 a 8,5 cm y en el nivel alto fueron de 7,2 hasta 8,7 cm; para las muestras de la Sierra, para el nivel bajo fueron de 0,9 hasta 5 cm; el nivel medio de 5,9 hasta 7 cm y el nivel alto, de 7,2 hasta 8,7 cm. Siguiendo el método sugerido por Koziol (1991), se pesaron $0,5 \pm 0,1$ g de granos enteros, que se colocaron en un tubo de ensayo. Se añadieron 5 ml de agua destilada, se tapó el tubo y se agitó vigorosamente durante 30 segundos en vortex. Se dejó en reposo durante 30 segundos hasta la estabilización de la espuma. Luego, se midió la altura de la espuma con una apreciación de $\pm 0,1$ cm. Las determinaciones fueron realizadas por triplicado.

Para la cuantificación de las saponinas, se utilizó la siguiente expresión:

$$\% \textit{saponinas} = \frac{0,441 \cdot h + 0,001}{P \cdot 10} \quad (4.12)$$

Dónde h: altura de la espuma en cm, P: peso de la muestra en g.

4.6.3. Determinación de grasas totales de la harina

El contenido de grasas se realizó según la técnica IRAM 5624 (2015). Se empleó un equipo Soxhlet (Figura 4.5) y n-hexano (grado analítico, CAS N°110–54–3) como solvente. Para ello, se dispusieron $5,0 \pm 0,1$ g de harina de quinoa en cartuchos de papel Whatman N° 3 y la extracción se mantuvo durante 4 h. Transcurrido ese tiempo, el solvente fue destilado en el mismo recipiente utilizado para la extracción y el balón con la materia grasa extraída, se colocó durante una hora en estufa a 103 ± 2 °C (Sific, Argentina), para agotar el hexano de la muestra. Se dejó enfriar en un desecador y se pesó en balanza de precisión, asegurando el miligramo (Boeco Germany modelo BAS 31 plus, EU).



Figura 4.5. Equipo Soxhlet para determinación de grasas totales

El porcentaje de grasa total se calculó de la siguiente manera:

$$\% \textit{grasa} = \frac{m_1 \cdot 100}{P} \quad (4.13)$$

Donde m_1 es la masa de la materia grasa extraída en gramos y P es la masa seca de la muestra en gramos.

4.6.4. Determinación de proteínas totales de la harina

El contenido de proteínas totales se determinó utilizando la técnica IRAM 15852-2 (2020), mediante un equipo Kjeldahl (Figura 4.6).



Figura 4.6. Bloque de digestión y de destilación del equipo Kjeldahl.

Primero se realizó la digestión en caliente de la muestra con ácido sulfúrico concentrado, en presencia de sulfato de cobre como catalizador y sulfato de potasio, para aumentar el punto de ebullición del ácido. Posteriormente la muestra digerida se neutralizó con hidróxido de sodio al 30 % y el amoníaco liberado se destiló sobre un exceso de solución de ácido bórico y se determinó por titulación con ácido clorhídrico 0,1 N.

El contenido de nitrógeno, se calculó según:

$$N \% = \frac{(V_s - V_b) \cdot N \cdot 14,01}{P \cdot 10} \quad (4.14)$$

Siendo:

$N \%$, contenido de nitrógeno, en gramos por 100 gramos;

V_s , volumen de la solución titulante gastado para titular la muestra, en mililitros;

V_b , volumen de la solución del titulante para titular el blanco, en mililitros;

N , normalidad de la solución titulante;

P , masa de la muestra de análisis o del material de referencia, en gramos;

10, el factor de conversión mg/g a porcentaje;

14,01, peso atómico del nitrógeno.

El contenido de proteína cruda, se calculó según:

$$P_t = N \% \cdot F \quad (4.15)$$

Siendo:

P_t, proteína cruda, en gramos por 100 gramos;

F, factor de conversión de nitrógeno a proteína. Para calcular el contenido proteico de la muestra se multiplicó el contenido de nitrógeno presente por 6,25.

4.6.5. Determinación de cenizas de la harina

El contenido de cenizas de la harina de quinoa se determinó utilizando la técnica IRAM 15851 (2009). Para la incineración de la muestra, se utilizó una mufla eléctrica (Técnica Seis S.A.) que se muestra en la Figura 4.7.



Figura 4.7. Mufla eléctrica

Para la determinación, se pesaron entre 2 y 3 g de harina en una cápsula de porcelana (0,1 mg). La muestra se incineró a $550 \text{ }^\circ\text{C} \pm 10 \text{ }^\circ\text{C}$. La determinación se efectuó por triplicado.

El contenido de cenizas se calculó mediante la siguiente expresión:

$$C = \frac{m_2 - m_1}{m} \cdot \frac{100}{100 - H} \quad (4.16)$$

Dónde:

C, las cenizas, en gramos por cien gramos de muestra seca

m, la masa de la muestra, en gramos

m_1 , la masa de la cápsula vacía, en gramos

m_2 , la masa de la cápsula con las cenizas, en gramos

H, la humedad de la muestra

4.6.6. Determinación de la capacidad antioxidante y antimicrobiana

Para la determinación del contenido de compuestos fenólicos totales, flavonoides y para la determinación de la capacidad antioxidante y antimicrobiana, se obtuvieron extractos hidroalcohólicos, a partir de las harinas de quinoa.

4.6.6.1. Preparación de los extractos

Carrasco Sandoval (2020), optimizó las condiciones de extracción de compuestos fenólicos totales en quinoa y encontró que la relación solvente/sólido óptima para este proceso fue igual a 1:33.4 g sólido/ml de solución extractiva. Carciochi (2014), por su parte, estudió el efecto de la relación sólido/solvente con etanol 40 % v/v como solvente y partículas de la matriz de extracción de $d < 0,5$ mm. Al utilizar relaciones sólido/solvente de 1/10, 1/20 y 1/40, observó que los valores de compuestos fenólicos totales fueron mayores en la medida en que la relación sólido/solvente aumentaba y se hacía muy similar para las relaciones 1/20 y 1/40. Concluyó que tanto la relación 1/20 como 1/40 se pueden considerar, apropiadas para obtener rendimientos máximos.

En ensayos anteriores, se determinó que la relación sólido/solvente óptima para la extracción de compuestos fenólicos totales fue 1:31 (Luisetti *et al.* 2020). Considerando estos resultados previos y la coincidencia con los datos publicados mencionados en el párrafo anterior, las operaciones de extracción se llevaron a cabo utilizando una relación peso de harina (g): volumen de solvente (ml) igual a 1:30. Se pesaron 20 gramos de harina y se llevaron a un recipiente con 600 ml de mezcla hidroalcohólica de etanol. Se empleó un extractor batch colocado en un baño termostático (Lauda, Alpha A6, Alemania) a $50^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$ con agitación continua, utilizando un agitador de hélice conectado a un motor de velocidad regulable, como se puede observar en la Figura 4.8. El tiempo de extracción fue de 30 minutos, de acuerdo a ensayos preliminares como se explica a continuación, y la velocidad de agitación empleada fue de 70 revoluciones por minuto, ya que dicha velocidad permitió mantener en suspensión las partículas en el solvente utilizado. Se tomaron muestras de 15 ml con una jeringa. Los extractos se filtraron y almacenaron en recipientes opacos a $-18 \pm 1^{\circ}\text{C}$ para las posteriores determinaciones.



Figura 4.8. Equipo de extracción batch.

Elección del tiempo de extracción

Se realizó una experiencia previa para determinar el tiempo de extracción que optimiza la extracción de los principios activos, en un tiempo adecuado para el proceso.

Para ello, se utilizó la harina de quinoa secada a 60 °C, bajo las condiciones operativas indicadas en el párrafo anterior.

Se tomaron muestras de 10 ml cada 5 minutos durante la primera media hora y luego cada 10 minutos, hasta completar las 2 horas de extracción. Posteriormente, los extractos se filtraron y se determinó el contenido de compuestos fenólicos totales para cada tiempo, como se ilustra en la Figura 4.9. Se aprecia que el contenido de compuestos fenólicos totales se estabiliza al cabo de 30 minutos. En consecuencia, se decide establecer un tiempo de extracción de 30 minutos.

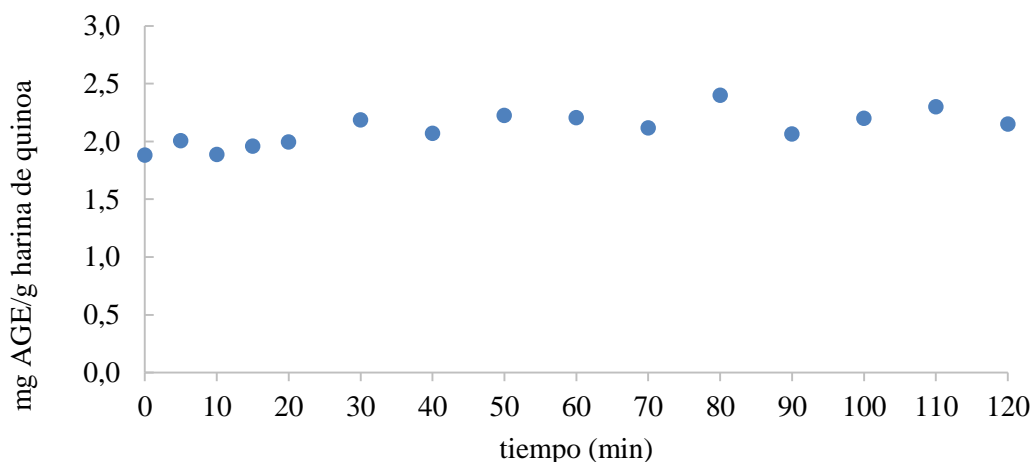


Figura 4.9. Contenido de compuestos fenólicos totales (mg AGE/g quinoa) para diferentes tiempos de extracción.

En la Figura 4.10, se observan los extractos obtenidos para los distintos tiempos ensayados.



Figura 4.10. Extractos obtenidos para distintos tiempos de extracción.

4.6.6.2. Determinación de los compuestos fenólicos totales en los extractos

La determinación de compuestos fenólicos se realizó utilizando el reactivo Folin Ciocalteu, el cual consiste en una solución de ácido fosfomolibdico y ácido fosfowolfrámico, que oxida los compuestos polifenólicos a fenolatos en medio alcalino, formando un complejo de molibdeno-tungsteno de color azul. La determinación se realizó siguiendo el protocolo propuesto por Singleton *et al.*, (1999) con modificaciones (Figura 5.11). Se mezclaron 40 μ l de muestra con 4 ml de agua destilada, se le agregaron 40 μ l de reactivo de Folin Ciocalteu y 2 ml de solución de carbonato de sodio saturada. La mezcla se homogeneizó y se dejó reposar 2 horas en oscuridad hasta la medición de la absorbancia a 765 nm en espectrofotómetro (UV-1800, Shimadzu, Japón). Las determinaciones se realizaron por triplicado y los resultados fueron expresados como Ácido Gálico

Equivalente (AGE) por gramo de semillas de quinoa (b. s.), utilizando una curva de calibración a partir de soluciones estándar de ácido gálico (Figura 4.12).

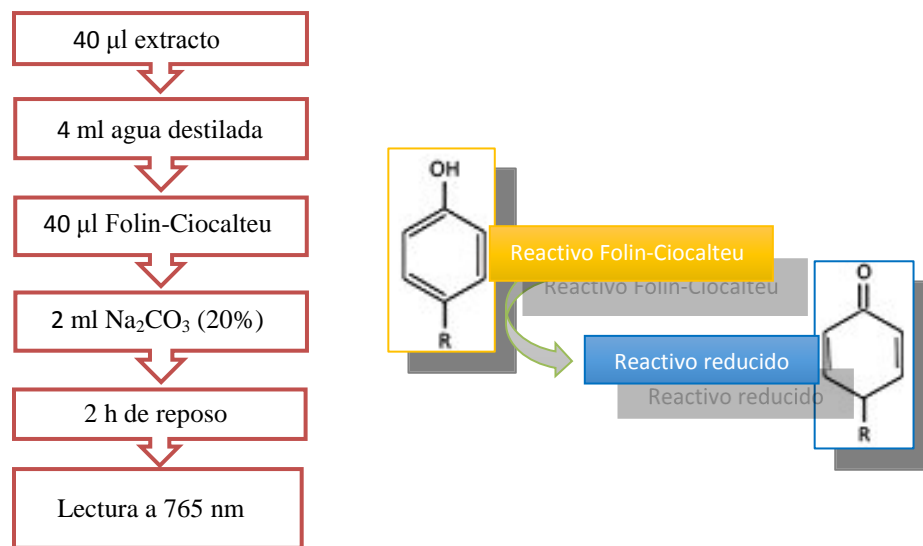


Figura 4.11. Diagrama del método de cuantificación de compuestos fenólicos totales de extractos de harina de quinoa.

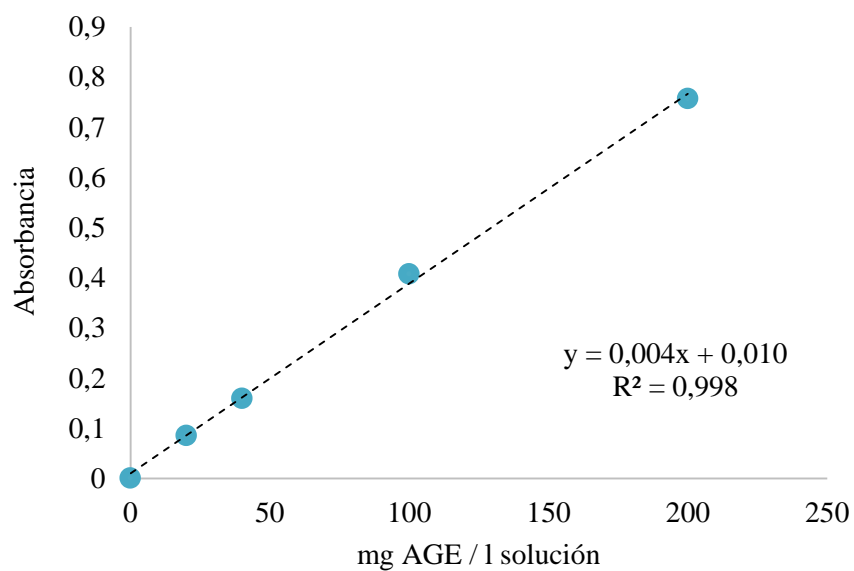


Figura 4.12. Curva de calibración para la determinación de compuestos fenólicos totales en los extractos de harina de quinoa.

4.6.6.3. Determinación de flavonoides en los extractos

El contenido de flavonoides se determinó de acuerdo al método descrito por Dini *et al.* (2010), con modificaciones (Figura 4.13). El fundamento del método consiste en la formación de un complejo flavonoide-aluminio de color rosado, que absorbe a una longitud de onda de 510 nm cuando se encuentra en medio alcalino. En este caso, se mezclaron 1 ml de extracto con 4 ml de agua destilada y 0,3 ml de una solución de nitrito de sodio al 5 % y se agitó en vórtex (Boeco Germany V1). Luego de 5 minutos, se agregaron 0,3 ml de una solución de cloruro de aluminio al 10 % y se llevó nuevamente a agitación. Luego de 6 minutos, se agregaron a la mezcla 2 ml de una solución de hidróxido de sodio 1 M y 2,4 ml de agua destilada. La medición de la absorbancia se realizó a 510 nm en espectrofotómetro (UV-1800, Shimadzu, Japón). Las determinaciones se realizaron por triplicado y los resultados fueron expresados como Quercetina Equivalente (QE) por gramo de semillas (b. s.), utilizando una curva de calibración a partir de soluciones estándar de Quercetina (Figura 4.14).

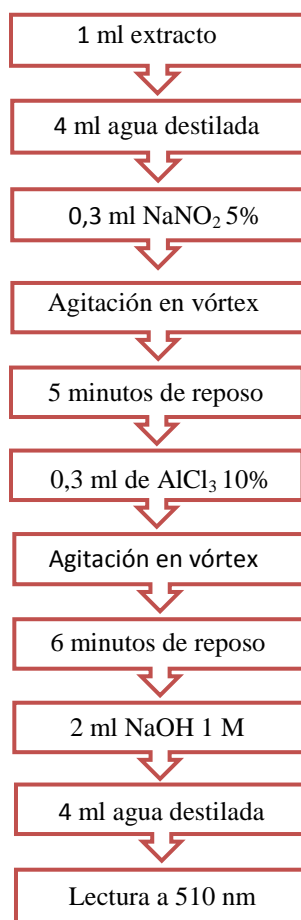


Figura 4.13. Diagrama del método de cuantificación de flavonoides de los extractos de harina de quinoa.

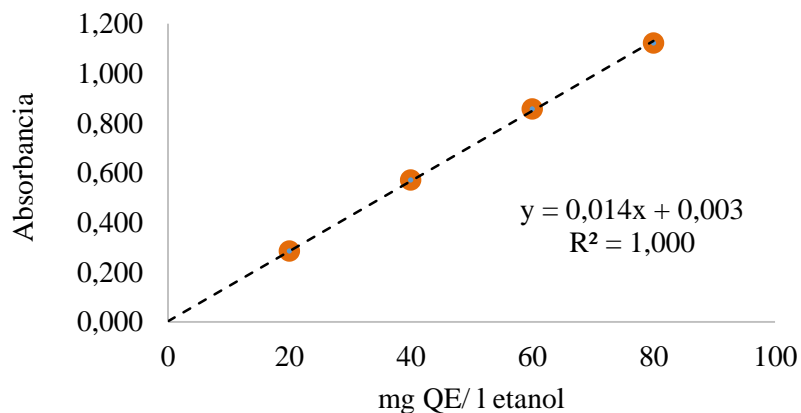


Figura 4.14. Curva de calibración para la determinación de flavonoides en los extractos de harina de quinoa.

4.6.6.4. Capacidad antioxidante de los extractos

La capacidad antioxidante de los extractos de harina de quinoa, se evaluó usando el método propuesto por Shimada *et al.* (1992); el cual, se basa en la reducción de la absorbancia del radical 1-1-difenil-2-picril-hidracilo (DPPH), debido a la cesión de electrones por parte de la especie antioxidante. El DPPH es un radical estable de color violeta.

A 1 ml de extracto, se le agregaron 5 ml de solución de DPPH 0,1 mM recién preparada. Se agitó con vórtex y se almacenó por 50 minutos en la oscuridad. Se midió la absorbancia a 517 nm, con un espectrofotómetro (UV-1800, Shimadzu, Japón). La muestra de control se preparó sin agregar extracto (Figura 4.15).

Todas las muestras se analizaron por triplicado y los resultados se presentan como el valor promedio y se expresaron como Trolox Equivalente (TE) por gramo de semillas (b. s.), utilizando una curva de calibración a partir de soluciones estándar de Trolox (Figura 4.16).



Figura 4.15. Diagrama del método de determinación de la capacidad antioxidante de los extractos de harina de quinoa.

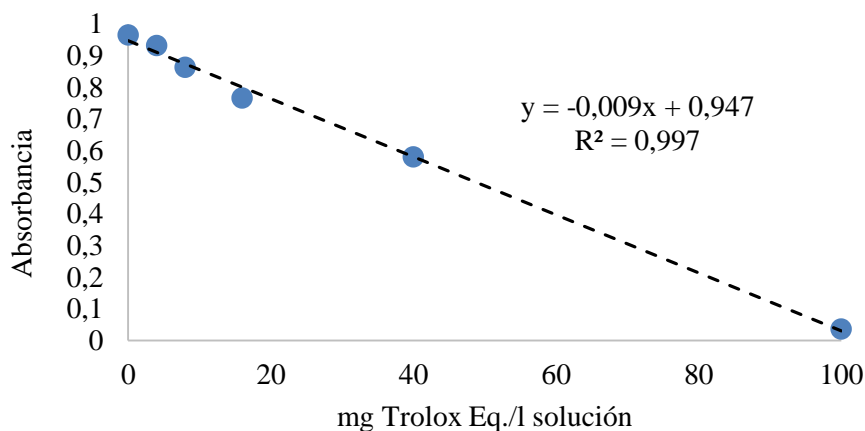


Figura 4.16. Curva de calibración para la determinación de la capacidad antioxidante de los extractos de harina de quinoa.

4.6.6.5. Capacidad antimicrobiana de los extractos

Se procedió a la determinación de halo de inhibición por el Método de difusión en agar. La técnica está basada en el método originalmente descrito por Bauer y adoptado como el método de referencia para difusión por disco por el National Committee for Clinical Laboratory Standards (NCCLS, 2012).

El fundamento de esta determinación es establecer de forma cualitativa, el efecto de un conjunto de sustancias, ensayadas individualmente sobre las cepas bacterianas. Este método consiste en depositar en la superficie de agar de una placa de Petri, previamente inoculada con el microorganismo, discos de papel secante impregnados con los diferentes extractos a evaluar. Tan pronto el disco impregnado se pone en contacto con la superficie húmeda del agar, el filtro absorbe

agua y el compuesto difunde al agar (Baron Pichardo, 2019). La difusión es radial, a través del espesor del agar a partir del disco, formándose un gradiente de concentración. Transcurrido el tiempo de incubación, los discos aparecen rodeados por una zona de inhibición (Ramírez y Castaño, 2009; Balour *et al.*, 2016). La susceptibilidad del microorganismo en prueba está relacionada con el tamaño de la zona de inhibición en milímetros. Los microorganismos se denominan susceptibles, intermedios o resistentes, según sea el tamaño del halo de inhibición (Balour *et al.*, 2016).

Se probaron los extractos etanólicos obtenidos a partir de la harina sin tratar y para los 6 tratamientos térmicos ensayados, frente a bacterias *Escherichia coli* y *Staphylococcus aureus*. Los microbios de prueba se transfirieron asépticamente con un asa de inoculación a un tubo de ensayo que contenía 5 ml de caldo nutritivo. Se agregaron suficientes inóculos hasta que la turbidez fue igual a los estándares de 0,5 McFarland. La suspensión del tubo de ensayo (1 ml) se agregó a 15–20 ml de agar nutritivo. Se emplearon discos de papel de filtro N°1 de Whatman de 6 mm de diámetro para detectar la actividad antimicrobiana. Cada disco estéril se impregnó con 20 μ l de extracto, antes de colocarlo en la superficie de las placas sembradas. Las placas de bacterias se incubaron a 37 °C por 24 horas. Transcurrido ese tiempo, se examinaron las zonas de inhibición del crecimiento.

4.7. Análisis estadístico de los datos

Los resultados experimentales se obtuvieron por triplicado y se presentan como promedio \pm D.E.

El análisis estadístico se llevó a cabo utilizando el programa Minitab 2018 (Pennsylvania, EEUU) mediante el cual se realizó el análisis de la varianza, con comparación de medias de los tratamientos mediante la prueba de Tuckey ($p < 0,05$).

Para la resolución del modelo de secado, se utilizó el software GAMS (Washington, EEUU), que resuelve modelos basados en ecuaciones algebraicas.

Capítulo 5

Resultados y discusión

5. Resultados y discusión

5.1. Humedad del grano

La humedad de almacenamiento del grano fue de $11,8 \pm 0,1$ g agua/100 g quinoa b. s. Este valor concuerda con los hallados por otros autores. Mujica *et al.* (2001), en un trabajo realizado para la FAO, reportaron valores de 10,05 g agua/100 g quinoa b. s.; Aguirre (2003) informó una humedad de 11,6 g agua/100 g quinoa b. s., que resultó del promedio obtenido de cinco autores. Repo Carrasco *et al.* (2011) estudiaron las variedades de quinoa Choclito de Ayaviri, Chullpi y Pasankalla y hallaron valores de almacenamiento de los granos de 8,93 g agua/100 g quinoa b. s., 9,99 g agua/100 g quinoa b. s. y 9,74 g agua/100 g quinoa b. s., respectivamente. Miranda *et al.* (2010), estudiaron la composición centesimal de quinoa proveniente del Valle de Elqui, Chile. Hallaron 13,42 g agua/100 g quinoa b. s. de humedad de almacenamiento del grano. Fuentes Gómez y Mendoza Villamil (2019), estudiaron quinoa amarilla, roja y negra y hallaron valores de humedad de almacenamiento de los granos de 13 g agua/100 g quinoa b. s., 12 g agua/100 g quinoa b. s. y 11,85 g agua/100 g quinoa b. s. Aguilar Izquierdo (2017), obtuvo humedades de almacenamiento entre 10,02 g agua/100 g quinoa b. s. y 11,41 g agua/100 g quinoa b. s., para las tres variedades de quinoa analizadas.

5.2. Contenido de saponinas

Según el CODEX Alimentarius, los granos de quinoa destinados al consumo humano, envasados a granel, deberán contener valores menores al 0,12 % de saponinas. En algunos países como Bolivia y Perú, contemplan dicho porcentaje como límite para saponinas; mientras que en el Artículo 682 del Código Alimentario Argentino, no registra valor alguno.

Bonilla *et al.* (2019), determinaron el contenido de saponinas mediante el método afrosimétrico de dos variedades de quinoa (Hualhuas y Recuay). Informaron una mayor cantidad de saponina para la variedad proveniente de Recuay (altura de espuma 6,9 cm), con respecto a la de Hualhuas (altura de espuma 0,5 cm). Esto concuerda con lo mencionado por Ahumada *et al.* (2016), quienes refieren que el contenido de saponinas está en función tanto de la variedad como de su origen. García Parra *et al.* (2018) estudiaron que las características climáticas de cada lugar y las características genéticas de cada variedad son determinantes en el contenido de saponinas.

Las diferencias en el contenido de saponinas en la quinoa, se deben a factores ambientales y/o genéticos y a las variedades de quinoa de las que se habla. De acuerdo a Bacigalupo y Tapia (1990),

el nivel máximo aceptable de saponina en la quinoa para consumo humano oscila entre 0,06 y 0,12 %. Esto concuerda con los resultados de pruebas sensoriales realizados en la Universidad de Ambato, Ecuador, en donde se determinó que el límite máximo de aceptación del contenido de saponinas en el grano cocido, fue del 0,1 % (Nieto y Soria, 1991). Soto *et al.* (2010) se basaron en los resultados del trabajo del Comité de Normalización de Cereales en Bolivia; en lo relacionado al contenido de saponinas, presentaron el límite máximo de 120 mg/100 g, determinado por el método de la espuma.

En la Tabla 5.1 se muestran los resultados obtenidos al analizar la quinoa utilizada en el presente trabajo.

Tabla 5.1. Porcentajes de saponinas obtenidos en el grano de quinoa

Masa de quinoa (g)	Altura de la espuma (cm)	% saponinas
0,5015	0,5	0,04
0,5097	0,5	0,04
0,5078	0,5	0,04

Portillo *et al.* (2021) evaluaron la eliminación de las saponinas del grano para considerar su adecuación a los niveles aptos para el consumo humano. Utilizaron granos variedad CICA 19 (coloración amarillo-naranja, cosecha 2018) cultivada en Cerrillos, Salta, Argentina. Los granos empleados tuvieron un porcentaje inicial de saponinas de 0,114 % \pm 0,014, en promedio, que se redujo a 0,02 %, luego del tratamiento.

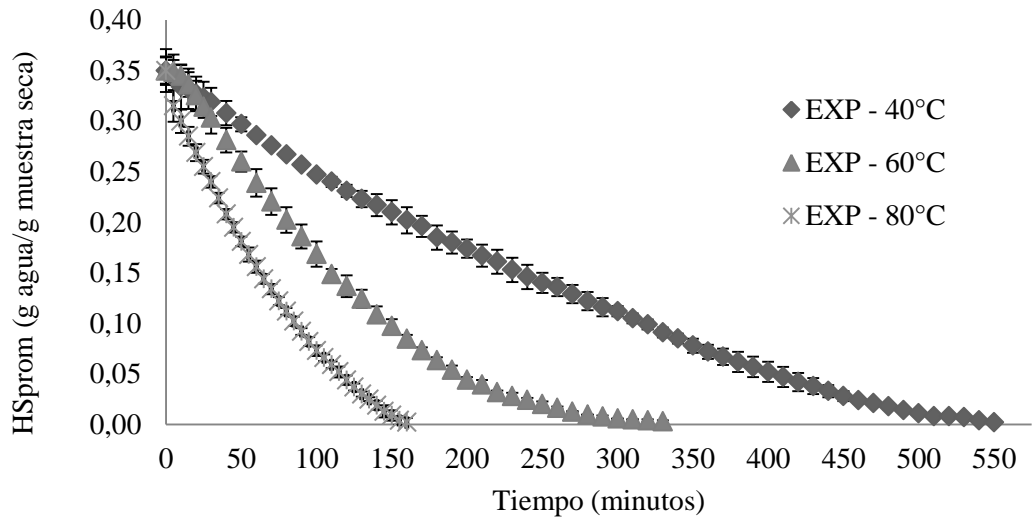
El porcentaje de saponinas obtenido en la presente tesis, se encuentra por debajo del nivel máximo aceptable según los antecedentes bibliográficos. Por este motivo, no fue posible practicar la desaponificación de estos granos y los ensayos posteriores fueron realizados con el grano de quinoa sin desaponificar.

Es probable que se trate de una variedad híbrida, que constituye la mayoría de la actual producción de quinoa, y que va reemplazando a las variedades autóctonas, más ricas en saponinas.

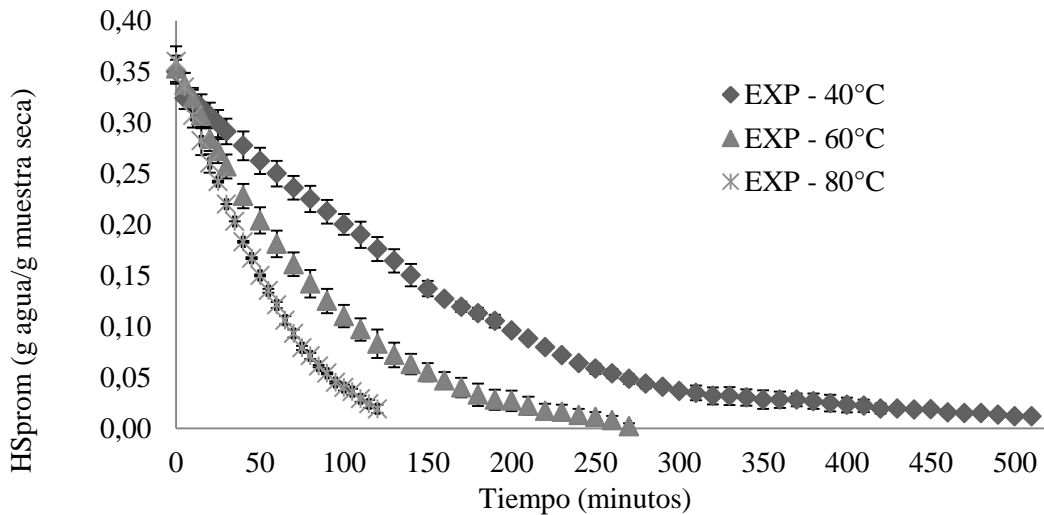
5.3. Resultados experimentales del secado de la quinoa

Se rehumectaron los granos hasta alcanzar una humedad de 35,30 \pm 0,13 g de agua/100 g de quinoa (b. s.) y sobre ellos se realizaron los ensayos de secado.

En la Figura 5.1 se muestran los perfiles experimentales del contenido de humedad promedio obtenidos. Los gráficos se agrupan según el nivel de velocidad del aire y se muestra un único conjunto de datos a modo de ejemplo. Los datos experimentales se informan en el Anexo de este trabajo de tesis.



a



b

Figura 5.1. Variación del contenido de humedad con el tiempo de secado para los granos de quinoa a diferentes condiciones de operación **a)** $v_1 = 0,2 \text{ m/s}$; **b)** $v_2 = 0,7 \text{ m/s}$.

En la Figura 5.1, se pueden observar tiempos de secado más cortos y velocidades de secado más altas a mayores temperaturas del aire de secado. Este resultado representa el comportamiento del secado de vegetales y cereales (Ertekin y Yaldiz, 2005; Vega *et al.*, 2005; Ocampo 2006; Akpinar y

Bicer 2006; Mohammadi *et al.* 2008). Vásquez Chávez y Vizcarra Mendoza (2008) determinaron que el parámetro de la temperatura del aire favorece al aumento de la evaporación del agua en el grano y por consiguiente, la pérdida de humedad se vuelve más rápida. Además, cuando el aire de secado contiene menos humedad, la absorción del agua contenida en el grano va a ser mayor y por lo tanto el proceso de secado tomará menos tiempo (Larrosa *et al.* 2016)

En todas las curvas se observó que al inicio del proceso de secado disminuye rápidamente la humedad, pero luego este proceso se ralentiza paulatinamente, hasta alcanzar el equilibrio. Según Ajala *et al.* (2012) y Geankoplis (1998), la mayoría de los productos agrícolas se secan en un periodo de tasa decreciente, proceso que puede tardar alrededor de 9 horas.

Para cada temperatura de secado, se observó una disminución del tiempo de secado cuando se aumentó la velocidad del aire, fenómeno que se explica por el aumento de la velocidad de difusión del agua desde el interior del grano hacia la superficie del mismo.

En la tabla 5.2, se muestran los tiempos de secado de los granos para los tratamientos ensayados. Cerrón Mercado (2013), en su tesis doctoral trabajó con granos de quinoa de la variedad Hualhuas. Realizó el desaponificado de los granos vía húmeda y posteriormente llevó a cabo el secado convectivo a temperaturas ambiente (20 °C), 30 °C y 50 °C, obteniendo tiempos de secado de 6,49, 6,33 y 5,29 horas respectivamente.

Tabla 5.2. Tiempos de secado de los granos para los tratamientos ensayados

	40 °C	60 °C	80 °C
$v_1= 0,2$ m/s	560 min	340 min	160 min
$v_2= 0,7$ m/s	530 min	300 min	150 min

Noroña Gamboa (2018) estudió la cinética de secado de distintos cereales provenientes de la Región Centro del Ecuador. Para el secado de maíz a 60 °C, 50 °C y 40 °C, los tiempos para alcanzar la humedad de equilibrio fueron 24, 25 y 32 horas, respectivamente. En el trigo, el proceso de secado a 60 °C tomó alrededor de 9 horas, a 50 °C, 9,5 horas y a 40 °C alrededor de 27 horas. Respecto a la cebada los tiempos fueron 7, 10,5 y 25 horas para los secados a 60 °C, 50 °C y 40 °C, respectivamente.

5.4. Aplicación del modelo de secado

La Figura 5.2 resume diferentes variables, parámetros y datos de entrada experimentales requeridos para resolver el modelo, para el secado convectivo de granos de quinoa.

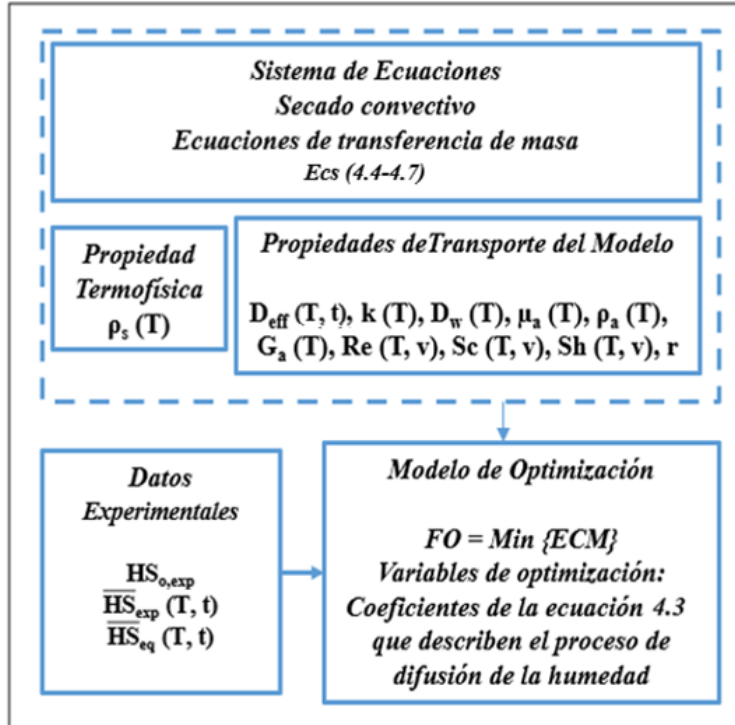


Figura 5.2. Resumen del modelo matemático del proceso que representa la cinética de secado de granos de quinoa.

La Tabla 5.3 presenta el valor correspondiente al error cuadrático medio (ECM) para el modelo implementado. De los resultados obtenidos, se concluye que los ECM son bajos, siendo el modelo satisfactorio para describir el proceso de secado, obteniéndose los parámetros de difusión. También se observan valores altos de R^2 , lo que demuestra una bondad de ajuste aceptable.

El adecuado ajuste se logra mediante la implementación de correlaciones ampliamente utilizadas en la literatura para la estimación de parámetros en la descripción del modelo de secado, mencionadas en la Tabla 4.2.

5.4.1. Efecto de las condiciones de secado sobre la difusividad efectiva y el coeficiente de transferencia de materia

La Tabla 5.3 presenta los valores del $Deff$ y de los parámetros A, B y C para cada tratamiento de secado, obtenidos con la ecuación 4.3. Además, muestra los valores del coeficiente de transferencia de materia obtenido para cada ensayo.

Tabla 5.3. Datos de ajuste obtenido por aplicación del modelo de secado para los ensayos con quinoa.

T (°C)	v (m/s)	$Deff$ (m ² /s)	ECM	A	B	C	R ²	k (cm/s)
40	0,2	2,52. 10 ⁻¹⁰ a	1,00. 10 ⁻⁰³	0,05	3100	0,03	1,000	7,20 ^d
40	0,7	3,02. 10 ⁻¹⁰ a	6,00. 10 ⁻⁰³	0,06	3100	0,03	0,991	11,20 ^e
60	0,2	5,47. 10 ⁻¹⁰ b	1,00. 10 ⁻⁰³	0,06	3100	0,03	1,000	7,76 ^d
60	0,7	5,93. 10 ⁻¹⁰ b	1,00. 10 ⁻⁰³	0,065	3100	0,03	1,000	11,33 ^e
80	0,2	9,27. 10 ⁻¹⁰ c	2,00. 10 ⁻⁰³	0,06	3100	0,03	1,000	7,83 ^d
80	0,7	1,00. 10 ⁻⁰⁹ c	4,00. 10 ⁻⁰³	0,065	3100	0,03	1,000	11,47 ^e

Letras diferentes indican diferencias significativas.

En la Tabla 5.3, se evidencia que el coeficiente de difusión del agua aumenta con el incremento de la temperatura del grano. Como se esperaba, el uso de temperaturas de secado más altas promueve una mayor movilidad del agua en los sistemas alimentarios desde el interior hasta la superficie (Ruiz López *et al.*, 2004) y aumenta la difusividad efectiva de la transferencia de masa. Por otro lado, los resultados obtenidos se encuentran dentro del intervalo hallado para otros alimentos (10⁻¹⁰ y 10⁻⁸ m²/s) (Zogzas *et al.*, 1996).

Janampa Arango (2017) investigó la difusividad efectiva durante el secado convectivo a 60 °C y velocidad del aire de 4,5 m/s para diferentes variedades de quinoa. Obtuvo los siguientes resultados: Negra Collana (5,73395 x 10⁻¹¹), Negra Ayrampo (5,73395 x 10⁻¹¹), Pasankalla (1,048668 x 10⁻¹⁰), Amarilla Compuesta (5,23276 x 10⁻¹¹) y Rosada de Juli (5,13289 x 10⁻¹¹).

Pagano y Mascheroni (2011) evaluaron la cinética de secado de granos de amaranto bajo diferentes condiciones. Realizaron el secado a temperaturas entre 25 y 55 °C, empleando un caudal de aire constante (0,3 m/s) y una humedad de almacenamiento de 14,9 g agua/100 g sólido seco. Obtuvieron coeficientes de difusión entre 2,103 x 10⁻¹² (25°C) y 3,966 x 10⁻¹² (55 °C). Calzetta Resio *et al.* (2004), secaron granos de amaranto con humedades de 20 y 32,5 g agua/100 g sólido seco, a las temperaturas 40, 50, 60 y 70 °C. Para la humedad del grano de 20 g agua/100 g sólido

seco de humedad, obtuvieron valores de difusividades de $6,375 \times 10^{-12}$ (40°) y $1,218 \times 10^{-11}$ (70° $^\circ\text{C}$); mientras que para el 32,5 g agua/100 g sólido seco, los resultados fueron $1,619 \times 10^{-11}$ (40° $^\circ\text{C}$) y $5,189 \times 10^{-11}$ (70° $^\circ\text{C}$).

Pantoja *et al.* (2016) realizaron el secado de dos variedades de arvejas (Obonuco Andina y Sureña) a temperaturas entre 45 y 60 $^\circ\text{C}$, con una velocidad de aire de 1,5 m/s. Para la variedad de arveja Obonuco Andina, obtuvieron valores de $1,649 \times 10^{-10}$ m^2/s (a 45 $^\circ\text{C}$) y $2,585 \times 10^{-10}$ m^2/s (a 60 $^\circ\text{C}$). Por otro lado, para la variedad Sureña los valores fueron $1,752 \times 10^{-10}$ y $2,586 \times 10^{-10}$ m^2/s para la menor y mayor temperatura, respectivamente.

Se realizó una prueba de comparación de Tukey (Figura 5.3 a), para las tres temperaturas de secado para ambas velocidades del aire de secado ensayadas, y se hallaron diferencias significativas ($p < 0,05$) en el coeficiente de difusión efectivo en función de la temperatura.

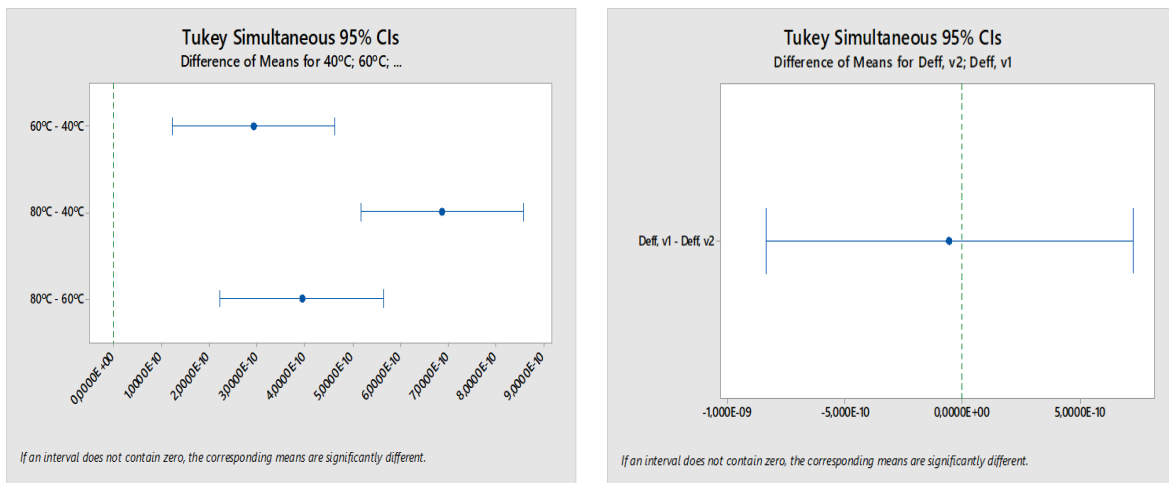
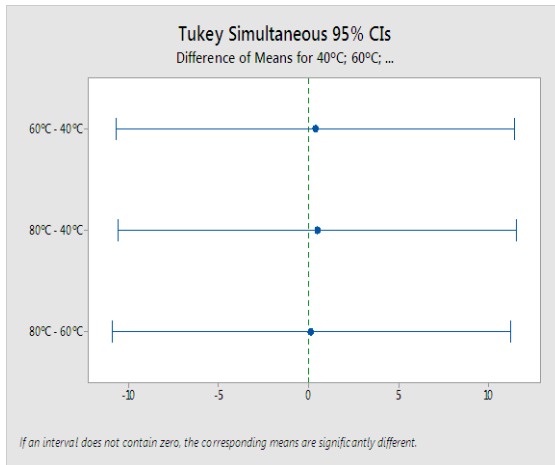
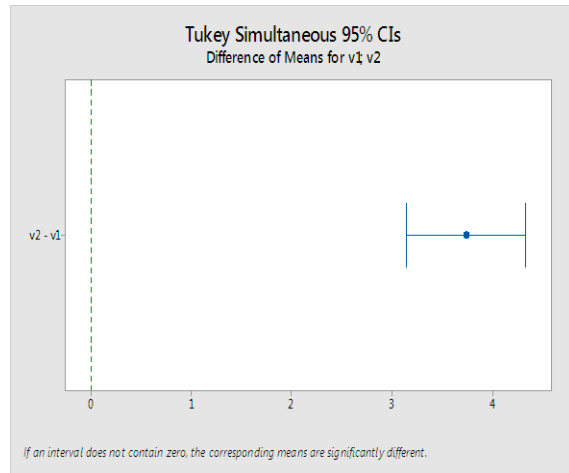


Figura 5.3. Prueba de comparación de Tukey para el coeficiente de difusión considerando las tres temperaturas y las dos velocidades del aire de secado.

En cambio, se confirmó mediante la prueba de comparación de Tukey (Figura 5.3 b), que el coeficiente de difusividad efectiva no depende de la velocidad del aire de secado ($p > 0,05$).



a (Temperaturas)



b (Velocidades)

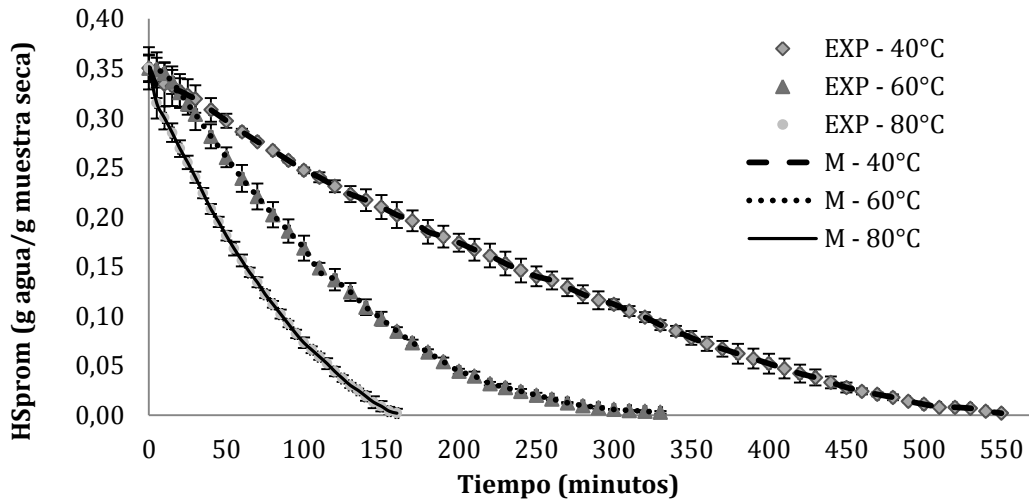
Figura 5.4. Prueba de comparación de Tukey para el coeficiente de transferencia de materia considerando las considerando las tres temperaturas y las dos velocidades del aire de secado.

En cuanto al coeficiente de transferencia de masa, como era esperado, aumentó con el incremento de la temperatura y velocidad del aire de secado. Se realizó una prueba de comparación de Tukey del coeficiente de transferencia de materia para las condiciones ensayadas; no se encontraron diferencias significativas ($p > 0,05$) en función de las temperaturas del aire de secado ensayadas (Figura 5.4 a), pero si con respecto a sus velocidades (Figura 5.4 b).

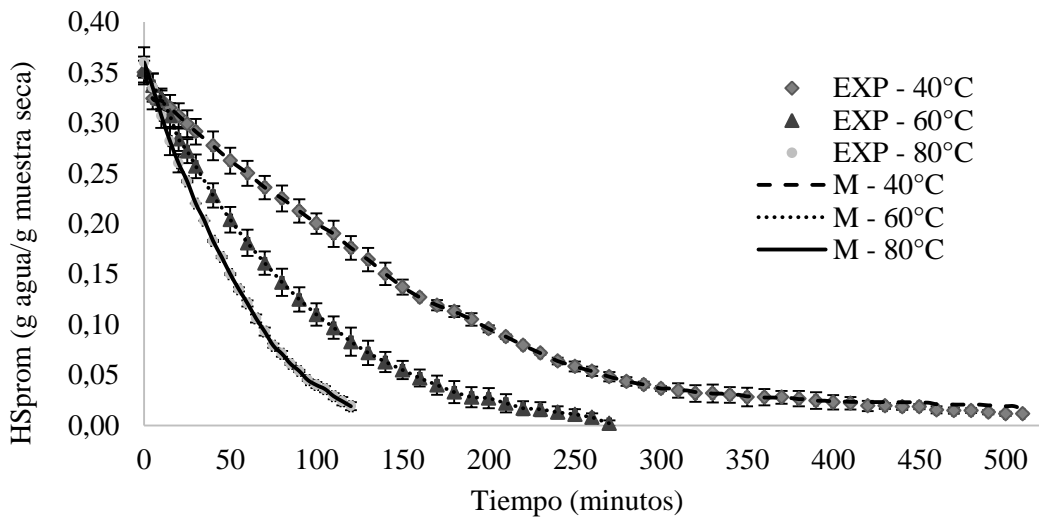
Cuando el sólido alcanza la humedad crítica, la transferencia de agua continúa con una velocidad de secado decreciente, hasta que el sólido llega a la humedad de equilibrio con el aire de secado. Durante este proceso, se retira la humedad libre contenida al interior de los poros del sólido mediante transferencia de masa. Una mayor velocidad del aire de secado, favorece la renovación del aire de secado evitando la saturación del mismo. Esto conlleva un incremento en el coeficiente de transferencia de masa.

5.4.2. Validación del modelo

Se verificó el ajuste del modelo para los datos experimentales (Figura 5.1). Se observa que el modelo propuesto describe con precisión la cinética de secado para todas las combinaciones de temperatura y velocidad del aire experimentadas (Figura 5.5a y b).



a



b

Figura 5.5. Curvas de secado experimentales y estimadas por el modelo para las tres temperaturas de secado ensayadas. **a)** velocidad del aire de secado, $v_1=0,2$ m/s; **b)** velocidad del aire de secado, $v_2=0,7$ m/s

5.5. Caracterización de la harina de quinoa

En la Figura 5.6, se muestra la harina obtenida luego de la molienda.



Figura 5.6. Harina obtenida en la molienda

En la Tabla 5.4 se indican los resultados obtenidos para caracterizar el perfil de granulometría del producto de la molienda. Las curvas de la granulometría se muestran en la Figura 5.7.

Tabla 5.4. Rendimiento obtenido para la molienda de la harina de quinoa.

Tamiz (malla)	Rendimiento (g harina obtenida / 100 g semillas)					
	40 °C, v ₁	40 °C, v ₂	60 °C, v ₁	60 °C, v ₂	80 °C, v ₁	80 °C, v ₂
16	0,25	0,86	0,19	0,14	0,19	0,38
25	4,92	10,04	26,64	17,50	27,56	11,67
50	85,65	80,97	69,71	79,00	68,01	65,78
100	8,00	6,57	2,30	2,13	2,41	4,42
200	0,25	0,21	0,26	0,48	0,12	1,33
270	0,06	0,01	0,11	0,13	0,12	1,87

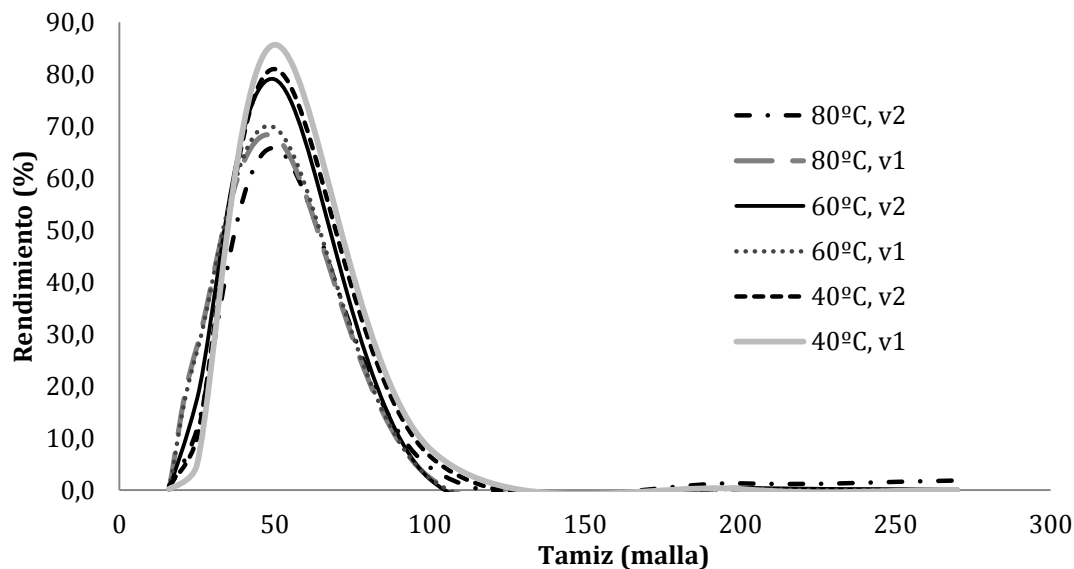


Figura 5.7. Curva granulométrica para la harina de quinoa obtenida

En relación con otros estudios realizados por diferentes autores, se reportó el perfil granulométrico de mezclas de harina de lupino, arroz, maíz y quinoa encontró 40,6 %; 20,5 % y 31,6 % de partículas retenidas en los tamices 212, 150 y 106, respectivamente (Cerezal Mezquita *et al.* 2011). Por otro lado, Guerrero *et al.* (2013), utilizaron una serie de tamices Tayler (14, 30, 60, 100, 200 y fondo) y reportaron un 45,35 % retenido para la malla 100. Asimismo, Castro (2010) obtuvo para malla 60, un rendimiento de 33,04 % para harina de quinoa variedad Matarredonda sin pulir. A partir de los resultados reportados se puede decir que la variación en el análisis granulométrico se podría deber a la variedad de la quinoa y los procesos de secado y molienda utilizados en la evaluación.

Cerezal Mezquita *et al.* (2011), realizaron el perfil granulométrico de harina de quinoa obtenida de la empresa Nestlé (Chile). Emplearon un equipo vibrador de tamices y observaron una retención de masa desde el tamiz N° 30 (600 μm) hasta el colector final del tamizador, es decir el 53,91% quedó retenida en los tamices N° 30, N° 60 (250 μm) y N° 80 (180 μm) y el 46,09 % de harina restante quedó en el colector final.

El rendimiento de la harina de quinoa retenida en un tamiz de malla 50 para los tratamientos ensayados se muestran en la Tabla 5.5.

Tabla 5. 5. Rendimientos de la harina de quinoa para los distintos tratamientos ensayados para el retenido en malla 50.

Temperatura de secado	Velocidad del aire de secado	Rendimiento
40°C	v1	85,6
40°C	v2	81,0
60°C	v1	69,7
60°C	v2	79,0
80°C	v1	68,0
80°C	v2	65,8

Se realizó una prueba de comparación de Tukey para el análisis de los resultados (Figura 5.8 y 5.9), pero no se hallaron diferencias significativas ($p > 0,05$) en el rendimiento de la molienda, para las dos velocidades del aire de secado ni para las tres temperaturas de secado ensayadas.

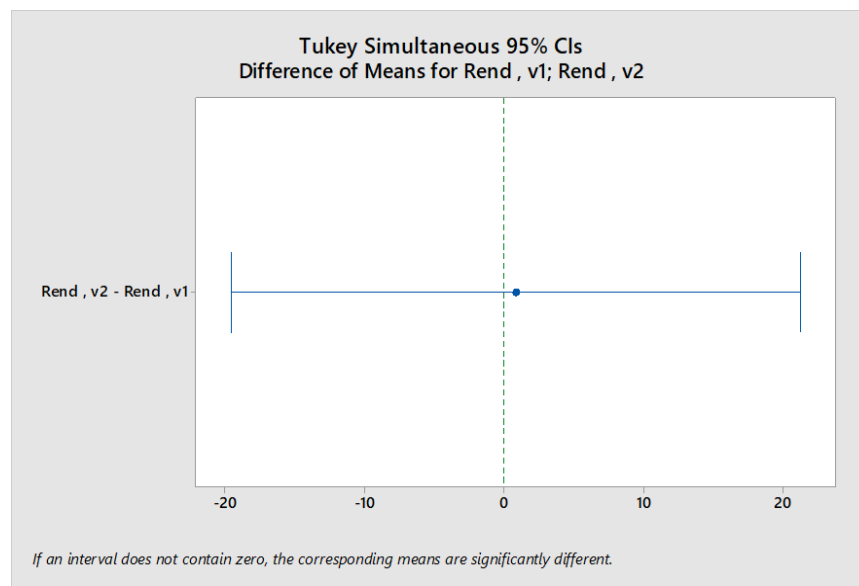


Figura 5.8. Prueba de comparación de Tukey para el rendimiento de la molienda para las dos velocidades del aire de secado.

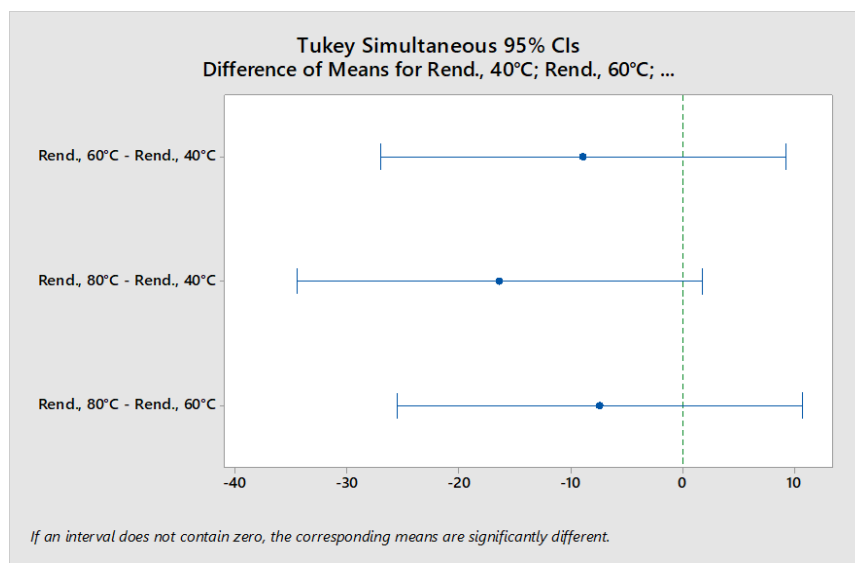


Figura 5.9. Prueba de comparación de Tukey para el rendimiento de la molienda para las tres temperaturas del aire de secado.

Según la clasificación realizada por PROINPA (2011), la harina obtenida para malla 50 (tamaño mínimo de gránulos de $297\mu\text{m}$) corresponde a afrecho (tamaño de gránulos entre 487 y $230\mu\text{m}$). Esto posibilita su uso para alimentos balanceados, panes integrales, panificación, bizcochería, pastas, purés, sopas y cremas.

5.6. Contenido de grasas totales en la harina de quinoa

El contenido de grasas totales en la harina de quinoa fue $6,48 \pm 0,3$ g por 100 g de quinoa b.s. No se encontraron diferencias significativas en el contenido de grasas totales para las harinas obtenidas de granos secados a las diferentes temperaturas ensayadas. Este valor fue similar al encontrado por otros autores. Mujica *et al.* (2001), en un trabajo para la FAO, reportaron un contenido de 5,1 % para la grasa. Aguirre (2003), informó que el contenido promedio de grasas totales de cinco autores es 6,2 %, Repo Carrasco *et al.* (2011), estudiaron las variedades de quinoa Choclito de Ayaviri, Chullpi y Pasankalla, y hallaron valores de grasas totales de 6,78 %, 7,52 % y 7,05 % en base seca respectivamente. Miranda *et al.* (2010), obtuvieron valores de 8,47 % para la variedad Salcedo INIA. Repo Carrasco *et al.* (2011), encontraron un contenido de grasas totales de 7,05 % en la variedad Pasankalla. Carciochi (2014), encontró un contenido de grasa total de 5,92 %. En su tesis doctoral, estudió que los valores reportados por distintos autores se encontraban en el rango de 5,2 – 9,7 %.

Dada la alta calidad de su aceite y debido a que algunas variedades de quinoa tengan un contenido graso elevado, algunos autores han considerado que este cultivo tiene un potencial uso como oleaginosa (Bhargava *et al.*, 2006). Aguilar Izquierdo (2017), encontró valores de grasas totales que oscilaron entre 6,627 y 8,298 g/100 g b. s. para las tres variedades de quinoa estudiadas. Avilés y Jinés (2000) hallaron valores entre 4 y 9 %, Magno (2010) entre 5,3 y 8,4 g/100 g b. s. y Bonifacio y Saravia (2006) obtuvieron resultados entre 3,67 y 8,92 %. González *et al.* (2012), sostiene que las variaciones pueden deberse a los diferentes cultivares, factores ambientales y climáticos. En el estudio de 555 accesiones de quinoa boliviana, se encontró que el contenido de grasa varió entre 2,05 y 10,88 %, con un promedio de 6,39 %. El rango superior de estos resultados es mayor al rango de 1,8 a 9,3 % reportado por Morón (1999), citados por Jacobsen y Sherwood (2002), quienes indican que el contenido de grasa de la quinoa tiene un alto valor debido a su alto porcentaje de ácidos grasos insaturados. Rojas *et al.* (2016), analizaron 13 variedades de quinoa originaria de Bolivia y los resultados indicaron que el contenido de grasa varió de 2,05 a 10,88 %, siendo el promedio de 6,46 %. Cervilla *et al.* (2012), estudiaron las semillas de quinoa provenientes de los departamentos Molinos y La Poma de la provincia de Salta, Argentina. El contenido de lípidos varía entre 6,70 y 9,64 %. Álvarez Jubete *et al.* (2009), en su investigación sobre quinoa, hallaron un contenido de grasas totales de 4,7 % b. s.

5.7. Contenido de proteínas totales en la harina de quinoa

El contenido de proteínas totales en la harina de quinoa fue $12,13 \pm 0,06$ g por 100 g de quinoa b.s. No se encontraron diferencias significativas en el contenido de proteínas totales, para las harinas obtenidas de granos secados a las diferentes temperaturas ensayadas. El resultado obtenido coincide con el reportado por distintos autores. Soto Pardo *et al.* (2019) estudiaron 12 variedades de quinoa de la región de Ayacucho, Perú. Los valores de proteínas totales obtenidos fueron entre 13,1 % y 16 %. Rojas *et al.* (2016) analizaron 13 variedades de quinoa originaria de Bolivia y los resultados fluctuaron entre 10,21 y 18,39 %, siendo el promedio de 14,33 %. Cervilla *et al.* (2012), estudiaron las semillas de quinoa provenientes de los departamentos Molinos y La Poma de la Provincia de Salta, Argentina. El contenido de proteína osciló entre 13,4 a 17,32 %. Álvarez Jubete *et al.* (2009), en su investigación sobre quinoa, hallaron un contenido de proteínas totales de 14,5 %. En otro estudio sobre 12 variedades de quinoa peruana, se observó que el contenido de las proteínas se situó entre 11,2 y 16,1 g/100 g (IICA, 2015). Reyes Montaña *et al.* (2006), observaron entre 19 variedades de quinoa, que el menor contenido alcanzó un 10,4 %, correspondiente a una variedad de quinoa boliviana, y el porcentaje más alto fue del 17 %, para la quinoa dulce proveniente de Quitopamba, Colombia.

Quispe Colquehuanca (2016), estudiaron dos variedades de quinoa de origen peruano (Salcedo INIA y Pasankalla). Compararon el contenido de proteínas entre el grano crudo y la harina obtenida del proceso de laminación del grano y posterior extrusión (150°C y 350 lb/pulg²) y molienda. Para el grano crudo obtuvieron 11,9 %, para la variedad Salcedo INIA, y 11,9 %, para la variedad Pasankalla. Mientras que, para la harina extruida, 10,3 % y 11,3 %, respectivamente. Concluyeron que la disminución proteica de la quinoa ante un tratamiento térmico puede deberse a la reacción de Maillard durante el proceso, lo que podría reducir la disponibilidad de la lisina.

Tacora *et al.* (2010), estudiaron el efecto de la temperatura de tostado (130°, 160° y 190 °C) en algunas características funcionales y fisicoquímicas de dos variedades de cañihua (*Chenopodium pallidicaule* Aellen). La proteína de la cañihua en ambas variedades disminuyó con la temperatura de tostado, para la variedad illpa obtuvieron un porcentaje inicial de 13,67 %, que se redujo a 9,45 % y en la variedad cupi varió de 14,85 % a 6,05 %. Vásquez, *et al.* (2016) caracterizaron dos muestras comerciales de harina de quinoa (cruda y tostada) producida en la Provincia de Chimborazo, Ecuador. Al comparar los resultados, obtuvieron diferencias significativas ($p < 0,05$) en los niveles de proteína cruda siendo 13,81 %, para la harina cruda, y 12,22 %, para la harina tostada. Informaron que es posible que el tratamiento térmico ocasione una desnaturalización de las proteínas afectando su contenido (citado en Avanza, 2004).

Pauro Quilli (2017), en su tesis doctoral, evaluó la composición química proximal de harina obtenida luego del procesamiento de dos variedades de cañihua. En la evaluación de la composición química encontró diferencias significativas ($p < 0,05$) en el contenido de humedad, cenizas y carbohidratos; mientras que en la comparación de proteínas, grasa y fibras no obtuvo significancia según la prueba de Duncan.

A diferencia del secado, en la cocción por extrusión se utilizan mayores temperaturas y tiempos más cortos. En la extrusión se cocina, forma y seca el producto en una operación integrada (Moscicki y Zuilichem, 2011). Los efectos benéficos incluyen la destrucción de factores antinutricionales, desnaturalización de proteínas, gelatinización del almidón y aumento de la fibra dietética soluble (Capriles *et al.*, 2008; Menegassi *et al.*, 2011; Muthukumarappan y Karunanithy, 2012; Yu, 2011). Echeverria *et al.* (2019) estudiaron la actividad antioxidante de harinas de amaranto obtenidas por extrusión y realizaron un análisis parcial de su calidad proteica in vivo. Analizaron la composición proximal del grano de amaranto sin procesar, amaranto inflado comercial y tratamientos de extrusión en condiciones menos (150 °C y 18 % de humedad) y más drásticas de procesamiento (180 °C y 32 % de humedad). Observaron que no se presentaron diferencias significativas entre amaranto sin procesar y extruido, con lo que indicaron que las condiciones de proceso empleadas no

afectaron el contenido total de proteína, grasa y ceniza. Brennan *et al.* (2011) reportaron que dependiendo de las condiciones de procesamiento por extrusión, la liberación de compuestos fenólicos de las matrices alimentarias se puede promover o disminuir, de manera análoga la digestibilidad y aprovechamiento de la proteína podría verse mejorado o disminuido dependiendo de las condiciones de procesamiento.

5.8. Contenido de cenizas en la harina de quinoa

El contenido de cenizas obtenido fue de $2,36 \pm 0,03$ % (g cenizas/100 g quinoa b.s). No se encontraron diferencias significativas en el contenido de cenizas para las harinas obtenidas de granos secados a las diferentes temperaturas ensayadas. El valor hallado coincide con el obtenido por otros autores. En su tesis doctoral sobre quinoa, Carciocchi (2014), informó un contenido de cenizas de $3,36 \pm 0,07$ %. Álvarez Jubete *et al.* (2009), obtuvieron un valor de 2,7 %. Vargas de la Cruz (2014), en sus estudios sobre quinoa (variedad Salcedo Inia) reportó valores de cenizas de $3,20 \pm 0,26$ %. Vásquez *et al.* (2016), informaron contenidos de cenizas de $2,89 \pm 0,11$ %. Romo *et al.* (2007) encontraron que el porcentaje de cenizas en quinoa fue de 2,12 %

5.9. Contenido de Compuestos Fenólicos Totales (CPT)

En la Tabla 5.6 se presentan los valores obtenidos para el contenido de compuestos fenólicos totales para los tratamientos ensayados. Se informan los promedios de los resultados obtenidos por triplicado.

Tabla 5.6. Valores del contenido de fenoles totales en extractos hidroalcohólicos de harina de quinoa obtenida mediante distintos tratamientos de secado

muestra	mg AGE/g harina de quinoa
Sin tratamiento	$1,5 \pm 0,0^a$
40°C, v1	$1,7 \pm 0,1^{ab}$
40°C, v2	$1,9 \pm 0,1^{ab}$
60°C, v1	$1,8 \pm 0,0^{ab}$
60°C, v2	$2,1 \pm 0,2^{ab}$
80°C, v1	$2,1 \pm 0,1^b$
80°C, v2	$2,2 \pm 0,0^b$

Letras diferentes indican diferencias significativas ($p < 0,05$).

Valores menores han sido informados por otros autores. Alvarez Jubete *et al.* (2010) en sus estudios sobre quinoa (variedad INIA Salcedo) obtuvieron valores de 0,71 mg AGE/ g materia seca. Quispe Colquehuanca (2016), estudiaron dos variedades de quinoa de origen peruano (Salcedo INIA y Pasankalla). Compararon el contenido de fenoles entre el grano crudo y la harina obtenida del proceso de laminación del grano y posterior extrusión y molienda. Para el grano crudo obtuvieron 0,50 mg AGE/g materia seca para la variedad Salcedo INIA y 0,70 mg AGE/g materia seca para la variedad Pasankalla. Mientras que, para la harina extruida, 0,60 mg AGE/g materia seca y 0,89 mg AGE/g materia seca respectivamente. Concluyeron que el tratamiento aplicado en el grano, aumentó el contenido de compuestos fenólicos totales en ambas variedades. Repo Carrasco *et al.* (2011) obtuvieron 0,77 mg AGE/g para quinoa desaponificada Salcedo INIA, procedente de Perú.

Chairez Huerta *et al.* (2020) analizaron cuatro variedades de quinoa, considerando quinoa orgánica, y tres especies más de origen peruano, elegidas en base a su color: amarilla, roja y negra. Obtuvieron valores de 1,02 mg de AGE/ g para la quinoa amarilla, 0,85 mg de AGE/ g para la roja y 0,50 mg de AGE/ g para la negra. Fuentes Gómez y Mendoza Villamil (2019), analizaron quinoa amarilla, roja y negra de origen ecuatoriana y obtuvieron como resultados 0,41 mg AGE/g, 0,36 mg AGE /g y 0,44 mg AGE /g, respectivamente.

En su tesis doctoral, Carciochi (2014) ensayó diferentes tratamientos en quinoa variedad Real: temperatura de extracción (20, 40, 60 °C), concentración de etanol en el solvente (0, 40, 80 %, v/v) y potencia de ultrasonido (0, 50, 100 W) y obtuvo un CPT entre 0,68 y 1,03 mg AGE/g quinoa. También estudió el efecto en el contenido de compuestos fenólicos totales en semillas de quinoa sometidas a temperaturas entre 100 °C y 190 °C, por períodos que alcanzaron hasta 120 minutos, y observó que el tratamiento térmico incrementó significativamente el contenido de CPT para todas las temperaturas ensayadas, respecto del control de semillas sin procesar ($p < 0,05$). Resultados similares fueron descritos por otros autores. Jeong *et al.* (2004) observaron un aumento en el CPT del 145 % respecto de un control en semillas de sésamo tostadas a 200°C durante 60 min. Tacora *et al.* (2010) trabajaron con semillas de cañihua (*Chenopodium pallidicaule* Aellen) y observaron incrementos de 95 %, 114 % y 145 % en el contenido de compuestos fenólicos totales luego del tostado de las semillas durante 20 min a 130°C, 160°C y 190°C, respectivamente. Gallegos Infante *et al.* (2010) realizaron un tostado en semillas de cebada a 125°C durante 30 min y observaron un incremento de alrededor del 100% en los niveles de CPT. Bartolo Estrella (2014), estudió la influencia de la temperatura de tostado sobre el contenido de compuestos fenólicos totales de la cañihua (*Chenopodium pallidicaule* Aellen) variedad Cupi. En su investigación encontró que temperaturas de tostado mayores a 160 °C, benefician notablemente el contenido de fenoles totales

(de 200 a 900 mg de AGE/g de extracto etanólico). Además, informó que la variable más significativa fue la temperatura de tostado, influyendo positivamente en el contenido de fenoles totales de la cañihua. Estos resultados son similares a los obtenidos por Vásquez (2006), quien señala que el contenido de polifenoles totales obtenidos del amaranto se incrementa a medida que aumenta la temperatura de tostado.

Este fenómeno puede ser explicado por la reacción de Maillard, ocurrida en la operación de tostado, ya que además de mejorar las propiedades sensoriales (sabor y olor), a partir del pardeamiento no enzimático parcial, se forman otros compuestos fenólicos incrementando el porcentaje total de fenoles (Saura Calixto y Bravo, 2002). Estudios similares acerca del efecto de la temperatura en alimentos como la harina de maíz, indicaron un incremento de fenoles tales como el ácido ferúlico, vanílico y p-coumárico, como resultado de la degradación de compuestos polifenólicos conjugados (Cheng *et al.*, 2006).

En este estudio, se observaron incrementos del 20, 30 y 33 %, en promedio, para los granos secados a 40°, 60° y 80 °C, respectivamente, siendo mayores los incrementos en el contenido de compuestos fenólicos totales para los granos secados a mayor velocidad (0,7 m/s). Las temperaturas de tratamiento fueron menores en este trabajo, con respecto a los mencionados precedentemente.

La Figura 6.10 muestra el resultado obtenido del análisis de varianza realizado para las dos velocidades del aire de secado. Al aplicar el test de comparación de Tukey, se obtuvo que no existen diferencias significativas ($p > 0,05$) para el CPT, para las dos velocidades del aire a las tres temperaturas ensayadas.

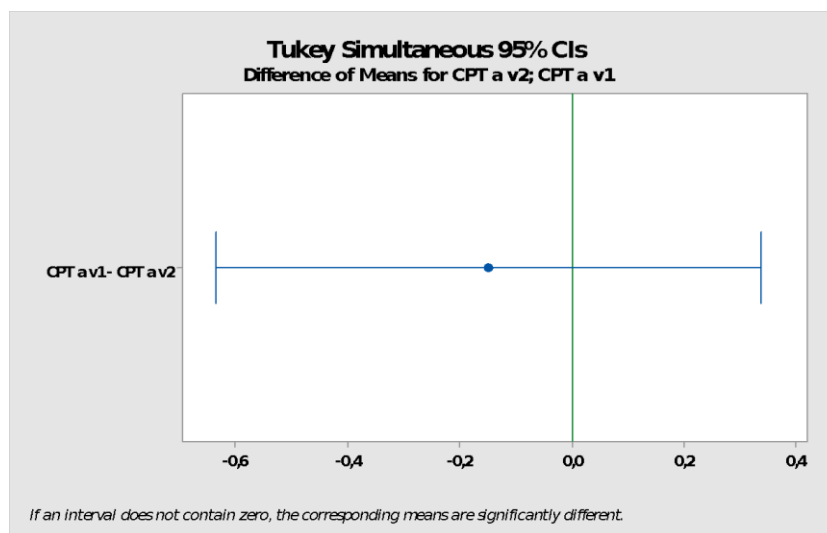


Figura 5.10. Test de comparación de Tukey para el contenido de compuestos fenólicos totales en las distintas velocidades del aire de secado ensayadas.

La figura 5.11 representa la prueba de comparación de Tukey para los distintos tratamientos ensayados. Puede observarse que existen diferencias significativas ($p < 0,05$) en el contenido de compuestos fenólicos totales entre la quinoa sin tratar y la que fue sometida a la operación de secado a 80 °C. No se hallaron diferencias significativas entre la quinoa sin tratar y la secada a 40 °C o 60 °C, como así tampoco entre los valores de CPT obtenidos para los tratamientos a 40 °C y 60 °C entre sí.

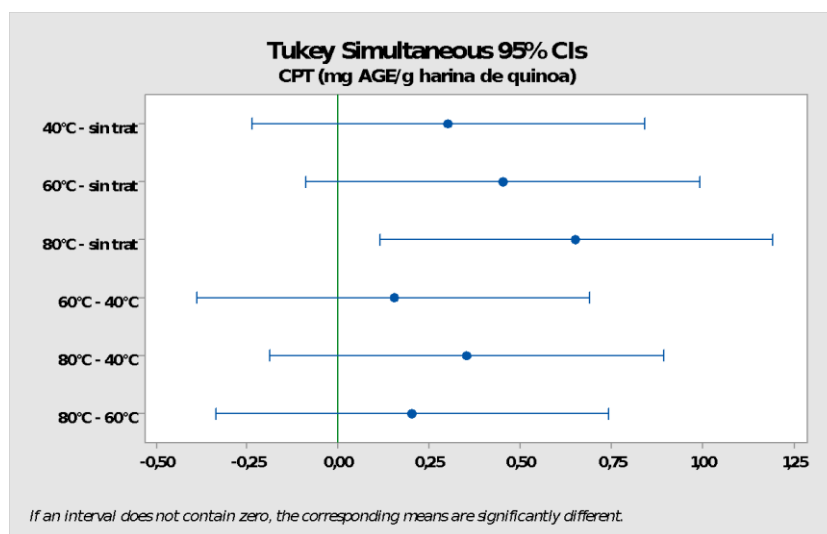


Figura 5.11. Test de comparación de Tukey para el contenido de compuestos fenólicos totales en las distintas temperaturas del aire de secado ensayadas.

El contenido de compuestos fenólicos totales aumentó por la aplicación del tratamiento térmico, siendo mayor este efecto a mayor temperatura del aire de secado. Este comportamiento fue independiente de las dos velocidades del aire de secado (Figura 5.12 y 5.13).

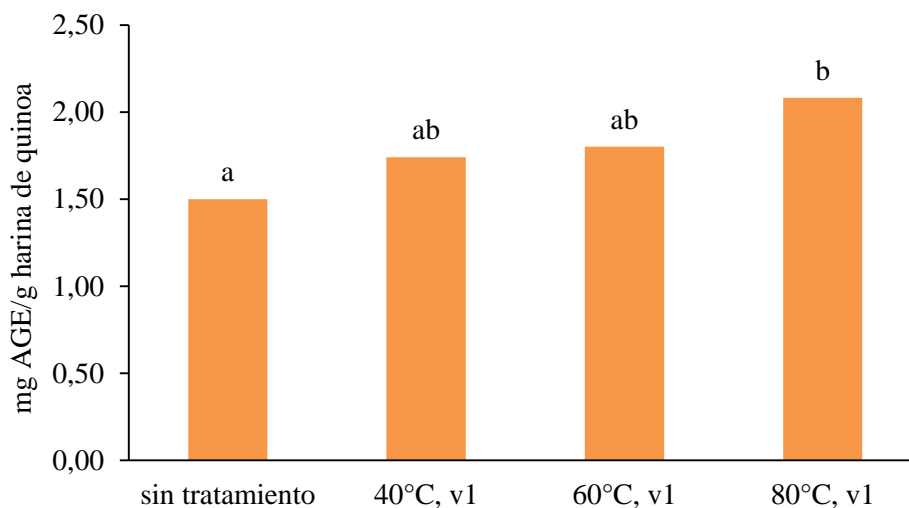


Figura 5.12. Contenido de compuestos fenólicos totales para la harina sin tratar y la harina procesada a temperaturas de 40 °C, 60 °C y 80 °C a la velocidad $v_1=0,2$ m/s del aire de secado. Letras diferentes indican diferencias significativas ($p < 0,05$).

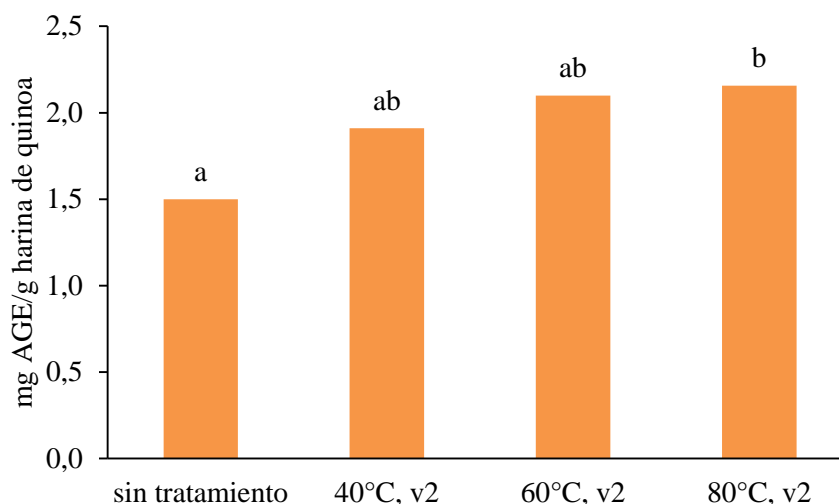


Figura 5.13. Contenido de compuestos fenólicos totales para la harina sin tratar y la harina procesada a temperaturas de 40 °C, 60 °C y 80 °C a la velocidad $v_2=0,7$ m/s del aire de secado. Letras diferentes indican diferencias significativas ($p < 0,05$).

Algunos autores intentan explicar que el aumento de compuestos fenólicos podría estar asociado a la liberación de compuestos fenólicos ligados, a partir de la descomposición de los constituyentes celulares, en función del tratamiento térmico (Boateng *et al.*, 2008). Investigaciones realizadas en cereales indicaron que parte de los compuestos fenólicos están presentes como enlaces solubles conjugados o insolubles. Diversos autores reportan que los compuestos fenólicos se encuentran asociados al sistema de protección antioxidante, ya que hay un incremento en la producción y contenido de estos compuestos ante factores de estrés biótico y abiótico (Treutter, 2008). Los antioxidantes fenólicos en semillas de quinoa pueden estar presentes en forma libre, pero también como forma ligada unida a las estructuras de la pared celular (Abderrahim *et al.*, 2012). Randhir *et al.* (2008) sugirieron la disociación de formas fenólicas conjugadas debido al procesamiento térmico. Dewanto *et al.* (2002) explicaron que el procesamiento térmico podría liberar más ácidos fenólicos unidos, por la descomposición de los constituyentes celulares.

En contraste, Viduarre Ruiz *et al.* (2017) estudiaron estos compuestos polifenólicos en dos variedades de quinoa peruana: Pasankalla (grano de color rojo) y Negra Collana (grano de color negro), después del proceso de lavado, secado y cocción. Obtuvieron valores de 1,42 (quinoa roja) y 1,09 mg AGE/g quinoa (quinoa negra) y observaron que luego del secado el contenido de CPT se mantuvo estable respecto de la quinoa original.

Otros autores han observado disminuciones en los niveles de compuestos fenólicos luego de aplicar un proceso térmico en las semillas. Boateng *et al.* (2008), aplicaron un proceso térmico sobre cuatro variedades de porotos (judías pintas, porotos rojos, soja y alubia Black-eyed) y observaron un aumento del CPT en tres de ellas, mientras que se observó el efecto contrario en el caso de semillas de soja. Quintero Hilario *et al.* (2019) evaluaron los contenidos de compuestos fenólicos totales en semillas de capomo (fruto originario de México y Centroamérica, hasta Perú y las Islas del Caribe) sometidos a dos tratamientos de tostado a 90 °C, durante 20 y 35 min. En general, el tostado no afectó la calidad nutricia de las semillas, aunque disminuyó significativamente ($p \leq 0,05$) la concentración de lípidos y de flavonoides. El tostado incrementó significativamente ($p \leq 0,05$) el contenido de compuestos fenólicos totales solubles a 2,71 y 13,37 mg AGE/g de semillas frescas, para los tiempos de tostado de 20 y 35 minutos, respectivamente.

Por lo expuesto, puede concluirse que el efecto del tratamiento térmico sobre el contenido de compuestos fenólicos es función de la especie y variedad del grano utilizado. Estas variaciones también dependen del método elegido para extraer los compuestos fenólicos y de la temperatura y duración del proceso.

Bajo determinadas condiciones, someter los granos a altas temperaturas podría degradar algunos compuestos fenólicos particularmente susceptibles (Randhir *et al.*, 2008). En cambio, el secado influiría positivamente en el contenido de compuestos fenólicos de la quinoa, debido a la reacción de Maillard que se produce como consecuencia del tratamiento térmico.

5.10. Contenido de flavonoides

En la Tabla 5.7, se presentan los valores obtenidos para el contenido de flavonoides para los tratamientos ensayados. Se informan los promedios de los ensayos realizados por triplicado. Se observa una disminución en el contenido de flavonoides para la harina obtenida luego de secar el grano, con respecto a la harina de grano sin tratar.

Tabla 5.7. Contenido de flavonoides en extractos hidroalcohólicos de harina de quinoa obtenida mediante distintos tratamientos de secado.

muestra	mg QE/g harina de quinoa
Sin tratamiento	0,16 ± 0,01 ^a
40°C, v1	0,12 ± 0,00 ^b
40°C, v2	0,11 ± 0,01 ^b
60°C, v1	0,10 ± 0,02 ^b
60°C, v2	0,10 ± 0,01 ^b
80°C, v1	0,10 ± 0,02 ^b
80°C, v2	0,09 ± 0,02 ^b

Letras diferentes indican diferencias significativas ($p < 0,05$).

Este comportamiento coincide con el observado por otros autores. Vidarrue Ruiz *et al.* (2017) investigaron el contenido de flavonoides de granos de dos variedades de quinoa (Pasankalla y Negra Collana), después del proceso de lavado, secado y cocción. Se evidenciaron pérdidas significativas ($p < 0,05$) para ambas variedades de quinoa, luego de los tratamientos.

Otros autores, en cambio, reportaron mayores contenidos de flavonoides. Aguilar Izquierdo (2017) trabajó con distintas variedades de quinoa y obtuvo valores para contenido de flavonoides de 0,88 mg QE/g b. s. (variedad Negra Collana), 0,83 mg QE/g b. s. (Pasankalla Roja) y 0,75 mg QE/g b. s. (INIA Salcedo). Repo Carrasco *et al.* (2010) obtuvieron resultados entre 0,5 y 0,7 mg QE/g b. s. y Tang *et al.* (2015), entre 1,5 y 5,0 mg QE/g b. s., en quinoa de color del altiplano de Perú.

En relación al comportamiento del contenido de flavonoides con el tratamiento térmico, Carciochi (2014) investigó el efecto en el contenido de flavonoides del tostado de semillas a 100 °C y 190 °C durante distintos periodos. Observó que el contenido de flavonoides aumentó a medida que se incrementó la temperatura del tratamiento térmico.

Las diferencias en el proceso de extracción como así también las diferentes concentraciones de pigmentos entre las variedades de quinoa, son factores que podrían explicar la diferencia entre los datos obtenidos por los distintos autores.

Las Figuras 5.14 y 5.15 representan el contenido de flavonoides para la harina de quinoa sin tratar y la harina procesada. Para ambas velocidades del aire de secado, los valores disminuyen con el tratamiento térmico, para todas las temperaturas ensayadas.

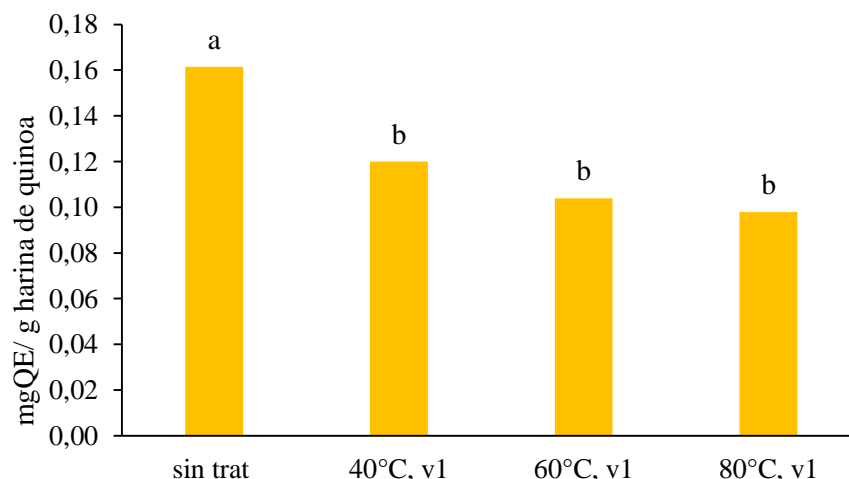


Figura 5.14. Gráfico de barras del contenido de flavonoides de la harina de quinoa sin tratar y procesada. Velocidad del aire de secado $v_1 = 0,2$ m/s y temperaturas de secado: 40 °C, 60 °C y 80 °C. Letras diferentes indican diferencias significativas ($p < 0,05$).

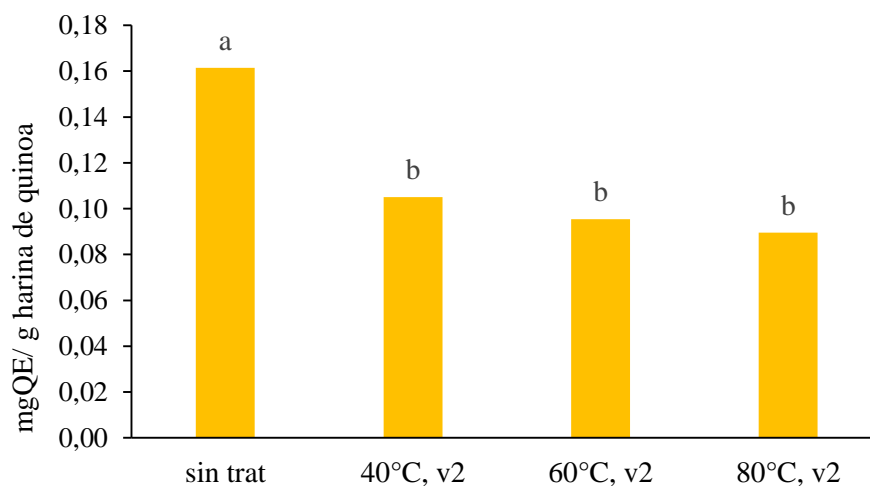


Figura 5.15. Gráfico de barras del contenido de flavonoides de la harina de quinoa sin tratar y procesada. Velocidad del aire de secado $v_2 = 0,7$ m/s y temperaturas de secado: 40 °C, 60 °C y 80 °C. Letras diferentes indican diferencias significativas ($p < 0,05$).

La Figura 5.16 muestra el análisis de varianza realizado para las dos velocidades del aire de secado. Se utilizó el test de comparación de Tukey y se obtuvo que, independientemente de la temperatura de secado, no existen diferencias significativas ($p > 0,05$) en el contenido de flavonoides de las muestras para las dos velocidades del aire ensayadas.

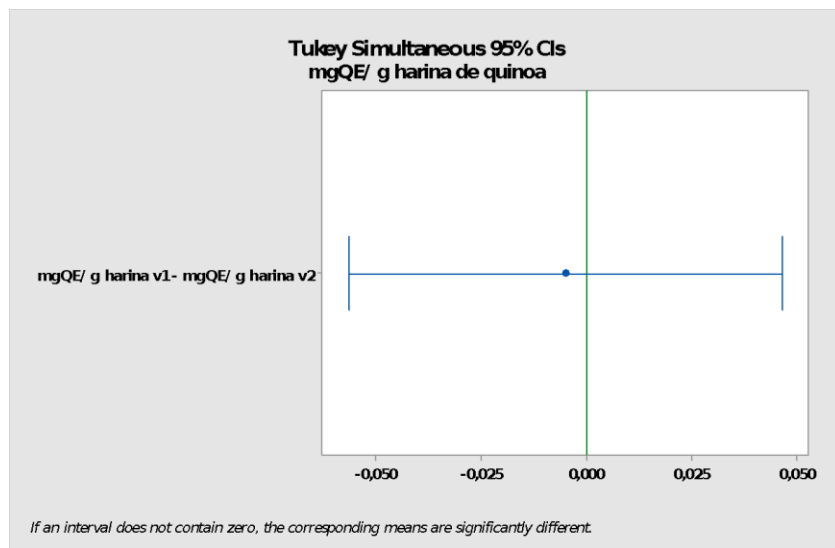


Figura 5.16. Test de comparación de Tukey para el contenido de flavonoides en función de las velocidades del aire de secado.

La Figura 5.17 representa la prueba de comparación de Tukey para los distintos tratamientos térmicos. Puede observarse que existen diferencias significativas ($p < 0,05$) en el contenido de flavonoides de la quinoa sin tratar y la quinoa sometida a la operación de secado a las temperaturas: 40 °C, 60 °C y 80 °C. En cambio, no se hallaron diferencias significativas entre la quinoa secada a 40 °C y a 60 °C, 40 °C y a 80 °C, como así tampoco entre los tratamientos a 60 °C y a 80 °C.

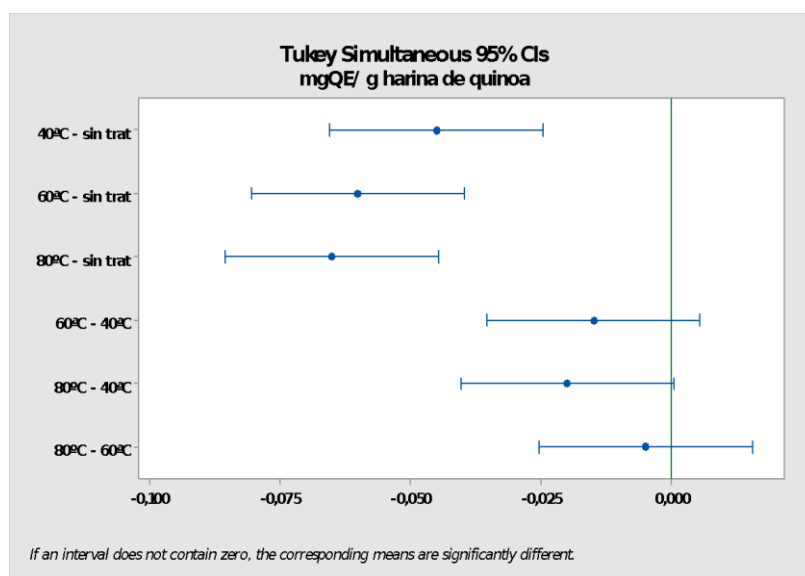


Figura 5.17. Test de comparación de Tukey para el contenido de flavonoides en función de las temperaturas del aire de secado.

En la Figura 5.18 se observa la relación entre el contenido de flavonoides y de compuestos fenólicos totales obtenidos en este trabajo de tesis.

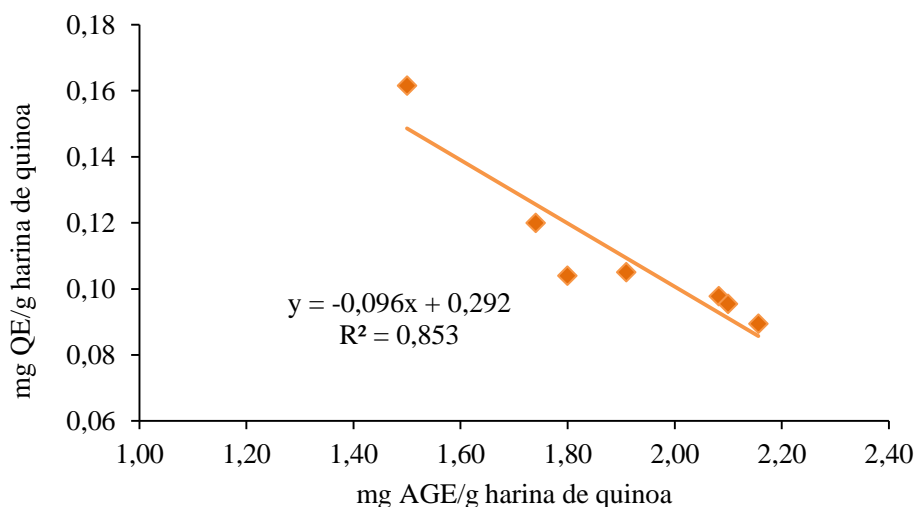


Figura 5.18. Correlación entre el contenido de flavonoides y compuestos fenólicos totales de la harina de quinoa.

5.11. Capacidad antioxidante

En la Tabla 6.8 se presentan los valores de capacidad antioxidante obtenidos para los tratamientos ensayados. Se informan los promedios de las determinaciones realizadas por triplicado.

Tabla 5.8. Capacidad antioxidante de los extractos hidroalcohólicos de harina de quinoa obtenida mediante distintos tratamientos de secado.

muestra	mg TE/g harina de quinoa
Sin tratamiento	1,00 ± 0,01 ^a
40°C, v1	1,38 ± 0,04 ^{ab}
40°C, v2	1,69 ± 0,01 ^{ab}
60°C, v1	1,31 ± 0,01 ^{ab}
60°C, v2	1,68 ± 0,02 ^{ab}
80°C, v1	1,65 ± 0,17 ^b
80°C, v2	1,86 ± 0,04 ^b

Letras diferentes indican diferencias significativas ($p < 0,05$).

Los resultados obtenidos fueron coincidentes con los informados por diversos autores. Los valores de capacidad antioxidante para las quince variedades de quinoa estudiadas por Repo Carrasco y

Encina (2008) oscilaron entre 0,117 mg TE/g y 2,4 mg TE/g. Valencia *et al.* (2017), en sus estudios de 24 accesiones de quinoa, encontraron valores de actividad antioxidante entre 0,01 y 2,99 mg TE/g. Hirose *et al.* (2010) trabajaron con semillas de quinoa cultivadas en Japón e informaron capacidades antioxidantes entre 1,26 mg TE/g (b. s.) y 2,38 mg TE/g (b. s.). Tang *et al.* (2015) realizaron investigaciones en quinoa roja, blanca y negra obteniendo entre 1,50 mg TE/g (b. s.) y 2,75 mg TE/g (b. s.).

Algunos autores hallaron valores mayores de capacidad antioxidante. Quispe Colquehuanca (2016) obtuvieron resultados entre 2,42 mg TE/g (b. s.) y 6,13 mg TE/g (b. s.), en distintas variedades de quinoa originaria de Bolivia y Perú. Fuentes Gómez y Mendoza Villamil (2019), en sus estudios sobre quinoa roja, blanca y negra, hallaron capacidades antioxidantes entre 3,47 y 4,90 mg TE/g (b.s.).

Carciochi (2014) analizó el efecto del tratamiento térmico sobre la actividad antioxidante en los extractos obtenidos a partir de semillas de quinoa sin procesar (control) y sometidas a distintas combinaciones de temperatura/tiempo (100 °C, 130 °C, 160 °C y 190 °C; 0, 15, 30, 60, 90 y 120 minutos). El proceso de tostado incrementó significativamente la actividad antioxidante respecto al control en los ensayos realizados a 160°C y 190°C para todos los tiempos analizados, resultando mayores los valores correspondientes a la mayor temperatura. En el tratamiento realizado a 160°C obtuvo un incremento del 78 % con respecto al valor del control y en el ensayo realizado a 190°C obtuvo un incremento del 135 % en relación al control. Vidarrue Ruiz *et al.* (2017), estudiaron dos variedades de quinoa (Negra Collana y Pasankalla) y observaron un aumento de la capacidad antioxidante después del proceso de secado para ambas variedades de quinoa, en comparación con el contenido inicial. Este fenómeno se puede atribuir a la liberación o formación de compuestos durante el secado y la cocción, que tengan mayor capacidad antioxidante (Miranda *et al.*, 2010). Acar *et al.* (2009) observaron fuertes incrementos en la actividad antioxidante durante el tostado de diversas semillas, los que coincidieron con aumentos en las concentraciones de productos de Maillard, en particular en el caso de semillas ricas en carbohidratos y proteínas. Afirmaron que el efecto del tratamiento térmico sobre la actividad antioxidante depende del balance entre la degradación térmica de los antioxidantes presentes naturalmente y la formación de nuevos productos de Maillard con capacidad antioxidante, donde la cantidad de éstos últimos dependerá a su vez, de la concentración de reactantes de la reacción de Maillard disponible en la matriz.

Ciertos compuestos fenólicos pueden intervenir como reactantes en la reacción de Maillard, pudiendo reaccionar directamente o luego de sufrir oxidación, con los grupos amino de las proteínas o aminoácidos (Sikorski *et al.*, 2007). Esto produciría una disminución en los niveles de dichos

compuestos en alimentos tratados térmicamente, resultando una disminución de la actividad antioxidante neta en los mismos (Kaur y Kapoor, 2001). Sin embargo, se ha observado en algunas semillas, que estos efectos negativos sobre la actividad antioxidante pueden resultar compensados o incluso superados, cuando el tratamiento térmico se lleva a cabo a altas temperaturas y/o por tiempos prolongados, debido principalmente a la liberación de compuestos fenólicos a partir de la fracción ligada y/o a la formación de nuevos compuestos de Maillard con fuerte actividad antioxidante (Nicoli *et al*, 1999).

Las Figuras 5.19 y 5.20, representan la capacidad antioxidante para la harina de quinoa sin tratar y la harina procesada. Para ambas velocidades del aire de secado, los valores aumentan con el tratamiento térmico, para las temperaturas ensayadas.

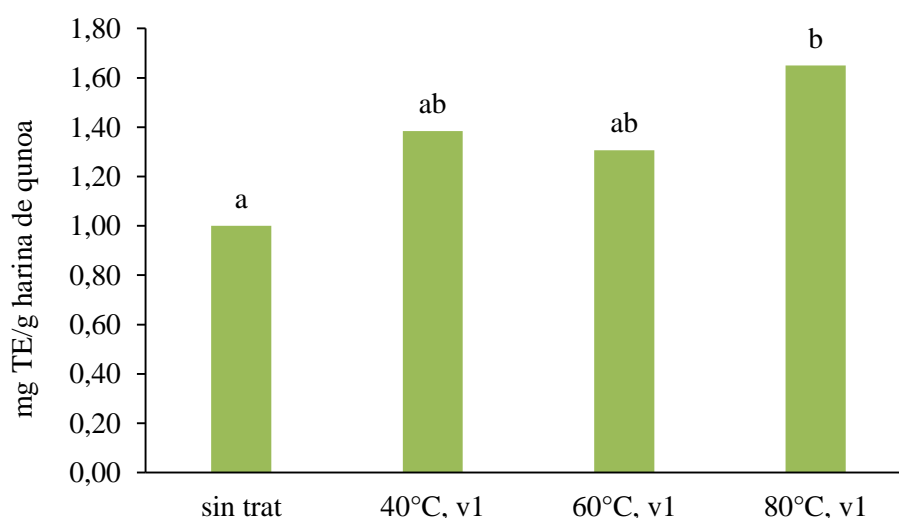


Figura 5.19. Gráfico de barras de la capacidad antioxidante de la harina de quinoa sin tratar y procesada. Velocidad del aire de secado $v_1 = 0,2$ m/s y temperaturas de secado: 40 °C, 60 °C y 80 °C. Letras diferentes indican diferencias significativas ($p < 0,05$).

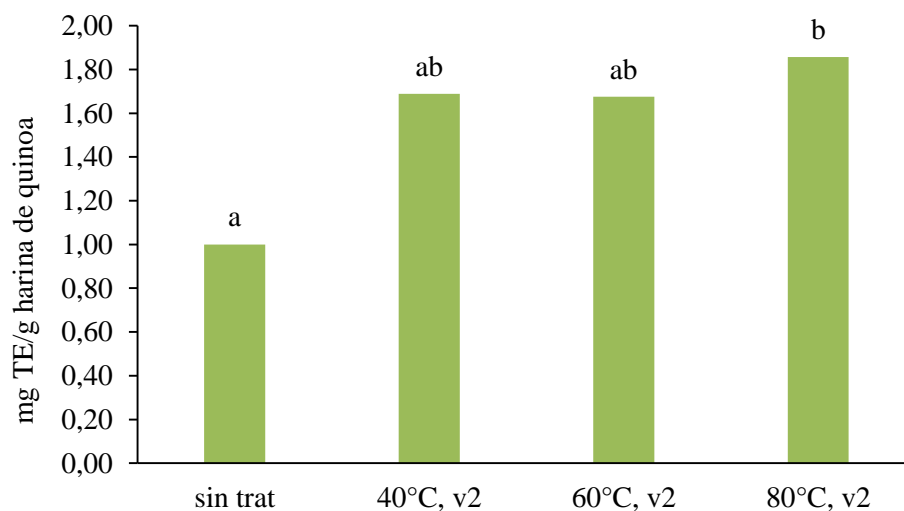


Figura 5.20. Gráfico de barras de la capacidad antioxidante de la harina de quinoa sin tratar y procesada. Velocidad del aire de secado $v_2 = 0,7$ m/s y temperaturas de secado: 40 °C, 60 °C y 80 °C. Letras diferentes indican diferencias significativas ($p < 0,05$).

El comportamiento de la capacidad antioxidante en el tratamiento térmico se asemeja al encontrado para compuestos fenólicos totales, en correspondencia con la correlación observada entre el contenido de fenoles totales de los pseudocereales y la actividad antioxidante (Pasko *et al.*, 2009), como también se muestra en la Figura 5.21.

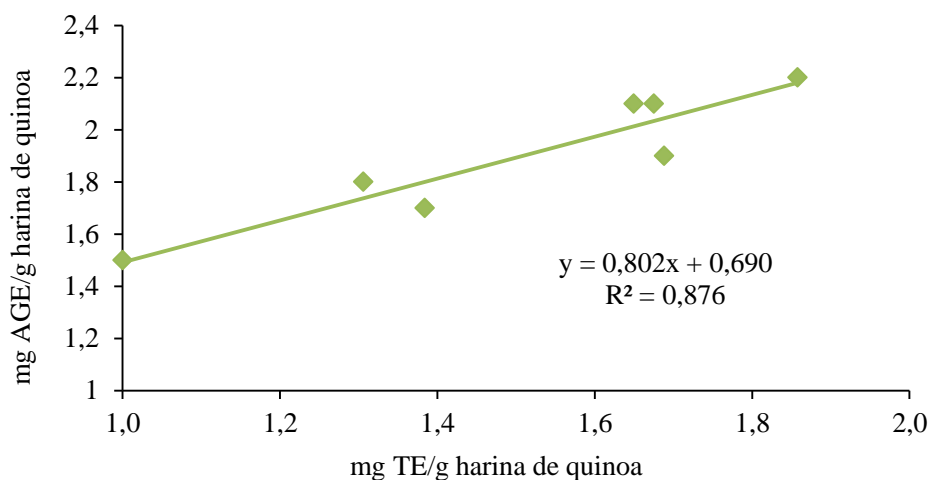


Figura 5.21. Correlación entre el contenido de compuestos fenólicos totales y la capacidad antioxidante de los extractos hidroalcohólicos de harina de quinoa.

La Figura 5.22 muestra el análisis de varianza realizado para las dos velocidades del aire de secado. No se hallaron diferencias significativas ($p > 0,05$).

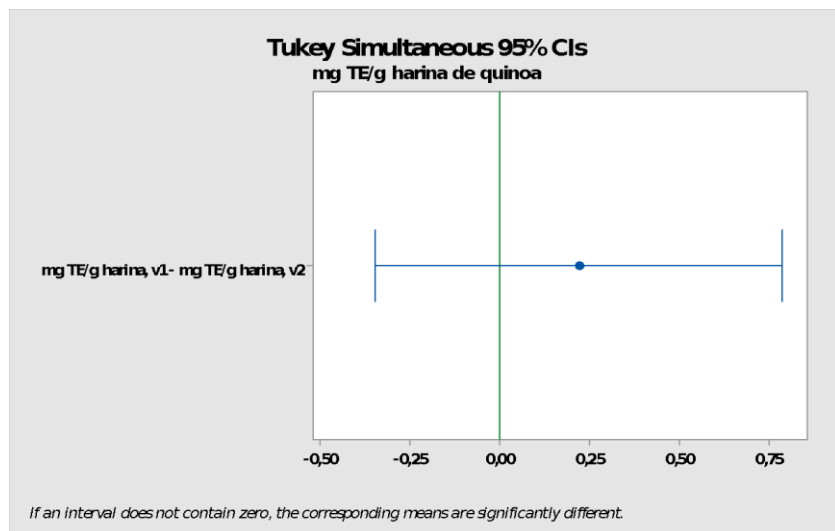


Figura 5.22. Test de comparación de Tukey para la capacidad antioxidante de la quinoa en función de las velocidades del aire de secado.

La Figura 5.23 representa la prueba de comparación de Tukey para los distintos tratamientos térmicos. Puede observarse que existen diferencias significativas ($p < 0,05$) en la capacidad antioxidante de la quinoa sin tratar y la que fue sometida a la operación de secado a 80 °C. En cambio, no se hallaron diferencias significativas entre la quinoa sin tratar y la secada a 40 °C y a 60 °C, como así tampoco entre los valores obtenidos para los tratamientos a 40 °C y 60 °C.

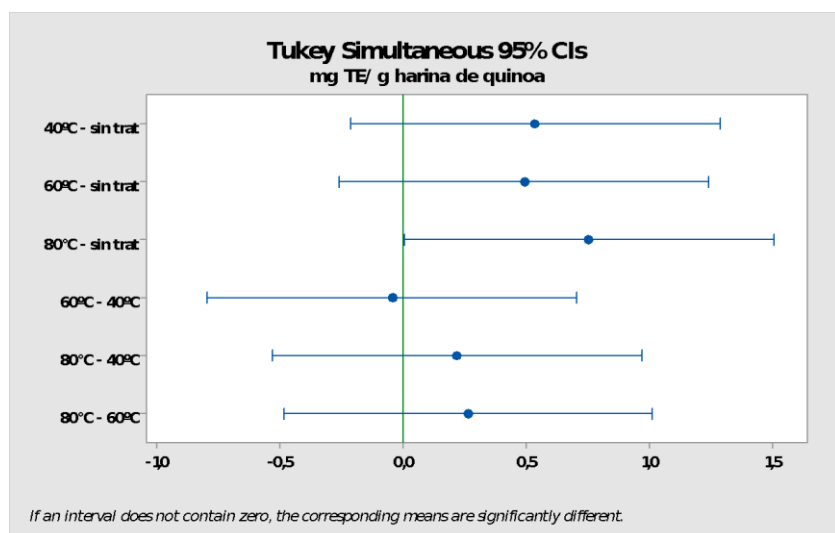


Figura 5.23. Test de comparación de Tukey para la capacidad antioxidante de la quinoa en función de la temperatura de los tratamientos térmicos.

La quinoa cultivada bajo condiciones extremas en la región del Altiplano es una fuente natural de ingredientes alimentarios funcionales (Abderrahim *et al.*, 2012). No obstante, la quinoa convencional produce menos antioxidantes que la primera, por las condiciones ambientales y por la

aplicación de materia orgánica y de fertilizantes nitrogenados y fosfatados (De la Torre *et al.* 2013), pudiendo manifestar capacidad antioxidante. Para la variedad ensayada en este trabajo, la actividad antioxidante resultó en general inferior a los valores informados en la bibliografía. Se requirieron temperaturas de secado de 80 °C, para observar diferencias significativas en el aumento de la capacidad antioxidante de la harina obtenida a partir de los granos de quinoa tratados.

5.12. Capacidad antimicrobiana

Las concentraciones iniciales empleadas para los microorganismos de *E. coli* y *S. aureus* fueron: $1,2 \cdot 10^8$ UFC/ml y $1,10^7$ UFC/ml, respectivamente. En la Tabla 5.9, se muestra la codificación de las muestras ensayadas.

Tabla 5.9. Codificación de las muestras de extractos hidroalcohólicos para los ensayos de actividad antimicrobiana en función de los tratamientos térmicos ($v_1= 0,2$ m/s; $v_2= 0,7$ m/s).

Muestra	Tratamiento
1	Sin tratamiento
2	40 °C, v_1
3	40 °C, v_2
4	60 °C, v_1
5	60 °C, v_2
6	80 °C, v_1
7	80 °C, v_2

En la Figura 5.24, se muestran las placas con el ensayo de los siete extractos frente a *E. coli*.

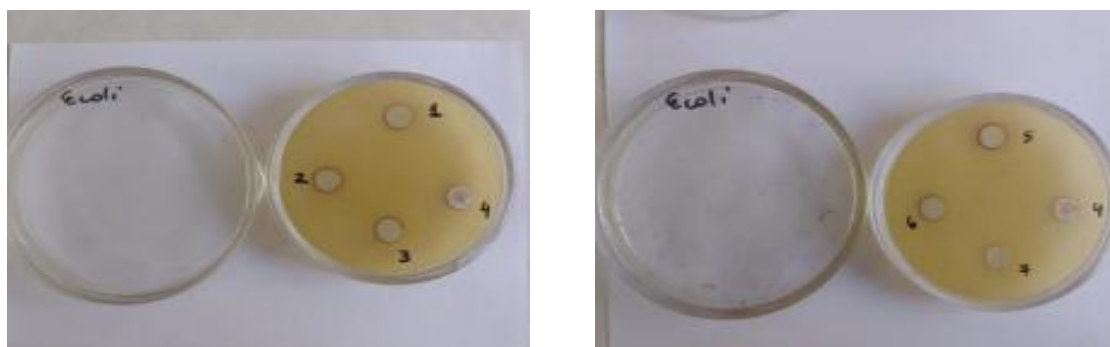


Figura 5.24. Determinación de la capacidad antimicrobiana de los extractos de harina de quinoa frente a la bacteria *Escherichia coli*.

En la Figura 5.25, se muestran las placas de los ensayos para los siete extractos frente a *Staphylococcus aureus*.

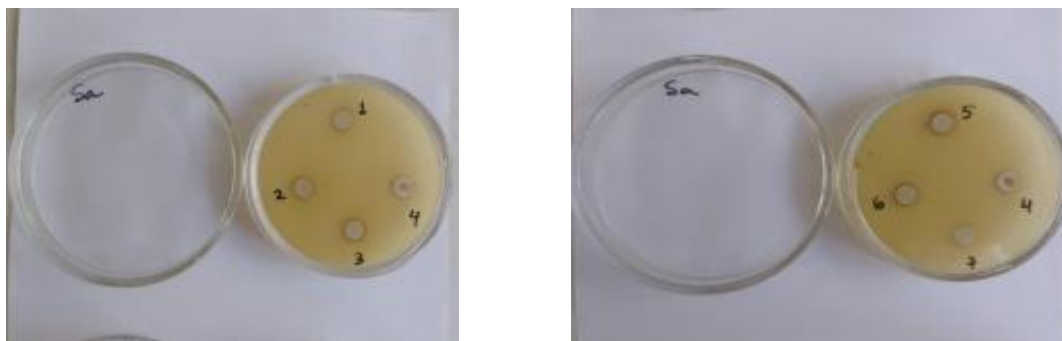


Figura 5.25. Determinación de la capacidad antimicrobiana de los extractos de harina de quinoa frente a la bacteria *Staphylococcus aureus*.

En ambos ensayos, se puede apreciar la ausencia de actividad antimicrobiana para todos los extractos ensayados. Esto puede explicarse por su baja concentración, que en este estudio fue 0,03 g/ml. Marín Sánchez *et al.* (2020), comprobaron la actividad bactericida in vitro de extractos de *Chenopodium quinoa* Willd. sobre las bacterias patógenas *S. aureus* y *E. coli*, para una concentración de 0,2 g/ml.

Proaño Perez *et al.* (2017), estudiaron el efecto antimicrobiano de extractos de quinoa frente a *S. Aureus*. Utilizaron dos concentraciones, 0,1 y 0,5 mg/ml y obtuvieron que solo la concentración de 0,5 mg/ml mostró resultados significativos.

Además de la concentración de los extractos, la actividad antimicrobiana de los mismos depende de otros factores como son la cantidad de metabolitos secundarios relacionados a los compuestos con capacidad antioxidante, obtenidos de acuerdo al mecanismo de extracción, el tipo de solvente usado, la localización geográfica del cultivo y la época del año, entre otros.

Capítulo 6

Conclusiones

6. Conclusiones

Los resultados obtenidos en la presente tesis permiten incluir a la variedad Hualhuas en el conjunto de las otras variedades de quinoa, por su aporte de grasas, proteínas y compuestos con capacidad antioxidante, pudiendo ser utilizada como ingrediente alternativo para la elaboración de alimentos.

Como se comprobó en esta tesis, en algunas variedades híbridas de quinoa se ha modificado el contenido de saponinas, habiendo logrado disminuir su contenido y reducirlo hasta valores aptos para el consumo humano. Esto evita los tratamientos requeridos para el acondicionamiento del grano previo al consumo y elimina la necesidad de realizar una desaponificación.

Fue posible modelar el proceso de secado, obteniendo una alta precisión entre los datos experimentales y los estimados mediante la aplicación del modelo. Se obtuvo el coeficiente de difusividad efectiva (D_{eff}), que resultó influenciado por la temperatura del grano, y el coeficiente de transferencia de masa (k), dependiente de las velocidades del aire de secado. Los coeficientes de difusión obtenidos para los granos de quinoa se encuentran dentro de los intervalos reportados por la bibliografía.

Dado que el modelo deriva fundamentalmente de los primeros principios e incluye parámetros con significado físico real, resulta adecuado para el diseño de equipos o para convertir un proceso batch en un proceso continuo.

En relación al secado, necesario para prolongar la conservación del grano en condiciones adecuadas de almacenamiento, se observaron diferencias causadas por el tratamiento realizado a 80 °C. A esta temperatura, se modificó el rendimiento de la molienda del grano; mientras que aumentó el porcentaje retenido por la malla 25, disminuyó el retenido por malla 50, con respecto a las harinas obtenidas por molienda de granos secados a 40 °C y 60 °C.

Los resultados de los tratamientos térmicos a diferentes condiciones de temperatura y velocidad del aire de secado aplicados sobre las semillas, mostraron que los mayores incrementos en los niveles de actividad antioxidante y en el contenido de compuestos fenólicos totales, se alcanzaron utilizando temperaturas de secado de 80°C. En cambio, el aumento de la temperatura de secado produjo una disminución en el contenido de flavonoides en las harinas obtenidas. Esto puede deberse a que bajo determinadas condiciones, someter los granos a altas temperaturas podría degradar algunos compuestos flavonoides, particularmente susceptibles, pero influiría positivamente en el contenido de compuestos antioxidantes de la quinoa, debido a la reacción de Maillard, que se produce como consecuencia del tratamiento térmico, o a la liberación de

compuestos fenólicos ligados. Estas variaciones también están condicionadas por el método utilizado para extraer y determinar los compuestos fenólicos. No se encontraron diferencias en los parámetros ensayados según la velocidad del aire de secado.

El contenido de grasas y proteínas totales encontradas para las harinas obtenidas por molienda del grano de quinoa, coincidió con los valores publicados en la bibliografía. Si bien durante la etapa de secado podrían haberse producido reducciones en el contenido total de proteínas, este no experimentó variaciones, aunque no se estudió su biodisponibilidad. Se sugiere realizar un estudio de los aminoácidos, a los fines de estudiar el efecto que podría ocurrir en su perfil.

Los extractos hidroalcohólicos obtenidos a partir de la harina no evidenciaron actividad antimicrobiana, para las concentraciones ensayadas que probablemente eran muy bajas para generar un efecto.

El artículo 682 bis del CAA indica que la concentración de grasa en la harina de quinoa debe ser inferior al 1%. Esto resulta contradictorio, ya que los granos de quinoa poseen entre el 2 y el 9,5 % de grasa y la harina se obtiene a partir de granos enteros, sin desgrasar. Por otra parte, se comprobó que la harina de quinoa generalmente se vende a granel en dietéticas o supermercados de la zona de Rosario y no se encontraron productos envasados y rotulados, que cumplieran las especificaciones del CAA. Se recomienda revisar estas especificaciones y su cumplimiento.

Recomendaciones

Sería interesante dar continuidad a este trabajo:

Verificando los resultados relativos al contenido de compuestos fenólicos y flavonoides para otra variedad de quinoa.

Verificando el cumplimiento del modelo de secado y los valores del coeficiente de difusión para otras variedades de quinoa.

Evaluando la capacidad antimicrobiana de los extractos hidroalcohólicos previamente concentrados.

Revisando lo expresado en el artículo 682 bis referido al contenido de grasas de la harina.

Publicación y presentación en congresos

Los resultados parciales del siguiente trabajo de Tesis han dado lugar a las siguientes publicaciones:

Publicaciones realizadas en revistas:

- Julia Luisetti, Héctor Lucero, and María Cristina Ciappini (2020). Optimization of the extraction of antioxidant compounds from quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd.). *Agronomía Colombiana*, 38(3), 345-350.
- Julia Luisetti, Héctor Lucero, and María Cristina Ciappini (2020). Estudio preliminar para optimizar la extracción de compuestos fenólicos bioactivos de quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd). *Revista de Ciencia y Tecnología*, 33, 94-99.

Asistencia a congresos como autor:

III Jornadas de Investigación en Agronomía, Agroindustrias, Enología Y Alimentos - Universidad de Morón, Buenos Aires, 19 y 20 de agosto 2021.

Luisetti J., Florencia M.B. y Ciappini M.C. “Influencia del Secado Convectivo de Granos de Quinoa (*Chenopodium Quinoa* Wild) en el contenido de Compuestos Antioxidantes”. Presentación de resumen y de trabajo completo con exposición oral. Formato virtual. Universidad de Morón.

V Congreso Argentino de Ingeniería – CADI/CLAEDI – Universidad Nacional de Buenos Aires- Facultad de Ingeniería, Buenos Aires, 5, 6 y 7 de octubre de 2021.

Luisetti, J., Balzarini M.F. y Ciappini M.C. Impacto de las condiciones operativas del secado de granos de quinoa (*Chenopodium Quinoa* Willd.) en el contenido de polifenoles totales. Presentación de resumen y trabajo completo con exposición oral. Formato virtual.

Portillo, S. B., Ciappini, M. C., Lucero, H. y Luisetti, J. “Eliminación de saponinas de los granos enteros de quinua (*Chenopodium quinua* Willd) por método húmedo para el consumo humano”. Presentación de resumen y trabajo completo. Formato virtual.

IX Jornadas de Jóvenes Investigadores JIT - Universidad Tecnológica Nacional – FR Santa Fe, Santa Fe, 6 y 7 de octubre de 2021

Ravagnan A. y Luisetti J. Modelos matemáticos para el ajuste de las curvas de secado de quinoa (*Chenopodium quinoa* willd.). Presentación de trabajo completo con exposición oral. Formato virtual.

Trabajo completo publicado en Universidad Tecnológica Nacional - Facultad Regional Santa Fe
JIT 2021: Jornadas de Jóvenes Investigadores Tecnológicos: Novena edición de las Jornadas
de Jóvenes Investigadores Tecnológicos JIT 2021 / contribuciones de Patricia Acevedo;
Mauro Avalo; Marcela Tulián; compilación de Ana Rosa Tymoschuk; prefacio de Ana Rosa
Tymoschuk - 1a Ed adaptada. - Ciudad Autónoma de Buenos Aires: Universidad
Tecnológica Nacional, 273-277, 2022. ISBN 978-950-42-0212-7

IDETEC 2020. I Congreso de Investigaciones y Desarrollos en Tecnología y Ciencia. -

Universidad Tecnológica Nacional – FR Villa María, Córdoba, del 22al 25 de Junio de 2020.

Luisetti J, Lucero H, Ciappini MC. Optimización de las variables operativas del proceso de
extracción de compuestos fenólicos bioactivos en quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd.).
Presentación en Poster y Trabajo completo publicado en Libro de Actas (ISBN 978-987-
4998-68-2). UTN FRVM. Villa María, Córdoba.

Bibliografía

- Abadía, B., M., Bartosik R., Cardoso, L., De la Torre D., Giordia, J., J, Hoyos, M. (2013). Manual de buenas prácticas en poscosecha de granos: hacia el agregado de valor en origen / editado por: Bernadette Abadía y Ricardo Bartosik. Buenos Aires, INTA. Disponible en: https://inta.gob.ar/sites/default/files/inta_manual_de_buenas_practicas_en_poscosecha_de_granos_reglon_48-2.pdf. Consultado en Noviembre 2020.
- Abderrahim, F., Huanatico, E., Repo-Carrasco-Valencia, R., Arribas, S. M., Gonzalez, M. C., & Condezo-Hoyos, L. (2012). Effect of germination on total phenolic compounds, total antioxidant capacity, Maillard reaction products and oxidative stress markers in canihua (*Chenopodium pallidicaule*). *Journal of Cereal Science*, 56(2), 410-417.
- Abugoch James, L. E. (2009). Quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd.): composition, chemistry, nutritional, and functional properties. *Advances in food and nutrition research*, 58, 1-31.
- Acar, O. C., Gökmen, V., Pellegrini, N., Fogliano, V. (2009). Direct evaluation of the total antioxidant capacity of raw and roasted pulses, nuts and seeds. *European Food Research Technology*, 229, 961-969.
- Acosta Estrada, B. A., Gutierrez-Uribe, J.A. y Serna-Saldivar, S.O. (2014). Bound phenolics in foods, a review. *Food Chemistry*, 152, 46-55. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2013.11.093>
- Aguilar Izquiero, J. C. (2017). Componentes bioactivos y valor nutricional de tres variedades de harina de quinua malteada (*Chenopodium quinoa* Willd.) (Tesis de grado). Facultad de Ciencias Agropecuarias. Universidad Nacional de Trujillo. Perú. Repositorio: <http://www.dspace.unitru.edu.pe/handle/UNITRU/9756>
- Aguirre, J. (2003). "Utilization of the technology of extrusión cooking of low cost in Quinoa processing (*Chenopodium quinoa* Willd)" (Tesis de grado para optar el título de ingeniero de Industrias Alimentarias). Universidad Nacional Agraria La Molina, Lima.
- Ahamed, T., Singhal, R., Kulkarni, P. y Pal, M. (1998). A lesser-known grain, *Chenopodium quinoa*: review of the chemical composition of its edible parts. *Food and Nutrition Bulletin*, 19.
- Ahumada, A., Ortega, A., Chito, D., Benitez, R. (2016). Saponinas de quinua (*Chenopodium quinoa* Willd.): un sub producto con alto potencial biológico. *Revista Colombiana Ciencias Químicas y Farmacéuticas*. 45 (3) 438-469.
- Ajala, A. S., Ajala, F. A. & Tunde-Akintunde, T. Y. (2012). Study on Drying Kinetics of Fermented Corn Grains. *Food Science and Quality Management*, 5, 10-18.

- Alvarez Jubete, L., Arendt, E. y Gallanher, E. (2010). Polyphenol Composition and in vitro antioxidant activity of amaranth, quinoa buckwheat and wheat as affected by sprouting and baking. *Food Chemistry*, 119, 770-778.
- Alvarez Jubete, L., Arendt, E. K., & Gallagher, E. (2009). Nutritive value and chemical composition of pseudocereals as gluten-free ingredients. *International Journal of Food Sciences and Nutrition*, 60 (4), 240-257.
- Avanza, M. (2004). Modificaciones de las proteínas de amaranto por tratamiento térmico (Tesis doctoral). Universidad Nacional del Nordeste Especialidad Química. Facultad de Ciencias Exactas y Naturales y Agrimensura. Buenos Aires. Argentina. Repositorio UNNE: https://repositorio.unne.edu.ar/bitstream/handle/123456789/28517/RIUNNE_FACENA_TD_Avanza_MV.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- Akpınar, E. K., Bicer, Y. (2006). Mathematical modelling and experimental study on thin layer drying of strawberry. *International Journal of Food Engineering*; 2(1), 1556-3758.
- AOAC. Moisture in cereal adjuncts: Air oven method (103 to 104°C). Official Methods of Analysis. 15th ed. Arlington, VA: Association of Official Analytical Chemists, 1990
- Apaza, V., Cáceres, G., Estrada, R., Pinedo, R. (2013). Catálogo de variedades comerciales de quinua en el Perú. Lima: Instituto Nacional de Innovación Agraria INIA; Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación FAO, 79.
- Avilés, D y Jinés, C. (2000). Extracción y caracterización de almidón de tres ecotipos de quinua (*Chenopodium quinoa* Willd.) (Tesis de grado para optar por el título de ingeniero en la industria alimentaria). Universidad Tecnológica Metropolitana. Santiago de Chile.
- Astiz V., Molfese E. and Seghezzi M. (2013). Panificación de harinas mezcla de trigo y quinua. Laboratorio de Calidad Industrial de Granos. Chacra Experimental Integrada Barrow (Convenio INTA-MAA).
- Azzouz, S., Guizani, A., Jomaa, W., Belghith, A. (2002). Moisture diffusivity and drying kinetic equation of convective drying of grapes. *Journal of Food Engineering*, 55, 322-330.
- Babu, R. H., and Savithramma, N. (2013). Phytochemical screening of underutilized species of Poaceae. *Journal of Pharmacy Research*, 1, 947-951.
- Bacigalupo, A. y Tapia, M. (1990). Cultivos Andinos subexplotados y su aporte a la alimentación. FAO. Ediciones Gegra S.A. Santiago, Chile, 136-163.
- Ballester Sánchez, J. (2020). Fraccionamiento de quinua por molienda seca y húmeda para la formulación de alimentos con alto valor añadido: estudio nutricional y evaluación de propiedades saludables (Tesis doctoral). Universidad de Valencia.

- Balouiri, M., Sadiki, M. y Ibsouda, S. K. (2016). "Methods for in vitro evaluating antimicrobial activity: A review". *Journal of Pharmaceutical Analysis*, 6, 71–79.
- Bande, Y.M., Adam, N.M., Azmi, Y. and Jamarie, O. (2012). A review of methodologies for determination of physical properties of seeds. *Engineering research methods*, 3.
- Barbosa Cánovas, G. V., Ortega-Rivas, V., Juliano, P., Yan, H. (2005). Food Powders. Physical Properties, Processing, and Functionality. Kluwer Academic / Plenum Publishers. New York, Boston, Dordrecht, London, Moscow.
- Barazarte, H. E., Sangronis, E., Moreno Pérez, I. M., Garmendia Guedez, C. A., & Mujica, Y. J. (2015). Laminados de guayaba (*Psidiumguajava* L.) enriquecidos con inulina y calcio. *Archivos Latinoamericanos de Nutrición*, 65(4), 225-233. Disponible en: http://ve.scielo.org/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0004-06222015000400003&lng=es&tlng=es. Consultado en Marzo 2021.
- Bartolo Estrella, D. E. (2014). Influencia de la temperatura de tostado sobre el contenido de compuestos fenólicos totales y la capacidad antioxidante de la Cañihua (*Chenopodium pallidicaule* Aellen) variedad Cupi (Tesis de grado). Facultad de Ingeniería y Arquitectura. Universidad Peruana Unión. Lima, Perú. Repositorio de tesis: <http://hdl.handle.net/20.500.12840/589>
- Baron Pichardo, L., F., M., G. (2019). Evaluación de la actividad antimicrobiana de extractos de *Hemiphylacusnovogalicianus* (Tesis de maestría). Universidad Autónoma del Estado de Morelos, Facultad de Farmacia. Cuernavaca, México.
- Bazile, D., Chia, E. y Olgún P. (2015). Diversidad de los cultivos de quínoa en Chile. In Quínoa: Un súper alimento para Chile y el mundo. Programa de mejoramiento genético de quínoa: la nueva apuesta de INIA. Disponible en: https://agritrop.cirad.fr/578611/1/Bazile-Chia-Olgun_2015_TAD_Diversidad%20de%20los%20cultivos%20de%20quinua%20en%20Chile.pdf
- Bazile, D. y Santiváñez, T. (2014). Introducción al estado del arte de la quinua en el mundo. Capítulo I. En Bazile D. Estado del arte de la quinua en el mundo. Santiago de Chile: FAO y CIRAD. Disponible en: https://agritrop.cirad.fr/574154/1/document_574154.pdf
- Berk, Z. (2009). Food Process Engineering and Technology (Primera ed.). Elsevier.
- Bhargava, A., Shukla, S., Ohri, D. (2006). *Chenopodium quinoa*—An Indian perspective. *Industrial Crops and Products*, 23, 73–87.
- Białobrzewski, I. and Markowski, M. (2004). Mass transfer in the celery slice: effects of temperature, moisture content, and density on water diffusivity. *Drying Technology*, 22 (17), 1777-1789.

- Boateng, J., Verghese, M., Walker, L. y Ogutu, S. (2008). Effect of processing on antioxidant contents in selected dry beans (*Phaseolus* spp. L.). *Food Science and Technology*, 41(9), 1541-1547
- Bonilla, H., Carbajal, Y., Gonzales, M., Vásquez, V., López, A. (2019). Determinación de la actividad insecticida de la saponina de la quinua (*Chenopodium quinoa*) en larvas de *Drosophila melanogaster*. *Scientia Agropecuaria*, 10 (1). Disponible en: http://www.scielo.org.pe/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2077-99172019000100004. Consultado Febrero 2021.
- Bonifacio, A. y Saravia, S. (2006). Informe final de actividades del Proyecto de Quinua: Cultivo Multipropósito para los países andinos. La Paz, Bolivia.
- Brennan, C., Brennan, M., Derbyshire, E. y Tiwari, B. K. (2011). Effects of extrusion on the polyphenols, vitamins and antioxidant activity of foods. *Trends in Food Science y Technology*, 22(10), 570-575.
- Brennan, J., Butters, J., Cowell, N., & Lilley, A. (1998). Las Operaciones en la Ingeniería de los Alimentos (Tercera ed.). Zaragoza, España: Acribia.
- Bruin, S. and Luyben, K. (1980). *Drying of Food Materials: a Review of Recent Developments*, En: *Advances in Drying, 1*. Washington, DC, USA: Mujumdar, A.S. (Ed.), 155-215, Hemisphere Publishing Corp., ISBN 0-8911-6185-6.
- Cáceres Ríos, M. C. (2016). Evaluación sensorial del sabor amargo de doce accesiones de quinua (*Chenopodium quinoa* Willd.) y su correlación con el contenido de saponinas (Tesis de carrera de grado). Universidad Nacional Agraria, Facultad de Industrias Alimentarias. La Molina, Lima, Perú.
- Çalışır, E., Marakoğlu, A., Ögüt, H. and Öztürk, Ö. (2005). Physical properties of rapeseed (*Brassica napus oleifera* L.). *Journal of Food Engineering*, 69(1), 61-66.
- Calzetta Resio, A. N., Aguerre, R. J., Suarez, C. (2004). Drying characteristics of amaranth grain. *Journal of Food Engineering*, 65, 197–203.
- Capriles, V. D., Coelho, K. D., Guerra Matias, A. C. y Arêas, J. A. G. (2008). Effects of processing methods on amaranth starch digestibility and predicted glycemic index. *Journal of Food Science*, 73(7), 160-164.
- Carciochi, R. A. (2014). Obtención de ingredientes alimenticios con capacidad antioxidante mejorada por aplicación de distintos procesos a semillas de quinua (*Chenopodium quinoa*). (Tesis Doctoral). Universidad de Buenos Aires, Facultad de Farmacia y Bioquímica.
- Cárdenas, M. (1944). Descripción preliminar de las variedades de *Chenopodium quinoa* de Bolivia. *Revista de Agricultura*, 2 (2), 13-26.

- Carrasco, F. (2016). Efectos del cambio climático en la producción y rendimiento de la quinua en el distrito de Juli, periodo 1997 - 2014. *Comuni@cción*, 7(2), 38-47.
- Carrasco Sandoval, J. (2020). Desarrollo de una plataforma científica tecnológica para la identificación de compuestos bioactivos desde arrayán (*Luma apiculata*) y evaluación del efecto de la nanoencapsulación sobre su bioaccesibilidad (Tesis doctoral). Repositorio UdeC <http://repositorio.udec.cl/jspui/handle/11594/6224>. Universidad de Concepción Dirección de Postgrado, Facultad de Farmacia. Concepción, Chile.
- Castro, E. (2010). Harina y aceite de quínoa (*Chenopodium quinoa* Willd.) de la región VI. Disponible en: http://repositorio.uchile.cl/bitstream/handle/2250/121448/Harina_y_aceite_de_Quinoa%5B1%5D.pdf?sequence=1
- Chairez Huerta, S. G., Trejo-Guardado, V. I., Bañuelos-Melero, V., Cortez-Muñoz, J. M., Contreras-Martínez, C. S., Noriega-Maldonado, A. y Carranza-Concha, J. (2020). Compuestos fenólicos y análisis proximal en cuatro variedades de Quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd). *Investigación y Desarrollo en Ciencia y Tecnología de Alimentos*, 5, 21-26.
- Chirife, J. (1983). Fundamental of the drying mechanism during air dehydration of foods, in *Advances in Drying*, 2. New York: Mujumdar (Ed.), Hemisphere Publishing.
- Cerezal Mezquita, P., Urtuvia Gatica, V., Ramírez Quintanilla, V., Romero Palacios, N. y Arcos Zavala, R. (2011). Desarrollo de producto sobre la base de harinas de cereales y leguminosa para niños celíacos entre 6 y 24 meses; I: Formulación y aceptabilidad. *Nutrición Hospitalaria.*, 26(1), 152-160
- Cerron Mercado, F. G. (2013). Efectos de temperatura y tiempo en el desamargado y secado de quinua (*Chenopodium quinoa* Willd) (Tesis de grado). Universidad Nacional del Centro del Perú, Facultad de Ingeniería en Industrias Alimentarias. Huancayo, Perú.
- Cervilla, N. (2016). Aspectos Tecnológicos que influyen en las pérdidas nutricionales durante el proceso de obtención de Harinas de Quinoa. Caracterización físico-química (Tesis doctoral). Universidad Nacional de Córdoba, Facultad de Ciencias Exactas Físicas y Naturales.
- Cervilla, N., Mufari, N., Calandri, E. y Guzmán, C. (2012). Composición nutricional y estabilidad oxidativa de harinas y sopas de quinua. *Ciencia y Tecnología de los Cultivos Industriales*, 5, 61-66.
- Chauhan, G., Eskin, N. and Tkachuk. (1992). Nutrients and antinutrients in quinoa seed. *Cereal Chemistry*, 69 (1), 85-88.
- Cheng, Z., Su, L., Moore, J., Zhou, K., Luther, M., Yin, J. J., Yu, L. L. (2006). Effects of postharvest treatment and heat stress on availability of wheat antioxidants. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 54 (15), 5623-5629.

- Choi, Y. and Okos, M. (1986). Effects of temperature and composition on the thermal properties of foods. *Food Engineering and Process Application*, 1, 93-116.
- Cogliatti, M. y Helter, D. (2016). Perspectivas de producción de quinua en la región agrícola del centro de la provincia de Buenos Aires. Disponible en: <http://www.faa.unicen.edu.ar/archivos/Quinua.pdf>
- Comai, S., Bertazzo, A., Bailoni, L., Zancato M. y Costa C.V. L. (2007). The content of proteic and nonproteic (free and protein-bound) tryptophan in quinoa and cereal flours. *Food chemistry*, 100 (4), 1350-1355.
- Cuniberti, M. (2014). Almacenamiento de granos (silo bolsa) y calidad Trigo. INTA. Disponible en: https://inta.gov.ar/sites/default/files/script-tmp-inta_almacen_granos14.pdf
- Coulibaly, A. K, Martínez, E. A., Sangare, A., Konate, M., Traore, S., Ruiz, K.B., Martinez, E. A., Zurita, A.R., Antognoni, F., Biondi, S., Maldonado, S., Leon, P., Bazile, D. (2014). Evaluación de Quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd.) y adaptación a las condiciones agroclimáticas de Mali, África Oeste: Un ejemplo de colaboración Sur-Norte-Sur. Capítulo Numero 6.31. En: Bazile, D., Bertero, D. y Nieto, C., “Estado del arte de la quinua en el mundo en 2013”: FAO (Santiago de Chile) y CIRAD, (Montpellier, Francia), 635-646.
- Crank, J. (1975). *The Mathematics of Diffusion*. Oxford SciencesPublication.
- De la Cruz Quispe. (2009). “Complementación proteica de harina de trigo (*Triticum aestivum* L.) por harina de quinua (*Chenopodium quinoa* Willd) y suero en pan de molde y tiempo de vida útil (Tesis de maestría). Universidad nacional agraria la Molina. Lima, Perú.
- Delatorre Herrera, J., Sánchez, M., Delfino, I., and Oliva, M.I. (2013). La quinua (*Chenopodium quinoa* Willd), un tesoro andino para el mundo. *Idesia*, 31(2), 111-114.
- Dewanto, V., Wu, X., and Liu, R. H. (2002). “Processed sweet corn has higher antioxidant activity. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 50, 4959–4964.
- Dincer, I., Hussain, M., Sahin, A., Yilbas, B. (2002). Development of a new moisture transfer (Bi – Re)correlation for food drying applications. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 45, 1749–1755.
- Dini, I., Tenore, G. C., Dini, A. (2010). Antioxidant compound contents and antioxidant activity before and after cooking in sweet and bitter *Chenopodium quinoa* seeds. *Food Science and Technology*, 43, 447–451.
- Douliat, D., Tzia, K., Gekas, V. (2000). A Knowledge Base for the Apparent Mass Diffusion Coefficient (DEFF) of Foods. *International Journal of Food Properties*, 3 (1), 1 – 14.
- Eberhardt, M., Lee, C. and Liu, R.H. (2000). *Antioxidant Activity of Fresh Apples. Nature*, 405, 903-904.

- Echeverría, S. J. A., Ramírez Wong, B., Medina Rodríguez, C. L., Magaña Barajas, E., Torres Chávez, P. I. y Ledesma Osuna A. I. (2019). Actividad antioxidante de harinas de amaranto obtenidas por extrusión y análisis parcial de su calidad proteica in vivo. *Revista de Ciencias Biológicas y de la Salud*, 21(1). Sonora, México.
- Ertekin, C., Yaldiz, O. (2005). Drying of eggplant and selection of a suitable thin layer drying model. *Journal of food engineering*, 25, 349-59.
- Espíndola, G. (1986). Respuestas fisiológicas, morfológicas y agronómicas de la quinua (*Chenopodium quinoa* Willd.) al déficit hídrico (Tesis de maestría). Colegio de Postgraduados. Institución de Enseñanza e Investigación en Ciencias Agrícolas. Chapingo México.
- FAOSTAT. (2019). Disponible en: <https://www.fao.org/faostat/es/#data/TCL>. Consultado en Marzo 2020.
- Fellows, P. (2000). Food Processing Technology. Second edition, Woodhead Publishing Limited and CRC Press LLC
- Fellows, P. (1994). Extrusión. Revisado en Tecnología del proceso de los alimentos: Principios y prácticas. Fellows (Editor). Editorial Acribia, S.A. España.
- Fischer, S. R., Wilckens, J and M. Aranda (2013). Variation in antioxidant capacity of quinoa (*Chenopodium quinoa* Will) subjected to drought stress. *Industrial Crops and Products*, 46, 341-349.
- Fuentes Gómez, H. D y Mendoza Villamil, H. J. (2019). Estudio comparativo del contenido de polifenoles totales y actividad antioxidante en quinua roja, negra y amarilla (*Chenopodium quinoa* willdenow) cultivada en ecuador (Tesis de grado). Universidad de Guayaquil. Facultad de Ciencias Químicas. Ecuador. Repositorio: <http://repositorio.ug.edu.ec/bitstream/redug/45374/1/BCIEQ-T-0457%20Fuentes%20G%C3%B3mez%20Henry%20David%3B%20Mendoza%20Villamil%20Humbolt%20Joe.pdf>
- Gallegos Infante, J. A., Rocha Guzmán, N. E., Gonzalez Laredo, R. F., Pulido Alonso, J. (2010). Effect of processing on the antioxidant properties of extracts from Mexican barley (*Hordeum vulgare*) cultivar. *Food Chemistry*, 119, 903-906.
- García Parra, M. A., García-Molano, J. F. y Carvajal-Rodríguez, D. C. (2018). Evaluación del efecto de la fertilización química y orgánica en la composición bromatológica de semillas de quinua (*Chenopodium quinoa* Willd) en Boyacá – Colombia. *Revista de Investigación Agraria y Ambiental*, 9 (2), 99–108.
- García Parra, M., Plazas Leguizamón, N., Carvajal, D., Ferreira, S., Parra, J. (2018). Descripción de las saponinas de la quinua (*Chenopodium quinoa* Willd.) en relación con el suelo y el clima: una revisión. *Informador Técnico*, 82 (2), 241-249.

- Garnero, S. (2006). Calidad intrínseca de los granos en la poscosecha (Trabajo final de maestría). Facultad de Ciencias Químicas. Universidad de Córdoba. Repositorio: http://www.edutecne.utn.edu.ar/tesis/calidad_intrinseca_granos.pdf.
- GawlikDziki, U., Świeca, M., Sułkowski, M., Dziki, D., Baraniak, B. Czyz, J. (2013). Antioxidant and anticancer activities of *Chenopodium quinoa* leaves extracts – *in vitro* study. *Food Chemistry Toxicology*, 57, 154-160
- Geankoplis, C. (1998). Proceso de transporte y Operaciones Unitarias (Tercera ed.). México: Continental S.A. Disponible en: <https://fenomenosdetransporte.files.wordpress.com/2008/05/geankopolis.pdf>. Consultado en Febrero 2021.
- Gianna, V. (2013). Extracción, cuantificación y purificación de Saponinas de semillas de *chenopodium quinoa* Willd provenientes del noroeste argentino (Tesis doctoral). Universidad Nacional de Córdoba, Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales. Córdoba, Argentina.
- Gómez Caravaca, A. M., Iafelice, G., Verardo, V.; Marconi, E., Caboni, M.F. (2014). Influence of pearling process on phenolic and saponin content in quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd). *Food Chemistry*, 157, 174-178.
- Gonzalez, J. A, Konishi, Y., Bruno, M., Valoy M, Prado, F. E. (2012). Interrelationships among seed yield, total protein and amino acid composition of ten quinoa (*Chenopodium quinoa*) cultivars from two different agroecological regions. *Journal of the Science Food and Agriculture*; 92 (6), 1222–1229.
- González J. A y Prado F. E. (2013). Quinoa: aspectos biológicos, propiedades nutricionales y otras consideraciones para su mejor aprovechamiento. Tucumán - Argentina.
- Guerrero, K., Hernandez, D. y Zuleta, H. (2013). Desarrollo y caracterización de un producto libre de gluten a base de harinas de maiz, arroz y quinua. Disponible en: <http://alimentos hoy.acta.org.co/index.php/hoy/article/viewFile/231/224>
- Harborne, J.B. (1989). Biosynthesis and function of antinutritional factors in plants. En: Association of Applied Biologists (Ed.) Aspects of Applied Biology, 19. Antinutritional factors, potentially toxic substances in plants, 21-28. Institute of Horticultural Research, Wellesbourne,
- Hassini, L., Azzouz, S., Belghith, A. (2004). Estimation of the moisture diffusion coefficient of potato during hot air drying, En: Proceedings of the 14th International Drying Symposium (IDS-2004), 1488-1495. São Paulo, Brazil.
- Heisser, C.B. y Nelson, D.C. (1974). On the origin of the cultivated chenopods (*Chenopodium*). *Genetic*, 78, 503-505

- Hirose, Y., Fujita, T., Ishii, T., Ueno, N. (2010). Antioxidative properties and flavonoid composition of *Chenopodium quinoa* seeds cultivated in Japan. *Food Chemistry*, 119, 1300–1306.
- Hossain, M. B., Barry-Ryan, C., Martin-Diana, A. B., & Brunton, N. P. (2011). Optimisation of accelerated solvent extraction of antioxidant compounds from rosemary (*Rosmarinus officinalis* L.), marjoram (*Origanum majorana* L.) and oregano (*Origanum vulgare* L.) using response surface methodology. *Food Chemistry*, 126, 339-346.
- Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura (IICA) · Instituto Nacional de Innovación Agraria, Lima (Perú) (INIA). (2015). El mercado y la producción de quinua en el Perú. Disponible en: <https://repositorio.iica.int/handle/11324/2652>
- IRAM 5624. (2015). Subproductos oleaginosos. Determinación de materia grasa. Instituto Argentino de Normalización y Certificación (IRAM).
- IRAM 15852-2. (2020). Cereales y productos derivados. Determinación del contenido denitrógeno y cálculo de proteína total. Método de Kjeldahl modificado. Parte 2 - Método automático oSemiautomático. Instituto Argentino de Normalización y Certificación (IRAM).
- IRAM 15851.(2009). Cereales y productos de cereales. Determinación de cenizas por incineración. Instituto Argentino de Normalización y Certificación (IRAM).
- Işik, E. and Unal, A. (2011). Some engineering properties of white kidney beans (*Phaseolus vulgaris* L.). *African Journal of Biotechnology*, 10(82), 19126- 19136
- Jacobsen, S. E. (2003). The Worldwide Potential for Quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd.). *Food Reviews International*, 19, 167-177.
- Jacobsen, S. E. y S. Sherwood. (2002). Cultivo de granos andinos en Ecuador. Informe sobre los rubros de quinua, chocho y amaranto. CIP y FAO Global IPM Facility. Editorial Abya Yala. Quito, Ecuador.
- Jacobsen, S. y O. Stolen. (1993). Quinoa - Morphology, phenology and prospects for its production as a new crop in Europe. *European Journal of Agronomy*, 2 (1), 19-29.
- Janampa Arango, M. N. (2017). Efecto de las variables de presión, temperatura y tiempo en la obtención de quinua (*Chenopodium quinoa* Willd) cocida variedad dura (Tesis de grado para alcanzar el título de ingeniería en industrias alimentarias). Universidad Nacional de San Cristobal de Huamanga, Facultad de Ingeniería Química y Metalurgia. Ayacucho, Perú. Disponible en: repositorio.unsch.edu.pe/bitstream/UNSCH/3341/1/TESIS%20IA271_Jan.pdf
- Janjai, S., Lamlert, N., Intawee, P., Mahayothee, B., Haewsungcharern, M., Bala, B.K., Müller, J. (2008). Finite element simulation of drying of mango. *Biosystems Engineering*, 99 (4): 523-531.

- Jeong, S.M., Kin, S.Y., Kin, D.R., Nam, K.C., Ahn, D.U., Lee, S.C. (2004). Effect of Seed Roasting Conditions on the Antioxidant Activity of Defatted Sesame Meal Extracts. *Journal of food science*, 69(5), 377 – 381
- Jongen, W. (2002). Fruit and vegetable processing. Improving quality. CRC Press. Estados Unidos.
- Karathanos, V. K. (1990). Water diffusivity in Starches at Extrusion Temperatures and Pressures. New Brunswick (Tesis doctoral). New Jersey, Rutgers University.
- Kaur, C., Kapoor, H. (2001). Antioxidants in fruits and vegetables - the millennium's health. *International Journal of Food Science and Technology*, 36, 703-725.
- Koocheki, A., Razavi, S.M.A., Milani, E., Moghadam, T.M., Abedini, M., Alamiyan, S and Izadkhan, S. (2007). Physical properties of watermelon seed as a function of moisture content and variety. *International Agrophysics*, 21 (4), 349-359.
- Koziol, F. (1991). Afrosimetric estimation of threshold saponin concentration for bitterness in quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd). *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 54(2), 211–219.
- Lampe, J. W. (2003). Spicing up a vegetarian diet: chemopreventive effects of phytochemicals. *Am. American Journal Clinical Nutrition*, 78 (3), 579-583.
- Larrosa, M., Llorach, R., Espin, J. C. y Tomas-Barberan, F. A. (2002). Increase of Antioxidant Activity of Tomato Juice Upon Functionalization with Vegetable Byproduct Extracts. *Annals of Agricultural Sciences*, 58(1), 83-95,
- Larrosa, V., Lorenzo, G., & Zaritzky, N. (2016). Modelado matemático del secado de pastas libres de gluten en relación a la temperatura. *Revista del Laboratorio Tecnológico de Uruguay*, 54-58.
- Lewis, W. K. (1921). The rate of drying of solid materials. *Industrial and Engineering Chemistry*, 13(5): 427 – 432.
- Llorente, J. R. (2008) Quinoa: Un auténtico superalimento. *Discovery DSalud*, 108.
- Luikov, A. (1970). *Analytical Heat Diffusion Theory*. New York, USA: Academic Press Inc.
- Luisetti, J., Lucero, H. y Ciappini, M. C. (2020). Estudio preliminar para optimizar la extracción de compuestos fenólicos bioactivos de quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd). *Revista de Ciencia y Tecnología*, 33, 94-99.
- Magno, M. (2010). Quinoa: Operaciones de poscosecha. Food and Agriculture Organization (FAO). Instituto de desarrollo agroindustrial. Compendio de poscosecha. Disponible en: <http://www.fao.org/3/a-ar364s.pdf>.

- Maroulis, Z. B., Saravacos, G. D., Panagiotou, N. M., Krokida, M. K. (2001). Moisture Diffusivity Data Compilation for Foodstuffs: Effect of Material Moisture Content and Temperature. *International Journal of Food Properties*, 4 (2), 2.
- McCabe, L.W., Smith, J.C. y Harriott P. (2007). Operaciones Unitarias En Ingeniería Química. 4^a ed. Editorial Mc Graw Hill, 833-870.
- Mena Reinoso, A. P. (2015). Análisis estadístico exploratorio de dos tipos de secado de quinua (Tesis de maestría). Escuela Superior Politécnica de Chimborazo. Riobamba, Ecuador.
- Menegassi, B., Pilosof, A. M. y Areas, J. A. (2011). Comparison of properties of native and extruded amaranth (*Amaranthus cruentus* L.-BRS Alegria) flour. *Food Science and Technology*, 44 (9), 1915-1921.
- Meyhuay, M. (2013). QUINUA: Operaciones de Poscosecha. Editado por AGSI/FAO. Disponible en: <https://www.fao.org/documents/card/fr/c/7b9583bf-ee74-5055-9753/>
- Miranda, M., Vega-Gálvez, A., López, J., Parada, G., Sanders, M., Aranda, M., Uribe, E. Di Scala, K. (2010). Impact of air-drying temperature on nutritional properties, total phenolic content and antioxidant capacity of quinoa seeds (*Chenopodium quinoa* Willd.). *Industrial Crops and Products*, 32, 258-263.
- Mohammadi, A., Rafiee, S., Keyhame, A., Emam Djomeh, Z. (2008). Estimation of Thin-layer Drying Characteristics of Kiwifruit (cv. Hayward) with Use of Page's Model. *Journal of Agriculture and Environmental Sciences*, 3 (5), 802-5.
- Moran, M. J. and Shapiro, H.N. (2004). Fundamentos de termodinámica técnica. Barcelona. Reverté.
- Morón, C. (1999). Importancia de los cultivos andinos en la seguridad alimentaria y nutrición. En: Mujica Sánchez, A., Izquierdo, J., Marathe, J. P., Morón, C. y Jacobsen, S. E. (Eds). Memoria: Reunión técnica y taller de formulación de proyecto regional sobre producción y nutrición humana en base a cultivos andinos. Arequipa, Perú. 20-24.
- Moscicki, L. and Zuilichem, D. (2011). Extrusion-Cooking and Related Technique. Wiley Online Books, Germany. 1-24.
- Mujica A. y Jacobsen S. E. (2006). La quinua (*Chenopodium quinoa* Willd.) y sus parientes silvestres. *Botánica Económica de los Andes Centrales*, 449-457.
- Mujica, A., Izquierdo J., Marathe J.P. (2001). Origen y descripción de la quinua. En Quinua (*Chenopodium quinoa* Willd.) – Ancestral cultivo andino, alimento del presente y futuro (Mujica A., Jacobsen S.-E., Izquierdo J., Marathe J., Editores). FAO, UNA-Puno, CIP. Santiago, Chile, 9-29

- Mujica, A. y Jacobsen, S. E. (1998). Resistencia a sequía de la quinua (*Chenopodium quinoa* Willd.). Escuela de Postgrado, Universidad Nacional del Altiplano, Puno.
- Mulet, A., Berna, A., Rosselló, C. (1989a). Drying of Carrots: Drying Models. *Drying Technology*, 7(3): 537-557.
- Mulet, A., Berna, A., Rosselló, C. and Pinaga, F. (1989b). Drying of Carrots: II Evaluation of Drying Models. *Drying Technology*, 7(4), 641-661.
- Mujumdar, A. S., and Devahastin, S. (2000). Fundamental principles of drying. In Devahastin, S. (Ed.), Mujumdar's practical guide to industrial drying. Montreal: Exergex Corp
- Muthukumarappan, K. and Karunanithy, C. (2012). Extrusion Process Design. *Handbook of Food Process Design*, 710-742.
- Nash, R. (2004). Remedies from nature. *Chemistry World*, 7, 20-23. Disponible en: <https://www.chemistryworld.com/features/remedies-from-nature/3004764.article>. Consultado en Agosto 2021
- National Committee for Clinical Laboratory Standards. (2012). Performance standards for antimicrobial disk susceptibility tests, approved standard. 11th Edition, 32(1), 1-32.
- Naczki, M., Shahidi, F. (2006). Phenolics in cereal, fruit and vegetables: Occurrence extraction and analysis. *Journal Pharmaceutical and Biomedical Analysis*, 41, 1523-1542.
- Navruz Varli, S., Sanlier, N. (2016). Nutritional and health benefits of quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd.). *Journal of Cereal Science*, 69, 371-376. Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0733521016300662>. Consultado en Agosto 2021.
- Nicoli, M. C., Anese, M., Parpinel, M. (1999). Influence of processing on the antioxidant properties of fruit and vegetables. *Trends in Food Science and Technology*, 10, 94-100.
- Noroña Gamboa, L. D. (2018). Cinética de secado de cereales provenientes de la Región Centro del Ecuador (Tesis de grado). Universidad Técnica de Ambato. Facultad de Ciencia e Ingeniería en Alimentos. Ambato, Ecuador. Repositorio digital: <https://repositorio.uta.edu.ec/jspui/handle/123456789/28372>
- Nowak, V., Du, J., and Charrondiére, U. R. (2016). Assessment of the nutritional composition of quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd.). *Food Chemistry*, 193, 47-54.
- Ocampo, A. (2006). Modelo cinético del secado de la pulpa de mango. *Revista Escuela de Ingeniería de Antioquia EIA*, 5, 193-28.
- Ocon, J. y Tojo, G. (1970). Problemas de Ingeniería Química. Operaciones básicas. Tomo II. Aguilar, España. Odhiambo, J., Dossaji, S., Lukhoba, C., and Yenesew, A. (2014).

- Phytochemical screening of *Dieramacupuliflorum* Klatt. (Iridaceae). *Journal of Pharmacy Research* 8, 589-592.
- Önen, üseyin; Altuntaş, Ebubekir; ÖzGöz, Engin; Bayram, Mustafa and Selçuk, Özcan. 2014. Moisture effect on physical properties of knotweed (*Polygonum cognatum* Meissn.) seeds. *Gaziosmanpaşa Üniversitesi Ziraat Fakültesi Dergisi. Journal of Agricultural Faculty of Gaziosmanpasa University*, 31 (2), 15-24.
- Pagano, A., M, Mascheroni, R. H. (2011). Modeling simultaneous heat and mass transfer in an amaranth grain during drying: a finite element approach. *Mecánica Computacional*, XXX, 1645-1668.
- Pakowski, Z., Bartczak, Z., Strumillo, C., Stenstrom, S. (1991). Evaluation of equations approximating thermodynamic and transport properties of water, steam and air for use in cad of drying processes. *Drying Technology*, 9, 753-773.
- Paladino, S. (2008). Actividad antioxidante de los compuestos fenólicos contenidos en las semillas de la vid (*Vitisvinifera* L.) (Tesis de grado). Universidad nacional del altiplano, Facultad de ciencias agrarias. Disponible en: http://bdigital.uncu.edu.ar/objetos_digitales/2627/tesispaladino.pdf. Consultado en Diciembre 2021.
- Pantoja, D. C., Osorio, O., Mejía, D. F., Vaquiro, H. A. (2016). Procesamiento de arvejas (*Pisumsativum* L.). Parte 1: Modelado de la Cinética de Secado por Capa Delgada de Arveja, Variedades Obonuco Andina y Sureña. *Información tecnológica*, 27 (1), 69-80.
- Paquita Ninarahui, R. (2015). Efecto del escaldado y temperatura en la cinético de secado de las hojas de quinua (*Chenopodium quinoa* Willd), variedad Salcedo Ini (Tesis de grado para optar el título de Ingeniero Industrial). Universidad Nacional del Altiplano, Facultad de Ciencias Agrarias.
- Parti, M. and Dugmanics, I. (1990). Diffusion Coefficient for Corn Drying. *Transaction of ASAE*, 33 (5), 1652-1656.
- Paško, P., Bartoń, H., Zagrodzki, P., Gorinstein, S., Folta, M. and Zachwieja, Z. (2009). Anthocyanins, total polyphenols and antioxidant activity in amaranth and quinoa seeds and sprouts during their growth. *Food Chemistry*, 115 (3), 994-998.
- Pauro Qulli, T. E. (2017). Evaluación del comportamiento de almidones y harinas de dos variedades de cañihua (*Chenopodium pallidicaule* Aellen) procesada para la preparación de harinas precocidas (Tesis de grado). Universidad Nacional del Altiplano, Facultad de Ciencias Agrarias.
- Pellegrini, M., Lucas-Gonzalez, R., Ricci, A., Fontecha, F.J., Fernández-López, J., Pérez-Álvarez, J. A., Viuda-Martos, M. (2018). Chemical, fatty acid, polyphenolic profile, techno-functional

- and antioxidant properties of flours obtained from quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd) seeds. *Industrial Crops and Products*, 111, 38-46.
- Pérez Jiménez, J., Díaz-Rubio, M. E., and Saura-Calixto, F. (2013). Non-extractable polyphenols, a major dietary antioxidant: occurrence, metabolic fate and health effects. *Nutrition Research Reviews*, 26(2), 118–129.
- Perry, R. H., Green, D. W., Maloney, J. O. (1992). Perry. Manual del Ingeniero Químico. Naucalpan de Juárez, México: Sexta Edición, McGraw Hill.
- Portillo, S. (2020). Optimización de las condiciones de pretratamiento, desaponificación y secado de las semillas de quinua (*Chenopodium quinoa* Willd) para su utilización en alimentación humana (Tesis de maestría). Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional Rosario.
- Portillo, S. B., Ciappini, M. C., Lucero, H. y Luisetti, J. Eliminación de saponinas de los granos enteros de quinua (*Chenopodium quinoa* Willd) por método húmedo para el consumo humano. Presentación de resumen y trabajo completo en V Congreso Argentino de Ingeniería – CADI/CLAEDI – Universidad Nacional de Buenos Aires- Facultad de Ingeniería, Buenos Aires.
- Prego, I., Maldonado, S., and Otegui, M. (1998). Seed structure and localization of reserves in *Chenopodium quinoa*. *Annals of Botany (UK)*, 82, 481-488
- PROINPA. (2011). La Quinoa: Cultivo milenario para contribuir a la seguridad alimentaria mundial. En: Oficina Regional de la FAO para América Latina y el Caribe (FAO/RLC): 1-58. Disponible en: <https://www.fao.org/3/aq287s/aq287s.pdf>. Consultado en Marzo 2020.
- Pszczola, R. (2003). Getting more fruits and vegetables into foods. *Food Technology*, 57, 52–63.
- Quinterio Hilario, C. C., Esparza Torres, F., García Mateos, M. R., Ybarra Moncada, M.C., Hernandez Ramos, L. (2019). Efecto del tostado sobre el valor nutritivo y componentes antioxidantes de la semilla de capomo (*Brosimum malicastrum*: Moraceae). *Revista Chapingo Serie Horticultura*, 25 (3), 199-212.
- Quispe Colquehuanca, W. E. (2016). “Evaluación comparativa del contenido proteico, compuestos fenólicos y capacidad antioxidante de variedades de quinua (*Chenopodium quinoa* willd) orgánica y convencional” (Tesis de grado). Universidad Nacional del Altiplano, Facultad de Ciencias Agrarias.
- Ramírez Luz S. y Castaño Darwin M. (2009). “Metodologías para evaluar In vitro la actividad antibacteriana de compuestos de origen vegetal”. *Scientia et technical*, 42, 263- 268.
- Ramos Gómez J.F. y Peña Rivera, A.O. (2019). Quinoa dehydration (*Chenopodium quinoa* Willd) assisted by infrared. *Infinitum*, 9 (2), 99-105.

- Randhir, R., Kwon, Y.I., Shetty, K. (2008). Effect of thermal processing on phenolics, antioxidant activity and health-relevant functionality of select grain sprouts and seedlings. *Innovative Food Science Emerging Technology*, 9, 355–364.
- Ratti, C. (2009). *Advances in Food Dehydration*, 5. United States of America: Taylor & Francis Group.
- Razzeto, G. S., Uñates, Rojas Moreno, J. E., Lucero López R. V., Aguilar, E.G. y Escudero, N. L. (2019). Evaluation and Comparative Study of the Nutritional Profile and Antioxidant Potential of New Quinoa Varieties. (2019). *Asian Journal of Agricultural and Horticultural Research*, 3 (3), 1-11.
- Repo Carrasco, R., Pilco, J. J y Encina Zelada, C. R. (2011). Desarrollo y elaboración de un snack extruido a partir de quinua (*Chenopodium quinoa* Willd.) y maíz (*Zea mays* L.). *Ingeniería Industrial*, 29, 209-224. Disponible en: <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=337428495012>. Consultado en Mayo 2020
- Repo Carrasco, R., Hellström, J. K., Pihlava, J.-M., & Mattila, P. H. (2010). Flavonoids and other phenolic compounds in Andean indigenous grains: Quinoa (*Chenopodium quinoa*), kañiwa (*Chenopodium pallidicaule*) and kiwicha (*Amaranthus caudatus*). *Food Chemistry*, 120 (1), 128-133.
- Repo Carrasco, R. y Encina, C. (2008). Determinación de la capacidad antioxidante y compuestos fenólicos de cereales andinos: Quinoa (*Chenopodium quinoa*), kañiwa (*Chenopodium pallidicaule*) y Kiwicha (*Amaranthus caudatus*). *Revista Sociedad Química del Perú*, 74 (2), 85-99.
- Repo Carrasco, R., Espinoza, C., Jacobsen, S. (2003). Nutritional value and use of the andean crops quinoa (*Chenopodium quinoa*) and kañiwa (*Chenopodium pallidicaule*). *Food Reviews International*, 19, 179-189.
- Reyes Montaña, E. A., Ávila Torres, D. P. y Guevara Pulido, J. O. (2006). Componente nutricional de diferentes variedades de quinua de la región andina. *Avances*, 5, 86-97.
- Risi, J. (1997). La quinua: actualidad y perspectivas. In: Taller sobre desarrollo sostenible de la quinua. Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura - IICA, Camara de Exportadores. La Paz, Bolivia. 21 de noviembre de 1997.
- Rivas J.C. (2013). Avances en el Cultivo de Quínoa (*Chenopodium quinoa* Willd.) en el Surde Argentina. Ediciones INTA. Centro Regional Buenos Aires Sur. *Estación Experimental Agropecuaria Hilario Ascasubi*, 4-21.
- Roberfroid, M. B. (2000). Concepts and strategy of functional food science: the European perspective. *American Journal of Clinical Nutrition*, 71, 1660-1664.

- Rodríguez M.A., Toledo V., Guinter J. y Figueroa Tomás M. (2019). Estudio de Comercio Inteligente para las Exportaciones de Chia, Quinoa y Sesámo. Acuerdo Pro Salta y el Consejo Federal de Inversiones.
- Rojas, W., Vargas Mena, A. y Pinto Porcel, M. (2016). La diversidad genética de la quinua: potenciales usos en el mejoramiento y agroindustria. *Revista de Investigación e Innovación Agropecuaria y de Recursos Naturales*, 3 (2),114-124.
- Rojas, W., Pinto, M., Soto J. L. y Alcocer, E. (2010). Valor nutricional, agroindustrial y funcional de los granos andinos. En: Rojas, W., Pinto, M., Soto, J. L., Jagger, M. y Padulosi, S. (eds). Granos Andinos: Avances, logros y experiencias desarrolladas en quinua, cañahua y amaranto en Bolivia. Bioersity International, 151- 164.
- Romo, S., Rosero, A., Forero, C., Ceron Ramirez, E., Perez, D. A. (2007). Potencial nutricional de harinas de quinua (*Chenopodium quinoa* W) variedad piartal en los andes colombianos segunda parte. *Bioteología en sector agropecuario y agroindustrial*, 5 (2).
- Ruiz López, I.I., Córdova, A.V.,Rodriguez-Jimenes, G.C., García-Alvarado, M.A. (2004). Moisture and temperature evolution during food drying effect of variable properties. *Journal of Food Engineering*, 63, 117-124.
- Sacilik, K.,Elicin, A.K., Unal, G. (2006). Drying kinetics of Üryani plum in a convective hot-air dryer. *Journal of Food Engineering*, 76 (3), 362-368.
- Saura Calixto, F., Bravo, L. (2002). Dietary Fiber – Associated compounds: Chemistry, Analysis and Nutritional Effects of Polyphenols. *Hand Book of Fiber Dietary*, 415-430.
- Scarpati, Z. y Briceño, O. (1980). Evaluación de la composición de algunas entradas de quinua del banco de germoplasma de la Universidad Nacional Técnica del Altiplano, 69-77. En: Tercer congreso internacional de cultivos andinos, Feb. 8-12, 1982. Ministerio de Asuntos Campesinos y Agropecuarios, La Paz, Bolivia.
- Shahari, N. (2012). *Mathematical modelling of drying food products: application to tropical fruits. PhD thesis*. Nottingham: University of Nottingham.
- Sherwood, T. K. (1929). The drying of solids. *Industrial and Engineering Chemistry*, 21(1), 12 – 16.
- Shimada, K., Fujikawa, K., Yahara, K., Nakamura, T. (1992). Propiedades antioxidantes de la xantona en la auto oxidación de la soja en emulsión de ciclodextrina. *Journal of agricultural and food chemistry*, 1992, 40, 945–948.
- Sikorski, Z., Pokorny, J., Damodaran, S. (2007). Physical and chemical interactions of components in food systems. Food Chemistry. K. L. Parkin y O. Fennema. New York, CRC Press.

- Simal, A., Femenia, A., Carcel, J.A., Rossello, C. (2005). Mathematical modelling of the drying curves of kiwi fruits: Influences of ripening stage. *Journal of Science of Food and Agriculture*, 85, 425–432.
- Singh, R.P. and Heldman, D.R. (1993). Introduction to Food Engineering, second ed. San Diego, California: Academic Press.
- Singleton, V.L., Orthofer, R., Lamuela Raventos, R.M. (1999). Analysis of total phenols and other oxidation substrates and antioxidants by means of Folin-Ciocalteu reagent. *Methods Enzymol*, 299, 152-179.
- Smith, J., and Hui, Y. (2004). Food Processing: Principles and Applications. EUA: Blackell Publishing
- Srinivasan, K. (2005). Role of spices beyond food flavoring: Nutraceuticals with multiple health effects. *Food Reviews International*, 21(2), 167-188.
- Soliz Guerrero, J. B., Jasso de Rodriguez, D., Rodriguez Garcia, R., Angulo Sanchez, J. L., Mendez Padilla, G. (2002). Quinoa saponins: concentration and composition analysis. *Trends in New Crops and New Uses*, 110- 114.
- Soto Pardo, M., Allende Burga, R. y Romero Carrión, V. L. (2019). Estudio comparativo en rendimiento y calidad de 12 variedades de quinua orgánica en la comunidad campesina de San Antonio de Manallasac, Ayacucho. *Revista Campus*, 29, 57-66. Disponible en: <https://www.usmp.edu.pe/campus/pdf/revista29/articulo4.pdf>. Consultado en Junio 2021.
- Soto, J. L., Kuramoto, C., Seleme, J. P., Calderón, R., Castañares, Carmen. (2010). Normas Técnicas Andinas para quinua (*Chenopodium quinoa* Willd.) y productos procesados (hojuelas y harina). Todo sobre la quinua. <https://laquinua.blogspot.com/2010/10/normas-tecnicas-andinas-para-quinua.html>. Consultado en diciembre 2021.
- Svoboda, K., Brooker, J., and Zrustova, J. (2006). Antibacterial and antioxidant properties of essential oils. *Acta Hort ISHS*, 709, 106.
- Stikic, R., Glamoclija, D., Demin, M., Vucelic-Radovic, B., Jovanovic, Z., Milojkovic Opsenica, D., Jacobsen, S.E., Milovanovic, M. (2012). Agronomical and nutritional evaluation of quinoa seeds (*Chenopodium quinoa* Willd.) as an ingredient in bread formulations. *Journal of Cereal Science*, 55, 132-138.
- Tacora Cauna, R. L, Luna Mercado, G. I, Bravo Portocarrero, R., Mayta Hanco, J., Choque Yucra, M. y Ibañez Quispe, V. (2010). Efecto de la presión de expansión por explosión y temperatura de tostado en algunas características funcionales y fisicoquímicas de dos variedades de cañihua (*Chenopodium pallidicaule* Aellen). *CienciAgro*, (2), 188-198. Disponible en: <https://19147850-1216-4065-8b34->

fd5e3f1771f0.filesusr.com/ugd/c6a5bd_820da0408cac4d428bce298a242411fc.pdf.

Consultado en Julio 2020.

- Tang, Y. and Tsao, R. (2017). Phytochemicals in quinoa and amaranth grains and their antioxidant, anti-inflammatory and potential health beneficial effects: a review. *Molecular nutrition and food research*, 61 (7). Disponible en: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/28239982/>. Consultado en Junio 2020.
- Tang, Y., Li, X., Zhang B., Chen, P., Liu, R., Tsao, T. (2015). Characterisation of phenolics, betanins and antioxidant activities in seeds of three *Chenopodium quinoa* Willd. Genotypes. *Food Chemistry*, 166, 380–388.
- Tapia, M.(1979). Historia y distribución geográfica. In: Tapia, M., Gandarillas, H., Alandia, S., Cardozo, A., Mujica, A., Ortiz, R., Otazu, V., Rea, J., Salas B., Zanabria, E. (Eds.), *Quinoa y Kañiwa*. CIID-IICA, Bogotá, Colombia, 11-19.
- Tarighi, J., Mahmoudi, A. and Rad, M. K. (2011). Moisture dependent engineering properties of sunflower (var. Armaviriski). *Australian Journal of Agricultural Engineering*, 2(2), 40-44.
- Treutter, D. (2008). Significance of flavonoids in plant resistance and enhancement of their biosynthesis. *Plant Biology*, 7 (6), 581–591.
- Valcárcel Yamani, B., Caetano, S. (2012). Applications of Quinoa (*Chenopodium Quinoa* Willd.) and Amaranth (*Amaranthus* Spp.) and Their Influence in the Nutritional Value of Cereal Based Foods. *Food and Public Health*, 2, 265-275.
- Valencia, Z, Cámara, F, Ccapa, K, Catacora, P, Quispe, F. (2017). Compuestos bioactivos y actividad antioxidante de semillas de quinua peruana (*Chenopodium quinoa* W.). *Revista de la Sociedad Química de Perú*, 83 (1).
- Vargas de La Cruz, L. M. (2014). Caracterización proximal de la quinoa (*Chenopodium Quinoa*) variedad Salcedo Inia del Caserío Coipin del Distrito de Huamachuco en la Provincia de Sánchez Carrión (Tesis de grado para optar por el título de Ingeniero Agroindustrial). Trujillo, Perú. Disponible en: <https://dspace.unitru.edu.pe/bitstream/handle/UNITRU/7500/VARGAS%20DE%20LA%20CRUZ%2c%20Lu%c3%ads%20Milton.pdf?sequence=1&isAllowed=y>. Consultado en Mayo 2022.
- Vásquez F. (2006). Digestibilidad in vitro de proteína y compuestos bioactivos en accesiones de kiwicha (*Amaranthus caudatus* L., 1753) Tostada (Tesis de maestría). Escuela de Postgrado Especialidad de Tecnología de Alimentos. Universidad Nacional Agraria La Molina. Lima, Perú. Repositorio institucional: <https://repositorio.lamolina.edu.pe/handle/20.500.12996/4119?show=full>. Consultado en Febrero 2022.

- Vásquez, J. M., Sucoshaña y Villalva, D. J. (2016). Caracterización de la harina de quinua (*Chenopodium Quinoa* Willd.) producida en la provincia de Chimborazo, Ecuador. *Revista Científica*, 16 (2), 27-31.
- Vásquez Chávez, L., & Vizcarra-Mendoza, M. (2008). Secado por lecho fluidizado del trigo y su calidad. *Revista Mexicana de Ingeniería Química*, 131-137.
- Vega, A., Andres, A. y Fito, P. (2005). Modelado de la cinética de secado del pimiento rojo (*Capsicum annum* L. cv Lamuyo). *Información tecnológica*, 16, 3-11.
- Vega-Gálvez, A., Miranda, M., Vergara, J., Uribe, E., Puente, L., Martínez, E. A. (2010). Nutrition facts and functional potential of quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd.). An ancient Andean grain: a review. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 90, 2541-2547
- Velic, D., Planinic, M., Tomas, S., Bili, M. (2004). Influence of airflow velocity on kinetics of convection apple drying. *Journal of Food Engineering*, 64, 97-102.
- Vidarrue Ruiz, J. M., Días-Rojas, G., Mendoza-Llamo, E. y Solano-Cornejo, M. A. (2017). Variación del contenido de betalaínas, compuestos fenólicos y capacidad antioxidante durante el procesamiento de la quinua (*Chenopodium quinoa* W.). *Revista de la Sociedad Química del Perú*, 83 (3), 319-329.
- Vidueiros, S., Curit, R., Dyner, L., Binaghi, M., Peterson, G., Bertero, H. and Pallaro, A. (2015). Diversity and interrelationships in nutritional traits in cultivated quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd.) from Northwest Argentina. *Journal of Cereal Science*, 62, 87-93.
- Vilche, C., Gely, M. and Santalla, E. (2003). Physical properties of quinoa seeds. *Biosystems Engineering*, 86(1), 59-65.
- Villa Corrales, L., Flores Prieto, J., Xaman Villasenor, J., Garcia Hernandez, E. (2010). Numerical and experimental analysis of heat and moisture transfer during drying of ataufu mango. *Journal of Food Engineering*, 98, 198–206.
- Viña, S. Z. (2013). Compuestos Fenólicos. Productos Naturales Vegetales. Universidad Nacional de La Plata. Facultad de Ciencias Agrarias y Forestales, 91-150.
- Wang, N. & Brennan, J. (1995). Changes in structure, density and porosity of potato during dehydration. *Journal of Food Engineering*, 24, 61–76.
- Yu, L. (2011). Extrusion processing of protein rich food formulations. Ph. D. dissertation. Department of Food Science and Agricultural Chemistry McGill University, Montreal.
- Zogzas, N. P., Maroulis, Z. B., Marinos-Kouris, D. (1996). Moisture diffusivity data compilation in foodstuffs. *Drying Technology*, 14(10), 2225-2253.

ANEXO

Experiencias de secado

Se realizaron seis corridas de secado para cada combinación de temperatura-velocidad seleccionadas para estos ensayos. En las Tablas A1, A2 y A3, se observan los valores de humedad promedio utilizadas para validar el modelo. En las Tablas A4, A5 y A6, se observan los valores de humedad promedio utilizadas para la estimación de los parámetros A, B, C, $Deff$ y k por aplicación del modelo.

Puede observarse que las humedades finales alcanzadas (H_{Seq} en las condiciones de secado) son bajas, ya que la operación de secado se continuó hasta eliminar toda el agua libre, más allá de la humedad de conservación del grano (aproximadamente 12 g agua/100 g sólido húmedo).

Tabla A1. Valores de humedad promedio para la temperatura de secado de 80 °C y velocidades del aire ensayadas

t (min)	g agua/100 g sólido seco,		g agua/100 g sólido seco,	
	v_2	σ	v_1	σ
0	35,00	1,50	35,00	2,10
5	33,50	1,40	34,10	1,60
10	30,70	1,20	32,30	1,20
15	28,20	1,40	30,10	0,90
20	26,00	0,90	27,80	0,80
25	24,20	0,10	25,80	0,70
30	22,00	0,00	24,00	0,60
40	18,30	0,10	20,80	0,50
50	15,00	0,10	18,10	0,30
60	12,10	0,30	15,60	0,10
70	9,30	0,40	13,40	0,00
80	7,10	0,30	11,20	0,10
90	5,40	0,10	9,20	0,20
100	4,00	0,30	7,30	0,10
110	2,90	0,30	5,90	0,20
120	1,90	0,40	4,40	0,20
130	1,10	0,10	3,00	0,20
140	0,50	0,10	1,90	0,10
150	0,04	0,00	0,90	0,00
160	0,04	0,00	0,40	0,00

Tabla A2. Valores de humedad promedio (g agua/g sólido seco) para la temperatura de secado de 60 °C y velocidades del aire ensayadas

t (min)	g agua/100 g sólido seco,		g agua/100 g sólido seco,	
	v ₂	σ	v ₁	σ
0	35,30	7,90	34,9	7,70
5	33,70	7,21	35,1	7,40
10	32,40	7,00	34,5	7,10
15	30,70	6,70	33,6	6,70
20	28,40	5,92	32,6	6,40
25	27,20	5,90	31,4	6,12
30	25,70	5,70	30,3	5,60
40	22,80	5,23	28,1	4,70
50	20,40	4,80	26,0	4,00
60	18,10	4,30	23,9	3,40
70	16,10	3,90	22,1	2,81
80	14,20	3,52	20,2	2,30
90	12,50	3,20	18,6	1,90
100	11,00	3,10	16,9	1,60
110	9,70	3,10	15,1	0,00
120	8,30	2,41	13,7	1,11
130	7,20	2,20	12,4	0,30
140	6,30	2,00	10,9	0,30
150	5,50	1,90	9,7	0,00
160	4,70	1,60	8,5	0,00
170	4,00	1,30	7,3	0,00
180	3,30	1,10	6,4	0,31
190	2,80	1,00	5,4	0,40
200	2,70	1,00	4,4	0,30
210	2,20	0,92	3,9	0,40
220	1,70	0,70	3,2	0,23
230	1,60	0,70	2,8	0,40
240	1,30	0,60	2,4	0,20
250	1,10	0,50	2,0	0,33
260	0,80	0,40	1,6	0,10
270	0,20	0,30	1,3	0,10
280	0,10	0,20	1,0	0,04
290	0,10	0,10	0,8	0,10
300	0,05	0,01	0,6	0,02
310	0,05	0,02	0,5	0,00
320			0,4	0,12
330			0,3	0,10
340			0,06	0,00
			0,06	0,00

Tabla A3. Valores de humedad promedio para la temperatura de secado de 40 °C y velocidades del aire ensayadas

t (min)	g agua/100 g sólido seco,		g agua/100 g sólido seco,	
	v ₂	σ	v ₁	σ
0	35,00	3,20	35,01	2,40
5	33,80	3,11	34,62	2,30
10	32,90	3,00	33,90	2,20
15	32,50	2,82	33,20	2,00
20	31,90	2,72	32,70	1,70
25	31,20	2,60	32,30	1,60
30	30,90	2,60	31,90	1,40
40	29,20	2,41	30,80	1,20
50	27,60	2,30	29,70	0,70
60	26,10	2,21	28,60	0,30
70	24,30	2,20	27,60	0,10
80	22,50	2,31	26,70	0,00
90	21,30	2,20	25,71	0,20
100	20,00	2,01	24,70	0,30
110	19,00	1,90	24,00	0,50
120	17,60	1,73	23,10	0,60
130	16,40	1,50	22,31	0,80
140	15,00	1,10	21,70	1,10
150	13,70	0,83	21,00	1,20
160	12,70	0,01	20,20	1,30
170	11,90	0,51	19,60	1,40
180	11,30	0,50	18,50	0,00
190	10,50	0,60	18,00	0,00
200	9,60	0,30	17,40	1,30
210	8,80	0,20	16,70	1,30
220	7,90	0,00	16,10	1,70
230	7,20	0,10	15,30	1,20
240	6,40	0,30	14,60	1,20
250	5,80	0,50	14,00	1,00
260	5,40	0,50	13,60	0,90
270	4,80	0,50	12,90	0,90
280	4,40	0,40	12,20	0,90
290	4,00	0,30	11,60	0,90
300	3,70	0,20	11,20	0,50
310	3,30	0,70	10,50	0,50
320	3,00	0,80	9,90	0,50
330	2,60	0,90	9,10	0,50
340	2,40	0,80	8,50	0,50
350	2,10	0,90	7,80	0,70

360	1,90	0,80	7,20	0,70
370	1,80	0,60	6,70	0,80
380	1,60	0,80	6,20	1,00
390	1,20	0,80	5,70	1,00
400	1,10	0,70	5,20	1,00
410	1,00	0,60	4,70	1,00
420	0,90	0,50	4,20	0,90
430	1,00	0,30	3,80	0,80
440	0,90	0,30	3,30	0,60
450	0,90	0,20	2,80	0,50
460	0,50	0,40	2,40	0,30
470	0,50	0,30	2,10	0,20
480	0,50	0,30	1,80	0,30
490	0,30	0,20	1,40	0,00
500	0,20	0,20	1,10	0,20
510	0,20	0,10	0,80	0,20
520	0,03	0,10	0,80	0,30
530	0,03	0,00	0,70	0,20
540			0,40	0,20
550			0,20	0,20
560			0,00	0,04

Tabla A4. Valores de humedad promedio para la temperatura de secado de 80 °C y velocidades del aire ensayadas para la estimación de los parámetros del modelo

t (min)	g agua/100 g sólido seco,		g agua/100 g sólido seco,	
	v_2	σ	v_1	σ
0	35,20	1,50	35,20	2,00
5	33,30	1,30	34,21	1,81
10	30,90	1,50	32,60	1,31
15	28,00	1,42	30,00	0,90
20	26,40	1,10	27,62	0,80
25	24,30	0,50	25,80	0,70
30	22,20	0,21	24,00	0,60
40	18,60	0,20	20,70	0,40
50	15,20	0,30	18,30	0,30
60	11,80	0,31	15,41	0,10
70	9,60	0,40	13,30	0,20
80	7,30	0,30	11,10	0,10
90	5,20	0,13	9,20	0,20
100	3,80	0,30	6,82	0,32
110	2,90	0,40	6,00	0,20

120	1,70	0,41	4,32	0,30
130	1,20	0,20	3,00	0,20
140	0,60	0,12	1,82	0,10
150	0,04	0,00	0,90	0,00
160	0,04	0,00	0,36	0,00

Tabla A5. Valores de humedad promedio (g agua/g sólido seco) para la temperatura de secado de 60 °C y velocidades del aire ensayadas para la estimación de los parámetros del modelo

t (min)	g agua/100 g sólido seco,		g agua/100 g sólido seco,	
	v ₂	σ	v ₁	σ
0	35,30	5,30	35,20	6,10
5	34,00	6,21	35,00	6,40
10	32,32	6,00	34,30	6,10
15	30,40	6,70	33,41	6,70
20	28,30	6,00	32,51	6,10
25	27,10	6,10	31,30	6,10
30	26,01	5,41	30,41	5,60
40	22,60	5,20	28,10	4,70
50	20,30	4,81	26,22	4,00
60	18,21	4,30	24,00	3,40
70	16,10	4,12	22,13	3,80
80	14,10	3,50	20,20	2,30
90	12,60	3,22	18,72	1,91
100	11,12	3,10	16,90	1,60
110	9,60	3,10	14,93	1,31
120	8,20	2,50	13,70	1,10
130	7,21	2,21	12,41	0,31
140	6,30	2,00	10,90	0,30
150	5,70	1,91	9,71	0,01
160	4,70	1,60	8,32	0,00
170	3,80	1,31	7,30	0,01
180	3,30	1,10	6,51	0,31
190	2,80	1,03	5,41	0,41
200	2,70	1,00	4,42	0,31
210	2,40	0,92	3,90	0,41
220	1,70	0,70	3,20	0,20
230	1,60	0,72	2,80	0,41
240	1,30	0,60	2,60	0,20
250	1,00	0,51	1,90	0,31
260	0,80	0,40	1,41	0,10
270	0,20	0,31	1,20	0,11
280	0,10	0,20	1,01	0,00

290	0,90	0,15	0,80	0,11
300	0,071	0,00	0,60	0,00
310	0,070	0,01	0,50	0,01
320	0,06	0,00	0,51	0,10
330	0,05	0,00	0,30	0,11
340	0,05	0,01	0,05	0,00
			0,05	0,00

Tabla A6. Valores de humedad promedio para la temperatura de secado de 40 °C y velocidades del aire ensayadas para la estimación de los parámetros del modelo

t (min)	g agua/100 g sólido seco,		g agua/100 g sólido seco,	
	v ₂	σ	v ₁	σ
0	35,00	4,50	34,93	4,40
5	34,10	3,10	34,61	2,30
10	32,90	2,80	33,90	2,60
15	32,51	2,80	33,21	2,00
20	31,90	1,70	32,70	1,90
25	31,23	2,60	32,31	1,60
30	31,00	3,60	31,90	2,40
40	29,20	2,40	30,81	1,20
50	27,60	2,30	29,70	0,70
60	26,11	2,21	28,61	0,30
70	24,32	2,20	27,60	0,10
80	22,50	2,30	26,70	0,00
90	21,30	2,20	25,70	0,20
100	20,00	2,02	24,70	0,30
110	19,00	1,90	24,00	0,50
120	17,60	1,72	23,11	0,60
130	16,40	1,50	22,30	0,80
140	15,00	1,12	21,71	1,10
150	13,55	0,80	20,90	1,20
160	12,70	0,01	20,10	1,30
170	12,00	0,50	19,70	1,40
180	11,31	0,50	18,50	0,00
190	10,50	0,60	17,92	0,00
200	9,55	0,30	17,30	1,30
210	8,82	0,20	16,70	1,30
220	7,90	0,00	16,10	1,70
230	7,20	0,10	15,30	1,20
240	6,44	0,30	14,60	1,20
250	5,80	0,50	14,00	1,00
260	5,40	0,50	13,60	0,90

270	4,80	0,50	12,90	0,90
280	4,40	0,40	12,20	0,90
290	4,00	0,30	11,60	0,90
300	3,60	0,20	11,20	0,50
310	3,15	0,70	10,54	0,50
320	2,95	0,80	9,90	0,50
330	2,63	0,90	9,10	0,50
340	2,40	0,80	8,50	0,50
350	2,10	0,90	7,80	0,70
360	1,90	0,80	7,22	0,70
370	1,80	0,60	6,70	0,80
380	1,60	0,80	6,24	1,00
390	1,20	0,80	5,70	1,00
400	1,10	0,70	5,20	1,00
410	1,00	0,60	4,75	1,00
420	0,90	0,50	4,20	0,90
430	1,00	0,30	3,80	0,80
440	0,90	0,30	3,30	0,60
450	0,90	0,20	2,80	0,50
460	0,50	0,40	2,40	0,30
470	0,50	0,30	2,10	0,20
480	0,50	0,30	1,75	0,30
490	0,30	0,20	1,40	0,00
500	0,20	0,20	1,10	0,20
510	0,20	0,10	0,80	0,20
520	0,18	0,10	0,80	0,30
530	0,04	0,00	0,52	0,20
540	0,04	0,01	0,31	0,20
550	0,03	0,01	0,20	0,20
560	0,03	0,00	0,00	0,04

Para cada temperatura del aire de secado, se obtuvieron las humedades relativas del aire de secado (Tabla A7).

Tabla A7. Humedades relativas del aire secado para cada temperatura del aire de secado

Temperatura del aire de secado (°C)	Humedad relativa del aire de secado (%)
40	18,00 ± 0,15
60	6,00 ± 0,20
80	2,70 ± 0,06