

UNIVERSIDAD PRIVADA ANTENOR ORREGO
FACULTAD DE CIENCIAS AGRARIAS
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA EN INDUSTRIAS
ALIMENTARIAS



**EFFECTO DE LA PROPORCIÓN DE QUINUA: KIWICHA: ARRACACHA EN
LA ACEPTABILIDAD GENERAL, CARGA COMPRESIVA Y VIDA ÚTIL DE
HOJUELAS**

TESIS para optar el título de:

INGENIERA EN INDUSTRIAS ALIMENTARIAS

LIANA LIZETH VALLEJOS BARRENO

TRUJILLO, PERÚ

2016

La presente tesis ha sido revisada y aprobada por el siguiente Jurado:

Ing. Dr. Fernando Rodríguez Avalos

PRESIDENTE

Ing. Dr. José Soriano Colchado
SECRETARIO

Ing. Ms. Carla Pretell Vásquez

VOCAL

Ing. Dr. Víctor Vásquez Villalobos

ASESOR

DEDICATORIA

Esta investigación se la dedico a mis padres, Genaro Vallejos Namó y Elena Barreno Cárdenas, por ser el ejemplo de superación, amor y esfuerzo que me sirvió para seguir adelante.

A mi hermano Nikolai Vallejos Barreno por su orientación en el transcurso de mi desarrollo profesional.

A mis mejores amigas Tatiana Nakahata, Julissa Armas y Melissa Paredes, por su amor amical, sus frases de aliento:.... sigue adelante manita, tú puedes, eres mi orgullo....., y apoyo incondicional.

Amiga Anagrace, nunca olvidaré el detalle de las traspasadas por estudiar juntas...gracias amiga querida!.

AGRADECIMIENTO

Con todo mi amor y devoción agradezco a Dios y a mis padres por su esfuerzo, quienes me supieron aconsejar hacia un camino de éxito, y a todos los que me apoyaron porque logré mi meta trazada para realizarme como una excelente profesional.

Agradezco de una manera especial a todas mis amistades que estuvieron apoyándome incondicionalmente durante la realización de mi proyecto, como también mi agradecimiento y admiración a mi asesor, el Ing. Dr. Víctor Vásquez, por brindarme su confianza, experiencia y enseñanza para realizar esta investigación.

A mis jurados el Ing. Dr. Fernando Rodríguez A., Ing. Ms. Carla Pretell V., Ing. Dr. José Soriano y a los excelentes docentes, reciban mi más sincero agradecimiento y que Dios los bendiga siempre.

ÍNDICE GENERAL

	<u>Pág.</u>
Caratula.....	i
Aprobación por parte del Jurado.....	ii
Dedicatoria.....	iii
Agradecimiento.....	iv
Índice General.....	v
Índice de Cuadros.....	ix
Índice de Figuras.....	xi
Índice de Anexos.....	xii
Resumen.....	xiv
Abstract.....	xv
I. INTRODUCCIÓN.....	1
II. REVISIÓN DE BIBLIOGRAFÍA.....	5
2.1. Quinoa.....	5
2.1.1. Reseña histórica.....	5
2.1.2. Taxonomía.....	5
2.1.3. Composición nutricional.....	6
2.1.4. Propiedades funcionales de la quinua.....	9

2.2.	Kiwicha.....	10
2.2.1.	Generalidades.....	10
2.2.2.	Taxonomía.....	10
2.2.3.	Composición nutricional.....	11
2.2.4.	Propiedades funcionales.....	13
2.3.	Arracacha.....	14
2.3.1.	Generalidades.....	14
2.3.2.	Taxonomía.....	14
2.3.3.	Composición nutricional.....	15
2.3.4.	Propiedades funcionales.....	16
2.4.	Hojuelas.....	16
2.4.1.	Definición.....	16
2.4.2.	Clasificación de hojuelas de cereales para desayuno.....	17
2.5.	Requisitos normativos para la comercialización de hojuelas.....	18
2.6.	Carga compresiva.....	19
2.7.	Diseño de mezclas.....	20
2.8.	Tiempo de vida útil.....	23
2.8.1.	Diseño de ensayos de vida útil en alimentos.....	24
2.8.2.	Determinación de vida útil con isotermas de adsorción mediante el modelo de Heiss y Eichner	24
2.8.3.	Propiedades termodinámicas.....	25

III. MATERIALES Y MÉTODOS.....	27
3.1. Lugar de ejecución.....	27
3.2. Materiales y equipos.....	27
3.2.1. Materia prima.....	27
3.2.2. Insumos.....	27
3.2.3. Equipos e instrumentos.....	28
3.3. Diseño experimental.....	28
3.4. Esquema experimental.....	29
3.5. Secuencia del proceso.....	31
3.6. Método de análisis.....	33
3.6.1. Carga compresiva.....	33
3.6.2. Aceptabilidad general.....	34
3.6.3. Pruebas aceleradas.....	35
3.6.4. Determinación de la humedad de equilibrio.....	35
3.6.5. Modelado de las isotermas de adsorción.....	36
3.6.6. Determinación de la vida útil.....	37
3.6.7. Determinación de las propiedades termodinámicas.....	39
3.7. Análisis estadístico.....	41
IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	43
4.1. Carga compresiva en hojuelas con las proporciones de quinua: kiwicha: arracacha.....	43
4.2. Aceptabilidad general en hojuelas con las proporciones de quinua: kiwicha: arracacha.....	47

4.3.	Optimización en hojuelas con las proporciones de quinua: kiwicha: arracacha.....	52
4.4.	Vida útil en hojuelas con las proporciones de quinua: kiwicha: arracacha.....	54
4.4.1.	Isotermas de adsorción en hojuelas con las proporciones de quinua: kiwicha: arracacha.....	54
4.4.2.	Ajuste de modelos para las isotermas de adsorción.....	56
4.4.3.	Determinación de la vida útil de hojuelas con las proporciones de quinua: kiwicha: arracacha.....	62
4.5.	Propiedades termodinámicas en hojuelas con las proporciones de quinua: kiwicha: arracacha.....	65
V.	CONCLUSIONES.....	73
VI.	RECOMENDACIONES.....	74
VII.	BIBLIOGRAFIA.....	75
VIII.	ANEXOS.....	83

ÍNDICE DE CUADDROS

	<u>Pág.</u>
Cuadro 1. Composición nutricional de la quinua.....	7
Cuadro 2. Contenido de aminoácidos en la proteína de quinua.....	8
Cuadro 3. Composición nutricional de la kiwicha.....	12
Cuadro 4. Contenido de aminoácidos en la proteína de kiwicha.....	13
Cuadro 5. Composición nutricional de la arracacha variedad amarilla.....	15
Cuadro 6. Requisitos nutricionales para comercializar hojuelas en general.....	19
Cuadro 7. Combinaciones porcentuales del diseño de mezclas simplex centroide ampliado.....	29
Cuadro 8. Formulación para la obtención de hojuelas con las proporciones de quinua: kiwicha: arracacha.....	36
Cuadro 9. Actividad de agua con diferentes soluciones salinas.....	37
Cuadro 10. Carga compresiva en hojuelas con las proporciones de quinua: kiwicha: arracacha.....	43
Cuadro 11. Análisis de varianza de modelos para carga compresiva en hojuelas con las proporciones de quinua: kiwicha: arracacha.....	44

Cuadro 12. Coeficientes de la regresión del modelo cuadrático aplicado a la carga compresiva en hojuelas con las proporciones de quinua: kiwicha: arracacha.....	44
Cuadro 13. Aceptabilidad general en hojuelas con las proporciones de quinua: kiwicha: arracacha	48
Cuadro 14. Análisis de varianza de modelos para aceptabilidad general en hojuelas con las proporciones quinua: kiwicha: arracacha	49
Cuadro 15. Coeficientes de la regresión del modelo cuadrático aplicado a la aceptabilidad general en hojuelas con las proporciones de quinua: kiwicha: arracacha.....	49
Cuadro 16. Humedad en equilibrio para cada actividad de agua a 25, 35 y 45 °C en hojuelas con las proporciones de quinua: kiwicha: arracacha.....	55
Cuadro 17. Parámetros estimados de los modelos GAB y BET a 25, 35 y 45 °C en hojuelas con las proporciones de quinua: kiwicha: arracacha.....	57
Cuadro 18. Parámetros para la determinación de vida útil en hojuelas con las proporciones de quinua: kiwicha: arracacha a 25, 35 y 45 °C.....	63

ÍNDICE DE FIGURAS

	<u>Pág.</u>
Figura 1. Espacio de los factores restringidos para mezclas con p=2 componentes y p=3 componentes.....	21
Figura 2. Sistema coordinado trilineal.....	22
Figura 3. Algunos diseños símplex reticulares para p=3 y p=4 componentes.....	23
Figura 4. Esquema experimental para la evaluación de la proporción de quinua, kiwicha y arracacha en la aceptabilidad general, carga compresiva y vida útil de hojuelas.....	30
Figura 5. Diagrama de flujo para la obtención de hojuelas.....	32
Figura 6. Tarjeta de evaluación para la prueba de aceptabilidad general de hojuelas de quinua: kiwicha: arracacha.....	34
Figura 7. Superficie de respuesta (a) y de contornos (b) en la carga compresiva en hojuelas con las proporciones de quinua: kiwicha: arracacha	46
Figura 8. Superficie de respuesta (a) y de contornos (b) en la aceptabilidad en hojuelas con las proporciones de quinua: kiwicha: arracacha	51
Figura 9. Superposición de superficies de contornos para la optimización de la carga compresiva y la aceptabilidad en hojuelas con las proporciones de quinua: kiwicha: arracacha.....	53
Figura 10. Isotermas de adsorción con GAB y BET en hojuelas con las proporciones de quinua: kiwicha: arracacha a 25 °C.....	58

Figura 11. Isotermas de adsorción con GAB y BET en hojuelas con las proporciones de quinua: kiwicha: arracacha a 35 °C.....	58
Figura 12. Isotermas de adsorción con GAB y BET en hojuelas con las proporciones de quinua: kiwicha: arracacha a 45 °C.....	59
Figura 13. Modelamiento de isotermas de adsorción con ecuación de GAB en hojuelas con las proporciones de quinua: kiwicha: arracacha a 25, 35 y 45 °C.....	60
Figura 14. Determinación de vida útil en hojuelas con las proporciones de quinua: kiwicha: arracacha a 20 °C.....	64
Figura 15. Ln (aw) frente 1/T para el cálculo del calor isostérico total de sorción en hojuelas con las proporciones de quinua: kiwicha: arracacha	66
Figura 16. Calor isostérico total de sorción frente al contenido de humedad en equilibrio en hojuelas con las proporciones de quinua: kiwicha: arracacha	67
Figura 17. Calor isostérico neto de sorción frente al contenido de humedad en equilibrio en hojuelas con las proporciones de quinua: kiwicha: arracacha	69
Figura 18. Entalpía, energía libre de Gibbs y entropía de sorción frente al contenido de humedad en equilibrio en hojuelas con las proporciones de quinua: kiwicha: arracacha.....	70
Figura 19. Entalpía frente a entropía en hojuelas con las proporciones de quinua: kiwicha: arracacha.....	72

ÍNDICE DE ANEXOS

	<u>Pág.</u>
Anexo 1. Puntuaciones de la prueba de aceptabilidad general el hojuelas de quinua: kiwicha: arracacha.....	83
Anexo 2. Ajuste de modelos para las isotermas de adsorción en hojuelas con las proporciones de quinua: kiwicha: arracacha.....	84
Anexo 3. Valores predichos del modelamiento GAB de las isotermas de adsorción en hojuelas con las proporciones de quinua: kiwicha: arracacha.....	87
Anexo 4. Determinación de materia seca.....	89
Anexo 5. Determinación de calor isostérico en hojuelas con las proporciones de quinua: kiwicha : arracacha.....	89
Anexo 6. Determinación de calor isostérico neto en hojuelas con las proporciones de quinua: kiwicha: arracacha.....	91
Anexo 7. Determinación de propiedades termodinámicas en hojuelas con las proporciones de quinua: kiwicha: arracacha.....	92
Anexo 8. Determinación de la temperatura media armónica (T_{hm}) en hojuelas con las proporciones de quinua: kiwicha : arracacha.....	92
Anexo 9. Ficha técnica del envase trilaminado.....	93
Anexo 10. Permeabilidad del polietileno de baja densidad.....	95
Anexo 11. Determinación de humedad por el método gravimétrico indirecto por desecación de la A.O.A.C. 2000.....	95

RESUMEN

Se evaluó el efecto de diez proporciones de quinua: kiwicha: arracacha (10 – 40: 10 – 40: 50 – 80%) en la aceptabilidad general, carga compresiva y vida útil de hojuelas. Se aplicó un diseño de mezclas simplex centroide ampliado, con la finalidad de obtener el modelo matemático adecuado para representar el comportamiento de las variables en estudio y establecer la combinación óptima predicha de los factores que permita optimizar la carga compresiva y la aceptabilidad general; se determinó el tiempo de vida útil a las hojuelas que presentaron mayor aceptabilidad general mediante el modelo de Heiss y Eichner a partir de las isotermas de sorción obtenidas con las ecuaciones de Brunauer, Emmett y Teller y Guggenheim, Andersen de Boer. Existió efecto significativo ($p < 0.05$) de las proporciones de arracacha, quinua y kiwicha sobre la carga compresiva y la aceptabilidad general. El modelo cuadrático describió el comportamiento de las variables en estudio, con valores de coeficientes de determinación R^2 de 0.892 y 0.978, respectivamente. La combinación óptima predicha de harina de arracacha al 51.09, harina de quinua al 37.96 y harina de kiwicha al 10.95 permitió optimizar la aceptabilidad general con mayor calificación de 6.03 (valor aproximado a 6 = calificación de “Me agrada poco”) y adecuada carga compresiva de 10.88 N. El tiempo de vida útil estimado a 20 °C fue de 592 días.

ABSTRACT

The effect of ten proportions of quinoa: kiwicha: arracacha (10 - 40: 10 - 40: 50 - 80%) on the general acceptability, compressive load and shelf life was evaluated. Design extended simplex mixtures centroid was applied, in order to obtain the appropriate mathematical model to represent the behavior of the variables under study and establish the optimal combination predicted factors to optimize the compressive load and overall acceptability; the shelf life was determined for the flakes that showed the highest overall acceptability using the Heiss and Eichner models from the sorption isotherms obtained with the Brunauer, Emmett and; Teller and Guggenheim, Andersen de Boer equations. There was significant ($p < 0.05$) ratios arracacha, quinoa and amaranth on the compressive load and overall acceptability, being the quadratic model which described the behavior of the variables studied, with values of coefficients of determination R^2 of 0.892 and 0.978, respectively. The optimal combination predicted flour arracacha to 51.09, quinoa flour to 37.96 and flour kiwicha to 10.95 allowed higher overall acceptability score greater than 6.03 (approximate value 6 = grade of "I like little") and suitable compressive load of 10.88 N. The estimated shelf life at 20 °C was 592 days.

I. INTRODUCCIÓN

En el Perú, la quinua representa el 86% de la producción de los granos andinos en relación a otras variedades como la kiwicha, tarwi y cañihua, debido al boom gastronómico de los cereales andinos que están presentes en las principales comidas, esto debido al contenido proteico y vitamínico, que contribuyen a elevar la calidad de la alimentación de los consumidores. Las exportaciones de quinua registraron en el 2014 ventas por US\$ 200 millones, siendo los principales mercados Estados Unidos de Norteamérica, Europa y los países del sudeste asiático. El Perú es el principal productor y exportador de quinua en el mundo y supera a Bolivia. Actualmente, la acogida de la quinua en el mercado exterior obedece a una mayor demanda de los consumidores por los productos saludables, especialmente del sector económico medio-alto. El Ministerio de Agricultura (MINAGRI) tiene interés en que la población incremente el consumo per cápita de granos andinos en el Perú, que apenas llega a los 3.16 kg, y que necesita duplicar el consumo de estos productos para mejorar la alimentación de la población (Diario Gestión, 2015).

El cultivo de la kiwicha, hasta la última década (2010), se realizaba mayormente en áreas muy pequeñas en asociación con el maíz. La revalorización del cultivo se puede apreciar en el incremento del área cultivada; en el año 2000 se reportó un área de 495 ha con una producción de 671 kg/ha. Para el 2008 se observó un incremento a 1696 ha con una producción de 1180 kg/ha. Las zonas productoras están localizadas en los departamentos de Arequipa, Ancash, Huancavelica, Ayacucho y Apurímac. El Perú es el principal exportador de kiwicha, le sigue Bolivia y Ecuador. En otros países, como Estados Unidos, las pequeñas cosechas se canalizan a los mercados de productos naturistas y a panaderías (Sierra Exportadora, 2014).

Las raíces de la arracacha constituyen uno de los alimentos nativos más agradables y alimenticios, destacando su contenido de almidón, el cual, se caracteriza por tener diminutos gránulos, empleados generalmente como un alimento altamente digerible de niños y ancianos. En el Perú se consume fresca o mediante algún tipo de procesamiento artesanal. Es de suma importancia las investigaciones futuras que posibiliten su desarrollo como un alimento alternativo con amplias y prometedoras perspectivas. En nuestro país su cultivo está distribuido en los departamentos de Amazonas, Cajamarca, La Libertad, Ancash, Huánuco, Cerro de Pasco, Huancavelica, Ayacucho, Apurímac, Arequipa, Moquegua, Tacna, Cuzco y Puno (Jiménez, 2005).

Tradicionalmente, el mercado de hojuelas de cereales en nuestro país se encontraba en dominio de dos marcas extranjeras (Kellog's y Nestlé) y era casi el privilegio de los sectores altos de la población. Los Corn Flakes constituían el desayuno diario de un reducido grupo de hogares que se mantenía alrededor del 27% del total. A mediados del 2004, Nestlé dominaba el mercado de los cereales con 28.5% de participación de mercado, le seguían Kellog's y Angel con 20.9%, estos tenían que repartirse el mercado pues sólo un 26.3% de los hogares consumía este tipo de productos. Sin embargo, en julio de 2005, se inicia el auge de Angel y la caída de las marcas transnacionales. Angel pasó a liderar el mercado con 32.4% de participación de mercado, en tanto que Nestlé y Kellog's redujeron su participación a 22.5% y 13.4%, respectivamente (Chávez, 2008).

La promoción de las hojuelas se dirige tanto a un público infantil como uno adulto. En el caso de los primeros, los cereales son azucarados o saborizados con miel, chocolate o frutas, enriquecidos con distintas vitaminas y minerales. Para los adultos, se promueve los beneficios de una dieta baja en grasas y alta en fibras. Entre los mayores productores de

hojuelas de cereales para el desayuno se encuentran Kellogg's, Quaker Oats y Nestlé. La industria de las hojuelas de cereales tiene unos márgenes de beneficios brutos del 40 - 45%, 90% de penetración en algunos mercados, y un crecimiento continuado a lo largo de su historia. (Bermeo, 2013).

Actualmente, el consumo de cereales laminados para desayunos, se ha masificado, presentado mayor volumen de ventas en el mundo, los cereales son producidos por dos procesos: tradicional y extrusión termoplástica (Serna, 2011).

En el mercado nacional existen hojuelas de maca y quinua, ambos como complemento alimenticio al maíz que es usado como insumo principal en la elaboración de dicho producto. Esta hojuela adquiere sus características esenciales durante el proceso de extrusión; obtiene la forma, color, olor, textura; sin embargo, la característica más importante es que debe estar crocante como sinónimo de frescura del producto (Chávez, 2008).

Es por ello que el presente trabajo de investigación está basado en la elaboración de hojuelas usando la combinación de quinua, kiwicha y arracacha, aprovechando todos los beneficios nutricionales que estos poseen, brindando perspectivas para la producción de alimentos novedosos, cubriendo así, necesidades actuales de los consumidores.

Se planteó el siguiente problema de investigación:

¿Cuál será el efecto de diez proporciones de quinua: kiwicha: arracacha (10 – 40: 10 – 40: 50 – 80%) en la aceptabilidad general, carga compresiva y vida útil de hojuelas?

Los siguientes objetivos:

Evaluar el efecto de diez proporciones de quinua: kiwicha: arracacha en la aceptabilidad general y carga compresiva.

Obtener el modelo matemático adecuado para representar el comportamiento de la aceptabilidad general y carga compresiva con las proporciones de quinua: kiwicha: arracacha en hojuelas.

Determinar el valor de la proporción óptima de quinua: kiwicha: arracacha, que produzca la mayor aceptabilidad general y adecuada carga compresiva en hojuelas.

Determinar el tiempo de vida útil de hojuelas, a partir de la mejor proporción de quinua: kiwicha: arracacha.

II. REVISIÓN DE BIBLIOGRAFÍA

2.1. Quinua

2.1.1. Reseña histórica

La quinua (*Chenopodium quinoa* Willd) es una planta andina que se originó en los alrededores del lago Titicaca de Perú y Bolivia. Fue cultivada y utilizada por las civilizaciones prehispánicas y reemplazada por los cereales a la llegada de los españoles, a pesar de constituir un alimento básico de la población de ese entonces. La evidencia histórica disponible señala que su domesticación por los pueblos de América puede haber ocurrido entre los años 3000 y 5000 a.C. (Sierra Exportadora, 2015).

Durante la domesticación los pueblos andinos seleccionaron los genotipos por el tipo de uso y por la tolerancia a factores adversos tanto bióticos como abióticos, llegando a obtener las actuales plantas y ecotipos con características diferenciales, tales como las quinuas “chullpi” para sopas, las quinuas “pasankalla” para tostado, las “coytos” para harina, las “reales” para la “pissara” o graneado, la “utusaya” para resistir a la salinidad, las “witullas” y “achachinos” para resistir el frío, las “kancollas” para resistir la sequía, las “quellus” o amarillas para alto rendimiento, las “chewecas” para resistir el exceso de humedad, las “ayaras” por valor nutritivo (alto balance de aminoácidos esenciales y proteína), y las “ratuquis” por precocidad (Sierra Exportadora, 2015).

2.1.2. Taxonomía

Según Revelo (2010), la quinua (*Chenopodium quinoa* Willd) es una planta herbácea, botánicamente no pertenece al grupo de los cereales como lo son: el arroz, trigo, cebada o maíz; pero por su contenido de

almidón es considerada como un pseudocereal. La clasificación taxonómica es la siguiente:

Jerarquía	Descripción
Reino:	Vegetal
Subreino:	Cellulata
División:	Fanerogámas
Clase:	Dicotiledóneas
Subclase:	Angiospermas
Orden:	Centropermales
Familia:	<i>Chenopodiaceae</i>
Género:	<i>Chenopodium</i>
Especie:	<i>Chenopodium quinoa</i> Willdenow

La semilla constituye el fruto maduro sin el perigonio, es pequeña, aproximadamente mide 2 mm de ancho y 1 mm de espesor, está cubierta por el pericarpio (pared externa del fruto), que es donde se encuentra la saponina que confiere el sabor amargo a la quinua (Velasco, 2007; Revelo, 2010).

2.1.3. Composición nutricional

La quinua es un alimento con valor nutritivo que destaca de los demás alimentos de origen vegetal, principalmente, por su contenido de proteína (10 - 14%), casi el doble del contenido de proteína de otros cereales como el arroz y el trigo. La proteína de la quinua es rica en histidina y lisina, aminoácidos limitantes en los cereales. A las proteínas se suman el almidón, grasa, minerales y vitaminas en diferente proporción, lo que ha hecho que la quinua sea llamada por los indígenas como “grano madre”,

por ser comparable con la leche materna en cuanto a su valor nutricional (Revelo, 2010). La composición nutricional de la quinua se presenta en el Cuadro 1.

Cuadro 1. Composición nutricional de la quinua

Componente	Cantidad (g/100 g comestible)
Agua	10.80
Proteína	12.20
Lípidos	6.10
Carbohidratos	64.20
Fibra	4.10
Ceniza	2.60

Componente	Cantidad (mg/100 g comestible)
Fósforo	155.00
Calcio	85.00
Hierro	4.20
Vitamina B ₁	0.15
Vitamina B ₂	0.95
Vitamina B ₃	0.20

Fuente: Collazos y otros (1996)

Desde el punto de vista nutricional y alimentario, la quinua es la fuente natural de proteína vegetal económica y de alto valor nutritivo, por la combinación de una mayor proporción de aminoácidos esenciales, entre estos cabe mencionar a la lisina, nutriente básico para el desarrollo del sistema neurológico humano (Montañez y Pérez, 2007; Sotelo, 2014). En el Cuadro 2 se presenta el contenido de aminoácidos.

La quinua contiene la provitamina A como el caroteno, Vitamina B como la riboflavina, la niacina, tiamina y la vitamina C; es rica en minerales como calcio, hierro y fósforo. Además es rica en fibra y en vitamina E, lo que favorece la salud y la belleza corporal, asimismo contiene litio que evita el estrés, la melancolía y la depresión (Castañeda, 2015).

Cuadro 2. Contenido de aminoácidos en la proteína de quinua

Componente	Cantidad (g/100 g de proteína)
Histidina*	3.20
Isoleucina*	4.40
Leucina*	6.60
Lisina*	6.10
Metionina*+cistina	4.80
Fenilalanina*+tirosina	7.30
Treonina*	3.80
Triptofano*	1.10
Valina*	4.50
Alanina	4.50
Arginina*	8.50
Acido aspártico	7.80
Acido glutámico	13.20
Glicina	6.10
Prolina	3.30
Serina	4.10

*Aminoácidos esenciales para la alimentación humana

Fuente: FAO (2013)

A pesar de los beneficios que la quinua brinda, también presenta factores antinutricionales que pueden afectar la biodisponibilidad de ciertos nutrientes esenciales, como proteínas y minerales. Estos antinutrientes son los fitatos, taninos e inhibidores de proteasa, además, la saponina produce

amargor, debido a ello, es recomendable usar variedades de quinua dulces como la Blanca de Junín, Samaja, Cheweca de Puno ya que presentan un contenido de saponina menor al 0.06% (Rodríguez, 2015).

2.1.4. Propiedades funcionales de la quinua

La quinua posee fibra dietética, la cual la convierte en un alimento ideal que actúa como un depurador del cuerpo, logrando eliminar toxinas y residuos que pueden dañar el organismo. Produce sensación de saciedad. Los cereales en general y la quinua en particular, tiene la propiedad de absorber agua y permanecer más tiempo en el estómago. La quinua es adecuada en el tratamiento del colesterol, en dietas de adelgazamiento, para la hipertensión y para prevenir enfermedades vasculares en general. Debido a su alto contenido mineral, la quinua se emplea como remedio antihemorrágico, contra la gonorrea y en la tuberculosis (Castañeda, 2015).

La quinua no tiene gluten y contiene dos fitoestrógenos: daidzeína y genisteína, que ayudan a prevenir la osteoporosis y muchas de las alteraciones orgánicas y funcionales ocasionadas por la falta de estrógenos durante la menopausia, además de favorecer la adecuada actividad metabólica del organismo y la correcta circulación de la sangre. Por lo anterior, las bondades nutricionales y terapéuticas de la quinua permiten considerarla como un alimento completo, nutritivo, saludable y muy recomendable, especialmente para niños, embarazadas, celíacos, mujeres que sufren menopausia, ancianos y personas convalecientes, pero también para deportistas, vegetarianos, diabéticos, personas muy estresadas y adultos en general (FAO, 2011).

2.2. Kiwicha

2.2.1. Generalidades

La kiwicha o amaranto (*Amaranthus caudatus*) fue una de las plantas alimenticias que consumieron los cazadores y recolectores de Norte América y los Andes antes de la domesticación de la planta en Mesoamérica. La kiwicha de las cuevas de Tehuacán en Puebla data de 4000 años a.C., en tanto que la fecha más antigua en América del Sur es de 2000 años a.C y viene de urnas funerarias de Salta (Argentina) (Higinio, 2011).

Desde la época colonial ha disminuido notablemente la superficie cultivada en Sudamérica, su cultivo se mantiene en Ecuador, Perú, Bolivia y Argentina, gracias a la persistencia de los agricultores andinos. Tradicionalmente se siembra en los valles interandinos (zona quechua), ubicada entre 2700 - 3500 m.s.n.m. (Higinio, 2011).

La kiwicha es conocida en la región andina del Perú, como kiwicha en el Cusco; achita, en Ayacucho; achis, en Áncash; coyo, en Cajamarca y qamaya, en Arequipa. En Bolivia, se le denomina coimi, en Argentina millmi; y un tipo de amaranto de color oscuro se llama sangoracha en Ecuador (Sierra Exportadora, 2014).

2.2.2. Taxonomía

Según Herrera y Montenegro (2012) la kiwicha es un género de plantas pertenecientes a la familia *Amaranthaceae*. Se trata de un género de plantas ampliamente distribuido por la mayor parte de las regiones templadas y tropicales. Varias de ellas se cultivan como verduras, granos o plantas ornamentales. La clasificación taxonómica es la siguiente:

Jerarquía	Descripción
Reino:	Vegetal
Subreino:	Tracheobionta
División:	Fanerógama
Clase:	Dicotiledóneas
Subclase:	Archyclamidae
Orden:	Centropermales
Familia:	<i>Amaranthaceae</i>
Género:	<i>Amaranthus</i>
Especie:	<i>Amaranthus Caudatus</i>

2.2.3. Composición nutricional

El valor nutritivo de la kiwicha alcanza 12 – 16% de proteína, con el aporte de lisina, aminoácido esencial para la nutrición. Presenta en mayor cuantía carbohidratos (64.50%), calcio, fósforo, hierro, y complejo de vitamina B. Su fibra (2.50%), comparada con la del trigo y otros cereales es muy fina y suave, no es necesario separarla de la harina; es más, juntas constituyen una gran fuente de energía (Sierra Exportadora, 2014). La composición nutricional de la kiwicha se presenta en el Cuadro 3.

Lo extraordinario de la proteína de la kiwicha es su riqueza en aminoácidos esenciales incluyendo la lisina y la metionina. La eficiencia proteica es comparable con la caseína. La proteína de la kiwicha contiene niveles relativamente altos de lisina (8.00%), casi el doble del trigo y tres veces más que el maíz y contenidos de aminoácidos azufrados (4.4%), en comparación a los granos más comunes (Higinio, 2011; Herrera y

Montenegro, 2012). En el Cuadro 4 se presenta el contenido de aminoácidos por cada 100 g de proteína de kiwicha.

Cuadro 3. Composición nutricional de la kiwicha

Componente	Cantidad (g/100 g comestible)
Agua	12.00
Proteína	13.50
Lípidos	7.10
Carbohidratos	62.50
Fibra	2.50
Ceniza	2.40
Componente	Cantidad (mg/100 g comestible)
Fósforo	453.00
Calcio	236.00
Hierro	4.50
Vitamina B ₁	0.30
Vitamina B ₂	0.01
Vitamina B ₃	0.40
Vitamina C	1.30

Fuente: Collazos y otros (1996).

Cuadro 4. Contenido de aminoácidos en la proteína de kiwicha

Componente	Cantidad (g/100 g de proteína)
Histidina	2.50
Isoleucina	3.70
Leucina	5.70
Lisina	8.00
Metionina	4.20
Fenilalanina	7.70
Treonina	3.60
Triptófano	1.50
Valina	4.30
Arginina	10.00

Fuente: Herrera y Montenegro (2014).

2.2.4. Propiedades funcionales

El valor nutritivo de la kiwicha contribuye en el tratamiento de anemias y desnutrición. Es un alimento rico en hierro, proteínas, vitaminas y minerales por lo que se recomienda que sea parte de la dieta para mujeres embarazadas y niños; así también en el caso osteoporosis. Los polifenoles y otros compuestos bioactivos presentes en las flores pueden ser la mejor materia prima en la elaboración de tisanas medicinales, ya que tienen propiedades antioxidantes que reduce el riesgo de contraer enfermedades cardiovasculares, incluso cáncer. Las personas que sufren de enfermedad celíaca, pueden consumir la harina de kiwicha, sin temer por su salud, ya que no posee gluten y, al contrario de lo que se puede pensar, proporciona los nutrientes necesarios en la ingesta diaria (Herrera y Montenegro, 2012).

2.3. Arracacha

2.3.1. Generalidades

La arracacha, apio criollo, racacha, virraca, zanahoria blanca o mandioquinha salsa (*Arracacia xanthorrhiza*) es una planta alimenticia, originaria de los Andes y cultivada actualmente en Colombia, Brasil, Perú, Bolivia, Venezuela y Ecuador entre los 600 y 3200 m.s.n.m. Su parte comestible es la raíz que asemeja a una zanahoria engrosada, ésta puede ser de color blanco, amarillo o morado según la variedad. Esta raíz tuberosa reservante, es apreciada no solo por su sabor, sino también por su digestibilidad ya que contiene un almidón muy fino, así como también un alto contenido de calcio y vitamina A (variedad amarilla). Existen variedades como la blanca denominada escuelenta, la amarilla denominada Xanthorrhiza y la morada que tiene alrededor de la raíz un tono violeta (Díaz, 2013).

2.3.2. Taxonomía

Según Blas (2009), el género *Arracacia* comprende treinta especies distribuidas desde México hasta Bolivia, entre 600 y 3600 m de altitud. La clasificación taxonómica es la siguiente:

Jerarquía	Descripción
Reino:	<i>Vegetal</i>
División:	<i>Magnoliophyta</i>
Clase:	<i>Magnoliopsida</i>
Orden:	<i>Apiales</i>
Familia:	<i>Apiaceae</i>
Género:	<i>Arracacia</i>
Especie:	<i>Arracacia xanthorrhiza</i>

2.3.3. Composición nutricional

En la composición nutricional de la arracacha destaca el contenido de carbohidratos (21.80%) y fibra (1.10%) (Collazos, 1996). En el Cuadro 5, se muestra la composición nutricional de arracacha variedad amarilla.

Cuadro 5. Composición nutricional de la arracacha variedad amarilla

Componente	Cantidad (g/100 g comestible)
Agua	75.10
Proteína	0.70
Lípidos	0.30
Carbohidratos	21.80
Fibra	1.10
Ceniza	1.00
Componente	Cantidad (mg/100 g comestible)
Fósforo	50.00
Calcio	27.00
Hierro	1.10
Vitamina B ₁	0.09
Vitamina B ₂	0.08
Vitamina B ₃	2.84
Vitamina C	27.10

Fuente: Collazos y otros (1996).

2.3.4. Propiedades funcionales

El uso de la arracacha es importante por los aportes de fibra dietética, almidón resistente y minerales, que la convierten en un alimento que además de ser nutritivo, promueve beneficios a la salud, ya que está asociado a la disminución del colesterol, la prevención del estreñimiento y en la reducción de la tasa de absorción de glucosa. En el caso particular de la fibra dietética de la arracacha, esta se reconoce como un agente terapéutico para los diabéticos, arterioscleróticos, personas con problemas de las coronarias y con padecimientos digestivos (García y Pacheco, 2007).

2.4. Hojuelas

2.4.1. Definición

Se conoce popularmente como hojuelas para desayuno, o simplemente cereal, a un producto alimenticio empaquetado derivado de distintos cereales como el arroz, el maíz o la avena, dando como resultado hojuelas o copos de avena, copos de maíz, copos de arroz, que se comercializan para ser consumido en el desayuno. Generalmente, se consume frío, servido con un líquido como leche o agua. Ocasionalmente también se le agregan nueces o frutas (Bermeo, 2013).

Las hojuelas son alimentos esencialmente energéticos debido a su composición de proteínas, carbohidratos y vitaminas, sobre todo para los niños y adolescentes que están en constante crecimiento y necesitan de todos los componentes nutricionales para el buen desarrollo físico como mental. Una de las comidas más importantes en el ser humano es el desayuno, por ello, se ha buscado a través de los años hacer el desayuno más sano, nutritivo, rico en proteínas, vitaminas, minerales y fibras, con precios al alcance de los usuarios y de buena calidad a fin de satisfacer la necesidad de alimentarse bien y sanamente (Chávez, 2008).

Las hojuelas son más digeribles que los granos enteros, se presentan en forma de escamas, copos, filamentos, gránulos, etc. Con frecuencia se enriquecen con diversos ingredientes alimenticios con lo que puede aumentar considerablemente su valor nutricional y su acción dietética (Serna, 2011).

2.4.2. Clasificación de hojuelas de cereales para desayuno

Según Maya y Ricaurte (2007), las hojuelas de cereales para desayuno se clasifican en:

Hojuelas

Se obtienen a partir de maíz procesado al cual muchas veces se le adiciona azúcar y malta y suelen ser fortificadas con vitaminas, minerales y calcio entre otros.

Los inflados

Se elaboran insuflando aire a presión a pequeños fragmentos de masa creados con harina refinada de diversos granos. Son más ligeros y crujientes que otros cereales pero tienen menos fibra.

Integrales y ricos en fibra

Las variedades integrales se elaboran con el grano entero del cereal. Su aporte nutritivo y de fibra es mayor que el de los cereales refinados. También son ricos en fibra los que incorporan frutos secos y frutas desecadas.

Musli

Se compone de cereales (avena, arroz inflado, trigo, maíz, etc.), frutos secos (nueces, almendras, avellanas) y frutas desecadas o deshidratadas (pasas, manzana, plátano, coco, fresas).

Cereales light

Presenta niveles de calorías más bajos que los tradicionales y pueden contribuir en una dieta previamente recomendada por un experto.

2.5. Requisitos normativos para la comercialización de hojuelas

Según Chávez (2008), el requisito primordial que se exige para su comercialización es el porcentaje de humedad al momento del envasado, el cual debe ser menor que 3.2%.

Se especifican los requisitos microbiológicos, sensoriales para la elaboración de hojuelas. Se señala también, que se debe cumplir con la Norma Técnica Peruana para envases usados en alimentos (el envase debe de estar fabricado de un material que proteja y asegura la conservación del producto en óptimas condiciones de seguridad). Además se debe contar con un registro sanitario otorgado por la dirección general de salud ambiental (DIGESA, 1998).

En el Cuadro 6 se observa los requisitos nutricionales que se deben cumplir para la comercialización de hojuelas en general.

Cuadro 6. Requisitos nutricionales para comercializar hojuelas en general

Componente	Cantidad (g/100 g comestible)
Agua	3.2
Proteína	6.5
Grasa total	0.7
Colesterol	0.0
Carbohidratos	84.3
Fibra dietética	2.3
Ceniza	3.0

Fuente: Chávez (2008).

2.6. Carga compresiva

La prueba de carga compresiva o compresión, es muy utilizada en la actualidad en el análisis de la textura de los alimentos, es el llamado análisis del perfil de textura (TPA). Desarrollado por un grupo de investigadores de la General Foods Corporation en los años 60, mediante el uso de un texturómetro para obtener varios parámetros de textura, ha demostrado la elevada correlación con la evaluación sensorial. Los parámetros del análisis del perfil de textura que pueden obtenerse son: dureza, fracturabilidad, elasticidad, cohesividad, adhesividad, gomosidad y masticabilidad (Sánchez y otros, 2014).

El texturómetro mide la resistencia del alimento a la compresión, mediante el uso de un cilindro con superficie plana de unos 25 mm de diámetro. Al igual que en la penetración, estos equipos pueden medir, tanto la fuerza necesaria para producir una deformación dada, como la deformación causada por una determinada fuerza. La compresión puede ser uniaxial,

cuando ocurre en una sola dirección y volumétrica, cuando se comprime en tres direcciones. La compresión uniaxial aplicada a un sólido, con el área de la sección transversal uniforme para deformaciones pequeñas antes de la ruptura, por lo general mide la “fuerza máxima de compresión”, como una medida de la textura o consistencia del producto, a partir de las curvas de fuerza en relación a la distancia, pudiendo calcularse otros parámetros, como módulo elástico aparente, deformabilidad, etc. (Castro y De Hombre, 2007).

La máquina Instron es uno de los instrumentos universales más usados para realizar estudios de propiedades de esfuerzo en función a la deformación de materiales. Pudiendo utilizarse para realizar pruebas convencionales de tensión, compresión, penetración, cizallamiento, extrusión o doblado; pero también puede usarse en estudios de histéresis, relajación de esfuerzos, energía de deformación y otros (Sánchez y otros, 2014).

2.7. Diseño de mezclas

Según Montgomery (2001), es un diseño experimental que se utiliza cuando los factores son los componentes o ingredientes de una mezcla, y por consiguiente, sus niveles no son independientes. Por ejemplo, si $c_1, c_2, \dots, c_p$ denota las proporciones de p componentes de una mezcla, entonces:

$$0 \leq c_i \leq 1 \quad i = 1, 2, \dots, p$$

$$c_1 + c_2 + \dots + c_p = 1 \quad (\text{es decir, } 100\%)$$

Estas restricciones se ilustran en la Figura 1 para $p=2$ y $p=3$ componentes. Para dos componentes, el espacio de los factores del diseño incluye los

valores que están sobre el segmento de la recta $C_1 + C_2 = 1$, cada componente acotado por 0 y 1. Con tres componentes, el espacio de la mezcla es un triángulo con vértices correspondientes a las formulaciones que son mezclas puras (100% de un solo componente).

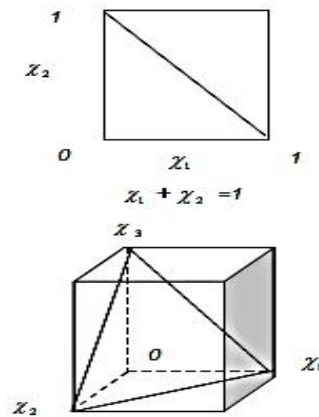


Figura 1. Espacio de los factores restringidos para mezclas con $p=2$ componentes y $p=3$ componentes
Fuente: Montgomery (2011).

Cuando hay tres componentes en la mezcla, la región experimental restringida puede representarse convenientemente en papel milimétrico lineal, como se muestra en la Figura 2. Cada uno de los tres lados de la gráfica, representa una mezcla que no contiene nada de alguno de los tres componentes (el componente indicado en el vértice opuesto). Las nueve líneas de graduación en cada dirección marcan incrementos de 100% en el componente respectivo.

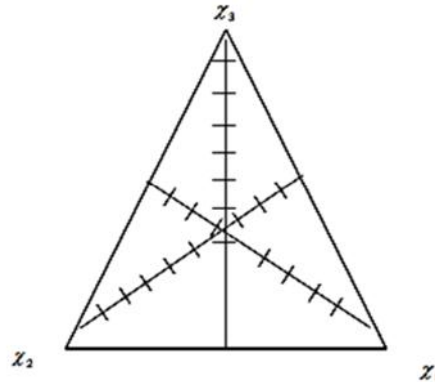


Figura 2. Sistema coordenado trilineal.
Fuente: Montgomery (2011).

2.7.1. Diseño símplex con centroide

Dentro de éstos diseños de mezclas se encuentran los diseños símplex, que se usan para estudiar los efectos de los componentes de una mezcla sobre la variable de respuesta. Un diseño símplex reticular (p, m) para p componentes, consta de los puntos definidos por los siguientes arreglos de las coordenadas: las proporciones asumidas por cada componente toman los $m + 1$ valores que están separados por una distancia igual de 0 a 1,

$$i = 1, 2, \dots, p; c_i = 0, \frac{1}{m}, \frac{2}{m}, \dots, 1$$

y se usan todas las combinaciones posibles (mezclas) de las proporciones. Así, sea $p=3$ y $m=2$; entonces:

$$i = 1, 2, 3; c_i = 0, \frac{1}{2}, 1$$

y el diseño símplex reticular consta de las seis corridas siguientes:

$(c_1, c_2, c_3) = (1, 0, 0); (0, 1, 0); (0, 0, 1); (1/2, 1/2, 0); (1/2, 0, 1/2)$ y $(0, 1/2, 1/2)$. En la Figura 3 se ilustra este diseño, entre otros.

Los tres vértices $(1, 0, 0)$, $(0, 1, 0)$ y $(0, 0, 1)$ son las mezclas puras, mientras que los puntos $(1/2, 1/2, 0)$, $(1/2, 0, 1/2)$ y $(0, 1/2, 1/2)$ son mezclas binarias o mezclas de dos componentes localizadas en los puntos medios de los tres lados del triángulo. En la Figura 3 se muestran también los diseños simplex reticulares $(3,3)$; $(4,2)$ y $(4,3)$.

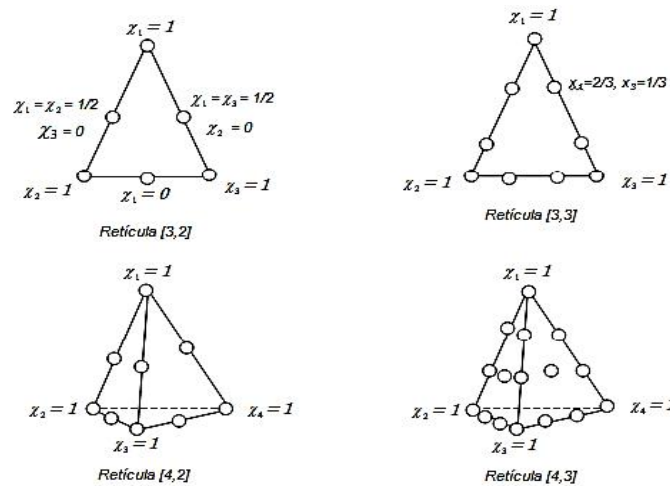


Figura 3. Algunos diseños simplex reticulares para $p=3$ y $p=4$ componentes.
Fuente: Montgomery (2011).

2.8. Tiempo de vida útil

En la industria de los alimentos se requiere conocer la vida útil de los productos para asegurar a los consumidores que el alimento mantiene todas sus características en buen estado (García y otros, 2011; Hough y Fiszman, 2005).

Casp y April (2003) indican que hay un determinado tiempo, después de haberse elaborado el producto, en el que se mantienen sus propiedades sensoriales y de seguridad, bajo determinadas condiciones de almacenamiento. El final de la vida útil de un producto se alcanza cuando ya no mantiene las cualidades requeridas para que el consumidor final lo utilice.

2.8.1. Diseño de ensayos de vida útil en alimentos

Un estudio de vida útil consiste en realizar una serie de controles preestablecidos en el tiempo, de acuerdo con una frecuencia establecida, hasta alcanzar el deterioro elegido como limitante o hasta alcanzar los límites prefijados. Los puntos clave al diseñar un ensayo de vida útil (VU) son el tiempo durante el cual se va a realizar el estudio siguiendo una determinada frecuencia de muestreo y los controles que se van a llevar a cabo sobre el producto hasta que presente un deterioro importante. Generalmente se cuenta con poca información previa, por lo que se deben programar controles simultáneos de calidad microbiológica, fisicoquímica y sensorial (Hough y Fiszman, 2005).

2.8.2. Determinación de vida útil con isotermas de adsorción mediante el modelo de Heiss y Eichner

La predicción de la vida útil de productos envasados en términos de sus condiciones de almacenamiento y calidad se vuelven importantes en la industria de alimentos, es por ello que mediante la ecuación de Heiss y Eichner se puede estimar el tiempo de almacenamiento potencial basado en el modelamiento de la actividad de agua con isotermas de adsorción para un sistema particular en condiciones de almacenamiento dadas (Dufour y otros, 2002).

En primera instancia es necesario el cálculo de las isotermas que relacionan gráficamente, a una temperatura constante, el contenido en humedad de equilibrio de un producto con la actividad termodinámica del agua del mismo (Togrul y Arslan, 2007). Las ecuaciones de BET (Brunauer, Emmett y Teller) y GAB (Guggenheim, Andersen de Boer) predicen el contenido de humedad de la monocapa y pueden ser consideradas las más útiles para determinar las condiciones óptimas de humedad (Seid y otros, 2012; Gavidia, 2015).

En segunda instancia se aplica la ecuación de Heiss y Eichner (ecuación 3) para estimar el tiempo de vida en anaquel del alimento envasado, dependiendo de factores como: la permeabilidad del empaque, el área del empaque, la materia seca del producto, la presión de vapor del agua a la temperatura de almacenamiento, la pendiente de la isoterma entre la humedad crítica y la de seguridad, la humedad inicial, la humedad de equilibrio y la humedad de seguridad (Dufour y otros, 2002).

2.8.3. Propiedades termodinámicas

El calor isostérico de adsorción es un indicador termodinámico importante en los fenómenos de adsorción y desorción, ya que es indicativo de la energía necesaria para vencer las fuerzas moleculares entre el agua y la superficie del alimento (desorción) y para que el agua se ligue a la superficie del sólido en el caso contrario (adsorción). En la práctica, el calor isostérico de adsorción es importante para el modelado de varios procesos de la industria alimenticia y el almacenamiento de alimentos. Se utiliza para estimar requerimientos de energía en la deshidratación ya que provee información importante sobre el estado del agua libre o ligada en las superficies de los componentes del alimento (Gálvez y otros, 2006; Pulla y otros, 2011; Gil y otros, 2013).

Las propiedades termodinámicas de los alimentos proporcionan una comprensión de las propiedades del agua y los requerimientos de energía asociados con el comportamiento de la sorción. El calor diferencial de sorción es a menudo referido como el calor isostérico de sorción (ΔH), es usado como un indicador del estado del agua adsorbida por las partículas sólidas y su conocimiento es importante en el diseño de equipos para procesos de deshidratación. El diferencial de entropía (ΔS) de un material es proporcional al número disponible de sitios de sorción para un nivel

específico de energía, mientras que la energía libre de Gibbs (ΔG) es indicativo de la afinidad de los adsorbentes de agua y proporciona un criterio de si la adsorción de agua ocurre como un proceso espontáneo (Goulas y otros, 2007).

III. MATERIALES Y MÉTODOS

3.1. Lugar de ejecución

La preparación de hojuelas se realizó en el laboratorio del Instituto de Desarrollo Agroindustrial de la Universidad Nacional Agraria La Molina, el análisis de carga compresiva, en el Laboratorio de Ingeniería de Operaciones Agroindustriales de la Universidad Nacional de Trujillo; las pruebas de aceptabilidad general y pruebas aceleradas para la determinación de vida útil, en el Laboratorio de Ingeniería de Ciencias de Alimentos de la Escuela de Ingeniería en Industrias Alimentarias de la Universidad Privada Antenor Orrego.

3.2. Materiales y equipos

3.2.1. Materia prima

Harina de quinua (*Chenopodium quinoa* Willd) variedad Blanca Juli, procedente del departamento de Ayacucho.

Harina de kiwicha (*Amaranthus caudatus*) variedad Oscar Blanco, procedente del departamento de Cuzco.

Harina de arracacha (*Arracacia xanthorrhiza*) variedad Amarilla, procedente de Oxapampa, departamento de Pasco.

3.2.2. Insumos

- Envases tr laminados (polipropileno biorientado + nylon + polietileno de baja densidad) 7 x 10 (COE SAC, 2015) (Anexos 9 y 10).

3.2.3. Equipos e instrumentos

- Cocina semi-industrial. Marca Surge.
- Secador de doble tambor GF DRYER-FLAKER. Marca Mathis Machine Corp. Capacidad 40 kg/h. Presión de vapor antes de la válvula de reducción de presión de 58 psi y después de la reducción de presión a 28 psi para obtener 100 °C en su superficie de secado, distancia entre rodillos 0.02 pulg.
- Molino de martillos. Marca S&S Megatek SAC.
- Texturómetro. Stable Micro Systems, TA.XTplus.
- Selladora de bolsas SH 1000. Marca Fischbein.
- Balanza analítica. Marca Mettler Toledo. Modelo AB204. Capacidad 210 g, aprox. 0.0001 g.
- Balanza electrónica. Marca Sartorius Ag Gottingen capacidad 30 kg.
- Estufa con temperaturas a 25, 35 y 45 °C (para las pruebas aceleradas). Marca Selecta.
- Frascos de vidrio con tapas metálicas con soluciones salinas saturadas de LiCl; $\text{KC}_2\text{H}_3\text{O}_2$; MgCl_2 ; $\text{K}_2\text{CO}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$; $\text{NaCr}_2\text{O}_7 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$; KI; NaCl; KCl; NaNO_3 .
- Laptop HP core i5, Intel®, con los programas: Statistica 12 (www.statsoft/support/free-statistica-9-trial/) y Minitab 17.1 (<https://www.minitab.com/es-mx/products/minitab/free-trial/>).

3.3. Diseño experimental

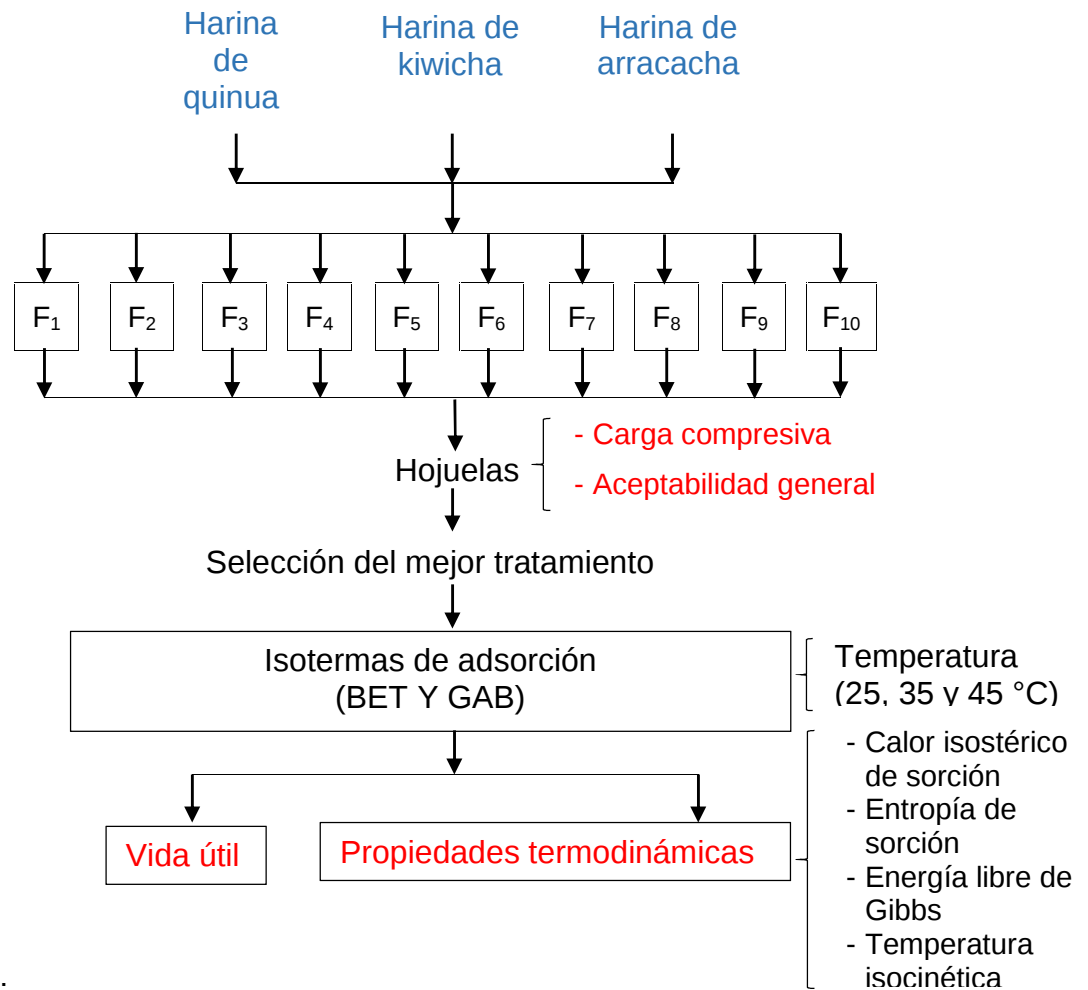
Se utilizó un diseño de mezclas simplex centroide ampliado. En el diseño experimental (Cuadro 7) se tuvo la mezcla de las proporciones de harina de quinua: harina de Kiwicha: harina de arracacha (10 - 40:10 - 40:50 – 80%), con las cuales se generaron las diez formulaciones o tratamientos. Los rangos fueron establecidos tomando como referencia la investigación de Pagador (2004).

Cuadro 7. Proporciones del diseño de mezclas simplex centroide ampliado

Formulación	Quinua	Kiwicha	Arracacha
F ₁	10	10	80
F ₂	40	10	50
F ₃	10	40	50
F ₄	25	10	65
F ₅	10	25	65
F ₆	25	25	50
F ₇	20	20	60
F ₈	15	15	70
F ₉	30	15	55
F ₁₀	15	30	55

3.4. Esquema experimental

En la Figura 4, se muestra el esquema experimental, en que la variable independiente son las proporciones de tres componentes: harina de quinua, kiwicha y arracacha en combinaciones de 10 a 80 respecto a la mezcla total de estos ingredientes, lo representa el 22% de un total y que fue completado con 78% de agua, mezclado para deshidratarse en el secador de tambor para obtener las hojuelas, y como variables dependientes la carga compresiva y aceptabilidad general. Para la elaboración de las formulaciones se empleó el software *Statistica 12.0*.



Leyenda:

- F₁: Proporción: quinua: kiwicha: arracacha (10:10:80%)
- F₂: Proporción: quinua: kiwicha: arracacha (40:10:50%)
- F₃: Proporción: quinua: kiwicha: arracacha (10:40:50%)
- F₄: Proporción: quinua: kiwicha: arracacha (25:10:65%)
- F₅: Proporción: quinua: kiwicha: arracacha (10:25:65%)
- F₆: Proporción: quinua: kiwicha: arracacha (25:25:50%)
- F₇: Proporción: quinua: kiwicha: arracacha (20:20:60%)
- F₈: Proporción: quinua: kiwicha: arracacha (15:15:70%)
- F₉: Proporción: quinua: kiwicha: arracacha (30:15:55%)
- F₁₀: Proporción: quinua: kiwicha: arracacha (15:30:55%)

Figura 4. Esquema experimental para la evaluación de la proporción de quinua: kiwicha: arracacha en la aceptabilidad general, carga compresiva y vida útil de hojuelas.

El diseño experimental de mezclas se realizó utilizando un diseño simplex con centroide ampliado con aumento de puntos interiores a diez (10) de F_1 a F_{10} . Los resultados obtenidos durante el desarrollo experimental permitieron con el software *Minitab 17.1*, superponer las superficies de contornos y optimizar la proporción de los componentes de las hojuelas en función de las mejores características de aceptabilidad general y carga compresiva. Las hojuelas con mejores características fueron envasadas y las muestras sometidas a humedades relativas entre 0.1116% y 0.8174% obtenidas con las diferentes sales a temperaturas de 25, 35 y 45 °C, para obtener las humedades de equilibrio, isotermas de adsorción y estimar su vida útil mediante modelamiento.

3.5. Secuencia del proceso

En la Figura 5, se observa el flujo de proceso seguido para la obtención de hojuelas de arracacha, quinua y kiwicha.

A continuación se describe la secuencia de proceso seguido para obtener las hojuelas de arracacha: quinua: kiwicha (Pagador, 2004; Escobar y otros, 2009; Tapia, 2004; Revelo, 2010):

Pesado

Se realizó de acuerdo a la formulación según el diseño de mezclas (Cuadro 8), donde la combinación de las harinas conformó el 22% de la formulación, el 78% restante fue agua potable. Se trabajó en base a 2000 g de papilla.

Mezclado

Las harinas fueron mezcladas a mano. Se agregó agua potable hasta obtener una mezcla homogénea.

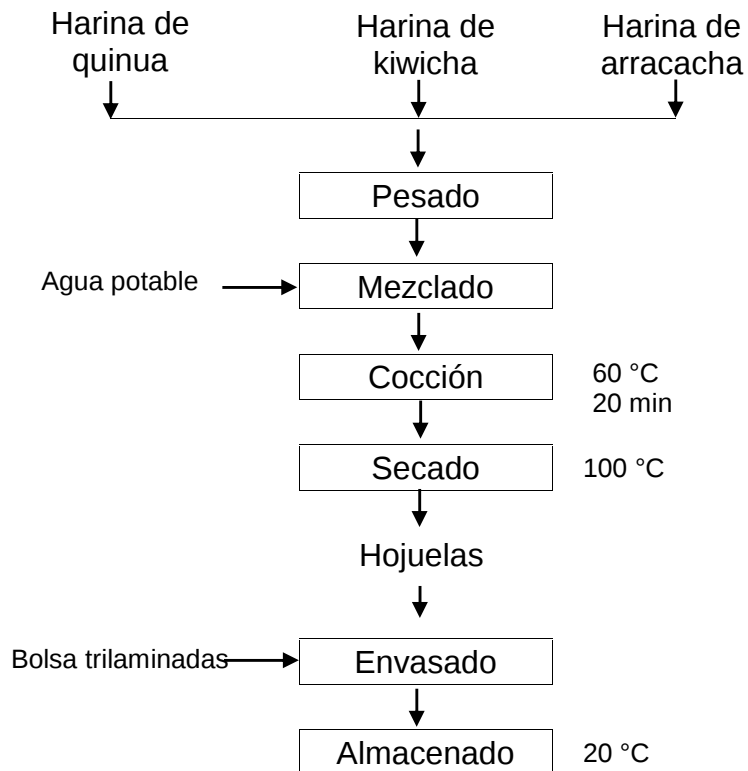


Figura 5. Diagrama de flujo para la obtención de hojuelas.

Cocción

Se realizó a 60 °C durante 20 min, en agitación para evitar la formación de grumos en la papilla debido a la gelatinización del almidón.

Secado

La papilla fue colocada en un secador de doble tambor, donde ingresó por la parte superior de los rodillos, al entrar en contacto con la superficie caliente de este, se produjo la eliminación de agua. El producto final tuvo forma de láminas secas (separadas por un raspador de cuchilla) que fueron recolectadas en bandejas. El secador trabajó con una distancia entre rodillos de 0.5 mm, con vapor a 58 psi y reducción de presión a 28 psi para obtener 100 °C en su superficie de secado.

Cuadro 8. Formulación para la obtención de hojuelas con la proporción de quinua: kiwicha: arracacha

Formulación	Quinua (g)	Kiwicha (g)	Arracacha (g)	Agua (g)	Total (g)
F ₁	46	46	366	1543	2000
F ₂	175	44	219	1562	2000
F ₃	44	175	219	1562	2000
F ₄	112	45	291	1553	2000
F ₅	45	112	291	1553	2000
F ₆	109	109	219	1562	2000
F ₇	89	89	266	1556	2000
F ₈	68	68	315	1550	2000
F ₉	132	66	242	1559	2000
F ₁₀	66	132	243	1559	2000

Envasado

Se envasaron en bolsas trilaminadas (polipropileno biorientado + nylon + polietileno de baja densidad) de 150 g, estas se sellaron al calor, se trató de eliminar la mayor cantidad de aire presente.

Almacenado

El producto envasado fue almacenado a temperatura ambiente (aprox. 20 °C) hasta su evaluación.

3.6. Método de análisis

3.6.1. Carga compresiva

Se empleó el texturómetro TA.XT plus, el cual midió la carga compresiva expresada en Newton. Este análisis se realizó cinco veces para cada tratamiento. Cada hojuela se colocó sobre una base ubicada en el centro del texturómetro para permitir la compresión de las muestras. Se usó una

placa cilíndrica de 18 mm de diámetro y velocidad de desplazamiento de 4.0 mm/s (Sánchez y otros, 2014; Reyes, 2014).

3.6.2. Aceptabilidad general

Se usó una prueba de escala hedónica para determinar las hojuelas con mayor grado de aceptación general. Los tratamientos a evaluar fueron sometidos a un panel sensorial conformado por 40 panelistas no entrenados, evaluándose la aceptabilidad general (Ureña y otros, 1999; Anzaldúa - Morales, 2005).

Prueba de aceptabilidad general										
Nombre del producto: hojuelas para desayuno										
Instrucciones: pruebe cada una de las muestras de hojuelas que se le ha proporcionado y califique según la escala que se presenta, marcando con una (X) en el casillero correspondiente de acuerdo con el nivel de agrado o desagrado que le produzca.										
Escala	Muestras									
	721	987	389	485	164	208	157	523	804	617
Me agrada muchísimo										
Me agrada mucho										
Me agrada moderadamente										
Me agrada poco										
No me agrada ni me desagrada										
Me desagrada poco										
Me desagrada moderadamente										
Me desagrada mucho										
Me desagrada muchísimo										

Comentarios _____

Gracias.....



Fuente: Anzaldúa – Morales (2005).

Figura 6. Tarjeta de evaluación para la prueba de aceptabilidad general de hojuelas con las proporciones de quinua: kiwicha: arracacha.

Se dividió la evaluación en dos bloques conformados por 5 muestras cada uno, el primer bloque de panelistas evaluó las 5 muestras iniciales, después de completar el análisis, al transcurrir una hora este mismo grupo evaluó las 5 muestras restantes. Las muestras fueron colocadas en recipientes de plástico debidamente codificados; a los panelistas se les entregó una tarjeta de evaluación (Figura 6). Cada panelista asignó la calificación correspondiente de acuerdo al grado de satisfacción, siendo el valor de más alto puntaje el de “me gusta muchísimo” (9 puntos) y el de menor puntaje el de “me disgusta muchísimo” (1 puntos), con un valor intermedio de “ni me gusta ni me disgusta” (5 puntos) (Anzaldúa - Morales, 2005).

3.6.3. Pruebas aceleradas

3.6.4. Determinación de la humedad de equilibrio

Las humedades de equilibrio de las muestras fueron determinadas gravimétricamente, usando el método estático con nueve soluciones salinas saturadas LiCl , $\text{KC}_2\text{H}_3\text{O}_2$, MgCl_2 , $\text{K}_2\text{CO}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$, $\text{NaCr}_2\text{O}_7 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$, KI , NaCl , KCl y NaNO_3 (Gil y otros, 2013). En el Cuadro 9, se observa valores de sales saturadas y sus valores de humedad en equilibrio.

Muestras de 1 g de hojuelas se colocaron sobre recipientes, y este dentro de frascos de vidrio con tapas metálicas con humedades relativas específicas obtenidas de acuerdo a la solución salina (Cuadro 9). Los envases de vidrio fueron colocados en una estufa y mantenidas a las temperaturas de 25, 35 y 45 °C durante 15 días, necesarios para llegar a la condición de equilibrio. Después del equilibrio el contenido de humedad de las muestras se determinó siguiendo el método gravimétrico (Tolaba y otros, 2004; Poaquiza, 2008).

Cuadro 9. Actividad de agua con diferentes soluciones salinas

Soluciones	Cantidad (g)	Agua (mL)	Humedad en equilibrio (% HR) a las temperaturas de estudio		
			25 °C	35 °C	45 °C
LiCl	79	46	11.3	11.25	11.16
KC ₂ H ₃ O ₂	150	40	22.51	22.5	22.4
MgCl ₂	100	47	32.78	32.05	31.1
K ₂ CO ₃ .6H ₂ O	100	47	43.16	43.15	43.08
NaCr ₂ O ₇ .2H ₂ O	150	42	54.01	51	48.02
KI	100	28	68.86	66.96	65.26
NaNO ₃	100	23	74.25	72.06	69.99
NaCl	100	28	75.29	74.87	74.52
KCl	100	30	84.34	82.95	81.74

Fuente: Poaquiiza (2008).

3.6.5. Modelado de las isotermas de adsorción

Los datos experimentales obtenidos se modelaron con las ecuaciones de GAB y BET, para obtener las isotermas de adsorción de las hojuelas con mejor tratamiento (Al-Muhtaseb y otros, 2002; Gil y otros, 2013).

El modelado de GAB permite modelar en el rango de actividad de agua de 0.01 a 0.95 (Gálvez y otros, 2006; Gil y otros, 2013).

$$X_{eq} = \frac{X_m * C * K * a_w}{(1 - K * a_w) * (1 - K * a_w + C * K * a_w)} \quad (1)$$

Donde:

a_w : actividad de agua

X_{eq} : Humedad en equilibrio (g agua/ g m.s.)

X_m : Valor de la monocapa (g. agua/ g m.s.)

C, K: constantes.

El modelo de BET permite modelar en el rango de actividad de agua de 0.01 a 0.50 (Gálvez y otros, 2006; Gil y otros, 2013).

$$X_{eq} = \frac{X_m * C * a_w}{(1 - a_w) * (1 - a_w + C * a_w)} \quad (2)$$

Donde:

a_w : actividad de agua

X_{eq} : Humedad en equilibrio (g agua/ g m.s.)

X_m : Valor de la monocapa (g. agua/ g m.s.)

C: constante

3.6.6. Determinación de la vida útil

Se utilizó el modelo de Heiss y Eichner para estimar el tiempo de vida útil basado en un factor crítico bajo unas condiciones dadas. Este modelo puede utilizarse asumiendo que la isoterma de vapor de agua que es el factor determinante, entre otros, tales como la presencia de microorganismos, el oxígeno y la luz que podría limitar el tiempo de conservación (Zakhia y otros, 2002; Ikhu, 2006).

$$q_s = \frac{\ln[(X_e - X_i)/(X_e - X_c)]}{K_s (A/W) (P_0/S)} \quad (3)$$

Dónde:

Θ_s : potencial de vida útil del producto (tiempo en días para que el producto envasado sufra deterioro microbiano y bioquímico con pérdida de calidad sensorial).

X_i : contenido de humedad inicial del producto al momento de ser envasado (kg agua/kg base seca).

X_e : contenido de humedad de equilibrio (kg agua/kg base seca) del producto (si se deja el producto fuera del envase en contacto con la atmósfera exterior). " X_e " depende de la temperatura, humedad relativa y de la isoterma de adsorción del producto.

X_c : contenido de humedad de seguridad del producto (kg agua/kg base seca), es decir, el contenido de humedad correspondiente al límite a_w de almacenamiento seguro. " X_c " es calculado para el límite a_w por iteraciones sucesivas a partir de la ecuación de regresión GAB hasta que la diferencia entre dos calculos " X_c " es menor que 0.01.

K_s : permeabilidad del empaque al vapor de agua (kg H_2O . m^{-2} . Pa^{-1} día $^{-1}$) (de ficha técnica del envase).

A : área del empaque (m^2).

W_s : peso del producto (kg de materia seca en el envase).

P_0 : presión de vapor del agua a la temperatura de almacenamiento (Pa).

S : pendiente de la isoterma del producto (asumida lineal en el rango entre " X_e " y " X_c ").

3.6.7. Determinación de las propiedades termodinámicas

Calor isostérico o entalpía de sorción

El calor isostérico de sorción es el diferencial de entalpía de sorción (ΔH ó Q_{st}) (Ayala, 2015). El calor isostérico neto de adsorción (Q_s) se define como el calor total de adsorción de agua del alimento (ΔH) menos el calor de vaporización de agua pura (ΔH_v), a una determinada temperatura, y se determinó por medio de la ecuación de Clausius-Clayperon (ecuación 4), ya que al graficar el $\ln a_w$ en función a $1/T$ (K) para ciertos valores de humedad se obtuvo una línea recta de cuya pendiente ($-\Delta H/R$) fue calculado el Q_s (Gálvez y otros, 2006).

$$\ln p = \frac{-\Delta H}{R} \cdot \frac{1}{T} + C \quad (4)$$

Dónde:

p : presión de vapor de agua en equilibrio con el material, a una temperatura determinada, que proviene de $a_w = p/p_o$; p_o es la presión de vapor del agua pura (Pa).

ΔH : calor total de adsorción del sistema alimento-agua (kJ/mol).

R : constante universal de los gases (8.314 kJ/kmol.K).

T : temperatura absoluta (K).

Para determinar el calor isostérico neto se empleó la siguiente ecuación:

$$Q_s = \Delta H - \Delta H_v \quad (5)$$

Dónde:

Q_s : calor isostérico neto de adsorción a contenido de humedad constante (kJ/mol).

ΔH : calor total de adsorción del sistema alimento-agua (kJ/mol).

ΔH_v : calor latente de vaporización (kJ/mol).

Entropía de sorción

El diferencial de entropía de adsorción (ΔH) fue calculada mediante la ecuación de Gibbs-Helmholtz (ecuación 6) (Ayala, 2015).

$$\Delta S = \frac{\Delta H - \Delta G}{T} \text{ (J/mol.K)} \quad (6)$$

Donde (ΔG) es la energía libre de Gibbs, calculada usando la ecuación 7.

$$\Delta G = RT \ln a_w \text{ (J/mol)} \quad (7)$$

Sustituyendo la ecuación 7 en 6 se tiene:

$$\ln a_w = \frac{\Delta H}{RT} - \frac{\Delta S}{R} \quad (8)$$

Los cambios de entalpía (ΔH) y entropía (ΔS) fueron calculados desde la ecuación 8, por medio del ploteo de la isoterma de sorción de $\ln(a_w)$ en función a $1/T$ para ciertos valores de contenido de humedad en equilibrio (inicial, monocapa y crítica) y determinando a partir de este, la pendiente ($-\Delta H/R$) y el intercepto ($\Delta S/R$), que al ser multiplicados por la constante universal de los gases (8.314 J/mol.k) se obtiene la entalpía (ΔH) y entropía (ΔS), mediante la ecuación 9 se tiene la energía libre de Gibbs (ΔG) (Goula y otros, 2007; Ayala, 2015).

$$\Delta G = \Delta H - T * \Delta S \quad (9)$$

Temperatura isocinética y media armónica

Se graficó ΔH frente a ΔS desde los valores obtenidos en la ecuación 8, estos valores fueron correlacionados de acuerdo a la siguiente ecuación (Goula y otros, 2007):

$$\Delta H = T_B \Delta S + \Delta G_B \quad (10)$$

Donde T_B es la temperatura isocinética, la cual representa la temperatura a la cual todas las reacciones en la series de sorciones ocurren a la misma velocidad. Es recomendable una prueba para la teoría de la compensación, lo cual implicó comparar la temperatura isocinética con la temperatura media armónica (T_{hm}), la cual se define como:

$$T_{hm} = \frac{n}{\sum_{i=1}^n (1/T)} \quad (11)$$

Donde n es el número de isotermas.

Una compensación química lineal patrón existe solo si $T_B \neq T_{hm}$. Si $T_B > T_{hm}$ el proceso es de impulso entálpico, mientras, si la condición opuesta es observada, el proceso es considerado como entrópico controlado (Goula y otros, 2007).

3.7. Análisis estadístico

Una vez obtenidos los resultados de carga compresiva y aceptabilidad general, se aplicó a los datos un análisis de varianza para determinar qué modelo (lineal, cuadrático o cúbico especial) fue significativo ($p < 0.05$), además, se determinó el coeficiente de determinación R^2 y R^2 -ajustado,

para validar el modelo matemático que representó el comportamiento del fenómeno en estudio (Montgomery, 2011).

La superficie de respuesta del diseño de mezclas simplex centroide ampliado proporciona una adecuada representación gráfica de superficie y contornos. El diseño de contornos está definido por un triángulo que representa todo el universo de posibilidades de combinaciones de harina de quinua, de kiwicha y de arracacha, sobre la carga compresiva y aceptabilidad general.

Para encontrar la combinación óptima predicha de harina de quinua, de kiwicha y de arracacha, que brindó los mejores resultados de carga compresiva y aceptabilidad general, se realizó una superposición de superficies de contornos y se halló la zona óptima del proceso de elaboración de hojuelas para desayuno.

IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1. Carga compresiva en hojuelas con las proporciones de quinua: kiwicha: arracacha

En el Cuadro 10, se presenta los valores de carga compresiva en hojuelas con las proporciones de quinua, kiwicha y arracacha, donde, se observa que el menor valor (0.22 N) fue para la mezcla de: arracacha al 50, quinua al 25 y kiwicha al 25; y el mayor valor (26.75 N) fue para la mezcla de: arracacha al 80, quinua al 10 y kiwicha al 10.

Cuadro 10. Carga compresiva en hojuelas con las proporciones de quinua: kiwicha: arracacha

Formulación	Quinua	Kiwicha	Arracacha	Carga compresiva (N)
F ₁	10	10	80	26.75
F ₂	40	10	50	13.13
F ₃	10	40	50	16.27
F ₄	25	10	65	16.99
F ₅	10	25	65	1.59
F ₆	25	25	50	0.22
F ₇	20	20	60	0.97
F ₈	15	15	70	0.24
F ₉	30	15	55	0.86
F ₁₀	15	30	55	0.55

En el Cuadro 11 se muestra el análisis de varianza, para determinar el modelo adecuado, para describir el comportamiento de la variable respuesta carga compresiva en hojuelas, con las proporciones de quinua, kiwicha y arracacha, donde, el modelo cuadrático fue significativo ($p < 0.05$), además, los coeficientes de determinación R^2 (0.892) y R^2 -ajustado (0.758) fueron superiores al 0.85 y 0.75, respectivamente, por lo que este modelo matemático se ha considerado válido para representar el comportamiento del fenómeno en estudio (Montgomery, 2011).

Cuadro 11. Análisis de varianza de modelos para carga compresiva en hojuelas con las proporciones de quinua: kiwicha: arracacha

Modelo	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Cuadrados medios	F	P	R ²	R ² -aju
Lineal	126.289	2	63.144	0.616	0.567	0.150	0.000
Cuadrático	627.174	3	209.058	9.210	0.029	0.892	0.758
Cúbico especial	12.326	1	12.326	0.471	0.542	0.907	0.721
Total	844.258	9	93.806				

En el Cuadro 12 se presenta los coeficientes de la regresión del modelo cuadrático, aplicado a la carga compresiva en hojuelas con las proporciones de quinua: kiwicha: arracacha. Donde, existió significancia ($p < 0.05$) de los coeficientes de la regresión, excepto del componente puro: quinua (B) y de la interacción: arracacha-quinua (A*B).

Cuadro 12. Coeficientes de la regresión del modelo cuadrático aplicado a la carga compresiva en hojuelas con las proporciones de quinua: kiwicha: arracacha

Componente	Coeficiente	p
(A)Arracacha	0.868	0.017
(B)Quinua	1.211	0.349
(C)Kiwicha	5.006	0.012
AB	-0.026	0.339
AC	-0.099	0.014
BC	-0.071	0.039

Modelado matemáticamente, la regresión del modelo cuadrático para la variable respuesta carga compresiva fue la siguiente:

$$CC = 0.868*A + 1.211*Q + 5.006*K - 0.026*A*Q - 0.099*A*K - 0.071*Q*K$$

CC: carga compresiva

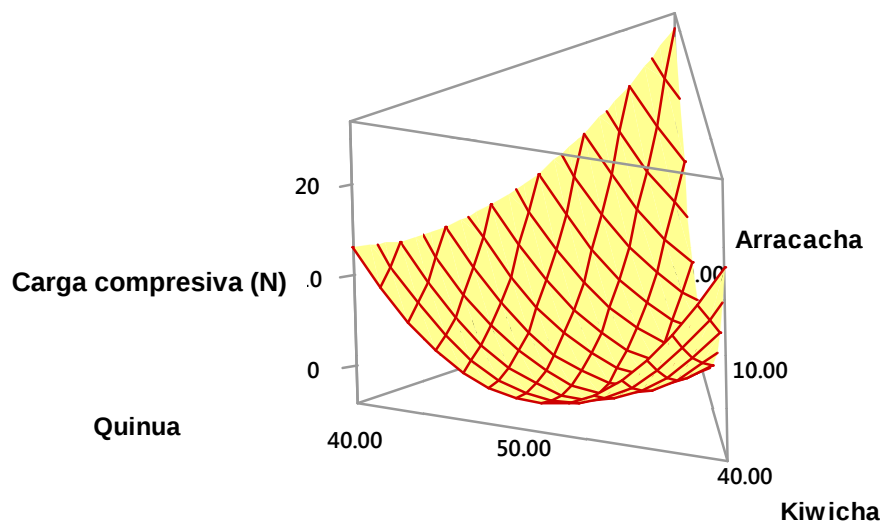
A: arracacha

Q: quinua

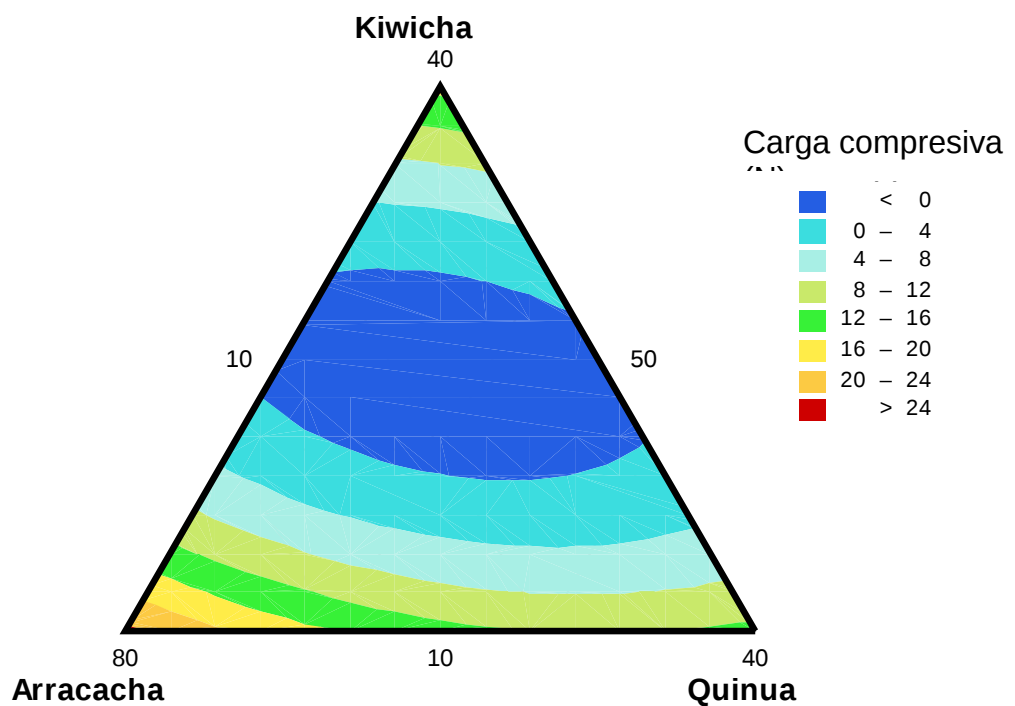
K: kiwicha

El modelo cuadrático, fue usado para generar la superficie de respuesta (Figura 7a) y de contornos (Figura 7b) en la carga compresiva en hojuelas, con las proporciones de quinua, kiwicha y arracacha. Donde en la superficie de contornos (Figura 7b) se observa que al aumentar la concentración de harina de arracacha de 50 a 80 en la mezcla, la carga compresiva aumentó de aproximadamente de 0.10 a 24.0 N; al aumentar la concentración de harina de quinua de 10 a 40 en la mezcla, la carga compresiva aumentó aproximadamente de 0.10 a 16.0 N, con respecto a la harina de kiwicha al aumentar la concentración en la mezcla de 10 a 40 los valores oscilaron de 8.0 a 12.0 N. Cuando la cantidad de la mezcla de los tres componentes fue similar (mezcla terciaria) la carga compresiva fluctuó aproximadamente de 0.20 a 0.30 N.

El aumento de los valores de carga compresiva en las hojuelas al incrementar el contenido de harina de arracacha podría ser debido a su alto contenido de almidón (74.47%) las harinas no convencionales de raíces y tubérculos imparten mayor carga compresiva a los productos alimenticios secados y horneados (formación de estructura por deshidratación del alimento) en los que son utilizados (García y Pacheco, 2015). Además, la harina de quinua es rica en fibra con 4.10% la cual aporta carga compresiva a las hojuelas, a comparación de la kiwicha que contiene 2.50% (Revelo, 2010; Higinio, 2011), presentando este último menores valores de carga compresiva.



(a)



(b)

Figura 7. Superficie de respuesta (a) y de contornos (b) en la carga compresiva en hojuelas con las proporciones de quinua: kiwicha: arracacha.

La carga compresiva en las hojuelas al aumentar el contenido de harina de quinua podría ser debido a la presencia de la cadena de polímero de

silsesquioxano que son dispersados en la solución filmogénica y durante el proceso de cocción, donde las cadenas amiláceas de la quinua se cruzan aleatoriamente aumentando así la resistencia a la deformación (Pagno y otros, 2015).

La menor carga compresiva en las hojuelas con mayor proporción de harina de quinua y kiwicha se debe a su contenido de proteína, la cual genera en las estructuras mayor elongación y por ende menor carga compresiva, la proteína de la quinua al ser mezclada con otros componentes (almidón, grasa, fibra y minerales) con diferentes interacciones moleculares entre estas macromoléculas son estabilizadas como iones e interacciones hidrofóbicas, además estas podrían interactuar a través de enlaces disulfuro cuando son desnaturalizadas debido al calor en el proceso de cocción (Abugoch y otros, 2011).

4.2. Aceptabilidad general en hojuelas con las proporciones de quinua: kiwicha: arracacha

En el Cuadro 13, se presenta los valores promedio de la aceptabilidad general en hojuelas con las proporciones de quinua: kiwicha: arracacha, donde, se observa que el menor valor (3.49) fue para la mezcla de: arracacha al 50, quinua al 10 y kiwicha al 40; y el mayor valor (6.18) fue para la mezcla de: arracacha al 50, quinua al 40 y kiwicha al 10.

Cuadro 13. Aceptabilidad general en hojuelas con las proporciones de quinua: kiwicha: arracacha

Formulación	Quinua	Kiwicha	Arracacha	Aceptabilidad general
F ₁	10	10	80	3.87
F ₂	40	10	50	6.18
F ₃	10	40	50	3.49
F ₄	25	10	65	4.34
F ₅	10	25	65	4.84
F ₆	25	25	50	5.47
F ₇	20	20	60	4.76
F ₈	15	15	70	4.63
F ₉	30	15	55	5.61
F ₁₀	15	30	55	4.89

Velásquez y otros (2014) observaron mediante un diseño de mezclas simplex centroide ampliado que con las proporciones de harina quinua (15%), como mezcla pura presentó un comportamiento positivo muy alto en la aceptación sensorial en galletas (8.0) debido a que el consumidor está habituado al sabor de la quinua, mientras que el contenido de harina de soya (6.2) y sobre todo harina de cacao (5.8) generó los menores valores de aceptación, además esta aceptación es alta debido a que el producto presenta azúcar en su formulación. Esto refleja que el consumidor está más familiarizado a las características sensoriales que brinda la quinua en los productos en el cual es utilizado, esta tendencia es similar a la reportada en esta investigación.

En el Cuadro 14, se muestra el análisis de varianza para determinar el modelo adecuado para describir el comportamiento de la variable respuesta aceptabilidad general en hojuelas con las proporciones de quinua: kiwicha: arracacha, donde, el modelo cuadrático fue significativo ($p < 0.05$), además, los coeficientes de determinación R^2 (0.978) y R^2 -ajustado (0.950) fueron superiores al 0.85 y 0.75, respectivamente, por lo que este modelo

matemático fue válido para representar el comportamiento del fenómeno en estudio (Montgomery, 2011).

Cuadro 14. Análisis de varianza de modelos para aceptabilidad general en hojuelas con las proporciones de quinua: kiwicha: arracacha

Modelo	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Cuadrados medios	F	P	R ²	R ² -aju
Lineal	3.929	2	1.965	7.119	0.021	0.670	0.576
Cuadrático	1.801	3	0.600	18.369	0.008	0.978	0.950
Cúbico especial	0.005	1	0.005	0.112	0.760	0.978	0.935
Total	5.861	9	0.651				

En el Cuadro 15, se presenta los coeficientes de la regresión del modelo cuadrático, aplicado a la aceptabilidad general en hojuelas con las proporciones de quinua: kiwicha: arracacha. Donde, existió significancia ($p < 0.05$) de todos los coeficientes de la regresión.

Cuadro 15. Coeficientes de la regresión del modelo cuadrático aplicado a la aceptabilidad general en hojuelas con las proporciones de quinua: kiwicha: arracacha

Componente	Coeficiente	P
(A)Arracacha	0.025	0.041
(B)Quinua	0.249	0.005
(C)Kiwicha	-0.252	0.004
AB	-0.003	0.026
AC	0.005	0.005
BC	0.003	0.035

Modelado matemáticamente, la regresión del modelo cuadrático para la variable respuesta aceptabilidad general fue la siguiente:

$$AG = 0.025*A + 0.249*Q - 0.252*K - 0.003*A*Q + 0.005*A*K + 0.003*Q*K$$

AG: aceptabilidad general

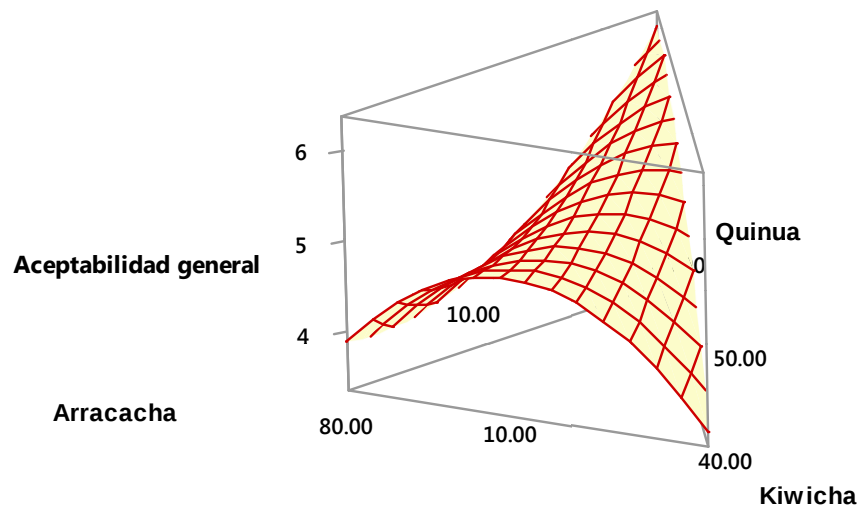
A: arracacha

Q: quinua

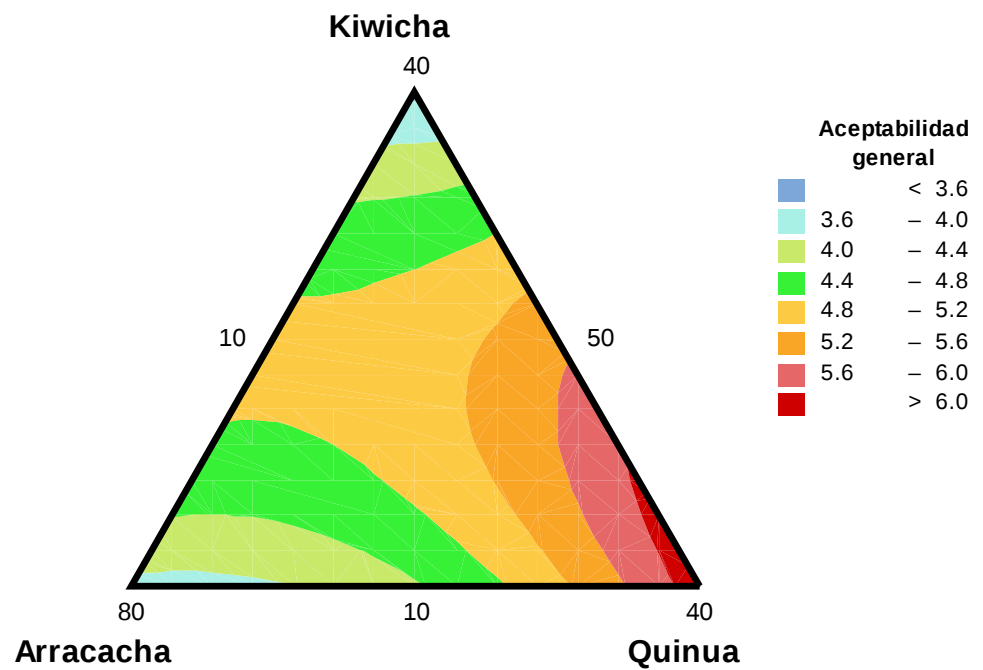
K: kiwicha

El modelo cuadrático fue usado para generar la superficie de respuesta (Figura 8a) y de contornos (Figura 8b) de la aceptabilidad general en hojuelas con las proporciones de quinua: kiwicha: arracacha. Donde en la superficie de contornos (Figura 8b) se observa que al aumentar la concentración de harina de arracacha de 50 a 80 en la mezcla, la aceptabilidad general disminuyó de aproximadamente de 5.2 a 3.6; al aumentar la concentración de harina de quinua de 10 a 40 en la mezcla, la aceptabilidad general aumentó aproximadamente de 4.8 a 6.0, con respecto a la harina de kiwicha al aumentar la concentración en la mezcla de 10 a 40, los valores disminuyeron de 4.0 a 3.6. Cuando la cantidad de la mezcla de los tres componentes fue similar (mezcla terciaria) la aceptabilidad general fluctuó aproximadamente de 4.8 a 5.2.

La mayor aceptación general en las hojuelas a mayor concentración de quinua, podría ser a que este ingrediente aporta positivamente en las características sensoriales de los productos, ya que los consumidores están acostumbrados al sabor que imparte (Velásquez y otros, 2014), caso contrario ocurre con la arracacha, que generalmente se consume en forma directa y por un grupo limitado de consumidores, debido a que su comercialización no es masificada (García y Pacheco, 2015).



(a)



(b)

Figura 8. Superficie de respuesta (a) y de contornos (b) en la aceptabilidad en hojuelas con las proporciones de quinua: kiwicha: arracacha.

Revelo (2010) evaluó el efecto de la mezcla de maíz y quinua (100:0, 50:50, 25:75 y 0:100%), contenido de humedad (44 y 46%) y temperatura de fritura (130 y 135 °C), sobre la aceptabilidad general en hojuelas, donde el tratamiento de mayor aceptación general (6 = “me gusta mucho”) fue el elaborado con maíz al 50% y quinua al 50%, con 44% de humedad y 130 °C de fritura, esta cantidad de quinua es similar a la utilizada en esta investigación (10 a 40%), y a mayor cantidad las aceptación disminuye, esto debido a que el consumidor está habituado a las características sensoriales que brinda el maíz en las hojuelas.

Escobar y otros (2009) evaluaron la sustitución de harina trigo por harina de cotiledón de algarrobo (0, 10 y 20%) sobre la aceptabilidad general de hojuelas. Las hojuelas elaboradas con 10% de harina de cotiledón de algarrobo presentaron la mayor aceptabilidad general con una percepción de “me gusta medianamente”, al sustituir la harina de trigo con mayor cantidad de cotiledón de algarrobo, la aceptabilidad disminuyó, este efecto puede haber sido similar a lo reportado en esta investigación; cabe mencionar que el consumidor no está habituado al sabor de la arracacha a comparación de la quinua y kiwicha, es por ello, que el uso de arracacha en la presente investigación se debió al hecho de revalorar los productos nativos.

4.3. Optimización en hojuelas con las proporciones de quinua: kiwicha: arracacha

La combinación de la mezcla predicha de harina de quinua, de kiwicha y de arracacha sobre la zona de optimización factible, fue determinada mediante el método de superposición de superficies de contornos (Montgomery, 2011) a fin de obtener el área determinada por los valores aproximados a los deseados para la optimización de las variables respuesta. Para la optimización se consideró solo a las variables respuesta que presentaron

significancia ($p < 0.05$) para algún modelo predictivo (lineal, cuadrático o cubico especial), además, de los coeficientes de determinación R^2 y R^2 -ajustado superiores al 0.85 y 0.75, respectivamente, siendo estas la carga compresiva y la aceptabilidad general, dentro de un modelo predictivo cuadrático.

En la Figura 9, se presenta la superposición de superficies de contorno para la optimización de la carga compresiva y aceptabilidad general en hojuelas con las proporciones de quinua: kiwicha: arracacha. Donde la optimización de la aceptabilidad general consistió en maximizar las calificaciones (siendo esta variable la de mayor consideración) y que la carga compresiva este dentro de un valor objetivo o target.

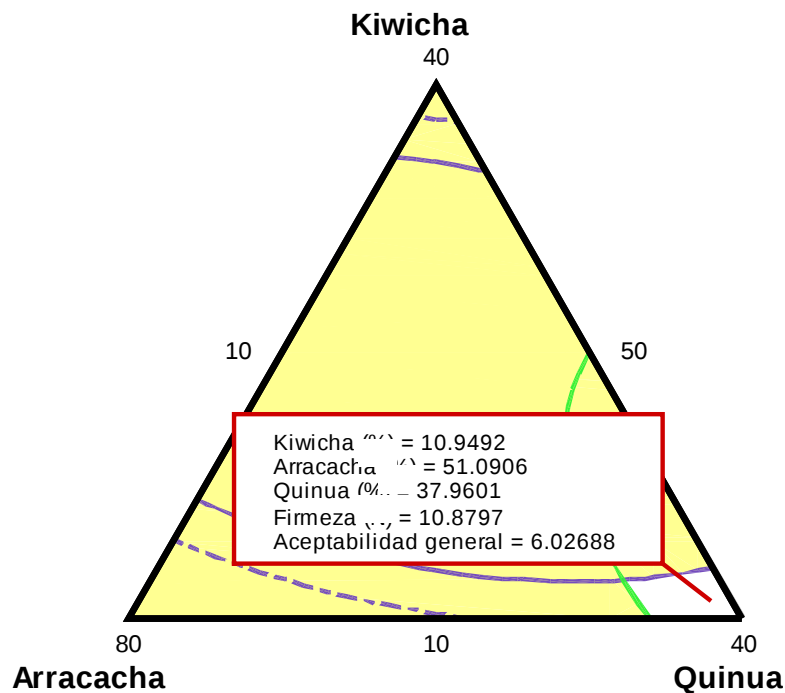


Figura 9. Superposición de superficies de contornos para la optimización de la carga compresiva y la aceptabilidad en hojuelas con las proporciones de quinua: kiwicha: arracacha.

La combinación óptima predicha (Figura 9) para tener mayor calificación de aceptabilidad general de 6.03 (valor aproximado a 6 = calificación de “Me agrada poco”) y carga compresiva de 10.88 N, se obtuvo con la mezcla predicha de harina de arracacha al 51.09, harina de quinua al 37.96 y harina de kiwicha al 10.95. La baja calificación en aceptabilidad general se debe a que las hojuelas no fueron azucaradas, esto se mejoraría usando sacarosa en la formulación.

4.4. Vida útil en hojuelas con las proporciones de quinua: kiwicha: arracacha

Se determinó el tiempo de vida útil a la hojuela obtenida con la mezcla de harina de arracacha al 50, harina de quinua al 40 y harina de kiwicha al 10, este tratamiento se encontró en la zona de optimización y con cercanía a la mezcla óptima predicha (Figura 9).

4.4.1. Isotermas de adsorción en hojuelas con las proporciones de quinua: kiwicha: arracacha

En el Cuadro 16 se muestra los valores de humedad en equilibrio de las hojuelas con las proporciones de quinua: kiwicha: arracacha para cada actividad de agua, a las temperaturas de 25, 35 y 45 °C (Cuadro 9). Se observa que a mayor actividad de agua mayor es el contenido de humedad en equilibrio, esto debido a que con el aumento de la temperatura las moléculas de agua se activan, incrementando su nivel de energía, por lo que se hacen menos estables, lo que conlleva a un rompimiento de los enlaces de los sitios activos del alimento (Cassini y otros, 2006). Las hojuelas son alimentos altamente higroscópicos que alcanzan el equilibrio de adsorción rápidamente (Prieto y Gordillo, 2006).

Cuadro 16. Humedad en equilibrio para cada actividad de agua a 25, 35 y 45 °C en hojuelas con las proporciones de quinua: kiwicha: arracacha

a_w	X_{eq} (g agua/g ms)
25 °C	
0.1130	0.0546
0.2251	0.0993
0.4316	0.0993
0.6886	0.1183
0.7425	0.1265
0.7529	0.1448
0.8434	0.1736
35 °C	
0.1125	0.0691
0.3205	0.0908
0.4315	0.1029
0.6696	0.1264
0.7206	0.1421
45 °C	
0.1116	0.0461
0.4308	0.0938
0.6526	0.1224
0.6999	0.1316
0.7452	0.1467
0.8174	0.1797

Para diferentes tipos de alimentos, es difícil definir un comportamiento teórico generalizado para describir con exactitud la isoterma de adsorción a intervalos amplios de la actividad de agua, debido a factores como la depresión de actividad de agua de los alimentos, las propiedades higroscópicas de sus numerosos constituyentes, la atracción superficial del

agua, así como a las diferentes interacciones del agua con los constituyentes del alimento y procesos como el calentamiento o pretratamientos (Bell y Labuza, 2000).

4.4.2. Ajuste de modelos para las isotermas de adsorción

En el Cuadro 17, se muestra los parámetros estimados usando los modelos de GAB (ecuación 1) y BET (ecuación 2) en hojuelas con las proporciones de quinoa: kiwicha: arracacha, se determinó que la ecuación de GAB fue más satisfactoria para el modelamiento al presentar mayor R^2 promedio de 0.953 y menor error absoluto promedio de 5.020% a comparación de la ecuación de BET que presentó R^2 promedio de 0.843 y error absoluto promedio de 6.204%. Los resultados del modelamiento se encuentran en el Anexo 2.

Los parámetros del modelo de GAB (Cuadro 17) a las temperatura de 25, 35 y 45 °C para humedad de monocapa (X_m) fueron de 0.073, 0.076 y 0.061 g agua/100 g.m.s. ,respectivamente, y corresponde a la humedad del producto cuando los puntos de adsorción primarios están saturados por moléculas de agua (ganancia del agua en la monocapa) (Prieto y Gordillo, 2006; Guevara, 2015); y C y K son las constantes de energía; C (62.184, 69.408 y 25.077, respectivamente) representa la diferencia de potencial químico de las moléculas de soluto entre capas de adsorción superiores y la monocapa y K (0.660, 0.639 y 0.810, respectivamente) es la relación entre el potencial químico de las moléculas de soluto en estado líquido puro y en capas de adsorción superiores, los valores de K deben ser menores a 1 (Gavidia, 2015). Los 3 parámetros (X_m , C y K) caracterizan las interacciones del agua con los macroconstituyentes del alimento (Bell y Labuza, 2000).

Cuadro 17. Parámetros estimados de los modelos GAB y BET a 25, 35 y 45 °C en hojuelas con las proporciones de quinua: kiwicha: arracacha

Modelo	Constante	Temperatura de tratamiento		
		25 °C	35 °C	45 °C
GAB	Xm	0.073	0.076	0.061
	C	62.184	69.408	25.077
	K	0.660	0.639	0.810
	%E	10.368	1.463	3.228
	R ²	0.878	0.991	0.991
	%E promedio		5.020	
	R² promedio		0.953	
BET	Xm	0.063	0.060	0.057
	C	64.983	49841900.60	20.544
	%E	16.176	2.438	0.000
	R ²	0.541	0.988	1.000
	%E promedio		6.204	
	R² promedio		0.843	

En las Figuras 10, 11 y 12 se presentan las isotermas de adsorción con los modelos de GAB y BET en hojuelas con las proporciones de quinua: kiwicha: arracacha a los 25, 35 y 45 °C, respectivamente, donde se observa que los datos experimentales se ajustan más al modelo de GAB.

Según Prieto y Gordillo (2006) se han desarrollado expresiones matemáticas que se ajustan a los distintos datos experimentales obtenidos, teniendo como base las propiedades fisicoquímicas y termodinámicas. Los modelos matemáticos que se usan con mayor frecuencia son GAB (0.01 a 0.95 de actividad de agua) y BET (0.01 a 0.50 de actividad de agua), pero

el modelo matemático que describe los fenómenos termodinámicos del agua en los alimentos, es el modelo de GAB, en todo el espectro de las isotermas de adsorción.

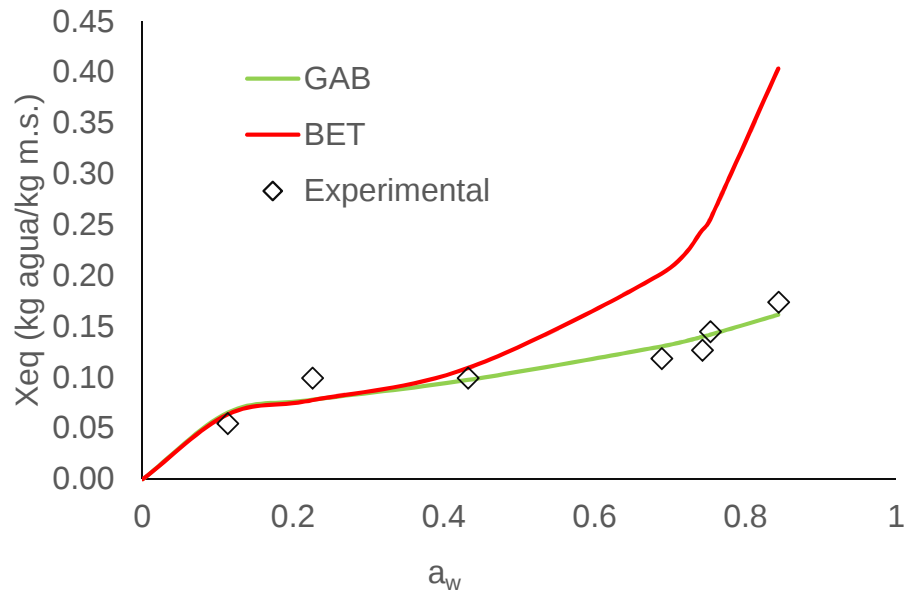


Figura 10. Isotermas de adsorción con GAB y BET en hojuelas con las proporciones de quinua: kiwicha: arracacha a 25 °C.

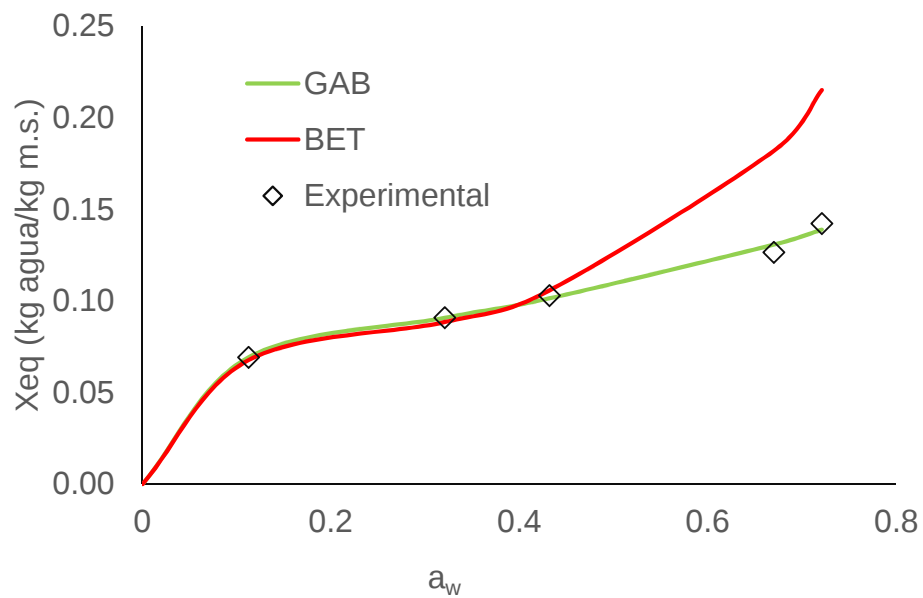


Figura 11. Isotermas de adsorción con GAB y BET en hojuelas con las proporciones de quinua: kiwicha: arracacha a 35 °C.

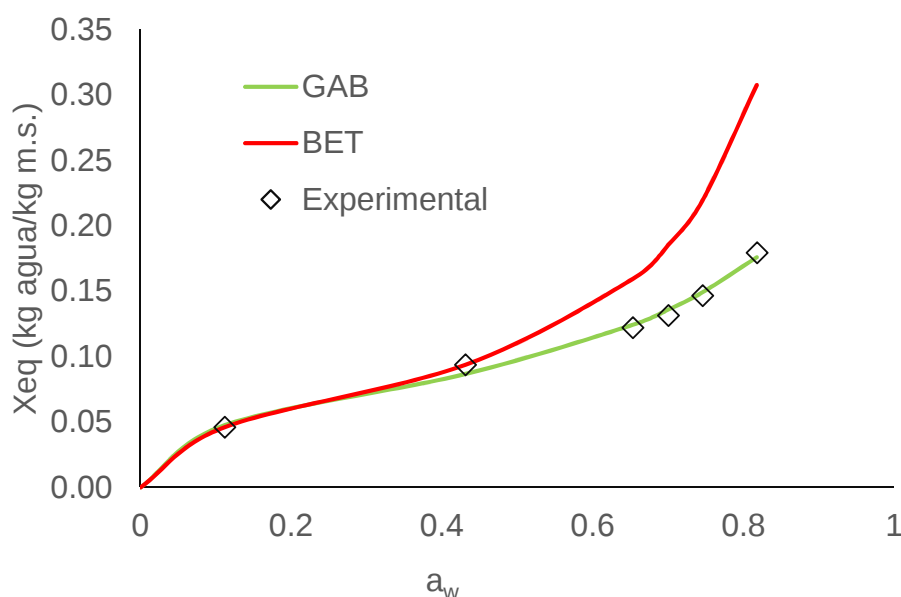


Figura 12. Isotermas de adsorción con GAB y BET en hojuelas con las proporciones de quinua: kiwicha: arracacha a 45 °C.

En la Figura 13 se presenta el modelamiento de las isotermas de adsorción con la ecuación de GAB en hojuelas, con las proporciones de quinua: kiwicha: arracacha a 25, 35 y 45 °C en el rango de actividad de agua de 0.0 a 1.0, donde se observa que con una actividad de agua de 0.0 a 0.62, el contenido de humedad en el equilibrio fue menor a la temperatura de 45 °C, además, entre las temperaturas de 25 y 35 °C el comportamiento fue similar; a partir de una actividad de agua de 0.65 la humedad en el equilibrio fue mayor a 45 °C, a comparación de las temperaturas de 25 y 35 °C; tendencias similares fueron reportadas por Gálvez y otros (2006) en isotermas de adsorción de harina de maíz, donde a actividad de agua mayor a 0.75 se observó un entrecruzamiento de las curvas, es decir, una independencia entre las temperaturas de trabajo (7, 22 y 45 °C), ya que, al parecer sobre 0.75 podría existir un aumento de la actividad enzimática y del movimiento entre moléculas de agua, carbohidratos y proteínas, del mismo modo Gil y otros (2013) observaron en leche descremada en polvo, un entrecruzamiento a actividad de agua superior a 0.5, indicando que esto

influye en la relación entre el calor isostérico de adsorción en función del contenido de humedad.

Según Djnedoubi y otros (2013) la ganancia de humedad es mínima a actividad de agua inferior a 0.6, cuando se supera esta cantidad a temperaturas elevadas, la adsorción de agua se ve afectada por la interacción del hidrógeno, con los grupos OH^- presentes en la superficie de los azúcares del alimento, donde el agua absorbida disuelve los cristales de azúcar, ocasionando la disociación de las interacciones de azúcar-azúcar, originando una solución, lo que ocasiona un aumento del contenido de humedad del alimento. A baja actividad de agua, el efecto no es muy fuerte para romper las moléculas de azúcar, pero a altos valores de actividad de agua, se producen mucho más disociaciones de las moléculas de azúcar.

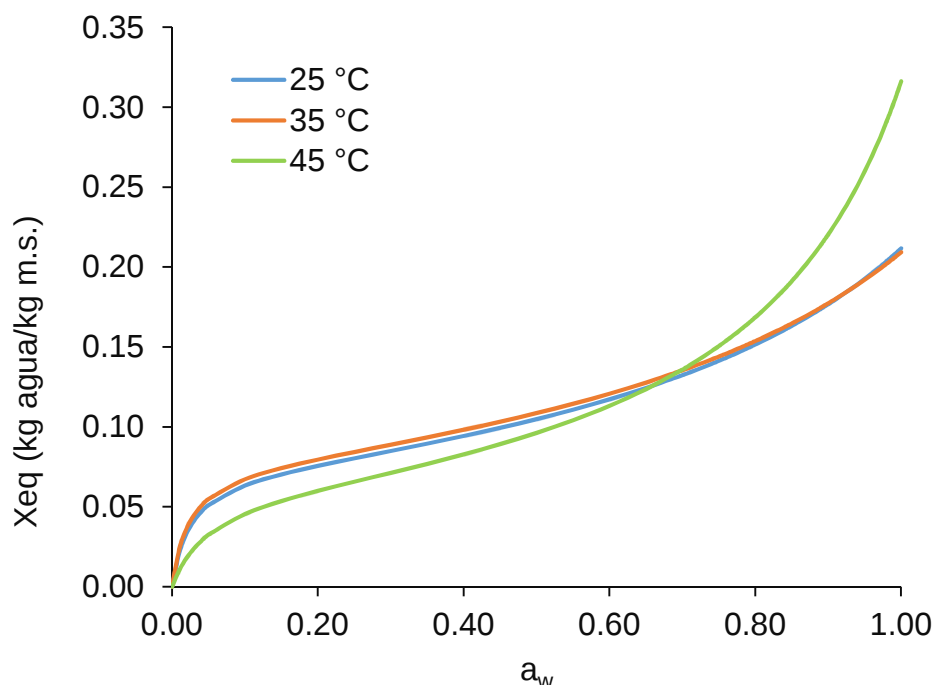


Figura 13. Modelamiento de isotermas de adsorción con ecuación de GAB en hojuelas con las proporciones de quinua: kiwicha: arracacha a 25, 35 y 45 °C.

Las isothermas de adsorción se caracterizan por una curva sigmoideal clásica (Figura 13), que puede ser descrita en término de los diferentes niveles de adsorción, esta isoterma es de tipo II, de forma sigmoidea o tipo S, de las cinco establecidas por Van der Waals; las cuales son las más frecuentes en alimentos (Gálvez y otros, 2006; Pulla y otros, 2011; Gil y otros, 2013). Se observa que durante el primer nivel de adsorción de agua (a baja actividad de agua), se forma una monocapa, que se fija sobre grupos polares de alta energía de enlace (del tipo $-\text{CO}$, $-\text{COO}^-$ y $-\text{NH}_3^+$) de los constituyentes hidrofílicos (almidones, proteínas y pentosas) de las hojuelas, mediante atracciones electrostáticas, enlaces dipolares y enlaces de hidrógeno. Es importante señalar que los almidones en estas hojuelas, han sufrido modificaciones y su capacidad de adsorción se ha incrementado a actividades de agua bajas, como se observa en los valores obtenidos de la monocapa (0.073, 0.076 y 0.061 g agua/g m.s., para 25, 35 y 45 °C, respectivamente); esta adsorción ocurre inicialmente por formación de una monocapa de agua, alrededor de los enlaces iónicos de la superficie del producto (Gil y otros, 2013). A valores de actividad de agua superiores, la adsorción de agua está asociada a los fenómenos de condensación a nivel de poro, de fisuras y de los capilares de las partículas que, entran en un hinchamiento parcial desenmascarando nuevos sitios polares. Eso se traduce en una fuerte adsorción de agua y un incremento en la pendiente de las isothermas de adsorción, siendo más notorio cuando la temperatura es alta (Bell y Labuza, 2000; Prieto y Gordillo, 2006). Finalmente, para muy altos contenidos de agua, hay un atrapamiento mecánico de la misma. Estas fases pueden solaparse y difieren entre los distintos tipos de alimentos, dependiendo de su composición y estructura. La obtención y modelado de las isothermas, es de suma importancia para el análisis de las condiciones de almacenamiento y para predecir la vida útil de un producto (Gil y otros, 2013).

Aviara (2002) señala que con el aumento de la temperatura, ocurren daños en los puntos activos de la unión entre el agua y la fase sólida del alimento; se reducen los puntos activos en la superficie del alimento donde se unen las moléculas de agua, debido a cambios químicos y físicos (reducción de los enlaces de hidrógeno).

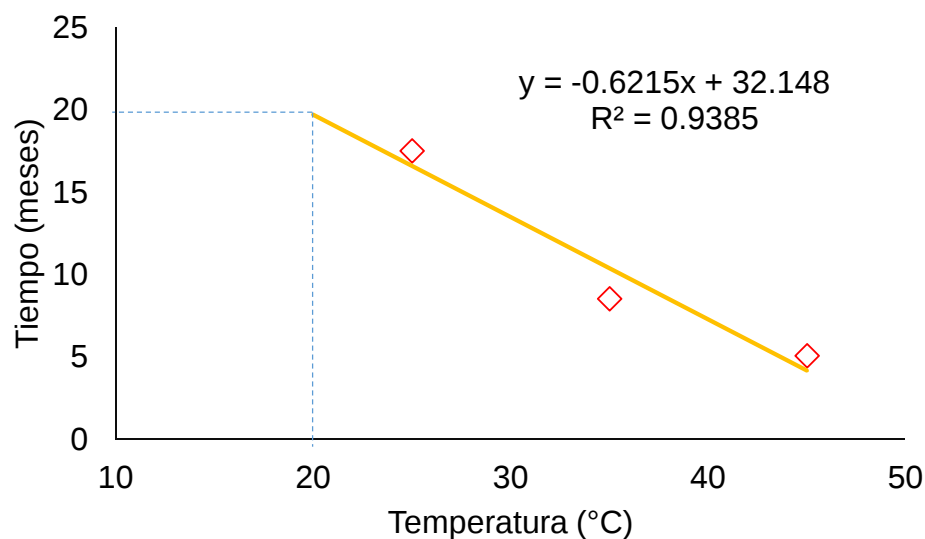
4.4.3. Determinación de la vida útil de hojuelas con las proporciones de quinua: kiwicha: arracacha

Para la determinación de la vida útil de hojuelas con las proporciones de quinua, kiwicha y arracacha (Cuadro 18) se utilizó el modelo de Heiss y Eichner (ecuación 3), se tuvo en consideración la humedad inicial la cual fue de 4.936% en base húmeda, siendo en base seca 0.052 kg agua/kg m.s. (Anexo 11), la humedad de seguridad (crítica) que según la ficha técnica de alimentos del Programa Nacional de Alimentación Escolar Qali Warma (2016) para hojuelas de quinua y kiwicha de 13.5% (0.1561 kg agua/kg m.s.), la humedad en equilibrio en la ciudad de Trujillo (85% HR, según AccuWeather, 2016); el contenido (150 g), espesor (50 μm), permeabilidad ($1.85\text{E-}06$ kg agua/ $\text{m}^2\text{.Pa.día}$, Anexo 10), área (0.030 m^2), peso de materia seca (W_s) el cual fue de 0.143 kg.m.s. (Anexo 4) y el material del envase (trilaminados: polipropileno biorientado + nylon + polietileno de baja densidad); con referencia a las pendientes de la isoterma entre humedad de seguridad y la de equilibrio (S) se usó los datos del modelamiento con la ecuación de GAB (Figura 13 y Anexo 3) el cual fue de 0.240, 0.224 y 0.420 correspondiente a cada una de las temperaturas; donde el tiempo de vida útil estimado fue de 526, 257 y 153 días, siendo 18, 9 y 5 meses para los 25, 35 y 45 °C, respectivamente.

Cuadro 18. Parámetros para la determinación de vida útil en hojuelas con las proporciones de quinua: kiwicha: arracacha a 25 35 y 45 °C

Parámetro	Temperatura (°C)		
	25	35	45
Xc (kg agua/kg m.s.)	0.156	0.156	0.156
Xe (kg agua/kg m.s.) a 85% HR	0.163	0.165	0.191
Xi (kg agua/kg m.s.)	0.052	0.052	0.052
Ks (kg agua/m ² .Pa.día)	1.85E-06	1.85E-06	1.85E-06
A (m ²)	0.030	0.030	0.030
Ws (kg.m.s.)	0.143	0.143	0.143
Po (Pa)	3173.073	5626.205	9558.880
S	0.240	0.224	0.420
Espesor (μm)	50	50	50
Tiempo de vida útil (días)	525.9	256.8	153.0
Tiempo de vida útil (meses)	17.5	8.6	5.1
Tiempo de vida útil (años)	1.5	0.7	0.4

Teniendo en cuenta el tiempo estimado a 25, 35 y 45 °C, se realizó una extrapolación (Figura 14) donde el tiempo de vida útil estimado a 20 °C fue de 592 días (1 año con 8 meses).



Temperatura (°C)	Días	Meses	Años
20	591.5	19.7	1.6

Figura 14. Determinación de vida útil en hojuelas con las proporciones de quinua: kiwicha: arracacha a 20 °C.

Revelo (2010) determinó el tiempo de vida útil en hojuelas de maíz y quinua (50:50%) envasados en polipropileno biorientado (BOPP), aplicando condiciones aceleradas y evaluando el cambio en la actividad de agua durante el almacenamiento, donde el tiempo de vida útil estimado a 20 °C fue de 124 días (aproximadamente 4 meses). Siendo este tiempo de vida útil estimado menor a los reportados en esta investigación debido al tipo de empaque (trilaminados).

Guevara (2015) mediante el modelo de Heiss y Eichner, basado en un factor crítico de condiciones de almacenamiento dadas (80% HR), estimó el tiempo de vida útil de hojuelas de quinua, siendo 10.3 y 8.6 meses a temperaturas de 25 y 45 °C, respectivamente.

Se observa que el tiempo de vida útil disminuyó al incrementarse la temperatura de almacenamiento, debido principalmente a que los polímeros como el polietileno y polipropileno, al ser sometidos a un incremento de temperatura, presentan una disminución del coeficiente de solubilidad (concentración del vapor de agua en el film en equilibrio con la presión externa) y un incremento del coeficiente de difusión (movilidad de las moléculas del vapor de agua en el polímero), debido al aumento de movilidad de los segmentos del polímero (polietileno y polipropileno) y al incremento en el nivel energético de las moléculas del vapor de agua, como resultado, la permeabilidad de la película plástica al vapor de agua se ve incrementada (Graciano y otros, 2006).

Jiménez (2008) determinó el tiempo de vida útil en hojuelas elaboradas con surimi de jurel, utilizando la cinética del deterioro y la ecuación de Arrhenius, donde evaluó el efecto de las concentraciones de antioxidantes butil-hidroxi-tolueno (BHT) (0, 0.0125 y 0.020%) y temperaturas de almacenamiento (30, 35 y 40 °C), observó que a mayores temperaturas disminuyó la calidad de las hojuelas y mientras que altas concentraciones del antioxidante BHT, favorecieron a mantener la calidad del producto y fueron adecuados para controlar la rancidez. Los tiempos de vida útil por predicción para las temperaturas de almacenamiento de 25 y 38 °C, fueron de 26 y 25 días aproximadamente en cada caso.

4.5. Propiedades termodinámicas en hojuelas con las proporciones de quinua: kiwicha: arracacha

En la Figura 15 se muestra la representación lineal de $\ln(a_w)$ frente $1/T$ de la ecuación de Clausius-Clayperon (ecuación 4) para un valor fijo de humedad en equilibrio (inicial, monocapa y de seguridad). Con la pendiente de cada línea recta ($-\Delta H/R$) se determinó el calor isostérico total de sorción en hojuelas con las proporciones de quinua: kiwicha: arracacha (Gálvez y

otros, 2006; Ayala, 2011). En el Anexo 5 se muestra el procedimiento para la determinación el calor isostérico total.

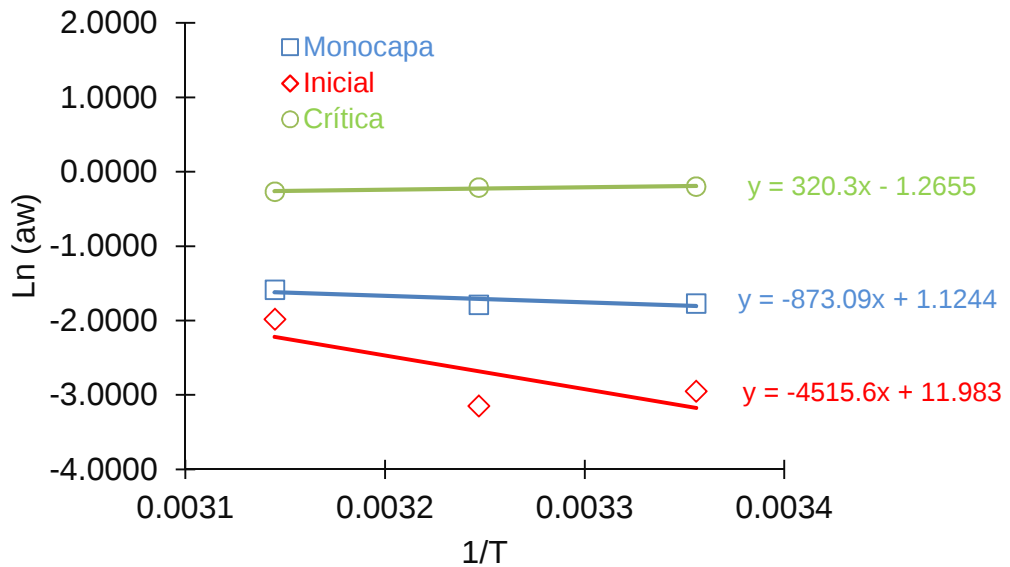


Figura 15. $\ln(a_w)$ frente $1/T$ para el cálculo del calor isostérico total de sorción en hojuelas con las proporciones de quinua: kiwicha: arracacha.

En la Figura 16 se presenta el comportamiento del calor isostérico total de sorción (ΔH), frente al contenido de humedad en equilibrio en hojuelas con las proporciones de quinua: kiwicha: arracacha. Se observa que el calor isostérico total de sorción (ΔH) disminuyó con el aumento del contenido de humedad en equilibrio (inicial, monocapa y de seguridad), variando desde 37.54 hasta 2.66 kJ/mol, para humedades entre 0.052 y 0.156 kg agua/kg m.s., esto indica que a bajos valores de contenido de humedad en equilibrio, existe una mayor interacción solido-vapor de agua en los sitios activos de unión en la superficie del producto, mientras que al aumentar la humedad, el ΔH decreció, debido a que el agua ocupa menos sitios activos ocasionando una reducción en la interacción de energía entre las moléculas de agua y el material alimenticio (disminución de las fuerzas de enlace) (Ayala, 2011; Pulla y otros, 2011).

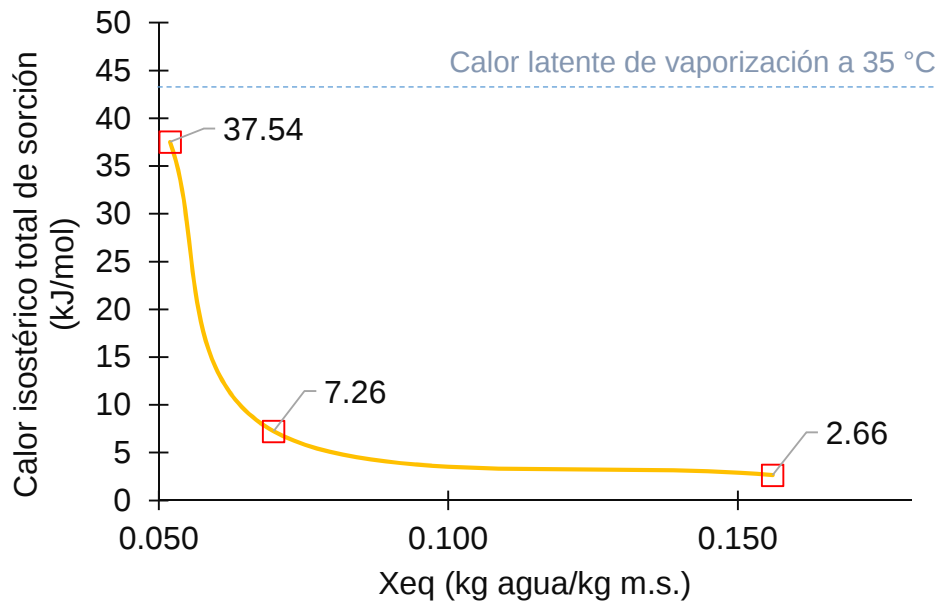


Figura 16. Calor isostérico total de sorción frente al contenido de humedad en equilibrio en hojuelas con las proporciones de quinua: kiwicha: arracacha.

Este comportamiento fue observado por (Ayala, 2011) en isotermas de sorción de harina de yuca, donde el ΔH disminuyó desde 118.84 hasta 45.20 kJ/mol, para humedades entre 0.050 y 0.350 kg agua/kg m.s. Del mismo modo Gálvez y otros (2006) observaron en harina de maíz una disminución de ΔH desde 21 a 6 kJ/mol a medida que aumentaba la humedad en equilibrio de 0.07 a 0.21 kg agua/kg m.s.

Algunos autores explican que el aumento del ΔH a bajos valores de contenido de humedad, se debe posiblemente a la fuerte resistencia al movimiento del agua desde el interior de la superficie de las muestras (Ayala, 2011). Otros investigadores argumentan que se debe posiblemente a la existencia de sitios polares altamente activos en la superficie del material (alimento), que unidos con las moléculas de agua forman la llamada capa monomolecular; además, afirman que para eliminar estas

moléculas de agua se requiere alta cantidad de energía (Moreira y otros, 2008).

Asimismo se observó, que los valores de ΔH en todo el intervalo de contenido de humedad en equilibrio, son menores que el calor de vaporización del agua pura a 35 °C (temperatura promedio de las tres isotermas), el cual fue de 43.52 kJ/mol; lo que indica que la energía de interacciones de las moléculas de agua en los sitios de adsorción (puntos activos) en la superficie del sólido, es menor, que la energía a la cual se mantienen las moléculas de agua pura en la fase líquida (Gálvez y otros, 2006; Ayala, 2011).

El conocimiento del calor isostérico total de sorción (ΔH), a un contenido de humedad en equilibrio constante en procesos de adsorción, proporciona información sobre el estado del agua en su interacción con la fase sólida del alimento y, por tanto, constituye una medida de la estabilidad física, química y microbiológica de los alimentos a determinadas condiciones de almacenamiento (McMinn y Magee, 2003).

En la Figura 17 se tiene al calor isostérico neto de sorción (Q_s), frente al contenido de humedad en equilibrio (X_{eq}), en hojuelas con las proporciones de quinua: kiwicha: arracacha. Se observa que Q_s (obtenido con la ecuación 5), disminuyó con el aumento del contenido de humedad en equilibrio (inicial, monocapa y de seguridad), variando desde -5.98 hasta -40.86 kJ/mol, para humedades entre 0.052 y 0.156 kg agua/kg m.s. En el Anexo 6 se muestra el procedimiento para la determinación de Q_s .

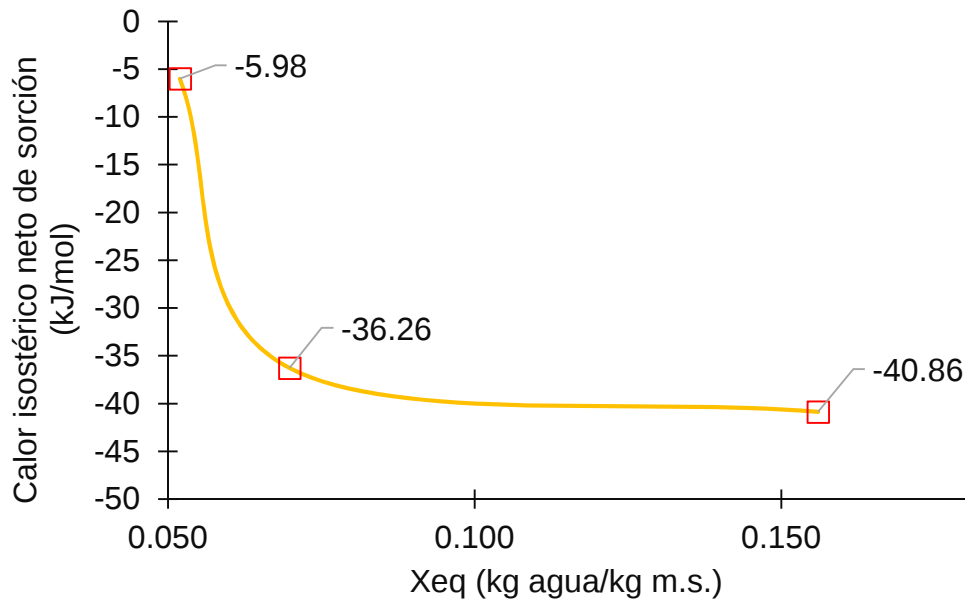


Figura 17. Calor isostérico neto de sorción frente al contenido de humedad en equilibrio en hojuelas con las proporciones de quinua: kiwicha: arracacha.

El Q_s para bajos contenidos de humedad es mayor, esto indica el cambio gradual del agua ligada como monocapa al agua ligada débilmente formando multicapas, al agua no ligada al sólido (libre) y al agua de relleno de los capilares (Gil y otros, 2014). Según Pulla y otros (2011) valores de calor neto de sorción más negativos, indican un mayor grado de agua ligada a la superficie del alimento.

En la Figura 18 se tiene a los valores de las propiedades termodinámicas de entalpía (ΔH), energía libre de Gibbs (ΔG) y entropía (ΔS) de sorción, frente a X_{eq} en hojuelas con las proporciones de quinua: kiwicha: arracacha, obtenidas con las ecuaciones 6, 7, 8 y 9. Se observa que a medida que aumentó el X_{eq} de 0.052 a 0.156 kg agua/kg m.s., la entalpía fue de -37542.70 a 2662.97 J/mol, la energía libre de Gibbs de -68227.71 a 5903.56 J/mol y la entropía disminuyó de 99.63 a -10.52 J/mol.K, siendo

este último inversamente proporcional a la entalpía y a la energía libre de Gibbs.

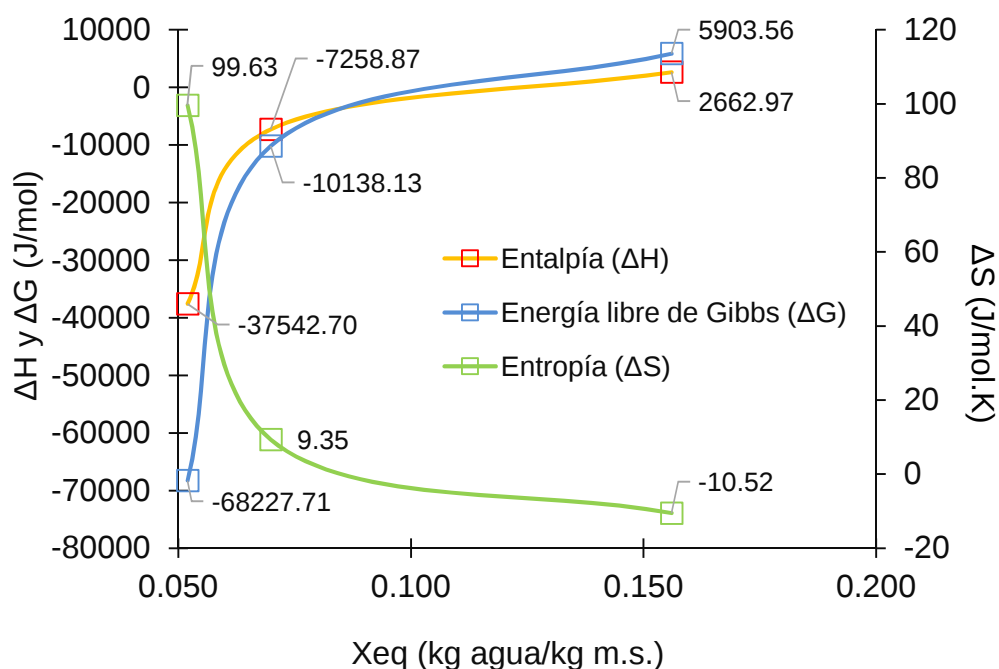


Figura 18. Entalpía, energía libre de Gibbs y entropía de sorción frente al contenido de humedad en equilibrio en hojuelas con las proporciones de quinua: kiwicha: arracacha.

La entalpía o calor de adsorción isostérico (ΔH) es considerado como calor necesario para ganar agua; variaciones isostéricas del calor total debido al contenido de agua del producto, proporciona conocimientos acerca de la interacción y cambios de moléculas de agua con los constituyentes del alimento (Corrêa y otros, 2010).

Según Texeira y otros (2014), la entropía (ΔS) es el grado de orden o trastorno existente en el sistema de agua-producto, la entropía se puede asociar con las fuerzas de unión o de repulsión en el sistema y, es en relación con la disposición espacial de la relación de agua y producto (alimento).

La energía libre de Gibbs (ΔG), se relaciona con la energía requerida para transferir las moléculas de agua a partir de una superficie sólida, al estado de vapor o viceversa, o equivalente a la medición del trabajo realizado por el sistema, para llevar a cabo el proceso de adsorción (Texeira y otros, 2014).

Para el cálculo de la temperatura isocinética, fue necesario trabajar con los valores negativos y positivos, con la cual fueron determinadas la entalpía (ΔH), energía libre de Gibbs (ΔG) y entropía (ΔS) (Anexo 7), además, esto permite evaluar que cuando la entropía (ΔS) disminuye con el aumento del contenido de humedad en equilibrio (en algunos casos llegando a ser negativa), existe indicios de la existencia de adsorción química o modificación estructural del adsorbente, en la superficie externa del alimento (Ayala y otros, 2015). Para el caso de la energía libre de Gibbs, valores negativos indican que el proceso es espontáneo, y los valores positivos son considerados como no espontáneos (Texeira y otros, 2014).

Para determinar la temperatura isocinética se graficó la entalpía (ΔH) en función a la entropía (ΔS) (Figura 19), a partir de los valores obtenidos en la Figura 18. Estos valores fueron correlacionados de acuerdo a la ecuación 10.

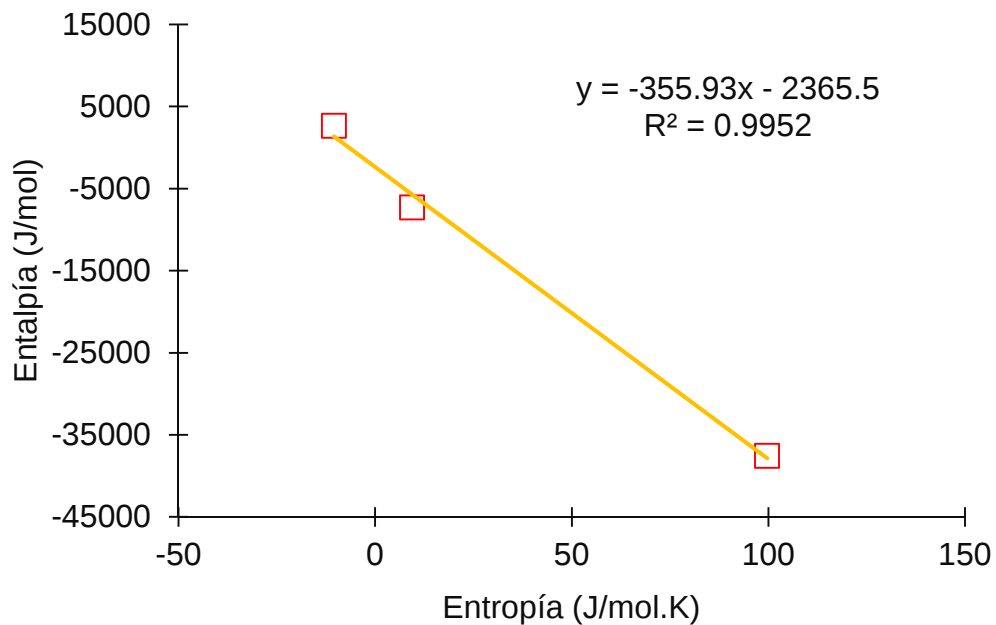


Figura 19. Entalpía frente a entropía en hojuelas con las proporciones de quinua: kiwicha: arracacha.

A partir de la regresión (Figura 19) se obtuvo la pendiente, siendo esta la temperatura isocinética (T_B) con valor de 355.93 K (en valor absoluto), representando la temperatura a la cual todas las reacciones en la series de sorciones ocurren a la misma velocidad (Goula y otros, 2007). Además la temperatura media armónica (T_{hm}) fue de 307.78 K (obtenida a partir de la ecuación 11). Existiendo un patrón de compensación química lineal ya que $T_B \neq T_{hm}$, además, $T_B > T_{hm}$, por lo que el proceso tiene impulso entálpico (Goula y otros, 2007).

V. CONCLUSIONES

Existió efecto significativo de la mezcla de las diez proporciones de quinua: kiwicha: arracacha en la aceptabilidad general y carga compresiva.

El modelo cuadrático representó el comportamiento de la aceptabilidad general y carga compresiva con R^2 de 89.2 y 97.8%, respectivamente, en hojuelas con las proporciones de arracacha: quinua: kiwicha.

La combinación óptima de harina de arracacha al 51.09, harina de quinua al 37.96 y harina de kiwicha al 10.95 permitió optimizar la aceptabilidad general, con mayor calificación de 6.03 (valor aproximado a 6 = calificación de “Me agrada poco”) y adecuada carga compresiva de 10.88 N, en hojuelas.

El modelo de GAB representó el comportamiento de la adsorción en hojuelas con R^2 global de 0.953 y error porcentual medio de 5.02%, reportando valores de monocapa de 0.073, 0.076 y 0.061 g agua/100 g.m.s. para los 25, 35 y 45 °C de almacenamiento, respectivamente.

El tiempo de vida útil estimado para las hojuelas a 20 °C fue de 592 días (1 año con 8 meses).

VI. RECOMENDACIONES

Evaluar el contenido nutricional de hojuelas con las proporciones de arracacha: quinua: kiwicha.

Utilizar saborizantes (cacao, miel y vainilla) y edulcorante (stevia) en las hojuelas con las proporciones de arracacha: quinua: kiwicha, con la finalidad de que sean más aceptables sensorialmente por los consumidores.

Realizar experiencias sobre vida útil con pruebas aceleradas utilizando el método de punto de corte y supervivencia del más apto.

VII. BIBLIOGRAFIA

Abugoch, L., Tapia, C., Villamán, M., Yazdani, M., Díaz, M. 2011. Food Hydrocolloids, 25: 879 – 886.

Al-Muhtaseb, A., McMinn, W. y Magee, T., 2002. Moisture sorption isotherm characteristics of food products: A Review. Food and Bioproducts Processing, 80(2):118-128.

AccuWeather. 2016. Humedad relativa en la ciudad de Trujillo, Perú. Recuperado de: <http://www.accuweather.com/es/pe/trujillo/258353/hourly-weather-forecast/258353>

Anzaldúa-Morales, A. 2005. La evaluación sensorial de los alimentos en la teoría y la práctica. Editorial Acribia. 2^{da} edición. Zaragoza, España.

A.O.A.C. 2000. Official Methods of Analysis 17th Edition. Determinación de la humedad de un alimento por un método gravimétrico indirecto por desecación. Estados Unidos de America.

Aviara, N., Ajibola, O. y Oni, S., 2004. Sorption equilibrium and thermodynamic characteristics of soya bean. Biosystems Engineering, 87(2):179–190.

Ayala, A. 2011. Estimación de las isothermas de adsorción y del calor isostérico en harina de yuca. Biotecnología en el sector Agropecuario y Agroindustrial, 9:88 – 96.

Ayala, A. 2015. Thermodynamic properties of moisture sorption in cassava flour. Dyna, 83(197):139 – 145.

Bell, L. y Labuza, T. 2000. Moisture sorption. Practical aspects of isotherm measurement and use. 2^{da} Edition. Ed. AACC. pág. 62.

Bermeo, M. 2013. Obtención de hojuelas a partir de la lenteja. Tesis para obtener el Título de Ingeniero Químico. Universidad de Guayaquil, Ecuador.

Blas, R. 2009. Problemática del cultivo y valor agregado de la arracacha.

Recuperado de:

http://www.telecentros.pe/img_upload/3ebf28670cc26d6c98d026abe0126c40/Problem_tica_del_cultivo_de_la_arracha.pdf

Castañeda, E. 2015. Efecto de tres sustituciones de harina de trigo por harina de quinua (*Chenopodium quinoa*) sobre el contenido de proteína, color, firmeza y aceptabilidad general de nuggets de pollo. Tesis para obtener el Título de Ingeniero en Industrias Alimentarias. Universidad Privada Antenor Orrego. Trujillo, Perú.

Casp A. y Abril J. 2003. Procesos de conservación de alimentos. 2º Edición. Editorial Mundi-Prensa. Madrid, España.

Castro, E. y De Hombre, R. 2007. Parámetros mecánicos y textura de los alimentos. Universidad de Chile. Santiago de Chile.

Chávez, O. 2008. Estudio de pre-factibilidad para la Instalación de una planta procesadora de hojuelas de maca enriquecida con quinua de diferentes sabores a frutas. Tesis para optar el Título de Ingeniero Industrial. Universidad de Lima. Perú.

Chávez, M., Maragalef, M., Fili, J., Marrupe, S. y Sánchez, V. 2009. Punto de corte sensorial de leche de caprina pasteurizada. Universidad Nacional de Salta. Congreso CYTAL, ISBN 978-987-22165-3-5. 8(13), Argentina.

COE SAC – CONTOMETROS & ENVOLTURAS. 2015. Ficha técnica de envase trilaminado. Lima, Perú.

Collazos, C., Alvistur, E., Vásquez, J., Quiroz, A. y Herrera, N. 1996. Tablas Peruanas de Composición de Alimentos. Ministerio de Salud. Lima, Perú.

Corrêa, C., Oliveira, H., Botelho, M., Goneli, L., Carvalho, M. Modelagem matemática e determinação das propriedades termodinâmicas do café (*Coffea arabica* L.) durante o processo de secagem. *Ceres*, Viçosa, 57(5): 595 - 601.

Diario Gestión. 2015. MINAGRI: La quinua representa el 86% de la producción de los granos andinos en el Perú. Lima, Perú. Recuperado de: <http://gestion.pe/economia/minagri-quinua-representa-86-produccion-granos-andinos-peru-2135792>

Díaz, L. 2013. Efecto de la sustitución de grasa de cerdo por la formulación de almidón de arracacha y fibra de avena sobre la textura, retención de agua, color y aceptabilidad de salchicha tipo Viena. Tesis para obtener el Título de Ingeniero en Industrias Alimentarias. Universidad Privada Antenor Orrego. Trujillo, Perú.

DIGESA, 1998. Reglamento sobre Vigilancia y Control Sanitario de Alimentos y Bebidas. Ministerio de Salud. Lima, Perú.

Djendoubi, M., Bonazzi, C., Kechaou, N., Courtois, F. 2013. Isotermas de sorción y transición vitrea de peras y manzanas osmodeshidratadas. *Journal Food Engineering*, 91:121-128.

Escobar, B., Estévez, A., Fuentes, C. y Venegas, F. 2009. Uso de harina de cotiledón de algarrobo (*Prosopis chilensis* (Mol) Stuntz) como fuente de proteína y fibra dietética en la elaboración de galletas y hojuelas fritas. *Archivos Latinoamericanos de Nutrición*, 59(2):191 – 198.

FAO. 2011. La quinua: cultivo milenario para contribuir a la seguridad alimentaria mundial. Recuperado de: http://www.fao.org/fileadmin/templates/aiq2013/res/es/cultivo_quinua_es.pdf

FAO. 2013. Quinoa, 2013 año internacional, un futuro sembrado hace miles de años. Food and Agriculture Organization of the United Nations Regional Office for Latin America and the Caribbean. Santiago de Chile. Recuperado de: <http://www.fao.org/quinoa-2013/what-is-quinoa/nutritional-value/es/>

Gálvez, A., Aravena, E. y Moncada, R. 2006. Isotermas de adsorción en harina de maíz (*Zea mays* L.). Ciencia y Tecnología de Alimentos. 26(4): 821–827.

Gavidia, A. 2015. Efecto de la temperatura en isotermas de adsorción de harina de maca (*Lepidium meyenii*). Tesis para obtener el Título de Ingeniero Agroindustrial. Universidad Nacional de Trujillo. Perú.

García, C., Chacón, G. y Molina, M. 2011. Evaluación de la vida útil de una pasta de tomate mediante pruebas aceleradas por temperatura. Revista: Ingeniería 21 (2):31-38, ISSN: 1409-2441. San José, Costa Rica.

García, A. y Pacheco, E. 2007. Evaluación de galletas dulces tipo wafer a base de harina de arracacha (*Arracacia xanthorrhiza* B.). Revista: Facultad de Agronomía, 60(2):4195-4212.

Gil, J., Muratona, S., Yacanto, P., Soteras, E., Abaca, C. y Sustersic, M. 2013. Isotermas de adsorción y desorción de agua en leche descremada en polvo. Avances en Ciencias e Ingeniería. 4(1):51 – 59.

Guevara, C. 2015. Efecto de la temperatura en isotermas de adsorción de quinua (*Chenopodium quinoa Willd*) en hojuelas. Tesis para obtener el Título de Ingeniero Agroindustrial. Universidad Nacional de Trujillo. Perú.

Goula, A., Karapantsios, T., Achilias, D. y Adamopoulos, K. 2007. Water sorption isotherms and glass transition temperatura of spray dried tomato pulp. Journal of Food Engineering. 85:73–83.

Graciano, A., Peralta, E. y Soto, H. 2006. Permeabilidad y vida útil de los alimentos. Alfa Editores Técnicos. D.F., México.

Herrera, S. y Montenegro, A. 2012. El amaranto: prodigioso alimento para la longevidad y la vida. *Kalpana* 8(9): 50 – 66, ISSN: 1390-5775. Ecuador.

Higinio, V. 2011. Elaboración de una mezcla instantánea de arroz, cañihua y kiwicha por el método de extrusión. Proyecto de investigación. Universidad Nacional del Callao. Lima, Perú.

Hough, G. y Fiszman, S. 2005. Estimación de la vida útil sensorial de los alimentos. 1^{ra} edición. Editorial CYTED. Madrid, España.

Ikhu, D., 2006. Comparision of the isotherm characteristics of two cassava products. *International Journal of the Food Properties*, 9(2): 167-177.

Jiménez, F. 2005. Características nutricionales de la arracacha (*Arracacia xanthorrhiza*) y sus perspectivas en la alimentación. Recuperado de: http://www.faviolajimenez.com/wp-content/uploads/2012/08/001_arracacha.pdf

Jiménez, J. 2008. Efecto de la concentración de antioxidante y la temperatura de almacenamiento en la vida útil de las hojuelas elaboradas con surimi de jurel (*Trachurus picturatus murphyi*). Tesis para obtener el grado de Magister en Tecnología de Alimentos. Universidad Nacional de Trujillo. Perú.

Maya, D. y Ricaurte, S. 2007. Diseño de un modelo alternativo para la cadena de abastecimiento de cereales preparados dirigido a la población de escasos recursos. Tesis para optar el Título de Ingeniero Industrial. Pontificia Universidad Javeriana. Bogotá, Colombia.

McMinn, W. y Magee, T. 2003. Thermodynamics properties of moisture sorption of potato. *Journal Food Engineering*, 60:157 – 165.

Montañez, C., y Pérez, I. 2007. Elaboración y evaluación de una salchicha tipo Frankfurt con sustitución de harina de quinua desaponificada (*Chenopodium quinoa* Wild). Tesis para obtener el Título de Ingeniero de alimentos. Universidad de La Salle. Bogotá, Colombia.

Montgomery, D. 2011. Diseño y análisis de experimentos (2^{da} ed.). Limusa. México, D.F.

Moreira, R., Chenlo, F., Torres, M. y Vallejo, N. 2008. Thermodynamic analysis of experimental sorption isotherms of loquat and quince fruits. *Journal Food Engineering*, 88: 514 – 521.

Pagador, S. 2004. Efecto de la variación de la velocidad de rotación y presión de vapor de un secador de tambor rotatorio atmosférico adaptado en la humedad de hojuelas de camote (*Ipomoea batata*) con quinua (*Chenopodium quinoa*) y kiwicha (*Amaranthus caudatus*). Tesis para obtener el Título de Ingeniera Agroindustrial. Universidad Nacional de Trujillo. Perú.

Pagno, C., Costa, T., de Menezes, R., Benvenuti, E., Hertz, P., Matte, C., Tosati, J., Monteiro, A., Rios, A., Flôres, A. 2015. Development of active biofilms of quinoa (*Chenopodium quinoa* W.) starch containing gold nanoparticles and evaluation of antimicrobial activity. *Food Chemistry*, 173: 755 – 762.

Poaquiza, D. determinación de isothermas y calor de humedad de panlea granulada producida por las organizaciones pañaleras de Ingapi y Pacto. Tesis para obtener el Título de Ingeniera Agroindustrial. Escuela Politécnica Nacional. Quito, Ecuador.

Prieto, F. y Gordillo, A. 2006. Evaluación de las isothermas de sorción en cereales para desayuno. *Superficies y Vacío*. 19(1):12-19.

Programa Nacional de Alimentación Escolar Qali Warma. 2016. Fichas técnicas de alimentos. 114–119.

Pulla, P., Díaz, J. y Cáceres, B. 2011. Isothermas de adsorción del ají seco (*Capcsicum annuum* L.) “ojito de pescado” de madre de Dios, Perú. *Revista Biodiversidad Amazónica*. Universidad Nacional de San Antonio Abab del Cusco.

Revelo, A. 2010. Desarrollo y evaluación de las tecnologías de un snack laminado a partir de quinua. Tesis para obtener el Título de Ingeniera Agroindustrial. Escuela Politécnica Nacional. Quito, Ecuador.

Reyes, L. 2014. Efecto de la sustitución de grasa por pulpa de mango (*Manguifera indica* L.) sobre la firmeza, color y aceptabilidad general de quesos. Tesis para obtener el Título de Ingeniera en Industrias Alimentarias. Universidad Privada Antenor Orrego. Trujillo, Perú.

Rodríguez, W. 2015. Efecto de dos sustituciones de cebada por quinua y de dos valores de pH inicial de maceración en las características fisicoquímicas y aceptabilidad general de una cerveza tipo Ale. Tesis para obtener el Título de Ingeniero en Industrias Alimentarias. Universidad Privada Antenor Orrego. Trujillo, Perú.

Sánchez, M., Quintero, A., Martínez, F., Meléndez, C. y Ruiz, M. 2014. Effect of different calcium sources on the antioxidant stability of tortilla chips from extruded and nixtamalized blue corn (*Zea mays* L.) flours. Food Science and Technology. 34(1): 43-149.

Seid, R., Hensel, O. y Har, F. 2012. Experimental evaluation of sorption isotherms of chili pepper an Ethiopian variety, Mareko Fana (*Capsicum annum* L.). Chemical Engineering Department, P.O. Box 1925, Bahir Dar, Ethiopia

Serna, S. 2011. Producción de cereales de desayuno mediante procesos tradicionales y de extrusión termoplástica. Quinto simposio internacional de innovación y desarrollo de alimentos. Departamento de Biotecnología e Ingeniería de Alimentos. Pág. 57. Monterrey, Uruguay.

Sierra Exportadora. 2014. Perfil comercial de la kiwicha. Recuperado de: http://www.sierraexportadora.gob.pe/perfil_comercial/KIWICHA.pdf

Sierra Exportadora. 2015. Orígenes e historia de la quinua. Lima, Perú. Recuperado de: <http://www.sierraexportadora.gob.pe/quinua/historia-y-caracteristicas/>

Sotelo, E. 2014. Efecto de la temperatura de incubación y porcentaje de sacarosa en las características fisicoquímicas y aceptabilidad general de una bebida fermentada a base de *Chenopodium quinoa* Wild (quinua) malteada. Tesis para obtener el Título de Ingeniero Agroindustrial. Universidad Cesar Vallejo. Trujillo, Perú.

Tapia, J. 2004. Efecto de la variación de la proporción de masa de pajuro (*Eritrina edulis*), harina de trigo (*Triticum aestivum*) y harina de maíz (*Zea mays*) en las características organolépticas y fisicoquímicas de hojuelas deshidratadas. Tesis para obtener el Título de Ingeniero en Industrias Alimentarias. Universidad Privada Antenor Orrego. Trujillo, Perú.

Teixeira, L., De Andrade, E. y Devilla, I. 2014. Calor isostérico, entropía y energía libre de Gibbs-Helmholtz de pepas de calabaza (*Curcubita moschata*). Centro de Convenções “Arquiteto Rubens Gil de Camillo”. Campo Grande, Brasil.

Togrul, H. y Arslan, N., 2007. Moisture sorption isotherms and thermodynamic properties of walnut kernels. Journal of Stored Products Research, 43(1):252-264.

Tolaba, M., Peltzer, M., Enriquez, N. y Pollio, M., 2004. Grain sorption equilibria of quinoa grains. Journal of Food Engineering, 61:365-371.

Ureña, M., D'arrigo, M. y Girón, O. 1999. Evaluación sensorial de los alimentos. Editorial Agraria. 1ra Edición. Lima, Perú.

Velasco, M. 2007. Elaboración de una bebida nutritiva a partir del malteado de quinua. Tesis para optar el Título de Ingeniero en Industrialización de Alimentos. Universidad Tecnológica Equinoccial. Quito, Ecuador.

Velásquez, L., Aredo, V. Caipo, Y. y Paredes, E. 2014. Optimización por diseño de mezclas de la aceptabilidad de una galleta enriquecida con quinua (*Chenopodium quinoa*), soya (*Glycine max*) y cacao (*Theobroma cacao* L.). Facultad Agronomía. 60(2):4195-4212.

Zakhia, N., Chuzel, G. y Griffon, D. 2002. Gari, a traditional cassava semolina in west Africa: its stability and shelf life and the role of water. cassava flour and starch: Progress in Research and Development, 21:176-183.

VIII. ANEXOS

Anexo 1. Puntuaciones de la prueba de aceptabilidad general el hojuelas de quinua, kiwicha y arracacha

Panelistas	T1	T2	T3	T4	T5	T6	T7	T8	T9	T10
1	5	8	5	6	5	4	4	3	3	2
2	3	5	2	6	5	7	3	3	5	5
3	3	6	1	3	5	2	2	3	6	4
4	1	7	2	4	4	7	6	4	7	4
5	1	6	3	4	3	4	5	4	4	3
6	5	7	4	5	6	5	4	1	5	2
7	5	7	5	5	6	7	6	6	6	7
8	5	5	2	2	2	3	3	3	6	2
9	3	6	4	5	5	5	5	4	5	4
10	3	7	3	3	3	7	5	4	6	4
11	2	9	6	6	7	8	6	7	8	7
12	2	5	5	5	7	7	6	5	7	6
13	1	7	5	4	6	6	5	3	4	4
14	5	6	3	5	3	3	5	6	7	4
15	8	3	2	2	3	7	4	7	5	6
16	1	8	3	5	4	6	3	4	7	5
17	2	6	3	5	3	4	3	3	3	2
18	2	5	3	4	4	5	4	4	3	3
19	2	8	4	5	5	7	6	5	7	6
20	2	5		3	4	4	5	6	9	8
21	2	7	2	5	6	9	7	5	8	6
22	2	6	6	6	7	8	7	7	8	6
23	5	8	2	6	6	3	6	6	8	6
24	1	6	3	3	5	6	4	4	6	4
25	7	3	4	5	5	4	6	3	5	7
26	7	7	5	4	5	8	7	8	6	6
27	6	7	3	3	4	3	4	7	3	5
28	7	6	5	5	7	6	5	4	5	7
29	8	7	3	5	3	6	3	4	7	6
30	4	4	2	5	4	5	4	5	5	4
31	4	8	5	3	5	6	5	4	6	5
32	5	6	3	7	5	8	7	5	2	7
33	5	3	4	4	7	4	5	6	3	5
34	5	5	1	1	3	7	5	5	8	4
35	4	3	1	1	5	3	2	4	4	4
36	5	6	5	5	5	5	5	4	4	4
37	5	7	3	3	3	3	2	2	2	2
38	2	6	4	4	5	6	4	6	7	7
39	8	8	5	6	7	6	7	5	6	6
40	2	8	5	5	6	5	5	6	8	7
Promedio	3.87	6.18	3.49	4.34	4.84	5.47	4.76	4.63	5.61	4.89

**Anexo 2. Ajuste de modelos para las isotermas de adsorción en
hojuelas de con las proporciones de quinua, kiwicha y
arracacha**

Modelo GAB a 25 °C

Parámetros	Estimados	Standard	t-value	p-value	Lo. Conf	Up. Conf
M0	0.073	0.021	3.437	0.026	0.014	0.131
C	62.184	147.084	0.423	0.694	-346.188	470.556
K	0.660	0.165	4.001	0.016	0.202	1.118

a_w	Xeq (g agua/g ms)			
	Observado	Predicho	Residual	E(%)
0.113	0.0546	0.0654	-0.0107	19.603
0.225	0.0993	0.0780	0.0212	21.406
0.432	0.0993	0.0975	0.0017	1.761
0.689	0.1183	0.1305	-0.0122	10.304
0.743	0.1265	0.1400	-0.0134	10.616
0.753	0.1448	0.1419	0.0029	2.004
0.843	0.1736	0.1616	0.0119	6.881
R²	0.878		Promedio	10.368

Modelo BET a 25 °C

Parámetros	Estimados	Standard	t-value	p-value	Lo. Conf	Up. Conf
M0	0.063	0.018	3.461	0.179	-0.169	0.296
C	64.983	338.854	0.192	0.879	-4240.560	4370.526

a_w	Xeq (g agua/g ms)			
	Observado	Predicho	Residual	E(%)
0.113	0.0546	0.0638	-0.0091	16.675
0.225	0.0993	0.0777	0.0216	21.749
0.432	0.0993	0.1093	-0.0100	10.103
R²	0.541		Promedio	16.176

Modelo GAB a 35 °C

Parámetros	Estimados	Standard	t-value	p-value	Lo. Conf	Up. Conf
M0	0.076	0.007	11.661	0.007	0.048	0.104
C	69.408	44.723	1.552	0.261	-123.022	261.837
K	0.639	0.064	9.979	0.010	0.363	0.914

a_w	Xeq (g agua/g ms)			
	Observado	Predicho	Residual	E(%)
0.113	0.069	0.0693	-0.00017	0.244
0.321	0.091	0.0908	0.00000	0.004
0.432	0.103	0.1014	0.00147	1.425
0.670	0.126	0.1307	-0.00434	3.437
0.721	0.142	0.1390	0.00314	2.207
R²	0.991		Promedio	1.463

Modelo BET a 35 °C

Parámetros	Estimados	Standard	t-value	p-value	Lo. Conf	Up. Conf
M0	0.06	0.002	0.000	0.000	0.041	0.080
C	49841900.6	0.000	0.000	0.000	49841900.6	49841900.6

a_w	Xeq (g agua/g ms)			
	Observado	Predicho	Residual	E(%)
0.113	0.0691	0.0677	0.0014	1.984
0.321	0.0908	0.0885	0.0023	2.575
0.432	0.1029	0.1057	-0.0028	2.754
R₂	0.988		Promedio	2.438

Modelo GAB a 45 °C

Parámetros	Estimados	Standard	t-value	p-value	Lo. Conf	Up. Conf
M0	0.061	0.006	10.329	0.002	0.042	0.079
C	25.077	14.265	1.758	0.177	-20.320	70.475
K	0.810	0.043	18.757	0.000	0.673	0.948

a_w	Xeq (g agua/g ms)			
	Observado	Predicho	Residual	E(%)
0.1116	0.0461	0.0476	-0.0015	3.244
0.4308	0.0938	0.0867	0.0071	7.539
0.6526	0.1224	0.1243	-0.0019	1.537
0.6999	0.1316	0.1359	-0.0043	3.304
0.7452	0.1467	0.1492	-0.0025	1.673
0.8174	0.1797	0.1760	0.0037	2.073
R²	0.991		Promedio	3.228

Modelo BET a 45 °C

Parámetros	Estimados	Standard	t-value	p-value	Lo. Conf	Up. Conf
M0	0.06	0.000	0.000	0.000	0.057	0.057
C	20.54	0.000	0.000	0.000	20.544	20.544

a_w	Xeq (g agua/g ms)			
	Observado	Predicho	Residual	E(%)
0.1116	0.0461	0.0461	0.0000	0.000
0.4308	0.0938	0.0938	0.0000	0.000
R²	1.000		Promedio	0.000

Anexo 3. Valores predichos del modelamiento GAB de las isothermas de adsorción en hojuelas de con las proporciones de quinua, kiwicha y arracacha

a_w	Xeq (g agua/g.m.s) predichos			a_w	Xeq (g agua/g.m.s) predichos		
	25 °C	35 °C	45 °C		25 °C	35 °C	45 °C
0.000	0.0000	0.0000	0.0000	0.790	0.1494	0.1518	0.1648
0.010	0.0214	0.0237	0.0104	0.795	0.1505	0.1528	0.1667
0.020	0.0334	0.0366	0.0180	0.800	0.1516	0.1539	0.1687
0.030	0.0412	0.0447	0.0239	0.810	0.1538	0.1559	0.1728
0.040	0.0468	0.0505	0.0286	0.811	0.1540	0.1561	0.1732
0.050	0.0510	0.0548	0.0325	0.820	0.1560	0.1581	0.1771
0.100	0.0633	0.0673	0.0454	0.820	0.1561	0.1581	0.1772
0.150	0.0702	0.0742	0.0536	0.830	0.1584	0.1603	0.1816
0.200	0.0756	0.0796	0.0600	0.840	0.1608	0.1626	0.1864
0.250	0.0803	0.0844	0.0657	0.845	0.1620	0.1637	0.1888
0.300	0.0849	0.0889	0.0713	0.850	0.1633	0.1649	0.1913
0.350	0.0895	0.0935	0.0769	0.890	0.1739	0.1749	0.2141
0.400	0.0943	0.0983	0.0828	0.893	0.1746	0.1755	0.2157
0.450	0.0994	0.1033	0.0893	0.895	0.1754	0.1762	0.2173
0.500	0.1049	0.1087	0.0963	0.900	0.1768	0.1775	0.2206
0.550	0.1108	0.1145	0.1042	0.910	0.1798	0.1803	0.2276
0.600	0.1172	0.1209	0.1133	0.920	0.1829	0.1831	0.2349
0.650	0.1244	0.1278	0.1237	0.930	0.1860	0.1861	0.2428
0.700	0.1324	0.1355	0.1360	0.940	0.1893	0.1891	0.2512
0.710	0.1341	0.1372	0.1387	0.950	0.1927	0.1922	0.2602
0.720	0.1359	0.1389	0.1415	0.960	0.1963	0.1954	0.2698
0.730	0.1376	0.1406	0.1445	0.970	0.1999	0.1988	0.2801
0.740	0.1395	0.1423	0.1475	0.980	0.2037	0.2022	0.2913
0.750	0.1414	0.1442	0.1507	0.983	0.2047	0.2031	0.2942
0.753	0.1419	0.1447	0.1517	0.985	0.2057	0.2040	0.2972
0.760	0.1433	0.1460	0.1540	0.990	0.2076	0.2058	0.3033
0.766	0.1445	0.1471	0.1561	0.993	0.2087	0.2067	0.3065
0.770	0.1453	0.1479	0.1574	0.993	0.2089	0.2069	0.3072
0.780	0.1473	0.1498	0.1610	0.995	0.2097	0.2076	0.3098
0.789	0.1492	0.1516	0.1644	0.998	0.2107	0.2085	0.3131
				1.000	0.2117	0.2095	0.3164

Xc: humedad de seguridad = 0.1561

a _w -seguridad a 25 °C	0.766
a _w -seguridad a 35 °C	0.811
a _w -seguridad a 45 °C	0.820

Xe: humedad de equilibrio a 85% HR

Xe-seguridad a 25 °C	0.1633
Xe-seguridad a 35 °C	0.1649
Xe-seguridad a 45 °C	0.1913

Para el cálculo de las pendientes se usó la siguiente formula:

$$\frac{X_{eq} - X_c}{a_{w-eq} - a_{wc}}$$

Donde:

X_{eq}: humedad de equilibrio a 85% HR

X_c: humedad de seguridad (crítica) para cada temperatura

a_{w-eq}: actividad de agua en el equilibrio (a_w = 0.85)

a_{w-c}: actividad de agua de seguridad (crítica) para cada temperatura

Pendiente 25 °C	0.24044
Pendiente 35 °C	0.22363
Pendiente 45 °C	0.42010

Anexo 4. Determinación de materia seca (Ws)

Para la determinación de la materia seca se usó la siguiente ecuación:

$$W_s = \frac{Pp * (100 - X_i)}{100}$$

Donde:

Ws: materia seca (kg)

Pp: peso de hojuelas envasadas, según presentación de 150 g (0.150 kg).

Xi: humedad inicial de 4.936% b.h. (0.0519 kg agua/kg m.s.).

Anexo 5. Determinación de calor isostérico en hojuelas con las proporciones de quinua, kiwicha y arracacha

Contenido de humedad en equilibrio inicial, monocapa y crítica en hojuelas con las proporciones de quinua, kiwicha y arracacha

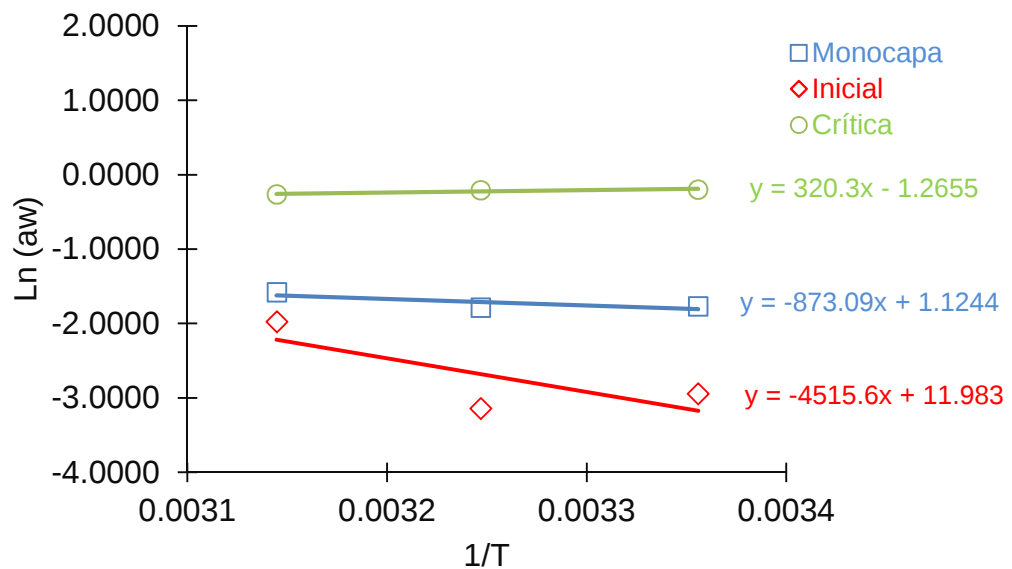
Humedad en equilibrio (kg agua/kg m.s.)	Temperatura (°C)		
	25	35	45
Inicial (Xi)	0.052	0.052	0.052
Monocapa (Xm)	0.073	0.075	0.061
Crítica (Xc)	0.156	0.156	0.156

Actividad de agua para la monocapa, inicial y crítica, obtenidas del modelamiento de las isotermas de GAB (Anexo 3) en hojuelas con las proporciones de quinua, kiwicha y arracacha

°C	a_w		
	Monocapa	Inicial	Crítica
25	0.1705	0.0526	0.8201
35	0.1677	0.0431	0.8108
45	0.2055	0.1385	0.7661

Valores de $\ln(a_w)$ e inversa de la temperatura absoluta ($1/T$) para la representación lineal de la ecuación de Clausius-Clayperon (ecuación 4) para un valor fijo de humedad en equilibrio (inicial, monocapa y crítica).

$\ln(a_w)$			$1/T$
Monocapa	Inicial	Crítica	
-1.76902	-2.94504	-0.19833	0.00336
-1.78558	-3.14423	-0.20973	0.00325
-1.58231	-1.97688	-0.26644	0.00314



Pendiente de cada línea recta ($-\Delta H/R$) con el cual se determinó el calor isostérico total de sorción en hojuelas con las proporciones de quinua,

kiwicha y arracacha, para lo cual se multiplico la pendiente por la constante universal de los gases (8.314 kJ/kmol.K).

	$\Delta H/R$	ΔH (kJ/mol)
Inicial	4515.6	37.54
Monocapa	873.1	7.26
Crítica	320.3	2.66

Anexo 6. Determinación de calor isostérico neto en hojuelas con las proporciones de quinua, kiwicha y arracacha

Se determinó el calor isostérico neto de contenido de humedad en equilibrio inicial, monocapa y crítica en hojuelas con las proporciones de quinua, kiwicha y arracacha mediante la ecuación 5, donde se restó al calor total de adsorción del sistema alimento-agua (ΔH) menos el calor latente de vaporización (ΔH_v) a 35 °C (promedio de 25, 35 y 45 °C).

	X_{eq} (g agua/g ms)	Calor total de adsorción ΔH	ΔH_v (kJ/mol)	Qs calor isostérico neto de sorción (kJ/mol)
Inicial	0.052	37.54	43.52	-5.98
Monocapa	0.070	7.26	43.52	-36.26
Crítica	0.156	2.66	43.52	-40.86

Anexo 7. Determinación de propiedades termodinámicas en hojuelas con las proporciones de quinua, kiwicha y arracacha

Xeq (g agua/g ms)	ΔH (J/mol)	ΔS (J/mol*K)	ΔG (J/mol)
Inicial	-37542.70	99.63	-68227.71
Monocapa	-7258.87	9.35	-10138.13
Crítica	2662.97	-10.52	5903.56

Anexo 8. Determinación de la temperatura media armónica (T_{hm}) en hojuelas con las proporciones de quinua, kiwicha y arracacha

La temperatura media armónica (T_{hm}) se obtuvo usando la ecuación 11, donde se dividió el número de isothermas entre la sumatoria de la inversa de la temperatura absoluta.

°C	1/T
25	0.003356
35	0.003247
45	0.003145
Suma	0.009747
n	3
T_{hm}	307.7835

Anexo 9. Ficha técnica del envase trilaminado



Fábrica de Empaques Flexibles en Polietileno de Baja densidad, alta densidad, uso pesado. Polipropileno y Laminados. Papel con Impresión a 04 y 06 Colores, Contómetros, Cajas, Pirotones.

QUALITY MANAGEMENT SYSTEM	REVISADO POR: JAC	VERSIÓN : 00
TECHNICAL PRODUCT SPECIFICATION	APROBADO: RD	FECHA : 03/01/13

CUSTOMER : UNIVERSAL FOODS LIMITED

PRODUCT : SUNSHINE CEREALES

1.- KIND OF PRODUCT : Trilaminated BOPP / NYLON / LDPE

2.- MAIN FEATURES :

BOPP CRISTAL 20u (18.1 g/m ²)
INK (2.0 g/m ²)
ADHESIVE (2.0 g/m ²)
NYLON (17.4 g/m ²)
ADHESIVE (2.0 g/m ²)
LDPE CRISTAL (28.5 g/m ²)

3.- APPLICATIONS :

Trilaminated film designed for use in packaging of a variety of solid foods.
Machinable on any horizontal and vertical packaging.

4.- QUALITY FEATURE :

Material high sealability , excellent protection to light and very high barrier to oxygen and / or moisture.
Materials approved by the F.D.A. for contact with food or the like.
Additionally, this film is designed for high-speed packaging where very consistent level of slip is required.
Its high hot-tack ensures the tightness of seals in a wide range of conditions packaging and up to 50m / min speeds.

5.- TECHNICAL INFORMATION :

FEATURES	TEST METHOD	UNIT	STANDARD VALUE	TOLERANCE	
				MINIMUM	MAXIMUM
1.- DIMENSION					
WIDTH	ME.GE.CE01	mm	830	829	831
REPEAT	ME.GE.CE02	mm	500	499	501
WEIGHT	ME.GE.CE03	g/m2	70.0	66.5	73.5
BOND STRENGHT	ME.GE.CE05	g-f / 25,4mm	Bl= 270	150	----
TEMPERATURE SEALING	ME.GE.CE06	°C t=0.1 s P=6 bar	148	127	----

COIL DIAMETER	ME.GE.CE07	mm	300	--	300
DIAMETRO DE TUCO	ME.GE.CE08	mm	96	93	96
2.- DIMENSIONLESS					
COF KI	ME.GE.CE09	Ext/Ext Int/Int	0.19 0.21	0.10 0.20	0.25 0.35
WINDING DIRECTION	ME.GE.CE10	---	5		

6.- LABELED :

The coils are externally identified with a label, adhered in the outer envelope of the coil indicating :

Client name

Product Name

Quantity in kg (net weight)

Quantity in kg (gross weight)

Lot (Order No.)

Date

Name Operator

7.- PACKAGING :

The Trilaminar coils will be packed with paper and polyethylene bags.

The packed coils are placed on a stretcher and are ready for storage or office respective.

8.- CONDITIONS AND STORAGE TIME :

To ensure maximum product life , keep it in its original packaging until their final use , at a temperature below 30 ° C and relative humidity around 60 %.

Considering the handling and storage conditions have , the material may remain unchanged for up to 10 months after manufacture.

9.- QUALITY CHECK :

A certificate of completion will be sent by batch .



PRODUCT DEVELOPMENT

Cesar Rodriguez Julca

Anexo 10. Permeabilidad del polietileno de baja densidad

Espesor μm	20 °C
	(kg agua/m ² .Pa.día)
50	1.85E-06
70	1.33E-06
80	1.17E-06
100	9.15E-07

Fuente: COESAC (2015)

Anexo 11. Determinación de humedad por el método gravimétrico indirecto por desecación de la AOAC 2000

Se colocaron 5 g de hojuelas en una placa petri y se introdujeron en la estufa a 105 °C por 3 h hasta peso constante. Para calcular el contenido de humedad se utilizó la siguiente ecuación:

$$\%Humedad\ b.\ \varnothing = \frac{(Peso\ muestra\ \varnothing umedad - Peso\ muestra\ seca)}{Peso\ muestra\ \varnothing umeda} \times 100$$

Para reportar el contenido de agua inicial por kg de materia seca (Xi) se usó la siguiente ecuación:

$$(Xi) = \frac{\%Humedad\ b.\ \varnothing}{100 - \%Humedad\ b.\ \varnothing}$$