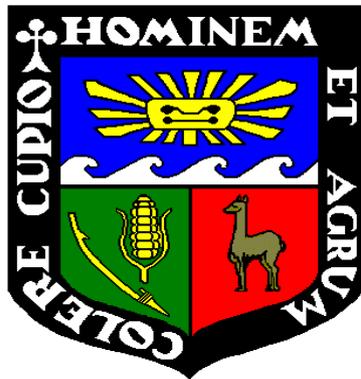


**UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA
LA MOLINA**

ESCUELA DE POST GRADO

ESPECIALIDAD DE TECNOLOGÍA DE ALIMENTOS



**“EFECTO DE SECADO EN BANDEJA Y ATOMIZACIÓN SOBRE
LA ACTIVIDAD ANTIOXIDANTE DE LA MASHUA
(*Tropaeolum tuberosum* R & P)”**

Tesis para optar el grado de
Magíster Scientiae

RAÚL AMÍLCAR CUYA AYALA

Lima-Perú

2009

UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA
LA MOLINA

ESCUELA DE POST GRADO

ESPECIALIDAD DE TECNOLOGÍA DE ALIMENTOS

“EFECTO DE SECADO EN BANDEJA Y ATOMIZACIÓN SOBRE LA
ACTIVIDAD ANTIOXIDANTE DE LA MASHUA
(*Tropaeolum tuberosum* R & P)”

Tesis para optar el grado de
Magíster Scientiae

Presentado por:

RAÚL AMÍLCAR CUYA AYALA

Sustentada y aprobada ante el siguiente jurado:

Dr. Américo Guevara Pérez
PRESIDENTE

Mg.Sc. Miguel Araujo Vargas
PATROCINADOR

M.S. Francisco Salas Valerio
MIEMBRO

Mg.Sc. Edwin Baldeón Chamorro
MIEMBRO

INDICE DE CONTENIDO

INDICE DE CONTENIDO

INDICE DE CUADROS

INDICE DE FIGURAS

INDICE DE APÉNDICES

RESUMEN

	Pag.
I. INTRODUCCION	1
II. REVISION DE LITERATURA	3
2.1 La mashua	3
2.1.1 Aspectos generales	3
2.1.2 Información de la especie	3
2.1.3 Descripción botánica	4
2.1.4 Variedades nativas	4
2.1.5 Usos	4
2.1.6 Valor nutritivo	5
2.1.7 Capacidad antioxidante y los metabolitos secundarios de la mashua	7
2.1.7.1 Contenido de compuestos fenólicos totales	7
2.1.7.2 Antocianinas totales	7
2.1.7.3 Carotenoides totales	8
2.1.7.4 Capacidad antioxidante hidrofílica	9
2.1.7.5 Relaciones entre el contenido de antocianinas, compuestos fenolicos y capacidad antioxidante	11
2.2 Aspectos generales sobre actividad antioxidante	12
2.3 Secado	16
2.3.1 Aspectos generales sobre secado	16
2.3.2 Curvas de velocidad de secado	18
2.3.3 Secado durante el periodo de velocidad constante	19
2.3.4 Secado durante el periodo de velocidad decreciente	20
2.4 Microencapsulamiento	21

2.4.1	Generalidades	21
2.4.2	Método de encapsulamiento	21
2.4.3	Secado por atomización	22
2.4.3.1	Generalidades	22
2.4.3.2	Factores que afectan las propiedades de los productos secados por atomización	23
a.	Influencia de las características inherentes del material de alimentación	23
b.	Concentración del material	24
c.	Temperatura de alimentación	25
d.	Influencia de temperatura de ingreso/salida del aire del secador	25
e.	Métodos y condiciones de atomización	26
2.4.3.3	Materiales de encapsulación	27
2.5	Propiedades físicas y químicas de los alimentos secos	29
2.5.1	Actividad de agua	29
2.5.2	Isoterma de sorción de humedad	30
2.5.2.1	Tipos de sorción	30
a.	Quemisorción	30
b.	Fisisorción	30
2.5.2.2	Clasificación de isoterma de sorción	31
2.5.2.3	Cálculo de monocapa	32
a.	Modelo de GAB	32
III.	MATERIALES Y METODOS	34
3.1	Lugar de ejecución	34
3.2	Materia prima e insumo	34
3.2.1	Materia prima	34
3.2.2	Insumo	34
a.	Almidón: Miracap	34
b.	Propiedades	34
c.	Aplicación	35
3.3	Equipos, reactivos y materiales	35
3.3.1	Equipos	35

3.3.2	Reactivos	36
3.3.3	Materiales	36
3.4	Métodos de control	37
3.4.1	Análisis químico proximal	37
3.4.2	Análisis físico-químico	37
3.4.3	Metodología para cuantificar actividad antioxidante	38
3.4.4	Metodología para determinar la isoterma de desorción	38
3.4.5	Metodología para determinar las curvas de secado	39
3.4.6	Metodología para calcular el periodo de secado de velocidad constante	40
3.4.7	Metodología para calcular el periodo de secado de velocidad decreciente	42
3.4.7.1	Difusión líquida de la humedad en el secado	42
3.5	Metodología experimental	44
3.5.1	Descripción general de los procesos de secado	46
a.	Selección y clasificación	46
b.	Lavado y desinfectado	46
c.	Secado	46
c.1	Secado en bandeja	46
c.1.1	Cortado	46
c.1.2	Acondicionamiento	46
c.1.3	Secado	47
c.1.4	Envasado de rodajas	47
c.1.5	Molienda y tamizado	47
c.1.6	Envasado y sellado	47
c.1.7	Almacenaje	47
c.2	Secado por atomización	48
c.2.1	Cortado	48
c.2.2	Extracción	48
c.2.3	Filtración	48
c.2.4	Acondicionamiento	48
c.2.5	Secado	48
c.2.6	Envasado y sellado	49
c.2.7	Almacenaje	49
3.6	Análisis estadístico	49

IV. RESULTADOS Y DISCUSION	51
4.1 Caracterización de la materia prima	51
4.1.1 Composición químico proximal	52
4.1.2 Composición fisicoquímica	52
4.1.3 Actividad antioxidante	53
4.2 Resultados de isoterma de desorción de la mashua	54
4.2.1 Calidad de ajuste de las curvas obtenidas con la ecuación de GAB para las tres temperaturas de trabajo	56
4.2.2 Resultados de las constantes de la ecuación de GAB obtenidas para las tres temperaturas de trabajo	56
4.3 Resultados del proceso de secado en bandeja	58
4.4 Efecto de la temperatura de secado en bandeja sobre la actividad antioxidante hidrofílica de la mashua	64
4.5 Efecto de factores de secado por atomización sobre la actividad antioxidante hidrofílica de la mashua	68
4.5.1 Efecto del factor encapsulante	68
4.5.2 Efecto del factor temperatura	70
4.5.3 Efecto del factor velocidad del rodete (atomizador)	72
V. CONCLUSIONES	74
VI. RECOMENDACIONES	75
VII. BIBLIOGRAFÍA	76
VIII. APÉNDICE	86

INDICE DE CUADROS

Cuadro	Pag.
1. Composición química de la mashua	6
2. Contenido total de carotenoide (TCT) y capacidad antioxidante lipofílico (LAC) en 11 genotipos de mashua (<i>Tropaeolum tuberosum</i> Ruiz & Pavón)	8
3. Capacidad antioxidante hidrofílica promedio de 30 genotipos de mashua obtenidos mediante el método del DPPH (515nm)	10
4. Sales utilizadas y su correspondiente actividad de agua para las tres temperaturas	38
5. Composición químico proximal de la mashua cultivar “zapallo amarillo”	51
6. Composición físico químico de la mashua cultivar “zapallo amarillo”	52
7. Calidad de ajuste de las curvas obtenidas con la ecuación GAB para las tres temperaturas de trabajo	56
8. Resultados de las constantes de la ecuación de GAB obtenidas para las tres temperaturas de trabajo	57
9. Resultados de los tiempos de predicción, experimental y humedad de equilibrio obtenidas para las tres temperaturas de trabajo	63
10. Resultados de actividad antioxidante hidrofílica de la mashua, posterior al secado en bandeja a diferentes temperaturas de secado	64
11. Resultados del efecto de factores de secado por atomización sobre la pérdida de actividad antioxidante hidrofílica de la mashua	71

INDICE DE FIGURAS

Fig.		Pág
1.	Curva típica de velocidad de secado constante: a) gráfica de los datos de humedad libre en función del tiempo, b) curva de velocidad de secado en función del contenido de humedad libre	19
2.	Clasificación de isoterma de sorsión de humedad	31
3.	Flujo de operaciones para el secado en bandeja y por atomización de la mashua	45
4.	Esquema experimental para los procesos de secado en bandeja y por atomización de la mashua “zapalla amarillo”	50
5.	Mashua cultivar Zapallo Amarillo	51
6.	Isoterma de desorción de la mashua experimental y modelada con la ecuación de GAB para 40°C	54
7.	Isoterma de desorción de la mashua experimental y modelada con la ecuación de GAB para 50°C	55
8.	Isoterma de desorción de la mashua experimental y modelada con la ecuación de GAB para 60°C	55
9.	Diagrama de esparcimiento experimental de la pérdida de humedad de las rodajas de mashua, en función al tiempo de secado para 40°C, 50°C y 60°C	59
10.	Diagrama de esparcimiento y modelada de la velocidad de secado en función al contenido de humedad libre de las rodajas de mashua para 40°C	60
11.	Diagrama de esparcimiento y modelada de la velocidad de secado en función al contenido de humedad libre de las rodajas de mashua para 50°C	61
12.	Diagrama de esparcimiento y modelada de la velocidad de secado en función al contenido de humedad libre de las rodajas de mashua para 60°C	61
13.	Resultados del contenido de la actividad antioxidante hidrofílica de la mashua fresca y seca	65
14.	Resultados del contenido de la actividad antioxidante hidrofílica de la mashua fresca y seca.	72

APENDICES

Apéndice

1. Metodología para determinar la actividad antioxidante hidrofílica o lipofílico utilizando el método DPPH.
2. Resultado del contenido de humedad de la mashua “zapallo amarillo” fresca.
3. Características físicas de la mashua “zapallo amarillo” fresca.
4. Secuencia del programa para determinar las constantes de la ecuación de GAB, de la isoterma de desorción.
5. Isoterma de desorción experimental y modeladas con la ecuación de GAB para las tres temperaturas de trabajo.
 - 5.1 Resultados de la isoterma de desorción de la mashua experimental y modelada con la ecuación de GAB para 40°C.
 - 5.2 Resultados de la isoterma de desorción de la mashua experimental y modelada con la ecuación de GAB para 50°C.
 - 5.3 Resultados de la isoterma de desorción de la mashua experimental y modelada con la ecuación de GAB para 60°C.
6. Datos teóricos, experimentales y cálculos realizados para determinar las curvas y tiempo de secado.
 - 6.1 Datos teóricos y experimentales, determinados para la mashua “zapallo amarillo”.
 - 6.2 Cálculos realizados para determinar el tiempo de secado del periodo de velocidad constante.
 - 6.3 Representación gráfica para describir el mecanismo que gobierna la migración del agua de las rodajas de mashua en el periodo decreciente para las tres temperaturas de trabajo.
 - 6.4 Representación gráfica para hallar el coeficiente de difusividad (D_L), para las tres temperaturas de trabajo.
 - 6.5 Cálculos realizados para determinar el tiempo de secado del periodo de velocidad decreciente por el método de difusividad.
7. Cálculos realizados para determinar las curvas de secado para las tres temperaturas de secado.
 - 7.1 Cálculos realizados para determinar la curva y curva de velocidad de secado experimental para 40°C.
 - 7.2 Cálculos realizados para determinar la curva y curva de velocidad de secado estimada para 40°C.

- 7.3 Cálculos realizados para determinar la curva y curva de velocidad de secado experimental para 50°C.
- 7.4 Cálculos realizados para determinar la curva y curva de velocidad de secado estimada para 50°C.
- 7.5 Cálculos realizados para determinar la curva y curva de velocidad de secado experimental para 60°C.
- 7.6 Cálculos realizados para determinar la curva y curva de velocidad de secado estimada para 60°C.
8. Análisis de variancia y la prueba de Tukey para evaluar el efecto de las temperaturas de secado en bandeja sobre la actividad antioxidante hidrofílica de la mashua.
 - 8.1 Análisis de variancia para evaluar si existe diferencias entre las medias del contenido de actividad antioxidante hidrofílica de la mashua, para las tres temperaturas de secado.
 - 8.2 Prueba de comparación del contenido de actividad antioxidante hidrofílica, determinado con diferentes temperaturas de secado.
9. Análisis de variancia y la prueba de Tukey para evaluar el efecto de los factores de secado por atomización sobre la actividad antioxidante hidrofílica de la mashua.
 - 9.1 Análisis de variancia para evaluar si existe diferencias entre las medias del contenido de actividad antioxidante hidrofílica de la mashua, para los diferentes niveles de secado.
 - 9.2 Prueba de comparación del contenido de actividad antioxidante hidrofílica, determinado con diferentes niveles de encapsulante.
 - 9.3 Prueba de comparación del contenido de actividad antioxidante hidrofílica, determinado con diferentes niveles temperaturas.
 - 9.4 Prueba de comparación del contenido de actividad antioxidante hidrofílica, determinado con diferentes niveles de velocidad del atomizador.
10. Determinación de la curva estándar de Trolox a 515 nm en metanol.

RESUMEN

En este trabajo de investigación se evaluaron la pérdida de actividad antioxidante hidrofílica de la mashua cultivar “zapallo amarillo”, posterior al secado en tipo bandeja y por atomización.

Para evaluar la pérdida de actividad antioxidante hidrofílica de las rodajas de mashua “cultivar zapallo amarillo” de 2 mm de espesor fueron sometidas al secado en tipo bandeja a tres temperaturas de trabajo 40°C, 50°C y 60°C y velocidad de aire constante de 1,4 m/s. De acuerdo a los métodos estadísticos aplicados, mediante el Diseño Completo al Azar (DCA). El análisis de variancia (ANVA) con un nivel de significación de $p < 0,05$; indica que existe alta significación entre los tres niveles de temperatura sobre la pérdida de actividad antioxidante hidrofílica, y el análisis comparativo de medias con la prueba de Tukey ($P < 0,05$); confirma dicha significación. Resultando la mayor retención de actividad antioxidante hidrofílica correspondiente al tratamiento para 40°C.

Con respecto al secado por atomización con tres factores, cada factor con dos niveles: encapsulante 10% y 15%, temperatura 160°C y 180 °C y velocidad del atomizador 30000rpm y 35000 rpm y con un promedio de alimentación constante de 12,5 ml/min. De acuerdo a los métodos estadísticos aplicados, indica que existe alta significación entre los niveles de encapsulante, temperatura y velocidad del atomizador, sobre la pérdida de actividad antioxidante hidrofílica. Resultando la mayor retención correspondiente con los siguientes niveles: encapsulante 10%; temperatura de entrada 160°C y velocidad del atomizador de 30000 rpm.

El método de secado por atomización resultó con mayor retención de la actividad antioxidante hidrofílica en contraste con el método de secado en bandeja que dio la menor retención. Estos resultados, podrían ser útiles para valorar el efecto de los métodos de secado y que sus efectos benéficos podría ser interesante para la industria alimentaria.

I. INTRODUCCION

Durante los últimos años, existe un interés creciente, en el uso de los antioxidantes, para el tratamiento de enfermedades y la importancia del rol de los antioxidantes de la dieta en la prevención del desarrollo de algunas patologías.

Estudios recientes indican que la mashua es fuente importante de actividad antioxidante y es comparado con arándano, un cultivar premier y que es considerado una de las frutas con alto contenido de actividad antioxidante y que en términos de nutrición es excelente.

La pérdida de actividad antioxidante hidrofílica natural, durante el procesado de los alimentos se ha vuelto un problema, debido a su baja resistencia contra el oxígeno, catálisis ion de metal, temperaturas altas, luz, secado y grado higrométrico. Por tanto, se debe buscar parámetros óptimos de secado para minimizar la pérdida de estos compuestos bioactivos.

La ventaja de la tecnología de secado de alimentos, son ampliamente conocidas, ya que al reducir el contenido de humedad, previene el crecimiento de microorganismos y minimizan las demás reacciones que los deterioran. También el secado de los alimentos reduce el peso y en algunos casos el volumen; lo que incluye en una reducción importante de los costos de empaque, almacenamiento y transporte. Los productos secos además permiten ser almacenados a temperatura ambiente por largos periodos de tiempo.

La mashua puede desempeñar, un papel importante en el contexto de un desarrollo sustentable, implementándose procesos tecnológicos que permitan su mejor aprovechamiento en beneficio de nuestros pueblos.

Teniendo en cuenta estas consideraciones, se llevó a cabo el presente trabajo de investigación, planteando el siguiente objetivo:

- Evaluación de la pérdida de actividad antioxidante hidrofílica de la mashua, después del secado por aire caliente; en tipo bandeja a diferentes temperaturas de secado y por atomización a diferentes niveles de encapsulante, temperatura y velocidad del atomizador.

II. REVISION DE LITERATURA

2.1 LA MASHUA

2.1.1 ASPECTOS GENERALES

La mashua (*Tropaeolum tuberosum* Radon & Pavón), es uno de los tubérculos más importantes después de la papa, olluco y oca; se cultiva en los valles húmedos de la zona andina de Perú, Colombia, Argentina, Ecuador y Bolivia (Nacional Research Council, 1989). Según Meza *et al.* (1997) mencionan que la planta hereditaria es de la Meseta Peruano-Boliviano. Pero ahora puede encontrarse en lugares tan lejanos como Canadá, Europa y Nueva Zelanda (Nacional Research Council, 1989). Entre los tubérculos andinos, la mashua es de mayor rendimiento, se encuentra entre 9 y 70 TM/ha (Caicedo, 1999). Crece en alturas de 3000 a 4000 msnm, pero la planta produce sus mejores cosechas y alto rendimiento entre 3500 y 3800 msnm (Hernández y León, 1992). Según Tineo (1993) menciona que los rendimientos de la mashua supera a la papa de dos por uno y crece en suelos pobres y sin fertilizantes.

2.1.2 INFORMACION DE LA ESPECIE

Nombre botánico : *Tropaeolum tuberosum* Ruiz & Pavon

Familia : Tropaeolacea

Nombres comunes:

Quechua : mashua, añu, apiñu, apiña-mama

Aymara : isau, issanu, kkayacha

Español : mashua (mafua, mauja, maxua).

Perú : mashuar, añu, anyu

Colombia : cubios, navios, navo

Bolivia : isaño, isañu, apilla

Inglés : mashua, anu.

(National Research Council, 1989)

2.1.3 DESCRIPCIÓN BOTÁNICA

Es una planta herbácea de 20 a 80 cm de alto, de tallos aéreos, cilíndricos y delgados de 2 a 4 mm de diámetro, ramificados de color púrpura. Tiene hojas de color verde oscuro brillante en el haz y verde claro en el envés, las flores son solitarias de diferentes colores que van de anaranjadas o rojizas (Hernández y León, 1992).

2.1.4 VARIEDADES NATIVAS

Existen más de 100 variedades que han sido reconocidos (National Research Council, 1989). No existen estudios profundos sobre la variación en *Tropaeolum tuberosum*, algunos autores los clasifican de acuerdo al color, tipo y distribución de colores (Meza *et al.*, 1997).

Espinosa (1977) citado por Delgado (1978) menciona que, a los clones de mashua lo diferencian de acuerdo al color del tubérculo en idioma quechua:

Occe año	Plomizo
Yana año	Negruzco
Puca año	Rojizo
Muru año	Morado
Chhecce año	Gris
Zapallo año	Amarillo
Yurac año	Blanco

Existe gran variabilidad de ecotipos en cuanto a la forma y coloración, siendo los más cultivados los ecotipos “Kello”, “Yana Ñawi”, “Zapallo Amarillo” y en menor proporción el “Cheqchi” (Cáceda y Rossel, 1991; Echegaray, 1998).

2.1.5 USOS

La mashua se cultiva con el objeto de aprovechar los tubérculos como alimento, con fines medicinales y ornamentales (Chacón, 1960).

Mas allá de su utilidad como repelentes de muchos insectos, nemátodos y otros patógenos. La mashua se destina una cierta cantidad para el consumo animal y otra cantidad se destina para el consumo humano, y se utiliza como ingredientes en sopas, guisos, encurtidos, mermelada, postres (Ortega, 1992).

En Nueva Zelanda, aparte de consumir sus tubérculos en sopas y estofados, también son consumidas las hojas jóvenes y las flores (National Research Council, 1989).

Por su valor diurético y nutritivo es consumida con agrado por adultos y niños del área rural sancochada en una pachamanca, o en el horno, adquiere un sabor especial semejante al camote (Salas, 1998).

Actualmente la mashua es muy escasa debido a que tiene poco valor comercial, ya que no es muy apetecido por el hombre porque tiene un sabor picante cuando está cruda, debido a los isotiocianatos (aceite de mostaza); en cocido pierde esta característica, pero aún es rechazada por las personas de sexo masculino porque se dice que es anafrodisiaco; aunque estudios realizados en ratas muestran que no afecta la fertilidad sin embargo hay un descenso en los niveles de testosterona (Hernández y León, 1992).

Esta especie se considera única, dentro de los alimentos se le incluye propiedades de reprimir el deseo sexual (Tapia, 1984).

2.1.6 VALOR NUTRITIVO

La mashua es muy nutritiva y contiene cerca de 20% de sólido y proteína alrededor de 16% en materia seca, y que podría ser usada como alimento de cerdos y terneros, y que podría volverse un alimento valioso y barato debido a su alto rendimiento. Sin embargo la proteína es altamente variable, dependiendo mucho de la variedad (National Research Council, 1989).

La mashua contiene una cantidad elevada de aminoácidos esenciales como lisina, aminoácido limitante en muchos cereales y leguminosas (Espinoza *et al.*, 2002).

La mashua cuyo nombre botánico es *Tropaeolum tuberosum* Radon & Pavon, presenta la composición química que se indica en el Cuadro 1.

Cuadro 1. Composición química de la mashua (g/100g)

Componentes	Base húmeda (B H)			Base seca (B S)	
	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)
	Rango	Promedio	Promedio	Rango	Promedio
Humedad (%)	79,10-88,8	87,4	86	78,3-92,4	-
Carbohidratos (g)	-	9,8	11	-	78,6
Proteína (g)	1,13-2,65	1,5	1,6	6,9-15,7	11,4
Grasa (g)	-	0,7	0,6	0,1-1,4	4,3
Cenizas (g)	0,56-1,08	0,6	0,8	4,2-6,5	5,7
Fibra (g)	-	0,9	0,8	7,8-8,6	-
Azúcares (g)	5,37-9,33	-	-	-	-
Potasio (mg)	1,28-1,76	-	-	-	-
Fósforo (mg)	0,61-0,83	29	42	-	300
Calcio (mg)	-	12	7	-	50
Hierro (mg)	-	1,0	1,2	-	8,6
Vitamina A (mg)	-	-	15	-	214
Tiamina (mg)	-	0,10	0,06	-	0,46
Riboflavina. (mg)	-	0,12	0,08	-	0,57
Niacina (mg)	-	0,67	0,6	-	4,3
Vitamina C (mg)	-	77,5	67	-	476

- Fuentes:
- (1) Tapia (1984)
 - (2) Collazos *et al.* (1993)
 - (3) Meza *et al.* (1997)
 - (4) King (1986), citado por Ramallo (1999)
 - (5) National Reserach Council (1989)

2.1.7 CAPACIDAD ANTIOXIDANTE Y LOS METABOLITOS SECUNDARIOS DE LA MASHUA

2.1.7.1 CONTENIDO DE COMPUESTOS FENÓLICOS TOTALES

Campos *et al.* (2006) señalan que, en los tubérculos de mashua, el contenido de compuestos fenólicos totales, se encuentran en un rango de 0,92 a 3,37 mg g⁻¹. Los genotipos ARB-5241, DP-02-24 y AGM-5109 tienen alto contenido de compuestos fenólicos con 3,37; 3,05 y 2,75 mg g⁻¹ respectivamente. Los genotipos de mashua de color púrpura, presentaron alto contenido de compuestos fenólicos totales, mientras que los genotipos de mashua color amarillo presentaron bajo contenido de compuestos fenólicos totales. El contenido de compuestos fenólicos totales de ARB-5241 fue comparado con las fresas, usado como una referencia (3,35 mg g⁻¹).

Chirinos *et al.* (2007) encontraron diferencias significativas en el contenido de compuestos fenólicos totales entre los 10 cultivares de mashua, para cada etapa de maduración ($p < 0,05$). Entre los cultivares de color púrpura, ARB-5241 muestra un progresivo incremento durante todo el proceso de maduración, mientras el cultivar AGM-5109 presentó valores casi constantes y los compuestos fenólicos totales de DP-02-24 incrementó hasta los 6 meses seguido por un decrecimiento hasta 7,5 meses. En los cultivares de colores amarillos, los compuestos fenólicos totales, muestran un modelo de decrecimiento ligero durante la maduración.

2.1.7.2 ANTOCIANINAS TOTALES

Las antocianinas totales del genotipo de la mashua pigmentadas se encuentran en un rango de 0,5 a 2,05 mg g⁻¹. La mayor cantidad de antocianinas totales se encontró en el genotipo DP-02-24 y se encuentra dentro del rango reportado para las fresas, 1,38 – 3,85 mg g⁻¹. Las antocianinas totales de los tubérculos de mashua parecen tener un componente significativo de compuestos fenólicos totales en los genotipos pigmentados. Por ejemplo, la relación de las antocianinas totales entre el contenido de compuestos fenólicos totales, el rango de la fracción se encuentra entre 0,3 y 0,67 (Campos *et al.*, 2006).

La mayor cantidad del contenido de antocianinas fueron encontrados a 7 y 7,5 meses que otras etapas de maduración (Chirinos *et al.*, 2007).

Cuadro 2. Contenido total de carotenoide (TCT) y capacidad antioxidante lipofílico (LAC) en 11 genotipos de mashua (*Tropaeolum tuberosum* Ruiz & Pavón)

Genotipo	Color Pulpa /cáscara ^a	Humedad (%) ^b	TCT ($\mu\text{g/g}$) ^b	LAC ($\mu\text{g TE/g}$) ^b
AVM-5562	Y/Y	92±1,6 ^c	14±3 ^{d,e}	217±37,7 ^{e,f}
DP-02-07	Y/Y	90±1,0 ^{c,d}	21±3 ^{d,e}	221±13,0 ^{e,f}
DP-02-15	Y/Y	90±1,9 ^{c,d,e}	17±1 ^{d,e}	186±9,6 ^{d,e}
M6COL2C	Y/Y	90±1,6 ^{c,d,e}	23±6 ^e	279±15,0 ^f
DP-02-23	Y/Y	90±1,6 ^{c,d,e}	13±6 ^{d,e}	93±22,85 ^c
AGM-5109	P/Y	89±1,2 ^{c,d,e}	18±0 ^{d,e}	128±56,1 ^{d,e}
DP-02-23	Y/Y	87±2,8 ^{c,d}	21±4 ^{d,e}	224±24,7 ^{e,f}
DP-02-24	P/P	87±1,3 ^{c,d}	ND	ND
ARB-5576	Y/Y	87±1,4 ^{c,d}	25±9 ^e	218±12,8 ^{e,f}
ARB-5241	P/Y	85±1,7 ^c	10±1 ^{c,d}	202±19,3 ^{d,e,f}
ARV-5566	Y-P/Y	86±0,6 ^c	1±0 ^c	225±44 ^{e,f}

^aP, púrpura; Y, amarillo.

^bPromedio \pm SD (n=3). Los promedios dentro de cada columna con la misma letra de superíndice no son significativamente diferentes ($\alpha=0,05$). ND, no detectado

Fuente: Campos *et al.* (2006)

2.1.7.3 CAROTENOIDES TOTALES

Campos *et al.* (2006) mencionan que los tubérculos de mashua contienen carotenoides totales que se encuentran en un rango de 1 a 25 $\mu\text{g } \beta\text{-caroteno g}^{-1}$. Los genotipos ARB-5576, M6COL2C y DP-02-07 tienen alto contenido de carotenoides con 25, 23 y 21 $\mu\text{g g}^{-1}$ respectivamente. Los contenidos de carotenoides de los tubérculos de mashua son relativamente elevados comparado con la papa comercial y papas nativas; también es comparado con el contenido de papaya (4,08 $\mu\text{g g}^{-1}$). Sin embargo, el contenido de carotenoides totales de la mashua es reducido respecto a tomate (56-210 $\mu\text{g g}^{-1}$), mango

(74,3 $\mu\text{g g}^{-1}$) y zanahoria ($90\pm 16 \mu\text{g g}^{-1}$).

Los altos valores de carotenoides totales fueron siempre observados en los cultivares con bajo contenido fenólico. Un incremento gradual en el contenido de carotenoides fue observado durante el desarrollo del tubérculo entre los cultivares amarillos y el cultivar púrpura AGM-5109, los valores altos se obtienen en maduración completa. A lo largo de la maduración los cultivares amarillos incrementan en un rango de 1,25 a 3,8; para ARB- 5576 y DP 0215, respectivamente. Los cultivares púrpuras DP-02-24 y ARB-5241 presentaron valores casi constantes durante el desarrollo del tubérculo (Chirinos *et al.*, 2007).

Navas *et al.* (1993) mencionan que las variedades amarillas contienen alto contenido de vitamina A.

2.1.7.4 CAPACIDAD ANTIOXIDANTE HIDROFÍLICA

La capacidad antioxidante hidrofílica de los tubérculos de mashua, se encuentra en un rango de 955 a 9800 $\mu\text{g Eq. Trolox /g}$, expresado en base húmeda (bh) y determinado por el método ABTS. Los genotipos ARB-5241, DP-02-24 y ARV- 5366 muestran alto contenido de capacidad antioxidante hidrofílica con valores de 9 800, 9 309 y 7 867 $\mu\text{g Eq. Trolox /g}$ (bh) por ABTS, respectivamente. Nuestros resultados indican que el genotipo de mashua ARB-5241 es comparado con arándano (cultivar premier de capacidad antioxidante hidrofílica con un valor de 9 575 $\mu\text{g Eq. Trolox /g}$ (bh) por ABTS), que es considerado una de las frutas con alto contenido de capacidad antioxidante (Campos *et al.*, 2006 y Ríos, 2004).

En el Cuadro 3, se presenta la capacidad antioxidante hidrofílica promedio de 30 genotipos de mashua obtenidas mediante el método DPPH (515nm).

Cuadro 3. Capacidad antioxidante hidrofílica promedio de 30 genotipos de mashua obtenidos mediante el método del DPPH (515nm)

Genotipo	Capacidad antioxidante (μg Eq. Trolox/g, bh)	Capacidad antioxidante (μg Eq. Trolox/g, bs)
ACH (M)	2 452,70 \pm 141,58	11 955,93 \pm 690,15
DP-0224 (M)	2 156,60 \pm 52,52	14 826,95 \pm 361,06
MP-033 (M)	1 637,50 \pm 76,33	12 824,93 \pm 597,80
06 (M)	1 603,0 \pm 143,04	11 986,75 \pm 1 069,60
AGM-5118 (M)	1 446,90 \pm 6,44	12 102,08 \pm 53,87
ARB-5241 (M)	1 430,90 \pm 47,35	10 334,72 \pm 342,00
07 (B)	1 477,60 \pm 172,94	11 050,58 \pm 1 293,37
21 (B)	1 418,90 \pm 32,26	8 411,55 \pm 191,25
18 (B)	338,50 \pm 67,14	1 727,62 \pm 342,67
02 (N)	435,00 \pm 7,66	2 801,31 \pm 49,34
03 (N)	255,30 \pm 8,96	2 470,22 \pm 86,66
04 (N)	171,40 \pm 3,24	1 189,23 \pm 22,47
05 (N)	279,10 \pm 7,49	1 821,07 \pm 48,89
08 (N)	284,20 \pm 11,29	1 490,87 \pm 59,24
09 (N)	356,10 \pm 14,71	2 723,71 \pm 112,52
10 (N)	581,50 \pm 27,85	4 081,57 \pm 195,51
11 (N)	479,30 \pm 11,43	3 805,95 \pm 90,78
12 (N)	284,20 \pm 14,12	1 732,87 \pm 98,64
13 (N)	493,90 \pm 9,81	4 115,66 \pm 81,71
14 (N)	360,30 \pm 5,36	2 654,35 \pm 39,47
16 (N)	1 301,90 \pm 29,39	6 880,84 \pm 155,31
19 (N)	188,70 \pm 28,47	1 310,89 \pm 197,79
22 (N)	288,40 \pm 52,80	1 854,84 \pm 339,58
23 (N)	203,80 \pm 11,99	1 403,46 \pm 82,57
24 (N)	457,90 \pm 34,58	3 695,33 \pm 279,05
26 (N)	211,10 \pm 4,42	1 257,62 \pm 26,32
27 (N)	163,50 \pm 5,62	1 641,03 \pm 56,38
28 (N)	274,50 \pm 9,22	1 993,05 \pm 66,96
29 (N)	450,20 \pm 3,08	3 862,80 \pm 26,45
30 (N)	368,00 \pm 39,23	1 926,36 \pm 205,38

M: Genotipo morado, B: Genotipo blanco, N: Genotipo naranja

Fuente: Temoche *et al.* (2004)

Los 30 genotipos de mashua evaluados poseen alta capacidad antioxidante. Los genotipos que presentaron valores altos son: ACH con 2 453,73 μg Eq. Trolox /g (bh) determinado con DPPH y 4 798,51 μg Eq. Trolox /g (bh) determinado por ABTS; DP-0224 con 2 156,59 μg Eq. Trolox /g (bh) determinado por DPPH y 4 006,63 μg Eq. Trolox /g (bh) determinado por ABTS y MP-033 presento 1 637,50 μg Eq. Trolox /g (bh) hallado con DPPH y 3 389,3 μg Eq. Trolox /g (bh) obtenido con ABTS, todos de coloración morada. Para todos los casos la capacidad antioxidante cuantificada por el método del ABTS resultaron ser mayores que con el DPPH, llegando a ser hasta un 72% mayor (Temoche *et al.*, 2004).

2.1.7.5 RELACIONES ENTRE EL CONTENIDO DE ANTOCIANINAS, COMPUESTOS FENÓLICOS Y CAPACIDAD ANTIOXIDANTE

La capacidad antioxidante hidrofílica de la mashua, está relacionada con el contenido de antocianinas totales y contenido de compuestos fenólicos totales. La baja correlación de antocianinas totales con capacidad antioxidante hidrofílica ($r = 0,48$, $p = 0,11$); y la alta correlación entre contenido de compuestos fenólicos totales y capacidad antioxidante hidrofílica ($r = 0,84$; $p = 0,00$), la mayoría son probablemente debido a la presencia de diferentes compuestos fenólicos en los tubérculos de mashua (Campos *et al.*, 2006).

Entre los cultivares de color púrpura, ARB-5241 fue el único que presentó una alta correlación entre antocianinas y capacidad antioxidante ($r = 0,89$, $p < 0,01$). Los cultivares de color púrpura DP-02-24 y AGM-5109, presentaron una relación pobre, indicando que, otros compuestos fenólicos pueden predominar, el efecto antioxidante. Una significativa correlación fue observada entre la capacidad antioxidante y compuestos fenólicos totales, para los cultivares DP-0224, ARB-5241, AGM-5109, M6COL2C, DP-0215 Y DP-0203 ($0,691 < r < 0,911$, $p < 0,01$). Estas diferencias en el coeficiente de correlación, sugiere una importante diferencia entre los cultivares que podrían ser relacionado para diferentes perfiles de antioxidante y compuestos fenólicos. (Chirinos *et al.*, 2007).

Ríos (2004) menciona que, el genotipo ARB-5241 presentó una alta capacidad antioxidante hidrofílica, a pesar de no reportar un alto contenido en antocianinas, pero si mayor contenido en fenólicos totales. Sin embargo, los genotipos DP-0215 y MCOL2C los

cuales presentaron un bajo contenido de compuestos fenólicos en comparación al genotipo AGM-5109 de coloración morada, presentaron una capacidad antioxidante hidrofílica similar.

Chirinos *et al.* (2007) mencionan que la baja y/o correlación negativa de otros cultivares pueden indicar diferencias, en los promedios y perfiles de compuestos fenólicos y/o la presencia de otros compuestos bioactivos, que puede contribuir a la capacidad antioxidante incluyendo ácido ascórbico y glucosinolatos.

Moyer *et al.* (2002) citado por (Ríos, 2004) menciona que, al evaluar 32 genotipos de grosellas (*Ribes*) observaron una baja relación, entre el contenido de compuestos fenólicos y la capacidad antioxidante hidrofílica, lo que se debería al alto contenido de ácido ascórbico que presenta esta fruta, lo cual contribuye a la capacidad antioxidante más no al contenido de compuestos fenólicos.

Navas *et al.* (1993); Collazos *et al.* (1993) y Meza *et al.* (1997) mencionan que, la mashua presenta un contenido inusual de ácido ascórbico, de aproximadamente 75; 77,5 y 67mg/ 100g respectivamente. Expresado en base húmeda.

2.2 ASPECTOS GENERALES SOBRE ACTIVIDAD ANTIOXIDANTE

Durante los últimos años, existe un interés sostenido y creciente en el uso de los antioxidantes para el tratamiento de enfermedades y la importancia del rol de los antioxidantes de la dieta en la prevención del desarrollo de algunas patologías (Cañas y Buschiazzo, 2000). La patogénesis de muchas enfermedades crónicas es el involucramiento del estrés oxidativo y antioxidante (Frei, 1999).

Las Especies Oxigénicas Reactivas (ROS), son Radicales Libres (RL), es decir especies moleculares activas, dotadas de un electrón desapareado en un nivel energético superior y por tanto dotadas de propiedades paramagnéticas, lo que les confiere una alta e indiscriminada reactividad (González *et al.*, 2001).

Los radicales libres son compuestos altamente tóxicos, que en condiciones normales se generan en los sistemas biológicos, como productos finales del proceso de la respiración celular (Desmachelier, 1997).

La producción del radical libre ocurre continuamente dentro de las células, como una función normal de las células. Sin embargo, el exceso de producción del radical libre que se origina de las fuentes endógenas o exógenas, generan un estado denominado estrés oxidativa (Young y Woodside, 2001; Wang *et al.*, 1996). Durante este proceso se producen daños químicos (oxidación) de moléculas estructurales, entre ellos lípidos, proteínas, glúcidos, ácidos nucleicos, etcétera, y con ello originan muchas enfermedades (Sánchez *et al.*, 2002 y Wang *et al.*, 1996).

Ante el estrés oxidativa, el organismo responde con la defensa antioxidante, pero en determinadas ocasiones puede ser insuficiente, desencadenando diferentes procesos fisiológicos y fisiopatológicos. En la actualidad son muchos los procesos relacionados con la producción de radicales libres como son: mutagénesis, cáncer, arteriosclerosis, infarto de miocardio, diabetes, enfermedades inflamatorias, trastornos del sistema nerviosos central, envejecimiento, enfermedades crónicas, enfermedad de la arteria coronaria, obesidad, cataratas varios desórdenes neurodegenerativos, alzheimer, etc. (Wen-Chi *et al.*, 2001; Frei, 1999; Lee y Shibamoto, 2002; Gonzáles *et al.*, 2001).

No cabe duda que todos los sistemas biológicos en ambientes oxigenados han desarrollado mecanismos de defensa, tanto a nivel fisiológico como bioquímico. Entre ellos destacan, a nivel bioquímico, la defensa antioxidante que puede ser enzimático o no enzimático, así como sistemas reparadores de moléculas (Gonzáles *et al.*, 2001).

Los antioxidantes, son pequeñas moléculas que se encuentran presentes dentro y fuera de la célula (Frei, 1999). Los antioxidantes enzimáticos son: superóxido dismutasa (SOD), catalasa (CAT), glutation peroxidasa (GPx) y DT-diaforasa; los antioxidantes no enzimático son: vitamina E, vitamina C, β -caroteno, ferritina, ceruloplasmina, selenio, glutation reducido (GSH), manganeso, ubiquinona, zinc, ácido úrico, flavonoides, polifenoles, isoflavones, catequinas, etc. (Gonzáles *et al.*, 2001; Frei, 1999; Cañas y Buschiazzo, 2000).

En el organismo, se produce un equilibrio entre oxidantes / antioxidantes, cuando este equilibrio se rompe a favor de los oxidantes, se produce un estrés oxidativa el cual esta implicado en muchos procesos fisiopatologicos (enfermedades, envejecimiento celular, etc.). Por tanto, es de vital importancia el consumo de alimentos que contengan antioxidantes para mantener el equilibrio entre oxidantes y antioxidantes (González *et al.*, 2001).

Los antioxidantes previenen el daño del tejido, inducido por radicales libres, previniendo la formación de radicales, secuestrándole, o previniendo su descomposición y protegiendo contra el daño oxidativo (Young y Woodside, 2001; Lee y Shibamoto, 2002). En respuesta a estos daños, han desarrollado una compleja defensa antioxidante, y los antioxidantes dietarios comprenden una gran parte de esta defensa. Esto sugiere, que la ingesta elevada de nutrientes antioxidantes de fuentes dietéticas ofrecen ventajas para la salud (Cañas y Buschiazzo, 2000).

Hay muchos resultados epidemiológicos que revelan una asociación entre las persona que tienen una dieta rica en frutas y hortalizas, hay una disminución en el riesgo de contraer estas enfermedades (Wen-Chi *et al.*, 2001). Pero no indican que frutas y hortalizas que debemos ingerir. Por consiguiente, es necesario identificar, la biodisponibilidad relativa, absorción y bioactividad de las frutas y hortalizas más benéficas (Halvorsen *et al.*, 2002). Además, no hay un antioxidante universal; diferentes compuestos actúan en diferentes líneas de defensa contra las Species Oxigénicas Reactivas (ROS). Estos pueden basarse en su modo de acción como antioxidantes y/o su localización dentro de la célula. Muchos antioxidantes se saben que operan sinérgicamente para proporcionar una barrera efectiva contra la oxidación (Young y Lowe, 2001; Young y Woodside, 2001).

Altas concentraciones de vitamina C pueden prevenir mutaciones inducidas por la oxidación en células humanas (Lutsenko *et al.*, 2002). Vitamina C realmente secuestra al oxígeno reactivo y especies de nitrógeno y por eso puede prevenir el daño oxidativa de macromoléculas como ADN, lípidos y proteínas (Carr y Frei, 1999).

Fennema (2000) menciona que, debido a su estructura química, los compuestos fenólicos resultan ser eficaces donadores de electrones o átomos de hidrogeno, atribuyéndole a esta conformación estructural el alto potencial antioxidante.

La efectividad de los carotenoides como antioxidante depende de su interacción con otros co-antioxidantes, especialmente las vitaminas E y C. Sin embargo, los carotenoides pueden perder su efectividad como antioxidantes a altas concentraciones o altas presiones parciales de oxígeno (Young y Lowe, 2001; Paolini *et al.*, 2001).

Los antioxidantes de las frutas y verduras protegen contra las enfermedades relacionadas con el estrés oxidante, los resultados de los ensayos de investigación con compuestos únicos como las vitaminas E y C o β -caroteno no ha apoyado este efecto de protección (Carr y Frei, 1999; Frei, 1999; Paolini *et al.*, 2001). La razón de estos ensayos clínicos ineficientes sería que los efectos protectores de frutas y hortalizas provienen de la acción de compuestos antioxidantes menos conocidos o de una acción conjunta de antioxidantes de los alimentos (Shi *et al.*, 2001).

En el caso de los alimentos debe tenerse en cuenta que la actividad antioxidante es dependiente de una multitud de factores, incluidas las propiedades coloidales de los substratos, las condiciones y etapas de oxidación, así como la posible localización de los antioxidantes y substratos en las distintas fases presentes en el alimento (Gonzales, 2001). También deberíamos esperar una acción conjunta de los numerosos antioxidantes presentes en la dieta, desde las estructuras físicas excesivamente complejas que conforma un individuo (Halvorsen *et al.*, 2002).

Shi *et al.* (2001) indican que, es necesaria una variedad de antioxidantes para mantener el nivel adecuado de redox en un sistema biológico no-homogéneo, lo que sería similar a las coordinadas reacciones redox que ocurren durante la cadena respiratoria en la mitocondria.

Prior y Cao (2000) realizaron estudios, y cuantificaron, detalladamente en las plantas dietarios una cantidad bien conocida, de antioxidantes como el β -caroteno, α -tocoferol, y vitamina C. Sin embargo, los datos actuales sugieren que solo conocemos una parte relativamente pequeña de antioxidantes de muchos alimentos.

Halvorsen *et al.* (2002) mencionan que, sería mucho más sencillo probar los efectos protectores de uno o una cantidad limitada de antioxidantes, quizás nunca encontremos una asociación si son bioactivos o trabajan sinérgicamente numerosos y quizás cientos de antioxidantes dietarios, como los carotenoides, ácidos polifenólicos, sulfuros, flavonoides, lignanos, etc. Así, la cantidad total que donan electrones (es decir, reductores) en la dieta proveniente de las combinaciones de antioxidantes individuales que ocurrirían en los alimentos, sería un mejor concepto que los antioxidantes dietarios individuales.

Pocorny y Schmidt (2001) mencionan que, existe una desventaja de los antioxidantes naturales por su baja resistencia contra el oxígeno, particularmente bajo la exposición a la luz, temperaturas altas y secado. Los cambios de antioxidantes continúan durante el almacenamiento de los alimentos.

2.3 SECADO

2.3.1 ASPECTOS GENERALES SOBRE SECADO

El secado es una de las técnicas ampliamente utilizada para la conservación de alimentos. El secado al sol de frutas, granos, vegetales, carnes y pescados han sido ampliamente utilizados, desde los albores de la humanidad, proporcionando al hombre una posibilidad de subsistencia en época de carencia de alimentos (Fito *et al.*, 2001 citado por Vega *et al.* 2005).

Son ampliamente conocidas las ventajas de los alimentos deshidratados, ya que al reducir el contenido de humedad, se previene el crecimiento de microorganismos y se minimizan las demás reacciones que los deterioran (Doymaz & Pala, 2003). También el secado de los alimentos reduce su peso y en muchos casos el volumen, lo que incluye en una reducción importante, de los costos de empaque, almacenamiento y transporte. Los productos secos además permiten ser almacenados a temperatura ambiente por largos periodos de tiempo (Barbosa y Vega, 2000).

Actualmente el aire caliente, sigue siendo el método de deshidratación más usado en la industria alimentaria (Hatamipour & Mowla, 2002), pero antes de abordar el estudio del secado por aire caliente de un producto y para poder predecir la humedad de equilibrio

que este alcanzará en función de las condiciones del aire de secado, es necesario conocer su isoterma de desorción, que puede ser descrita por varios modelos matemáticos que utilizan dos o tres parámetros, sin embargo lo interesante es aplicar aquellas ecuaciones en las que utilicen parámetros que tengan explicación física (Vega *et al.*, 2005).

La estabilidad del producto, es fuertemente afectada por las condiciones de secado (Chou & Chua, 2001). El daño térmico incurrido en un producto durante el secado es directamente proporcional a la temperatura y tiempo (Lin *et al.*, 1998). La temperatura alta y secado por mucho tiempo esta asociado a menudo con el daño que afecta adversamente la textura, color, sabor y valor nutritivo de los productos (Zanoni *et al.*, 1999).

La pérdida de la calidad nutritiva, durante el procesado y el almacenamiento de alimentos se han vuelto un problema importante; desde el descubrimiento de las vitaminas básicas y sus formularios, se han hecho los esfuerzos para su optimización de los nutrientes durante el manejo de post-cosecha, proceso comercial, distribución, almacenamiento y preparación (Gregory, 1996; citado por Erenturk *et al.*, 2004).

La vitamina C (ácido ascórbico) es normalmente seleccionada como un índice de la calidad nutritiva, debido a su naturaleza lábil comparada con otros nutrientes en los alimentos. La degradación de ácido ascórbico depende de varios factores que incluyen al oxígeno, catálisis de ion de metal, luz, temperatura y grado higrométrico (Rojas & Gerschenson, 2001). La solubilidad de la vitamina C en el agua y la sensibilidad al calor se comparó, con la mayoría de los otros nutrientes, que puede causar los problemas durante la preservación de alimentos. La oxidación de ingredientes de los alimentos como vitaminas, pigmentos y los compuestos del aroma son las causas más importantes de pérdida de calidad durante el procesado de alimentos y son la reacción del deterioro principal (Anderson & Lingnert, 1997 citado por Erenturk *et al.*, 2004).

En los alimentos originales, las gotitas de lípido, lisosomas o membranas son protegidos por las capas de proteínas hidratadas, contra el acceso de oxígeno del aire. Debido a la deshidratación, la capa protectora es deteriorada. Por tanto, los lípidos y estructuras no lipídicas son expuestas al oxígeno, siendo la oxidación de lípidos (incluido los esteroides) y estructuras no lipídicas más rápidos que en alimentos originales ricos en agua. Altas concentraciones de radicales libres implica mayor pérdida de los antioxidantes.

Los cambios en la actividad antioxidante relacionado con la remoción de agua es muy relativo, si la evaporación del agua es moderada y el tiempo de remoción es mínima; los antioxidantes no son dañados usualmente durante el secado (Pocorny & Schmidt, 2001).

El estudio de la cinética de secado es esencial para diseñar un correcto proceso de secado, que permita además obtener un producto de calidad. Por otro lado, un buen modelo matemático, que describa el proceso de secado puede considerarse como una herramienta muy eficiente para salvar obstáculos, tales como, daños al producto, consumo excesivo de energía, desgaste del equipo o la disminución del rendimiento (Olivas *et al.*, 1999 citado por Vega *et al.*, 2005).

2.3.2 CURVAS DE VELOCIDAD DE SECADO

En la Figura 1b, se muestra la curva de la velocidad de secado para condiciones de secado constante. Empezando en el tiempo cero, el contenido inicial de humedad libre corresponde al punto A. Al principio, el sólido suele estar a una temperatura inferior de la que tendrá al final, y la velocidad de evaporación va en aumento. Al llegar al punto B, la temperatura de la superficie alcanza su valor de equilibrio. Por otra parte, si el sólido está bastante caliente al principio de la operación, la velocidad de secado puede iniciarse en un punto A'. Este periodo inicial de ajuste en estado no estacionario suele ser bastante corto y por lo general se pasa por alto en el análisis de los tiempos de secado.

La curva de la Figura 1a, es recta entre los puntos B y C, por lo que la pendiente y la velocidad son constantes durante este periodo. Este periodo de velocidad constante de secado corresponde a la línea BC en la Figura 1b.

En el punto C de ambas gráficas, la velocidad de secado comienza a disminuir en el periodo de velocidad decreciente, hasta llegar al punto D. En este primer periodo de velocidad decreciente, la velocidad corresponde a la línea CD en la Figura 1b, y por lo general es lineal.

En el punto D la velocidad de secado disminuye con más rapidez a un, hasta que llega al punto E, donde el contenido de humedad de equilibrio X^* , $X = X^* - X^* = 0$. En el secado de algunos materiales, la región CD no existe, o bien constituye la totalidad del

periodo de velocidad decreciente.

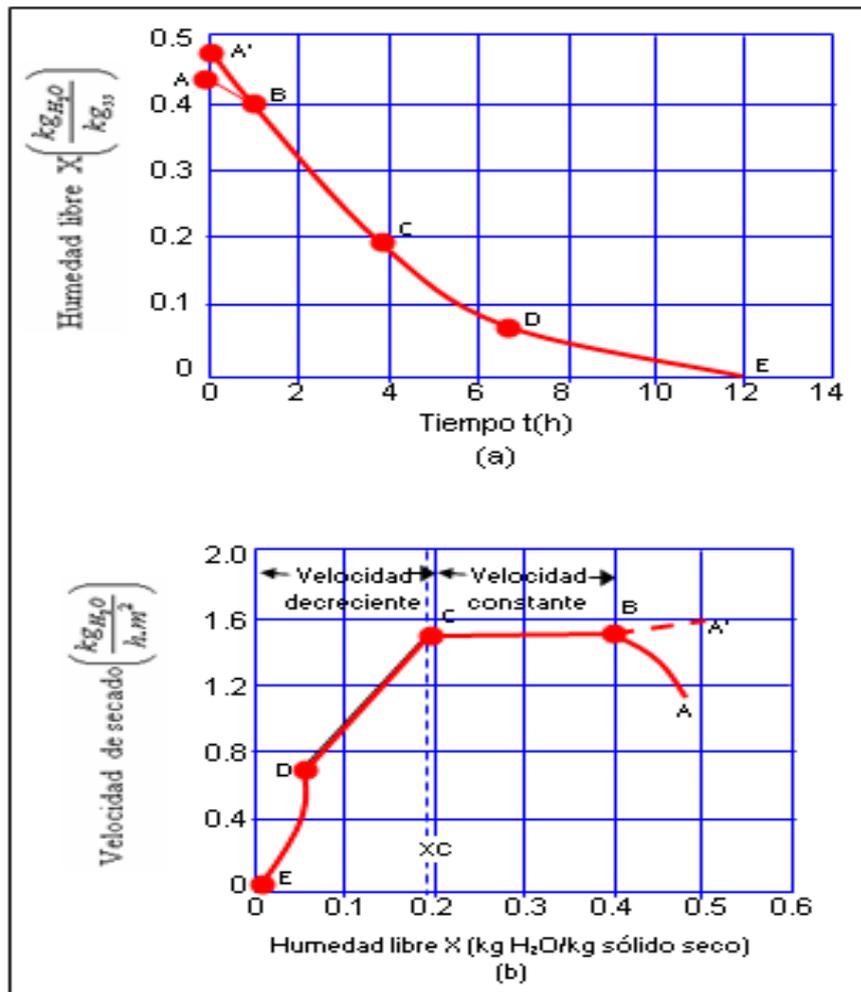


Fig. 1: Curva típica de velocidad de secado constante: a) gráfica de los datos de humedad libre en función del tiempo, b) curva de velocidad de secado en función del contenido de humedad libre (Adaptado de Geankoplis, 1998).

2.3.3 SECADO DURANTE EL PERIODO DE VELOCIDAD CONSTANTE

El secado de diversos sólidos bajo diferentes condiciones constantes de secado casi siempre produce curvas de forma variable en el periodo de velocidad decreciente, pero en general siempre están presente las dos zonas principales de la curva de secado: el periodo de velocidad constante y el periodo de velocidad decreciente.

Durante el primer periodo, la superficie del sólido esta muy mojada al principio y sobre ella hay una película de agua continua. Esta capa de agua es agua no combinada y actúa como si el sólido no estuviera presente. La velocidad de evaporación con las condiciones establecidas para el proceso, es independiente del sólido y esencialmente igual a la velocidad que tendría una superficie líquida pura. Sin embargo, las ondulaciones y hendiduras en la superficie del sólido ayudan a obtener una velocidad más alta de la tendría un superficie plana.

Si el sólido es poroso, la mayor parte del agua que se evapora durante el periodo de velocidad constante proviene de su interior. Este periodo continúa mientras el agua siga llegando a la superficie con la misma rapidez con la que se evapora. La evaporación durante este periodo es similar a la que existe cuando se determina la temperatura de bulbo húmedo.

2.3.4 SECADO DURANTE EL PERIODO DE VELOCIDAD DECRECIENTE

El punto C de la Figura 1b, corresponde al contenido crítico de humedad libre X_c . En este punto no hay suficiente agua en la superficie para mantener una película continua. La superficie ya no esta totalmente mojada, y la porción mojada comienza a disminuir durante el periodo de velocidad decreciente hasta que la superficie queda seca en su totalidad en el punto D, cuando la superficie esta seca en su totalidad. El plano de evaporación comienza a desplazarse con lentitud por debajo de la superficie. El calor de evaporación se transfiere a través del sólido hasta la zona de vaporización. El agua evaporada atraviesa el sólido para llegar hasta la corriente de aire.

En algunos casos no hay discontinuidad definida en el punto D, y el cambio de condiciones de secado de una superficie con una humedad parcial a una superficie completamente seca, es tan gradual que no se detecte un punto de inflexión. Es posible que la cantidad de humedad que se elimina durante el periodo de velocidad decreciente sea bastante pequeña; no obstante, el tiempo requerido puede ser largo (Geankoplis, 1998).

2.4 MICROENCAPSULAMIENTO

2.4.1 GENERALIDADES

La microencapsulación puede ser considerada como una forma especial de empaquetar en la que un material en particular puede ser cubierto de manera individual para protegerlo de factores que puedan causar deterioro, tales como: oxígeno, humedad o luz. En un sentido amplio, la microencapsulación provee un medio de envasar, separar y almacenar materiales en escala microscópica, esto protege al material sensible, extendiendo su vida en anaquel (Re, 1998 citado por Pedroza, 2002).

La microencapsulación hoy en día se aplica para preservar y/o proteger una amplia variedad de alimentos como: agentes saborizantes, enzimas, ácidos, bases, preservantes, agentes fermentadores, antioxidantes, colorantes, entre otros (Gibbs *et al.*, 1999). El material que es cubierto se refiere como fase interna y el material que recubre es llamado pared y generalmente no reacciona con el material a encapsular (Balassa & Brody, 1968 citado por Pedroza, 2002).

Las microcápsulas presentan una amplia variedad de estructuras, algunas son de geometría esférica con una fase interna continua rodeada por una pared también continua (estructura de partícula simple), mientras que otras pueden tener una geometría irregular y pueden tener la fase interna distribuida en una matriz de material de pared múltiple (estructuras agregadas) (Gibbs *et al.*, 1999).

El microencapsulamiento involucra la incorporación de varios ingredientes dentro de una capsula de aproximadamente 5 a 300 micras de diámetro (Lee, 1996 citado por Gibbs *et al.*, 1999).

2.4.2 MÉTODO DE ENCAPSULAMIENTO

Para preparar las microcápsulas hay numerosas técnicas, y se ha sugerido que podrían identificarse más de 200 métodos en la literatura de patentes (Magdassi & Vinetsky, 1996; Brazel, 1999 citado por Pedroza, 2002). No obstante algunos autores clasifican a los métodos de encapsulación en, físicos o mecánicos y químicos. Como

métodos químicos pueden citarse: Coacervación compleja, polimerización interfacial, gelificación iónica, incompatibilidad polimérica y atrapamiento en liposomas (Gibbs *et al.*, 1999).

Entre los métodos físicos se encuentran; el secado por atomización y la encapsulación por lecho fluidizado, como los más comunes (Gibbs *et al.*, 1999).

2.4.3 SECADO POR ATOMIZACION

2.4.3.1 GENERALIDADES

Este método es ampliamente utilizado para encapsular ingredientes alimenticios y es el más económico (Risch, 1995; Re, 1998 citado por Pedroza, 2002).

Este proceso es en sí, uno de deshidratación, pero se considera también de encapsulación ya que puede producir partículas que atrapan el material a cubrir. Por definición, corresponde a la transformación de un fluido en un material sólido, atomizándolo en forma de gotas minúsculas en un medio de secado en caliente (Pedroza, 2002).

El proceso consiste de la preparación de la emulsión o suspensión del material a encapsular en una solución de encapsulante, la atomización y la deshidratación de las partículas atomizadas. La adecuada selección del atomizador y el agente encapsulante, son factores críticos. Una de las grandes ventajas de este proceso, además de su simplicidad, es que es apropiado para materiales sensibles al calor, ya que el tiempo de exposición a temperaturas elevadas es muy corto (5 a 30 s) (Gibbs *et al.*, 1999; Deasy, 1983 citado por Pedroza, 2002).

Zilberboim *et al.* (1986) citado por Gibbs *et al.* (1999) mencionan que la técnica de encapsulamiento es un método común para trabajar con productos termosensibles, permite convertir materiales líquido en sólidos o en formas pulverulentas más prácticas, protege el material activo y extiende la vida en anaquel.

2.4.3.2 FACTORES QUE AFECTAN LAS PROPIEDADES DE LOS PRODUCTOS SECADOS POR ATOMIZACIÓN

El secado por atomización produce partículas, con características diferentes a las que tienen las obtenidas por otros procesos. Sin embargo, estas propiedades son afectadas por un gran número de variables que se pueden dar en el proceso, tales como:

- Características inherentes del material de alimentación.
- Concentración del material
- Temperatura de alimentación
- Temperatura de ingreso/salida del aire
- Métodos y condiciones de atomización
- Coeficiente de transferencia de masa controlado por la velocidad y humedad relativa del aire

(Bangs y Reiniccius, 1981)

a. INFLUENCIA DE LAS CARACTERÍSTICAS INHERENTES DEL MATERIAL DE ALIMENTACIÓN

Bangs y Reineccious (1981) encontraron evidencias que las características de los sólidos son más importantes que el contenido de sólidos. La propia naturaleza del material influye en la calidad del producto final obtenido.

Christensen (1970) menciona que los productos secados por atomización, con bajo porcentaje de sólidos solubles tienen dificultades para secar, recolecta en pequeñas cantidades de muestra, la muestra recolectada en el secador es viscosa e higroscópica y difícil de manipular.

Los productos más difíciles de secar por atomización, son aquellos en que los sólidos totales contienen poco soporte celulósico o amiláceo y contienen azúcares o componentes que producen sólidos higroscópicos (Casp y Abril; 1999).

La extrema higroscopicidad combinada con la naturaleza termoplástica de tales productos da origen a problemas de deposición en las paredes y obstaculiza el manipuleo

subsiguiente de los productos. Las dos formas más fructíferas de aproximación hacia la solución de estos problemas parece ser el uso de aditivos como coadyuvantes de secado (Brennan *et al.*, 1971).

b. CONCENTRACIÓN DEL MATERIAL

Durante el proceso de secado cada pequeña gota será transformada en una partícula de polvo y cuanto más alta sea la concentración de sólidos, más grande será la cantidad de polvo en comparación con la cantidad de agua evaporada. Consecuentemente será una ventaja secar atomización a los líquidos con alto contenido de sólidos (Domina 1985 citado por Finney *et al.*, 2002).

El aumento en el contenido de sólidos puede llevar al material a un incremento en la viscosidad. La viscosidad es otra característica de los materiales que son secadas por atomización, que influyen, en el producto final. Es conocido que viscosidades incrementadas producen partículas grandes y huecas, que resultan con una densidad aparente baja (Seltzer y Settlemyer, 1949; Marshall, 1954 citado por Bangs y Reineccius, 1981).

Los sólidos de alimentación, son considerablemente importantes determinan la retención de sabor (Finney *et al.*, 2002).

La explicación a esta coincidencia puede darse de la misma forma que al aumentar el contenido de sólidos, es decir mientras más alta es la temperatura de secado y/o más alta la concentración de sólidos de la carga, más corto es el periodo de secado constante (Real, 1965 citado por Bangs y Reineccius, 1981).

Rosenberg *et al.* (1985) citado por Sarmiento (2003) observaron en capsulas de dextrosa equivalente (DE) 20, que la superficie de las partículas tenían poros, grietas y abolladuras profundas, por lo que al encapsular un material volátil o un ingrediente oxidativo se obtendrá un producto pobre. Por otro lado Main (1978) citado por Sarmiento (2003) observó que las microcapsulas formadas con goma arábiga y maltodextrinas presentaban superficies externas con algunas abolladuras, pero libres de poros y grietas.

c. TEMPERATURA DE ALIMENTACIÓN

Tavella (1972) menciona que la viscosidad es reducida con el incremento de la temperatura, y con ello las gotas producidas en secado por atomización son menores.

d. INFLUENCIA DE TEMPERATURA DE INGRESO/SALIDA DEL AIRE DEL SECADOR

La retención del sabor esta influenciada por la entrada y salida de la temperatura de aire. En general, una entrada bastante alta de la temperatura de aire permitir formación rápida de una membrana del semipermeable en la superficie de la gota pero aun no es tan alto para causar daño por calor al producto seco (Thijssen 1972; Rulkens y Thijssen 1972 citado por Finney *et al.*, 2002). Las gotas son secadas, a la temperatura de bulbo húmedo. Por esta razón el aire de secado a muy altas temperaturas puede ser tolerado en un secador, con un mínimo dado a los componentes sensibles al calor (Goula y Adamopoulos, 2005).

Tavella (1972) menciona que el grado de hueco o vacío de la partícula será incrementado con incremento de la temperatura. Un incremento en la temperatura de ingreso eleva la capacidad evaporativa del secador a niveles constantes de aire, promoviendo la formación de partículas ligeramente más grandes, que secado a temperaturas bajas, debido a que el secado rápido promueve el endurecimiento de la capa exterior de la partícula y un subsiguiente atrapamiento de la humedad residual, causando expansión y los productos secan a una estructura mas porosa, y con ello promueven una reducción en la densidad aparente (Verhey 1972 a,b citado por Finney *et al.*, 2002).

Finney *et al.* (2002) observaron en microfotografías que, las muestras obtenidas con temperatura (170°C) de entrada baja, presentaron partículas con ondulaciones y afiladas en la superficie de la partícula seca. En contraste con la superficie muy lisa observada para muestras obtenidas a una temperatura (220°C) de entrada alta. Por otro lado, las partículas obtenidas a temperatura de entrada alta presentaron el área de la superficie pequeña, que la temperatura de la entrada baja. El tipo de atomización no parecía causar mucha diferencia en la forma entre las muestras.

Las partículas pequeñas son normalmente más densas que las partículas grandes. El polvo más denso es más compacto tiene la permeabilidad bajo al oxígeno y, por consiguiente, una vida en anaquel más larga. Sin embargo, no sólo es la densidad que esta involucrado, si no también el tamaño de las partículas, geometría, y porosidad que influyen en la permeabilidad de la matriz al oxígeno y finalmente en la vida en anaquel del producto (Buffo y Reineccius 2000 citado por Finney *et al.*, 2002).

Rulkens y Thijssen (1972) citado por Finney *et al.*, (2002) mencionan que la retención del sabor esta influenciada por la entrada y salida de la temperatura del aire. En general, una entrada bastante alta de la temperatura de aire permitir formación rápida de una membrana semipermeable en la superficie de la gota. Pero aun no es tan alto para causar daño por calor al producto seco.

Reineccius (2001) citado por Finney (2002) mencionan que la porosidad de la partícula al oxígeno es el factor mayor que determina vida en anaquel de polvos deshidratados por atomización. Finney *et al.*, (2002) observaron una reducción sustancial en la retención del sabor, con una entrada elevada temperatura de aire, y mencionan que las características físico químicas, la estabilidad y vida en anaquel, del producto final, dependen principalmente de la porosidad de partículas secas.

e. MÉTODOS Y CONDICIONES DE ATOMIZACIÓN

En la atomización, la rueda centrífuga, la velocidad rotatoria, el diámetro de la rueda del pulverizador, orificio de la boquilla y las propiedades físicas de la matriz (como la viscosidad y concentración de los sólidos) principalmente determinan el tamaño de las partículas. Una presión alta y el orificio pequeño producirán partículas menores y las condiciones opuestas en las partículas más grandes (Reineccius 2001citado por Finney *et al.*, 2002).

Tavella (1972) menciona que, con bajas velocidades de atomización son producidas partículas esféricas sólidas, conforme se aumenta la velocidad se obtendrá gotitas menores y la densidad aparente remanente es aproximadamente constante. Como la velocidad es aumentada, las partículas llegan a ser más huecas y hay disminución de densidad, hasta que, eventualmente las partículas llegan a ser tan frágiles que se rompen y esta situación es

usual para encontrar un ligero incremento de la densidad aparente.

En los experimentos ejecutados, la velocidad del atomizador fue variada desde 25000 rpm hasta 37000 rpm., manteniendo constantes otros parámetros. Dentro de este rango la velocidad del atomizador no tuvo efectos sobre el contenido de humedad, tamaño de partícula y contenido de sólidos insolubles. La densidad de la masa se incremento ligeramente con el incremento de la velocidad del atomizador (Brennan *et al.*, 1971).

El tamaño de las partículas varía en razón inversa a la velocidad del disco, pero hay que determinar la relación exacta entre las variables. Se ha sugerido que existen presiones máximas por encima de las cuales es inútil gastar energía adicional (Perry, 1966).

2.4.3.3 MATERIALES DE ENCAPSULACIÓN

Independientemente del método para preparar las microcápsulas, el primer paso para encapsular un ingrediente es la elección de una matriz de encapsulación adecuada. Los encapsulantes o materiales formadores de pared más utilizados en secado por atomización son: Carbohidratos (almidón y derivados, maltodextrinas, jarabes de maíz, ciclodextrinas, carboximetilcelulosa y derivados); gomas (arábiga, mezquite, alginato de sodio); lípidos (ceras, parafinas, grasas) y proteínas (gelatina, proteína de soya, caseinatos, suero de leche y zeína). Desde luego que el tipo de material encapsulante tendrá influencia en la estabilidad de la emulsión antes de secar, en el tamaño de partícula, en las propiedades de flujo, en las mecánicas y en la vida útil del material deshidratado. Otras consideraciones importantes son que la matriz sea relativamente inerte a los componentes del material sensibles y que sea formador de película (Risch, 1995; Re, 1998, citado por Bangs y Reineccius 1981; Pedroza, 2002).

Los encapsulantes ampliamente utilizados en secado por atomización para retener los sabores son: maltodextrina, goma arábica y almidones modificados, pero sufren la desventaja de producir soluciones de alta viscosidad cuando se disuelve a altas concentraciones (Goubet *et al.*, 2001 citado por Shiga *et al.*, 2004).

El pH es un factor que puede afectar a los polisacáridos que se comportan como electrolitos (goma arábica, goma de mezquite, alginato, carragenina), alterando su

conformación debido a las cargas intramoleculares, lo que da como resultado diferentes tamaños de partícula de las microcápsulas, modificaciones en la permeabilidad de las películas que forman y en la eficiencia de encapsulación y de retención de los aceites. La naturaleza del polímero también tiene efecto sobre estas propiedades (Pedroza *et al.*, 1999, citado por Pedroza, 2002).

Lumdubwong (2001) citado por Pedroza (2002) menciona que usando polisacáridos como agentes encapsulantes, como en el secado por atomización, también debería revisarse detalladamente sus propiedades funcionales. Por ejemplo, las maltodextrinas se usan en combinación con goma arábica para contribuir en la continuidad estructural durante la formación de la película encapsulante, al combinar dos compuestos de muy diferente peso molecular (aproximadamente 1 800 y 1 700 000 respectivamente) mejorando con ello la eficiencia de encapsulación de aceites, aún de bajo peso molecular. Sin embargo, el grado de hidrólisis de las maltodextrinas también es un factor a considerar, ya que muy bajos equivalentes de dextrosa no tienen el efecto positivo mencionado.

Recientemente se ha demostrado que por la interacción existente entre la goma arábica y los lípidos se previene su oxidación. El mecanismo propuesto está relacionado con las propiedades de la goma arábica de adsorberse en la interfase aceite/agua formando una película viscoelástica, donde los lípidos contribuyen con la coherencia de la estructura a través de la formación de empalmes o uniones por medio de gotitas de aceite en los anclajes de las cadenas de la goma arábica (Matsumara *et al.*, 2000, citado por Pedroza, 2002).

Continuando con las propiedades de las paredes, ya se mencionó que el alginato no es adecuado si se busca retener moléculas no lipídicas de bajo peso molecular, lo mismo ocurre cuando se usa carragenina o zeína (López-Alvarado *et al.*, 1994, citado Pedroza, 2002), no siendo así para cápsulas de pared lipídica, donde pueden retenerse moléculas pequeñas solubles en agua como la tiamina, riboflavina y la glucosa (Villamar & Langdon, 1993, citado por Pedroza, 2002).

Rosenberg *et al.* (1985) citado por Sarmiento (2003) observaron en capsulas de dextrosa equivalente (DE) 20, que la superficie de las partículas tenían poros, grietas y abolladuras profundas, por lo que al encapsular un material volátil o un ingrediente oxido-

sensitivo se obtendrá un producto pobre. Por otro lado Main (1978) citado por Sarmiento (2003) observó que las microcapsulas formadas con goma arábica y maltodextrinas presentaban superficies externas con algunas abolladuras, pero libres de poros y grietas.

Estudios realizados, reportan beneficiosos efectos al usar materiales como matriz en el secado por atomización de diversos productos. Risch y Reineccius (1988) citado por Gibbs *et al.* (1999) mencionan que utilizando goma arábica mejoró la retención de aceite esencial de naranja y con ello disminuyó la oxidación. Dziezak (1998) citado por Gibbs *et al.* (1999) mencionan que la encapsulación protege al ácido ascórbico de la humedad y oxígeno.

2.5 PROPIEDADES FÍSICAS Y QUÍMICAS DE LOS ALIMENTOS SECOS

2.5.1 ACTIVIDAD DE AGUA

El término de actividad de agua (a_w) se implantó para tener en cuenta la intensidad con que el agua se asocia a los diferentes componentes no acuosos del alimento (Fennema, 2000). Los componentes no acuosos del alimento son: biopolímeros, azúcares, sales orgánicas e inorgánicas (Chirife, 1999).

La a_w es un término utilizado para indicar la relación entre la humedad de un alimento y la humedad relativa de equilibrio de la atmósfera que le rodea (Barbosa y Vega, 2000).

La a_w es un factor muy importante en el crecimiento microbiológico, producción de toxinas y las reacciones enzimáticas y no-enzimáticas (Barbosa y Vega, 2000).

Cambios en la temperatura del ambiente, luz, presión, pH, aditivos y modificaciones en el tamaño de las partículas, pueden alterar el estado molecular del agua e influir en la reactividad de los compuestos sobre las propiedades funcionales, color, aroma, sabor, textura, estabilidad, aceptabilidad de materias primas y alimentos procesados con rangos de a_w relativamente estrechos (Chandía, 1995 citado por Hermosilla *et al.*, sin año).

La a_w para el cese del crecimiento de diversos microorganismos es significativamente inferior si el producto se ajusta por desorción en lugar de hacerlo por adsorción (Fennema, 2000).

2.5.2 ISOTERMAS DE SORCIÓN DE HUMEDAD

Las isotermas de sorción de agua de los alimentos muestran la relación de equilibrio entre el contenido de humedad de los alimentos y a_w a temperatura y presión constante (Iglesias y Chirife, 1982).

Bell y Labuza (2000) mencionan que si algún alimento se coloca en una atmósfera seca, cede vapor de agua, hasta que la presión resultante llegue a ser igual a la tensión de vapor de equilibrio; a este fenómeno se le denomina desorción.

2.5.2.1 TIPOS DE SORCIÓN

La sorción, depende de la asociación entre el gas y la superficie sólida, esta asociación puede ser de carácter químico o físico.

a. QUEMISORCIÓN

Flores (2003) menciona que, las moléculas adsorbidas se unen a la superficie mediante fuerzas covalentes del mismo tipo general que las que ocurre entre los átomos de las moléculas. El calor que se desprende por mol en este tipo de adsorción, conocido como quemisorción, en general es comparable al que se desprende de un enlace químico, o sea de 100 a 500 kJ/mol. Una consecuencia importante de la quemisorción es que después de que la superficie se ha recubierto con una sola capa de moléculas adsorbidas, queda saturada y solo puede ocurrir adsorción adicional sobre la capa ya presente, y en general es de tipo débil.

b. FISISORCIÓN

Flores (2003) afirma que, las fuerzas de naturaleza física y la adsorción es relativamente débil, las fuerzas corresponden a las fuerzas de Van der Waals. Este tipo de

adsorción se conoce como adsorción física. El calor que se desprende cuando un mol de gas experimenta fisisorción en general es bajo, de menos de 20kJ/mol. Este tipo de adsorción desempeña un papel poco importante en la catálisis.

2.5.2.2 CLASIFICACIÓN DE ISOTERMA DE SORCIÓN

Isoterma de tipo I, es típico de agentes higroscópicos. Estos tipos de ingredientes adsorben agua sobre sitios específicos con una energía alta dentro de una red de capilares no hinchados, resultando con una propiedad de adsorción de agua a baja a_w .

La mayoría de los alimentos, siguen una curva representativa de forma sigmoidal de isoterma de tipo II. La curva resultante es causada por la combinación de efectos coligativos, efectos capilares, e interacciones entre la superficie y agua.

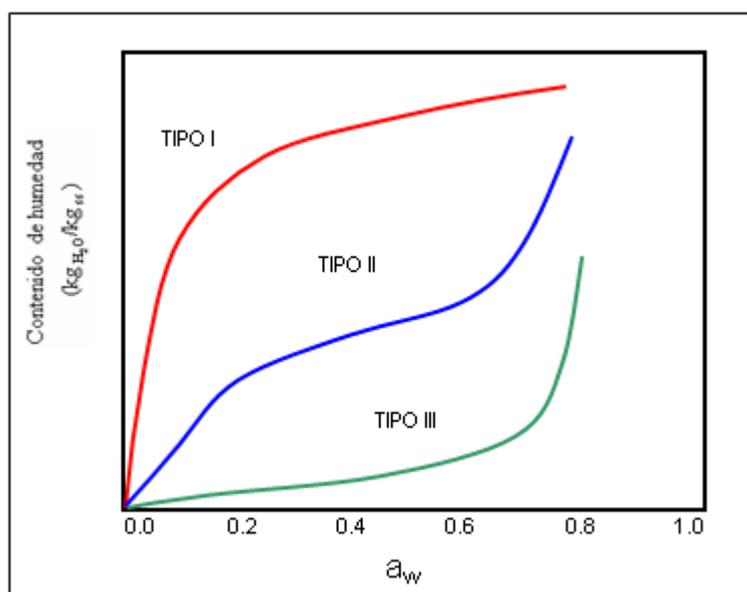


Fig. 2: Clasificación de isoterma de sorción de humedad (Adaptado de Bell & Labuza, 2000)

La curva de tipo III, representa la isoterma de adsorción de una sustancia cristalina (sacarosa) y muestra muy poca humedad, pero a medida que la a_w aumenta (0,7–0,8), comienza a ocurrir la disolución de la estructura cristalina. La forma de esta curva es debida a la interacción del agua solo por vía enlace de hidrogeno con grupos hidroxilo sobre la superficie cristalina (Bell & Labuza, 2000).

2.5.2.3 CÁLCULO DE MONOCAPA

El contenido de humedad de monocapa puede encontrarse usando varios modelos matemáticos, para los alimentos los modelos que más se adecuan son, la ecuación de Brunauer Emmett y Teller (BET) y Guggenheim Anderson de Boer (GAB), (Bell y Labuza, 2000).

a. MODELO DE GAB

El grupo europeo de proyectos “COST” sobre propiedades físicas de los alimentos, usó y recomendó el modelo de Guggen Anderson y Boer (GAB); para la construcción de isotermas de sorción de alimentos (Spies & Wolf, 1987; citado por Giovanelli, 2001).

Esta ecuación de tres parámetros con coeficientes que tienen significado físico, se ajusta muy bien a datos experimentales hasta una a_w de 0,94 en muchos casos y menciona que describe matemáticamente las isotermas de sorción de humedad para la mayoría de los alimentos, mejor que las ecuaciones de dos parámetros (Lomauro *et al.*, 1985).

El modelo de GAB es muy utilizado para predecir datos de niveles de a_w aproximadamente hasta 0,9 y da mejores ajustes que la ecuación de BET en un amplio intervalo de contenido de humedad (Barbosa y Vega, 2000).

Bell and Labuza (2000) mencionan que el modelo GAB no solamente permite calcular el valor de la humedad de monocapa si no que también entrega información relativa del calor de sorción de la monocapa y multicapa. La ecuación de GAB tiene la forma original:

$$\frac{X_e}{X_m} = \frac{C.K.a_w}{K - K.a_w + C.K.a_w} \quad (1)$$

Donde:

a_w : actividad de agua

X_e : humedad de equilibrio del producto ($\text{Kg}_{\text{agua}} / \text{Kg}_{\text{s.s}}$)

- X_m : humedad de la monocapa y representa la humedad que alcanza el producto cuando los productos de sorción primarios están saturados por molécula de agua.
- C : constante de Guggenheim característica del producto y relacionada con el calor de sorción de la monocapa.
- K : factor de corrección relacionado con el calor de sorción de la multicapa.

Por su parte, la constante C y K se obtienen

$$C = c' \exp\left[\frac{H_m - H_n}{RT}\right] \quad (2)$$

$$K = K' \exp\left[\frac{H_p - H_n}{RT}\right] \quad (3)$$

- H_m : calor total de sorción de la primera capa en los sitios primarios (monocapa)
- H_n : calor total de sorción de las multicapas
- H_p : calor de condensación del vapor de agua pura
- R : constante universal de los gases
- T : temperatura absoluta
- Q_s : calor de sorción

Según Bizot (1983) citado por Huamán (2001) menciona que, para hallar el calor de adsorción de la capa monocapa se puede determinar utilizando la siguiente ecuación:

$$Q_s = R.T.LnC \quad (4)$$

III. MATERIALES Y MÉTODOS

3.1 LUGAR DE EJECUCIÓN

El presente trabajo de investigación se llevó a cabo en la Planta Piloto de Tecnología de Alimentos y Productos Agropecuarios (TAPA), laboratorios de Análisis Físico-Químico e Instrumentación, instalaciones pertenecientes a la Facultad de Industrias Alimentarias de la Universidad Nacional Agraria La Molina. Lima. Perú.

3.2 MATERIA PRIMA E INSUMO

3.2.1 MATERIA PRIMA

La materia prima utilizada para esta investigación, fue la mashua (*Tropaeolum tuberosum* R & P) cultivar “zapallo amarillo”, proveniente del distrito Huacrapucquio, provincia Huancayo, departamento de Junín, cosechados en el mes de mayo. El reconocimiento de este cultivar se realizó, con el apoyo técnico del jefe del Programa de Investigación en Raíces y Tuberosas de la Universidad Nacional Agraria la Molina.

3.2.2 INSUMO

a. ALMIDON: MIRACAP

Miracap es un almidón de maíz waxi modificado, con propiedades similares a la goma arábica.

b. PROPIEDADES

Miracap se presenta como polvo blanco, relativamente insípido, fluido y soluble en agua; forma soluciones con baja viscosidad y se puede utilizar este producto similar en la

misma concentración, esta característica "altos sólidos – baja viscosidad" facilita la formación de emulsiones estables, uniformes que son fácilmente utilizados en secado por atomización.

c. APLICACIÓN

Miracap es soluble en agua fría y puede ser utilizado eficazmente en muchas aplicaciones sin calentamiento. Tiene excelente película que moldea las partículas; potencialmente es útil en las aplicaciones como, encapsulación de lecho inestables de partículas sólidas (Staley Food Ingredients, 2000)

3.3 EQUIPOS, REACTIVOS Y MATERIALES.

3.3.1 EQUIPOS

- Agitador eléctrico LABOR.
- Aparato de SOXHLET.
- Atomizador NIRO ATOMIZER, N° 4963.
- Anemómetro SPER SCIENTIFIC.
- Balanza analítica SARTORIUS, capacidad 0-200 g, sensibilidad $\pm 0,0001$ g.
- Balanza eléctrica ADVENTURER, modelo av 4101, capacidad 0-4kg.
- Centrífuga HETTICH.
- Computadora TOSHIBA.
- Cronómetro CASIO.
- Digestor y destilador micro-Kjendhal.
- Espectrofotómetro SPECTRONIC GENESIS 6.
- Estufa LABOR MEMMERT, modelo 500.
- Extractor de jugos, NATIONAL modelo, MJ. 40N.
- Higrómetro EXTECH.
- Juego de campanas con sus respectivas sales para determinar isotermas de desorción.
- Mufla LABOR MUSZCRIPARINUVEEK.
- Molino WILLEY MILL, modelo CYC.
- Micropipeta de 20–200 μ L y 100–1000 μ L, marca BRAND.

- Potenciómetro SCHOTT GERAT, modelo CG 728.
- Refractómetro manual FISHER (0-32 °Brix).
- Rodajadora HOBART, modelo HZ.
- Refrigeradora congeladora GENERAL ELECTRIC.
- Secador de bandejas por flujo de aire de caliente.
- Selladora industrial EFISA.

3.3.2 REACTIVOS

- Agua destilada
- Metanol (Química Service)
- Acido Sulfúrico (Química Service)
- Hidróxido de sodio en lentejas (Merk)
- Radical 2,2-difenil-1-picril hidrazil (DPPH) (Química Service)
- Reactivo Estándar de actividad antioxidante Trolox (6-hydroxy-2,5,7,8-tetramethylchroman- 2- carboxilic acid) (Aldrich)

3.3.3 MATERIALES

- Tubos FALCÓN de 100 ml.
- Erlenmeyer de 50, 100 y 250 ml.
- Fiolas de 50 y 100 ml.
- Beacker de 100, 250 y 500 ml.
- Pipetas de 1, 2, 5,10 y 20 ml.
- Placas petri
- Embudos de vidrio
- Baguetas
- Probetas de 10, 20, 50,100 y 250 ml.
- Termómetros
- Mallas nº 70 (250µm)
- Papel de aluminio
- Mortero y pilón de porcelana

3.4 MÉTODOS DE CONTROL

3.4.1 ANÁLISIS QUÍMICO PROXIMAL

- **Humedad.** Se evaluó la humedad de la muestra por pérdida de peso que sufre durante el calentamiento, hasta obtener peso constante (AOAC, 1998).
- **Cenizas.** La muestra se incineró a 550°C (AOAC, 1998).
- **Proteína.** Se determinó mediante el método semi-micro Kjeldahl, considerando 6,25 como factor de conversión del nitrógeno a proteína (AOAC, 1998).
- **Grasa.** Se determinó empleando el método Soxhlet (AOAC, 1998).
- **Fibra cruda.** Se determinó eliminando los carbohidratos solubles por hidrólisis a compuestos más simples mediante la acción de los ácidos y álcalis débiles en caliente, luego fue incinerado y por diferencia se obtuvo la fibra (AOAC, 1998).
- **Extracto libre de nitrógeno (ELN).** Se obtuvo por diferencia del análisis de ceniza, proteínas, grasas y fibra cruda (AOAC, 1998).

3.4.2 ANÁLISIS FÍSICO-QUÍMICO.

- **pH.** Se determinó mediante un potenciómetro, siguiendo el método de lectura directa recomendada por la AOAC (1998).
- **Sólidos solubles (°Brix).** Se determinó, según el método recomendado por la AOAC (1998).
- **Azúcares reductores.** Se determinó por el método DNS recomendado por Miller (1959).
- **Ácido ascórbico.** El contenido de ácido ascórbico se determinó, siguiendo la metodología sugerida por la AOAC (1998).

3.4.3 METODOLOGIA PARA CUANTIFICAR ACTIVIDAD ANTIOXIDANTE

Actividad antioxidante, fue determinado por el método 2,2, Difenil-1-Picril Hidracilo (DPPH), método adaptado de Brand *et al.* (1995). Los resultados obtenidos se expresaron en μg Equivalente Trolox/gramos de muestra, tomando como base una curva estándar de Trolox. El procedimiento se da en el Apéndice 1.

3.4.4 METODOLOGIA PARA DETERMINAR LA ISOTERMA DE DESORCIÓN

Para la determinación de la isoterma de desorción se siguió la metodología utilizada por Gionovanelli (2001) y Bell and Labuza (2000). Esta consiste en tomar una masa conocida de muestra (fresca), la que se deja equilibrar con la atmósfera producida por una disolución saturada de sal de humedad relativa conocida dentro de un recipiente herméticamente cerrado (Cuadro 4). Se controló el peso de la muestra cada 3 días hasta llegar a peso constante (condición de equilibrio). En el momento que las muestras llegaron a peso constante, se determinó el contenido de humedad por medio de la metodología gravimétrica. Los datos experimentales de la isoterma de desorción se modelaron con la ecuación propuesta por Guggenheim, Anderson y de Boer, comúnmente llamado GAB, la cual tiene amplio uso en los alimentos.

Cuadro 4: Sales utilizadas y su correspondiente actividad de agua para las tres temperaturas.

Sales	Actividad de agua		
	40°C	50°C	60°C
Cloruro de litio	0,112	0,111	0,109
Acetato de potasio	0,207	0,200	0,190
Cloruro de magnesio	0,316	0,305	0,293
Dicromato de sodio	0,510	0,500	0,490
Nitrito de sodio	0,620	0,610	0,600
Cloruro de sodio	0,747	0,740	0,720
Cromato de potasio	0,840	0,830	0,820

Fuente: Bell and Labuza (2000)

3.4.5 METODOLOGIA PARA DETERMINAR LAS CURVAS DE SECADO

Para trazar las curvas de secado: curva de secado y velocidad de secado se utilizó la metodología propuesta por Geankoplis (1998).

Los datos que se obtienen de un experimento de secado por lotes, generalmente se expresan como peso total W del sólido húmedo (sólido seco más humedad) a diferentes tiempos t horas en el periodo de secado. Estos valores se pueden convertir a datos de velocidad de secado por los siguientes procedimientos. Primero se recalculan los datos. Si W es el peso del sólido húmedo en kilogramos totales de agua más sólido seco y W_s es el peso del sólido seco en kilogramos.

$$X_t = \frac{W - W_s}{W_s} \left(\frac{\text{Kg agua}}{\text{kg s.s.}} \right) \quad (5)$$

Después de haber establecido las condiciones de secado constante, se determina el contenido de humedad de equilibrio, X^* kg de humedad de equilibrio/ kg de sólido seco, mediante la isoterma de desorción. Con el, se procede a calcular el valor del contenido de humedad libre X en kg de agua libre/ kg de sólido seco para cada valor de X_t .

$$X = X_t - X^* \quad (6)$$

Al sustituir los datos calculados en la ecuación 6, se traza una gráfica del contenido de humedad libre X en función del tiempo t en h, como se mostró en la Figura 1a. Para obtener una curva de velocidad de secado a partir de esta gráfica, se miden las pendientes de las tangentes a la curva, lo cual proporciona valores de dX/dt para ciertos valores de t . Se calcula entonces la velocidad R para cada punto con la expresión.

$$R = - \frac{Ls}{A} \left(\frac{dX}{dt} \right) \quad (7)$$

Donde R es velocidad de secado en $\text{Kg}_{\text{agua}} / \text{h.m}^2$, Ls es Kg de sólido seco usado y A es el área expuesta al secado en m^2 . Entonces, la curva de velocidad de secado se obtiene graficando R en función del contenido de humedad, tal como se mostró en la Figura 1b.

3.4.6 METODOLOGIA PARA CALCULAR EL PERIODO DE SECADO DE VELOCIDAD CONSTANTE

El factor más importante en los cálculos del secado es probablemente el tiempo requerido para secar un material a partir de un contenido inicial de humedad libre X_1 hasta un contenido de humedad X_2 . Para el secado en el periodo de velocidad constante, es posible estimar el tiempo necesario mediante curvas de secado obtenidas con lotes experimentales, o por predicciones de coeficiente de transferencia de masa y de transferencia de calor.

Método de curva de velocidad de secado para el periodo de velocidad constante. En lugar de la curva de secado, es posible emplear la curva de velocidad de secado. La velocidad de secado R se define en la ecuación 7 de la siguiente manera:

$$R = -\frac{Ls}{A} \left(\frac{dX}{dt} \right) \quad (7)$$

Esta expresión se reordena e integra con respecto al intervalo para secar desde X_1 a $t_1 = 0$ hasta X_2 a $t_2 = t$.

$$t = \int_{t_1=0}^{t_2=t} dt = \frac{Ls}{A} \int_{X_2}^{X_1} \frac{dX}{R} \quad (8)$$

Si el secado se verifica dentro del periodo de velocidad constante, de manera que tanto X_1 como X_2 sean mayores que el contenido de humedad crítica X_c , entonces $R = \text{constante} = R_c$. Al integrar la ecuación 8 para el periodo de velocidad constante, se obtiene la siguiente ecuación.

$$t = \frac{Ls}{AR_c} (X_1 - X_2) \quad (9)$$

$$L_s = \rho_f \cdot \text{de.sólido.sec} \cdot d \quad (10)$$

Donde ρ_f es densidad de mashua fresca y d es el espesor de la placa

El secado de un material se verifica por transferencia de masa del vapor de agua de la superficie saturada del material a través de una película de aire hasta la fase gaseosa general del ambiente circundante. La velocidad de desplazamiento de humedad dentro del sólido es suficiente para mantener la superficie saturada. La velocidad de eliminación del vapor de agua (secado) está controlada por la velocidad de transferencia de calor hasta la superficie de evaporación, que suministra el calor latente de evaporación para el líquido. Cuando se opera en estado estacionario, la velocidad de transferencia de masa equivale a la velocidad de transferencia de calor.

Para deducir la ecuación de secado, se desprecia la transferencia de calor por radiación hacia la superficie sólida, y se supone además, que no hay transferencia de calor por conducción en las bandejas o por superficies metálicas.

La velocidad de transferencia convectiva de calor q en W (J/s) desde el gas a T °C a la superficie del sólido a T_w °C.

$$q = h(T - T_w)A \quad (11)$$

Donde h es el coeficiente de transferencia de calor en $W/m^2 \cdot K$, T es la temperatura de bulbo seco, T_w es temperatura de bulbo húmedo, λ_w es calor latente de vaporización y A es el área de secado expuesta en m^2 .

$$R_c = \frac{q}{A \cdot \lambda_w} = \frac{h(T - T_w)}{\lambda_w} \quad (12)$$

Para predecir el valor de R_c en la ecuación 12, se debe conocer el coeficiente de transferencia de calor. Si el aire fluye paralelo a la superficie de secado, y la temperatura del aire se encuentra entre 45 a 150°C, velocidad de masa G de 2450 a 29300 $kg/h \cdot m^2$ y velocidad del aire (v) de 0,61 a 7,6 m/s, entonces

$$h = 0,0204G^{0,8} \quad (13)$$

$$G = v \cdot \delta \quad (14)$$

Donde δ es densidad del aire húmedo (kg/m^3) y h está en ($\text{W/m}^2 \cdot \text{K}$); para estimar el tiempo de secado en el periodo de velocidad constante, al sustituir la ecuación 12 en la ecuación 9 se obtiene la siguiente expresión:

$$t = \frac{Ls \cdot \lambda_w (X_1 - X_2)}{A \cdot h (T - T_w)} \quad (15)$$

3.4.7 METODOLOGÍA PARA CALCULAR EL PERIODO DE SECADO DE VELOCIDAD DECRECIENTE

La velocidad de desplazamiento de la humedad está dictada durante el periodo de velocidad decreciente por la velocidad de movimiento interno del líquido por difusión líquida o por movimiento capilar.

3.4.7.1 DIFUSIÓN LÍQUIDA DE LA HUMEDAD EN EL SECADO

Cuando la difusión líquida de la humedad controla la velocidad de secado en el periodo de velocidad decreciente, pueden aplicarse la ecuación, de la segunda ley de Fick para difusión en estado no estacionario

$$\frac{\partial X}{\partial t} = D_L \frac{\partial^2 X}{\partial d^2} \quad (16)$$

Si se supone que la distribución inicial de humedad es uniforme en el tiempo $t=0$, la ecuación 16 puede integrarse y se obtiene la siguiente expresión:

$$\frac{X}{X_c} = \frac{8}{\pi^2} \left[e^{-D_L t \left(\frac{\pi}{2d}\right)^2} + \frac{1}{9} e^{-9D_L t \left(\frac{\pi}{2d}\right)^2} + \frac{1}{25} e^{-25D_L t \left(\frac{\pi}{2d}\right)^2} + \dots \right] \quad (17)$$

Donde X = contenido promedio de humedad libre al tiempo t h, X_c = humedad libre crítica =

contenido inicial de humedad libre en el tiempo $t=0$, d espesor total de la rodaja cuando el secado solo se verifica desde la cara superior y D_L es el coeficiente de difusión líquida.

Para tiempos de secado largos, el único termino de la ecuación 17 que tiene importancia es el primero; por tanto la expresión se transforma en:

$$\frac{X}{X_c} = \frac{8}{\pi^2} \left[e^{-D_L t \left(\frac{\pi}{2d} \right)^2} \right] \quad (18)$$

Al despejar el tiempo de secado, se obtiene la siguiente ecuación.

$$t = \frac{4d^2}{\pi^2 \cdot D_L} \ln \frac{8X_c}{\pi^2 \cdot X} \quad (19)$$

El coeficiente de difusión líquida (D_L), se calculó a partir de la ecuación 18, diferenciando con respecto al tiempo y reordenando tenemos:

$$\frac{dX}{dt} = - \frac{D_L \pi^2}{4d^2} X \quad (20)$$

$$y = -mX \quad (21)$$

La ecuación 20 es semejante a la ecuación 21. Por tanto, la ecuación 21 es lineal; donde:

$$m = \frac{D_L \pi^2}{4d^2} \quad (22)$$

A partir de la ecuación 20; si se grafica la variable independiente $\frac{dX}{dt}$; a partir de humedad crítica X_c hasta la humedad final; con respecto a la variable dependiente contenido de humedad X en el tiempo t ; si se obtiene una línea recta, entonces m es la pendiente de la recta.

Para estudiar el comportamiento del secado de la mashua, en la etapa de velocidad decreciente y determinar si el fenómeno de transferencia de humedad fue por difusión o capilaridad, se aplicó la ecuación integrada de la segunda ley de Fick:

$$\ln X = \ln \frac{8X_c}{\pi^2} - D_L t \left(\frac{\pi}{2d} \right)^2 \quad (23)$$

Donde X_c , D_L , y d , son constantes. Por tanto, la ecuación se hace lineal, manteniendo como variable independiente el tiempo de secado t y como variable dependiente el contenido de humedad X en el tiempo t . Por tanto, si se grafica logaritmo natural de la variable dependiente X ($\ln X$), a partir de humedad crítica X_c hasta la humedad final; con respecto a variable independiente tiempo t ; si se obtiene una línea recta, entonces la migración del agua estará gobernado por difusión.

Para el modelado de la cinética de transferencia de agua ocurrida durante el secado por aire caliente de las rodajas de mashua, se utilizaron dos ecuaciones, en función de los dos periodos de secado.

La ecuación 24 describe el periodo constante, donde la velocidad de secado decrece linealmente hasta una humedad libre crítica.

$$X = X_t - X^* = a_0 + a_1 t \quad (24)$$

Para modelado de la velocidad decreciente, se utilizó el modelo difusional, a partir de la ecuación 18.

$$\frac{X}{X_c} = \frac{8}{\pi^2} e^{-D_L \cdot t \left(\frac{\pi}{2d} \right)^2} \quad (18)$$

3.5 METODOLOGIA EXPERIMENTAL

En las Figuras 3 y 4 se presentan el flujo de operaciones y esquema experimental respectivamente, para la presente investigación, donde se muestra las etapas de secado en bandeja y por atomización.

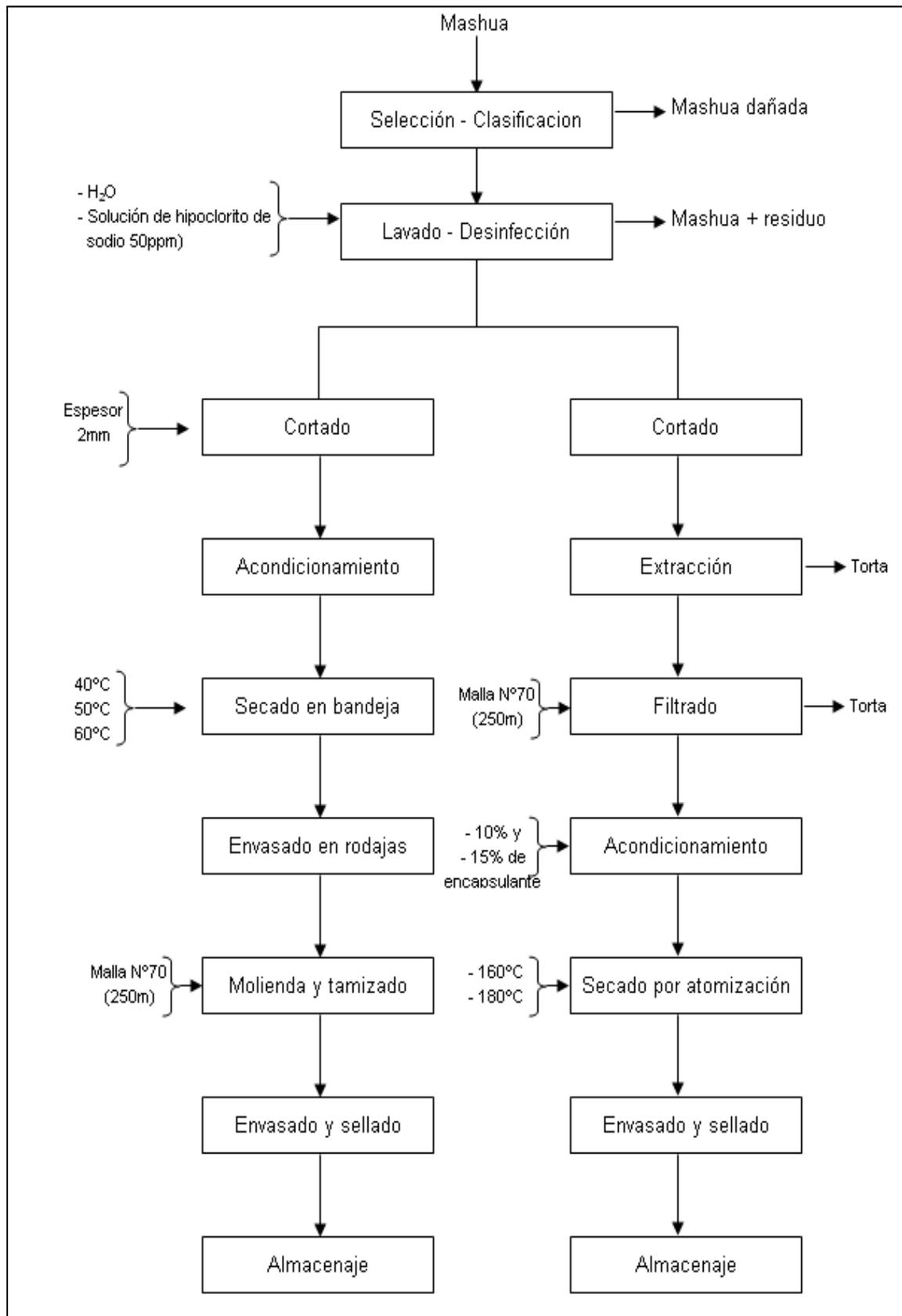


Fig. 3: Flujo de operaciones para el secado en bandeja y por atomización de la mashua

3.5.1 DESCRIPCION GENERAL DE LOS PROCESOS DE SECADO

a. SELECCIÓN Y CLASIFICACIÓN

La selección tuvo como objetivo de separar, todas las mashuas que presentaron, signos de deterioro. La mashua seleccionada, estuvo libre de golpes y magulladuras, arrugas, cicatrices, rajaduras y manchas verdes. La clasificación se realizó de acuerdo al tamaño con el fin de darles condiciones adecuadas al proceso.

b. LAVADO Y DESINFECTADO

El lavado se realizó con la finalidad de retirar cualquier tipo de materia extraña adheridas a la superficie de la raíz. Para tal efecto, se empleó agua potable fría en aspersión, acompañado de una ligera escobillada que se realizó manualmente y luego se le sumergió en una solución de hipoclorito de sodio a 50 ppm de cloro residual por 10 minutos a fin de reducir la posible carga microbiana.

c. SECADO

c.1 SECADO EN BANDEJA

c.1.1 CORTADO

Debido a su forma geométrica (cilíndrica) la mashua fue cortada en forma de rodajas de 2mm de espesor, el ancho de las muestras estuvo determinado, por el diámetro de la mashua. Para cortar, se utilizó la rebanadora por ciertas ventajas como: uniformidad, limpieza, tiempo de procesamiento.

c.1.2 ACONDICIONAMIENTO

Las rodajas de mashua uniformes fueron colocadas en una malla de acero inoxidable 40 x 60 cm, llenando por completo toda el área de la malla, de tal manera que solo quedó expuesta a la corriente de aire de secado.

c.1.3 SECADO

Para el presente estudio de secado en bandeja, se utilizaron 3 niveles de temperaturas de bulbo seco 40°C, 50°C y 60°C; velocidad de aire constante de 1,4 m/s. La pérdida de humedad se registró, con una balanza Adventurer, modelo av 4101, capacidad 0-4 kilogramo, conectada a una computadora. El software desarrollado y usado en la computadora permitió el monitoreo en tiempo real del comportamiento de la humedad durante la deshidratación. Las muestras se secaron en todos los casos hasta peso constante.

c.1.4 ENVASADO DE RODAJAS

Las rodajas secas de mashua, fueron envasados en bolsas de polietileno de alta densidad y posteriormente sellados herméticamente, quedando impermeable al aire y al vapor de agua.

c.1.5 MOLIENDA Y TAMIZADO

Para triturar las rodajas secas de la mashua y obtener la harina, se utilizó un molino industrial; la harina obtenida, fue tamizado utilizando una malla N° 70, con ello se obtuvo partículas homogéneas de tamaño promedio de 250µm de diámetro.

c.1.6 ENVASADO Y SELLADO

Con la finalidad de guardar, mantener estable la harina de la mashua, fueron envasados en bolsas de polietileno de alta densidad y sellados herméticamente, quedando así impermeable a la humedad y al aire del medio ambiente.

c.1.7 ALMACENAJE

El producto envasado fue almacenado en una caja de cartón a temperatura ambiente para su próximo análisis, las muestras se utilizaron de acuerdo al avance de investigación. El periodo de análisis fue completado en dos semanas.

c.2 SECADO POR ATOMIZACIÓN

c.2.1 CORTADO

La mashua fue cortada con cuchillo de acero inoxidable en cuatro partes, para poder introducir al extractor de jugos.

c.2.2 EXTRACCIÓN

Para obtener el extracto de mashua, se utilizó un extractor de frutas y hortalizas, con esta operación, se obtuvo un rendimiento de 61% de extracto de mashua y 39% de torta, ambos en peso.

c.2.3 FILTRACIÓN

Con la finalidad de eliminar partículas groseras, y facilitar el secado por atomización se realizó una filtración a través de una malla N° 70 (250 μ m).

c.2.4 ACONDICIONAMIENTO

Con la finalidad de mejorar el secado por atomización, se añadió el encapsulante al extracto filtrado; para tal efecto se empleó, el encapsulante miracap; este encapsulante se agregó al extracto en diferentes niveles de concentración 10% y 15%, en función al peso de sólidos totales, estas mezclas se homogenizaron y posteriormente fue filtrado con una malla N° 70 (250 μ m), para evitar que quede algún grumo que dificulte la formación del atomizado.

c.2.5 SECADO

El trabajo se realizó a nivel semi-industrial. Los parámetros de la operación de secado fueron: Temperatura de aire de entrada 160°C y 180°C, temperatura de aire de salida 85°C y 95°C respectivamente; atomizador centrifugo rotatorio (rodete), que es accionado por una turbina de aire a velocidad de 30000 y 35000 revoluciones por minuto; velocidad de la alimentación en promedio de 12,5 ml/min y temperatura de medio

ambiente de 17°C.

c.2.6 ENVASADO Y SELLADO

Con la finalidad de guardar y mantener estable la mashua seca, fueron envasados en bolsas de polietileno de alta densidad, y posteriormente sellados herméticamente, quedando impermeable al aire y a la humedad.

c.2.7 ALMACENAJE

El producto envasado fue almacenado en una caja de cartón a temperatura ambiente para su próximo análisis, las muestras se utilizaron de acuerdo al avance de investigación. El periodo de análisis fue completado en dos semanas.

3.6 ANÁLISIS ESTADÍSTICO

Las distintas repeticiones enunciadas en los respectivos apartados ponen de manifiesto que se obtuvieron datos suficientes como para poder aplicar distintos tratamientos estadísticos, los cuales se llevaron a cabo con el paquete estadístico SAS (Statistical Analysis Sistem) versión 8,0 para Windows.

El análisis estadístico empleado para evaluar la actividad antioxidante hidrofílica de la mashua seca, posterior al secado en bandeja con tres niveles de temperatura de 40°C, 50°C y 60°C, fue mediante el Diseño Completo al Azar (DCA); y para comparar los diferentes niveles de temperatura se utilizó, la prueba de Tukey. Para ambos, se utilizó un nivel de confianza de 95%.

Por otro lado, el análisis estadístico empleado para evaluar la actividad antioxidante hidrofílica de la mashua seca, posterior al secado por atomización con tres factores: encapsulante, temperatura y velocidad del rodete, fue mediante el DCA, en arreglo factorial de 2x2x2; y para comparar los diferentes niveles de los factores se utilizó, con la prueba de Tukey. Para ambos, se utilizó un nivel de significación de 5%.

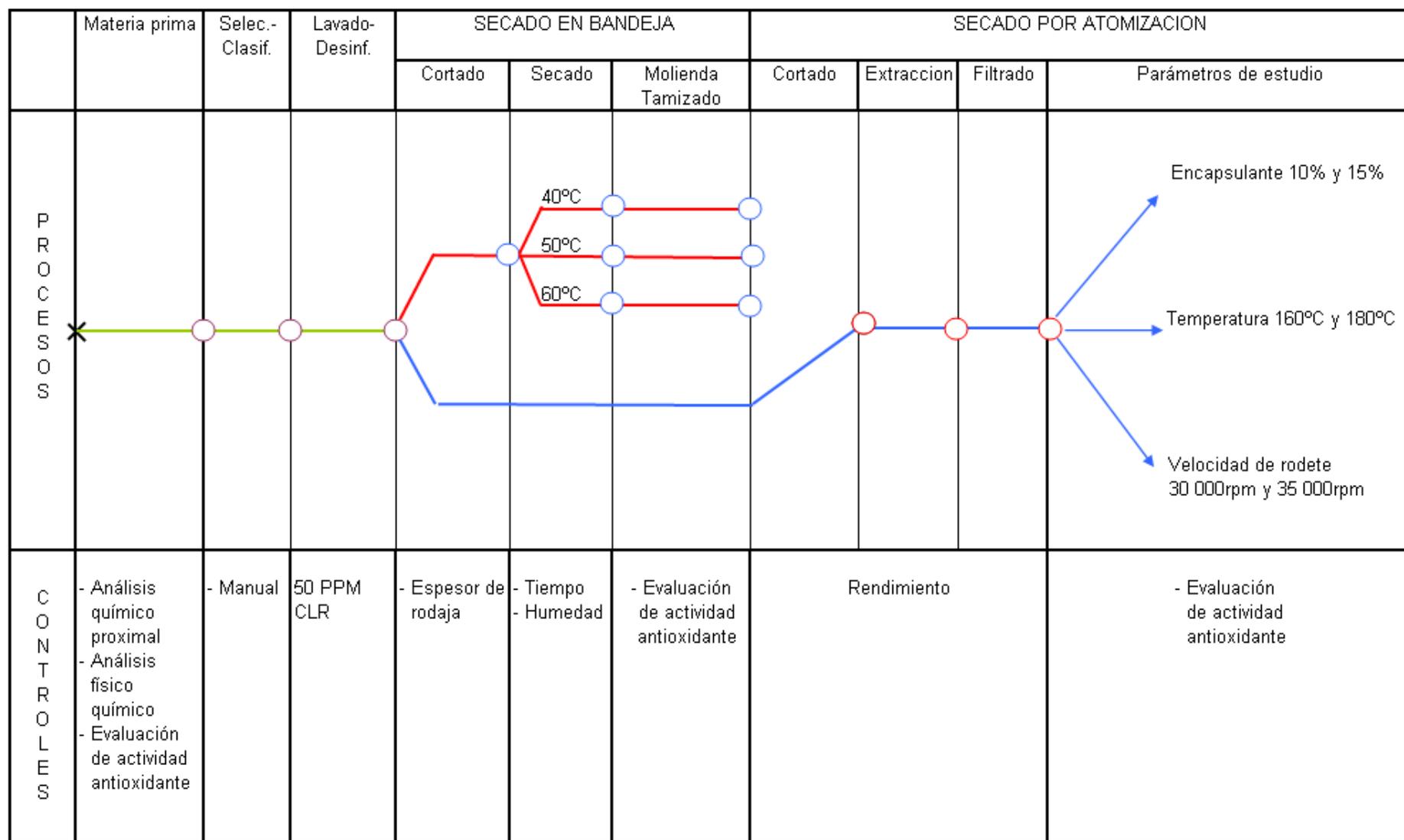


FIG. 4: Esquema experimental para los procesos de secado en bandeja y por de la mashua atomización "zapallo amarillo"

IV. RESULTADOS Y DISCUSION

4.1 CARACTERIZACIÓN DE LA MATERIA PRIMA



Fig. 5: Mashua cultivar Zapallo Amarillo

Los resultados promedios con su respectiva desviación estándar del análisis físico químico efectuado para la mashua cultivar “zapallo amarillo” (Figura 5) en estado fresco por 100 gramos de porción comestible, expresada en base húmeda (bh) y base seca (bs), se muestran en los Cuadros 5 y 6.

Cuadro 5. Composición químico proximal de la mashua cultivar “zapallo amarillo”
(En 100 g de parte comestible)

Composición(g)	Contenido	
	Base húmeda (bh) Y ± DS	Base seca (bs) Y ± DS
Humedad	88,100 ±1,000	
Proteínas	1,589 ± 0,043	13,355 ± 0,363
Grasas	0,311 ± 0,029	2,616 ± 0,250
Fibra cruda	0,609 ± 0,036	5,117 ± 0,300
Ceniza	0,591 ± 0,015	4,967 ± 0,125
ELN	8,799± 1,123	73,945 ± 1,033

Y : Promedio de 3 repeticiones

DS : Desviación estándar

ELN : Extracto Libre de Nitrógeno

Cuadro 6. Composición físico químico de la mashua fresca cultivar “zapallo amarillo”
(En 100 g de parte comestible)

Composición	Contenido	
	Base húmeda (bh) Y ± DS	Base seca (bs) Y ± DS
Acido ascórbico (mg)	55,97 ± 0,198	470,35 ± 16,639
Azúcares reductores (mg)	7,2 ± 0,240	60,5 ± 1,332
Actividad antioxidante hidrofílica (*)	587,781 ± 5,935	4939,910 ± 49,843
pH	6,22	
Sólidos solubles (%)	8,5	

(*) : µg Eq. Trolox /g de mashua fresca.

4.1.1 COMPOSICIÓN QUÍMICO PROXIMAL

En el Cuadro 5 se observó los resultados del análisis químico proximal de la mashua cultivar “zapallo amarillo”; los valores determinados en cuanto a la cantidad de agua, proteínas, grasas, fibra cruda y ceniza; se asemejan a los valores reportados para la mashua por diversos investigadores como: Tapia (1984), Collazos *et al.* (1993), Meza *et al.* (1997), King (1986) citado por Ramallo (1999), National Reserach Council (1989) y Campos *et al.* (2006); tal como se visualizó en los Cuadros 1 y 2 ya indicados.

La cantidad de proteínas encontrada con un promedio de 1,589±0,043 g/100g (bh) para la mashua cultivar “zapallo amarillo”, contiene valores por encima del camote morado (1,4); olluco (1,1); oca (1,0); arracacha (0,7) y yuca (0,6), todos expresados en g/100g de los tubérculos en base húmeda, tal como lo reporta Collazos *et al.* (1993).

4.1.2 COMPOSICIÓN FÍSICOQUÍMICA

En el Cuadro 6 se observó, el contenido de vitamina C (ácido ascórbico) con un valor promedio de 55,97±0,198mg/100g (bh) para la mashua cultivar “zapallo amarillo”; lo cual, contiene valores por encima de oca (38,4); arracacha (27,1); papa blanca (14,0); camote morado (13,6); camote blanco (12,9); olluco (11,5), papa amarilla (9,0) y maca (2,5). Todos expresados en mg/100g de los tubérculos, expresado en base húmeda, tal como lo reporta Collazos *et al.* (1993).

En el Cuadro 6 también se observó los resultados del contenido de sólidos solubles, expresados en grados °Brix (8,5) y de azúcares reductores expresado en base húmeda ($7,2\% \pm 0,24$) para la mashua cultivar “zapallo amarillo”; los valores determinados de azúcares reductores, se encuentran dentro del rango (1,73%-13,48%) reportado para la mashua por Brito y Espin (1999).

Reynoso *et al.* (1997) citado por Sarmiento (2003) menciona que el contenido de sólidos solubles de 8 °Brix y de azúcares reductores 5,7% (bh) lo hace propicio para las operaciones de concentración y secado de colorante.

4.1.3 ACTIVIDAD ANTIOXIDANTE

En el Cuadro 6 se presentó el resultado de la actividad antioxidante hidrofílica de la mashua cultivar “zapallo amarillo”, donde se observó un valor promedio de $4\,939,91 \pm 49,843$ µg de Eq. Trolox /g (bs); determinado con el método DPPH. Este resultado se encuentra dentro del rango reportado por Temoche *et al.* (2004) quienes encontraron la actividad antioxidante hidrofílica para los 21 genotipos de mashua de color naranja en un rango de 2 801,31 a 6 880,84 µg de Eq. Trolox / g (bs); utilizando DPPH.

Toor y Savage (2006) mencionan que, el ácido ascórbico y compuestos fenólicos son los principales contribuyentes de la actividad antioxidante hidrofílica del tomate. Al respecto Campos *et al.* (2006) señalan que, la capacidad antioxidante hidrofílica de la mashua está relacionada con el contenido de antocianinas totales y contenido de compuestos fenólicos totales; la baja correlación de antocianinas totales, con capacidad antioxidante hidrofílica ($r = 0,48$, $p = 0,11$); y la alta correlación entre contenido de compuestos fenólicos totales y capacidad antioxidante hidrofílica ($r = 0,84$, $p = 0,00$), la mayoría son probablemente debido a la presencia de diferentes compuestos fenólicos en los tubérculos de la mashua.

Moyer *et al.* (2002) citado por Ríos (2004) menciona que al evaluar 32 genotipos de grosellas (*Ribes*) observaron una baja relación entre el contenido de compuestos fenólicos y la capacidad antioxidante, lo que se debería al alto contenido de ácido ascórbico que presenta esta fruta, lo cual contribuye a la capacidad antioxidante hidrofílica más no, el contenido de compuestos fenólicos.

4.2 RESULTADOS DE ISOTERMA DE DESORCION DE LA MASHUA

En las Figuras 6, 7 y 8 se muestran las isotermas de desorción para la mashua fresca “zapallo amarillo”, obtenidas para las tres temperaturas de trabajo de 40°C, 50°C y 60°C respectivamente. En ellas se observan isotermas no lineales para las tres temperaturas de trabajo y que tienen la forma sigmoidea que son similares a la isoterma de tipo II, de las tres establecidas por Bell and Labuza (2000), como se observó en la Figura 2; las cuales son las más frecuentes en los alimentos como frutas y verduras.

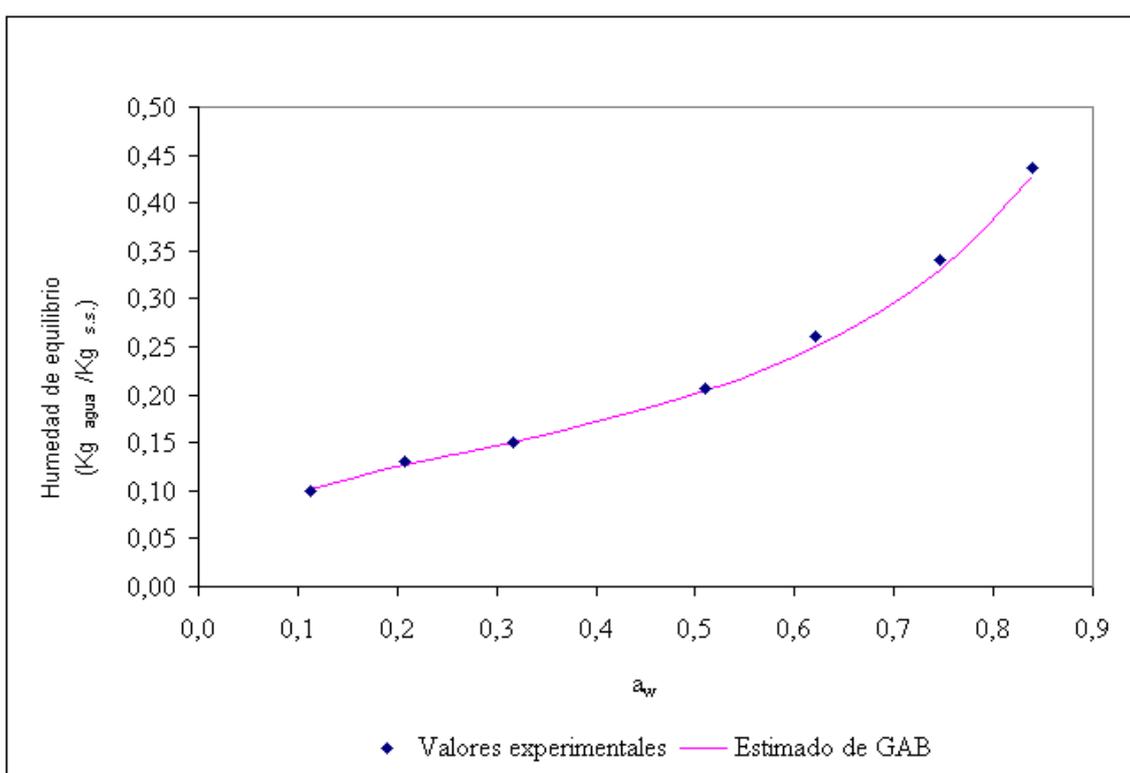


Fig. 6: Isoterma de desorción de la mashua experimental y modelada con la ecuación de GAB para 40°C

Los datos experimentales se modelaron con la ecuación propuesta por Guggenheim, Anderson y de Boer (GAB), debido a que este modelo matemático, ajusta valores de a_w hasta 0,95 (Bell y Labuza, 2000). Todos los valores experimentales determinados se muestran en los Apéndices 5,1; 5,2 y 5,3.

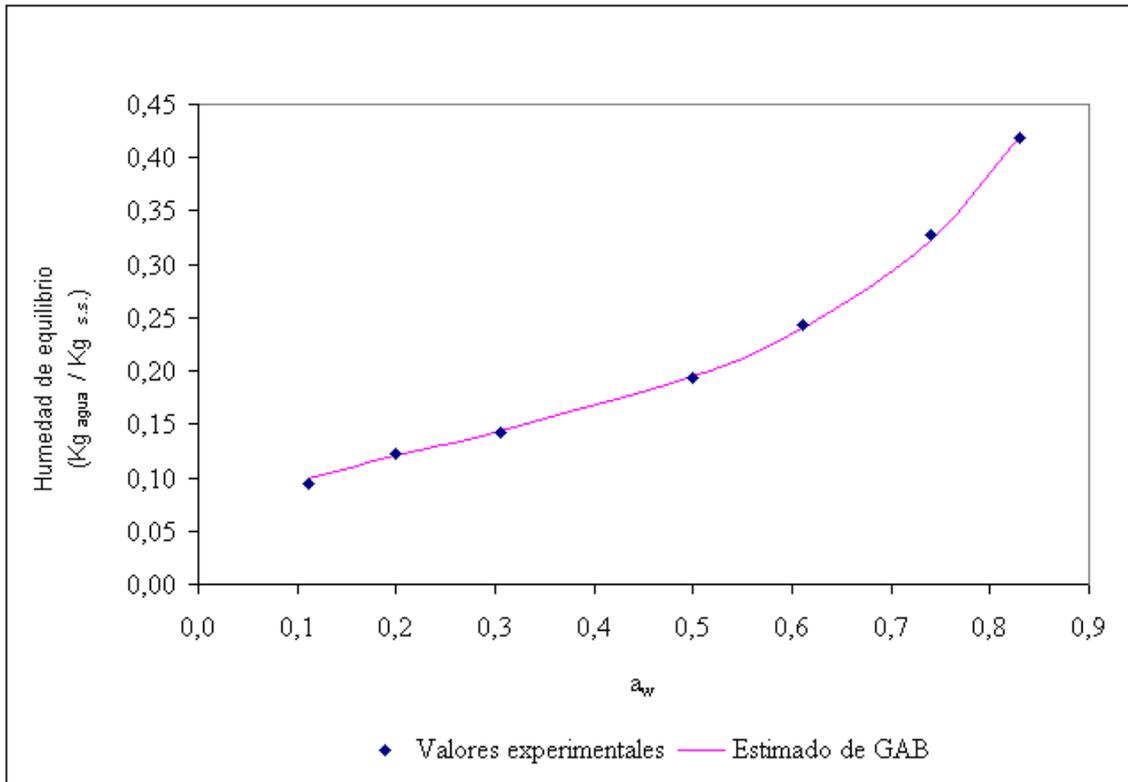


Fig. 7: Isotherma de desorción de la mashua experimental y modelada con la ecuación de GAB para 50°C

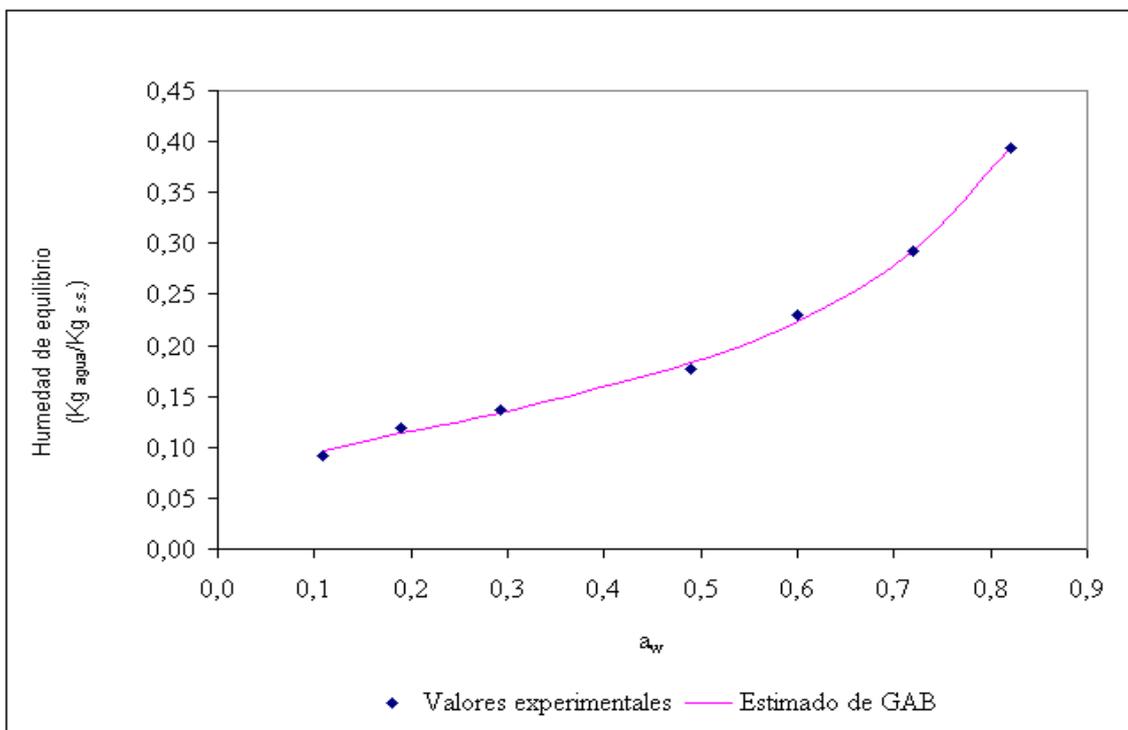


Fig. 8: Isotherma de desorción de la mashua experimental y modelada con la ecuación de GAB para 60°C

Las isotermas de sorción de humedad en los alimentos muestran una relación entre actividad de agua y humedad de equilibrio del alimento a una temperatura y presión constante. Es por esto que para iniciar el estudio de secado por aire caliente del producto es necesario obtener la humedad de equilibrio (X^*), la cual se determina por medio de la isoterma de desorción del producto fresco (Vega *et al.*, 2007).

4.2.1 CALIDAD DE AJUSTE DE LAS CURVAS OBTENIDAS CON LA ECUACIÓN DE GAB PARA LAS TRES TEMPERATURAS DE TRABAJO

En el Cuadro 7 se observa un excelente coeficientes de regresión polinomial (r^2) mayor a 0,98 y un error porcentual medio relativo (ERM) menor a 5%, para las tres temperaturas de trabajo confirmando que la ecuación de GAB es un buen modelo para predecir la humedad de equilibrio de la mashua cultivar “zapallo amarillo” a un amplio rango de humedad relativa (11,2-82,0 %). Al respecto Bell and Labuza (2000) afirman que los coeficientes de regresión (r^2) superiores a 0,98, indican buen ajuste de la ecuación. A si mismo Vidal *et al.* (1986) mencionan que el ERM, inferiores a 5%, dan buen ajuste al modelo.

Cuadro 7. Calidad de ajuste de las curvas obtenidas con la ecuación de GAB para las tres temperaturas de trabajo

Temperatura (°C)	r^2	ERM (%)
40	0,989	2,84
50	0,988	2,54
60	0,989	3,10

r^2 : Coeficientes de regresión

ERM : Errores Relativos Medios

4.2.2 RESULTADOS DE LAS CONSTANTES DE LA ECUACIÓN DE GAB OBTENIDAS PARA LAS TRES TEMPERATURAS DE TRABAJO

En el Cuadro 8 se muestran los resultados de los valores de las constantes de desorción de la mashua cultivar “zapallo amarillo” (X_m , C y K), obtenidas con la ecuación de GAB. Las constantes fueron determinadas, utilizando una herramienta computacional presente en el Microsoft Excel 97. La secuencia del programa para determinar las

constantes, y la fuente se reportan en el (Apéndice 4).

Los resultados experimentales del valor de la humedad de monocapa (X_m) de la mashua “zapallo amarillo” mostraron una tendencia a disminuir a medida que aumenta la temperatura. Al respecto Torres (1991) menciona que los valores de monocapa, disminuyen con el aumento de la temperatura. Los investigadores Westgote *et al.* (2005) mencionados por Vega *et al.* (2007) afirman que la tendencia a disminuir del contenido de humedad de la monocapa al aumentar la temperatura, lo que puede deberse a la menor disponibilidad de los sitios activos (o enlaces de hidrogeno) en los polímeros de almidón para la unión con el agua.

Cuadro 8. Resultados de las constantes de la ecuación de GAB obtenidas para las tres temperaturas de trabajo

Temperatura (°C)	X^*	X_m	C	K	Calor de desorción (Kcal/mol)
40	0,115	0,120	30	0,86	2,12
50	0,106	0,110	35	0,88	2,29
60	0,100	0,106	40	0,89	2,45

X^* : humedad de equilibrio del producto ($Kg_{\text{agua}}/ Kg_{\text{s.s}}$)

X_m : humedad de la monocapa y representa la humedad que alcanza el producto cuando los productos de sorción primarios están saturados por molécula de agua.

C : constante de Guggenheim característica del producto y relacionada con el calor de sorción de la monocapa.

K : factor de corrección relacionado con el calor de sorción de la multicapa.

Cheftel (1984) señala que los valores de la monocapa para la mayor parte de los alimentos se hallan en el intervalo de 3 a 10 gramos de agua por cada 100 gramos de sustancia seca.

El coeficiente C tiene importancia, para obtener el calor de sorción (Q_s) de la capa monomolecular. Según Barbosa y Vega (2000) indican que el calor de sorción (Q_s) se define como la diferencia entre el cambio de entalpía molar total y la entalpía molar de

vaporización. La razón principal del aumento del contenido de agua a valores altos de actividad de agua, es debido a la condensación capilar. Según Fennema (2000) menciona que los valores de C se comportan en relación directa con el calor de sorción, es decir, mayor es el valor de C a mayor calor de sorción y menor es el valor de C a menor calor de sorción. Vega *et al.* (2005) mencionan que k es un factor de corrección relacionado con el calor de sorción de la multicapa.

Giovanelli *et al.* (2001) indican que, una buena descripción de las isotermas se da cuando las constantes se encuentran dentro del rango de $5,67 \leq C \leq \infty$ y $0,24 < K < 1$, como se observó en el Cuadro 8; los valores de las constantes C y K determinados para la mashua “zapallo amarillo” se hallan dentro de ese rango.

4.3 RESULTADOS DEL PROCESO DE SECADO EN BANDEJA

Las Figuras 9, 10, 11 y 12 muestran las curvas de secado y curvas de velocidad de secado respectivamente, obtenidas a las tres temperaturas de trabajo (40°C, 50°C y 60°C). En las figuras se pueden observar en primera instancia el efecto de la temperatura sobre el proceso. En términos generales y como era de esperar, al aumentar la temperatura del aire de secado aumenta la velocidad de secado. Por tanto, en función de los resultados obtenidos se deduce que la cinética de secado de la mashua es dependiente de la temperatura del aire de secado.

Para estudiar el comportamiento del secado de la mashua en la etapa de velocidad decreciente y determinar si el fenómeno de transferencia de humedad es por difusión o por capilaridad se aplicó la ecuación 23. De acuerdo a los resultados obtenidos, en este estudio, se observó una línea recta, con un buen coeficiente regresión lineal superior ($r^2 > 0,97$), comprobando la validez del ajuste realizado, para las tres temperaturas de trabajo. Comprobando que, el mecanismo que predomina la migración de las moléculas de agua, para las rodajas de mashua cultivar “zapallo amarillo”, es por difusión molecular (Apéndice 6,3). Al respecto Geankoplis (1998) menciona que la migración por difusión de la humedad contenido en un alimento es el mecanismo predominante en el secado de la mayoría de los alimentos, tal es caso de los vegetales.

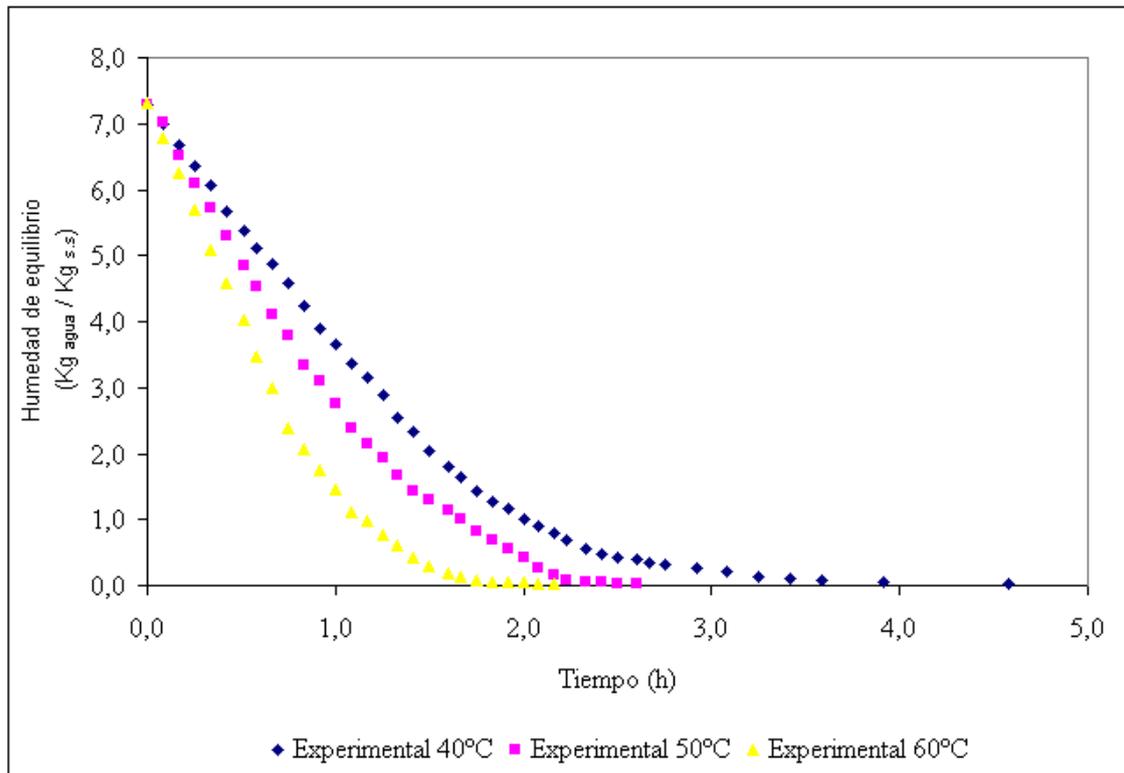


Fig. 9: Diagrama de esparcimiento experimental de la pérdida de humedad de las rodajas de mashua, en función al tiempo de secado para 40°C, 50°C y 60°C

Para obtener, el coeficiente de difusividad líquida (D_L), se utilizó la ecuación 20; si se grafica la variable independiente $\frac{dX}{dt}$; con respecto a la variable dependiente contenido de humedad X en el tiempo t ; a partir de humedad crítica (X_c) hasta la humedad final, si se obtiene una línea recta, entonces m es la pendiente de la recta (ecuación 21). De acuerdo a los resultados obtenidos, en este trabajo, se observó una línea recta, con un buen coeficiente regresión lineal superior ($r^2 > 0,93$), comprobando la validez del ajuste realizado, para las tres temperaturas de trabajo (Apéndice 6,4), de cuya pendiente se obtuvieron los coeficientes de difusión líquida (D_L), los resultados se dan en el Apéndice 6,1.

En las Figuras 10, 11 y 12, se distinguen para las tres temperaturas de trabajo, dos etapas de secado; periodo de velocidad constante y periodo de velocidad decreciente.

El periodo de velocidad constante, para humedades de la mashua, que va desde la inicial, hasta un valor crítico (X_c), rango de humedad en la que la velocidad de secado varía linealmente con la humedad libre de la mashua.

Finalmente se observa una segunda etapa (periodo de velocidad decreciente), más lenta para valores de humedad del producto menores a X_c , es en esta etapa de secado donde cobra mayor importancia la simulación del proceso mediante la teoría de difusión molecular del agua. La migración por difusión de la humedad contenida en un alimento es el mecanismo predominante en el secado de la mayoría de alimentos, tal es caso de vegetales (Geankoplis, 1998).

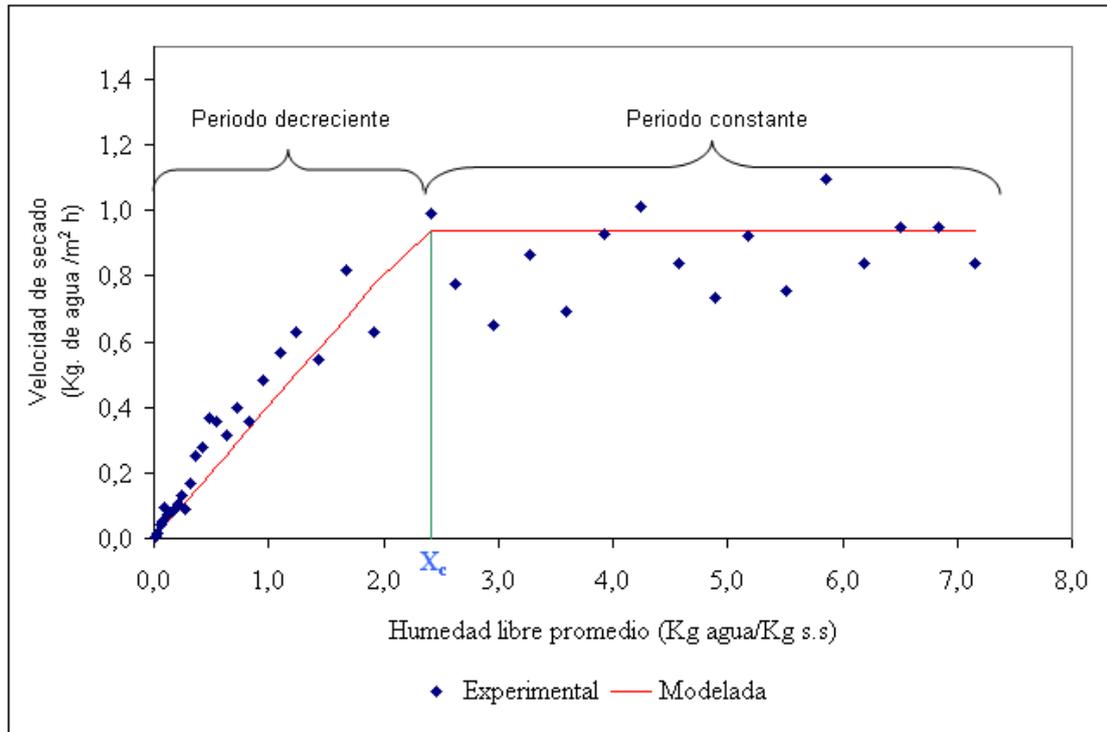


Fig. 10: Diagrama de esparcimiento y modelada de la velocidad de secado en función al contenido de humedad libre de las rodajas de mashua para 40°C

Para el modelado de la cinética de transferencia de agua ocurrida durante el secado en bandeja de la mashua, se utilizaron dos ecuaciones, en función de los dos periodos observados en el proceso.

La ecuación 24 describe el periodo constante, donde la velocidad de secado decrece linealmente hasta una humedad libre crítica (X_c); con un buen coeficiente regresión lineal obtenido ($r^2 > 0,98$), comprobando la validez del ajuste realizado, para las tres temperaturas de trabajo; ya que a partir de ese punto ya no se observa una línea recta, dando origen al periodo decreciente.

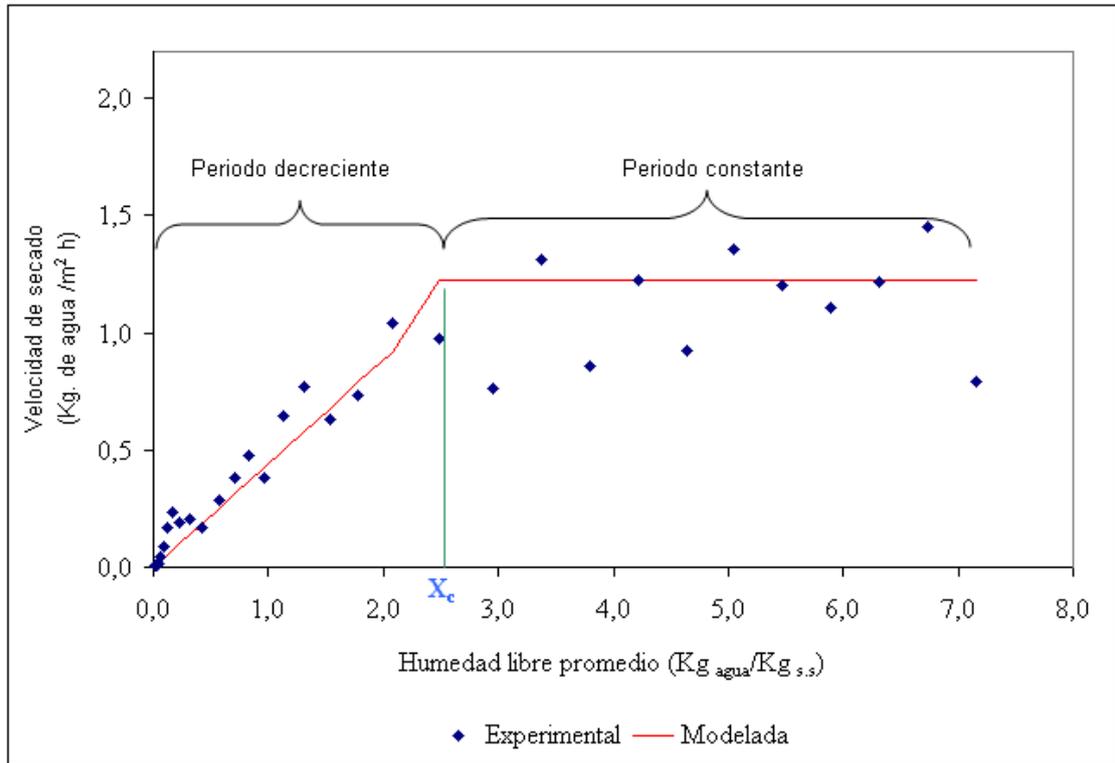


Fig. 11: Diagrama de esparcimiento y modelada de la velocidad de secado en función al contenido de humedad libre de las rodajas de mashua para 50°C

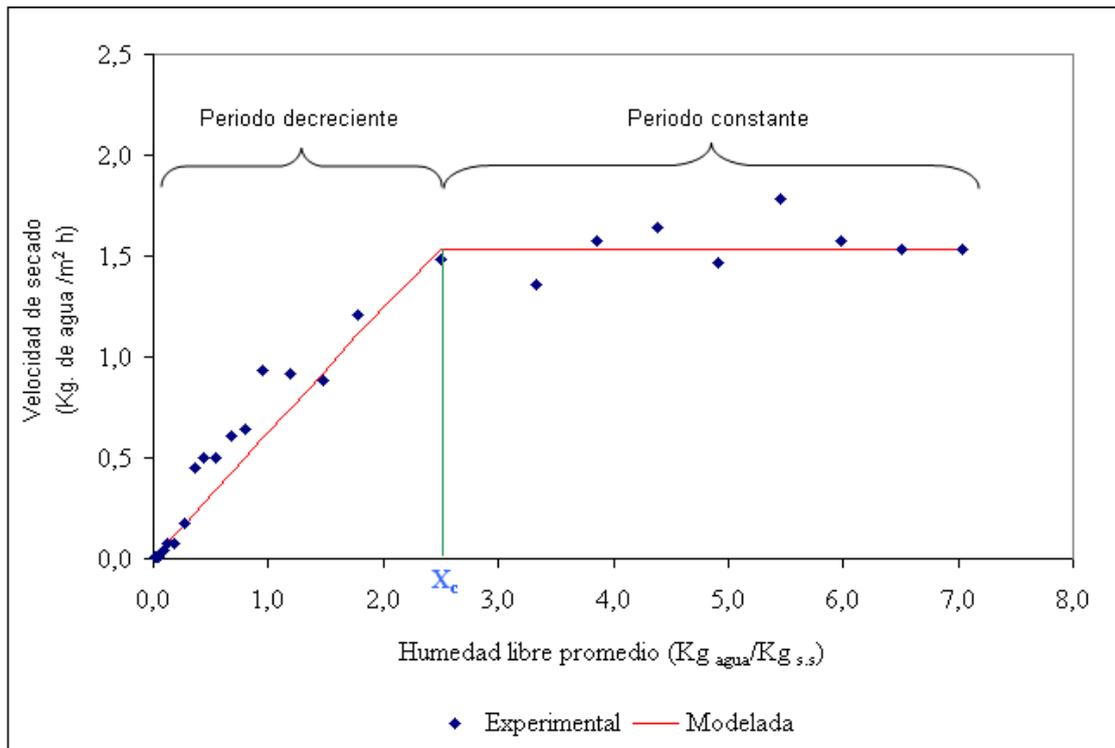


Fig. 12: Diagrama de esparcimiento y modelada de la velocidad de secado en función al contenido de humedad libre de las rodajas de mashua para 60°C

Para modelar el periodo de velocidad decreciente, se utilizó el modelo difusional, ya que se demostró que la migración del agua fue por difusión líquida (Apéndice 6,3). Por tanto, para el modelado se utilizó, la ecuación integrada de la segunda ley de Fick, ecuación 18, para tiempos largos y geometría plana en una dimensión y se obtuvo un buen coeficiente regresión exponencial ($r^2 > 0,97$), comprobando la validez del ajuste realizado, para las tres temperaturas de trabajo. Al respecto Geankoplis (1998) menciona que, el método tradicionalmente se utiliza en el estudio de transferencia de masa en estado no estacionario para el secado de productos agrícolas, si se consideran como sólidos húmedos.

En el periodo constante se observa que la humedad libre de la mashua va desde la inicial $7,291; 7,296$ y $7,301 \frac{Kg_{agua}}{Kg_{s.s}}$ hasta un valor crítico de $2,537; 2,753$ y $2,395 \frac{Kg_{agua}}{Kg_{s.s}}$. Durante este periodo, se obtuvo valores constantes de velocidad de secado de $0,939; 1,222$ y $1,535 \frac{Kg}{m^2.h}$, retirando $66,00\%$, $62,47\%$ y $67,46\%$ de humedad (Apéndice 7,2; 7,4 y 7,6); en un tiempo de $1,820; 1,440$ y $1,320$ horas (Cuadro 9); rango de humedad en la que la velocidad de secado varía linealmente con respecto a la humedad libre de las rodajas de mashua, para $40^\circ C$, $50^\circ C$ y $60^\circ C$ respectivamente. De acuerdo a los resultados obtenidos, durante el periodo de velocidad constante se retiró la mayor cantidad de humedad. Al respecto Geankoplis (1998) indica que durante el periodo de velocidad constante, la superficie del sólido está muy mojada al principio y sobre todo hay una película de agua continua. Esta capa de agua, es agua no combinada y actúa como si el sólido no estuviera presente.

El periodo de velocidad decreciente comienza desde la humedad libre crítica $2,537; 2,753$ y $2,395 \frac{Kg_{agua}}{Kg_{s.s}}$ hasta la humedad libre final $0,037; 0,025$ y $0,029 \frac{Kg_{agua}}{Kg_{s.s}}$ (Apéndice 7,2; 7,4 y 7,6), rango de humedad, donde la velocidad de secado ya no varía linealmente con la humedad libre de la mashua. Durante este periodo se retiró $34,00\%$; $37,53\%$ y $32,54\%$ de humedad en un tiempo de $2,40; 2,450$ y $1,620$ horas, para $40^\circ C$, $50^\circ C$ y $60^\circ C$ respectivamente. Al respecto Barbosa y Vega (2000) mencionan que el periodo de velocidad decreciente se da cuando la velocidad de secado ya no se mantiene constante y empieza a disminuir. En este periodo, la velocidad de secado está gobernada por el flujo interno del agua y vapor. El periodo de velocidad decreciente se puede dividir en dos etapas (Figura 1b). A veces no existen diferencias marcables entre el primer y segundo

periodo de velocidad decreciente.

Para determinar los tiempos de transferencia de agua ocurrida durante el periodo de velocidad constante y velocidad decreciente para las rodajas de mashua, se utilizaron las ecuaciones 15 y 19 ya antes mencionados. Los cálculos realizados se encuentran en los Apéndices 6,2 y 6,5; resultando que los tiempos de velocidad constante son menores en contraste a los tiempos de velocidad decreciente (Cuadro 9). Al respecto Geankoplis (1998) señala que la cantidad de agua eliminada en el período decreciente puede ser baja, mientras que el tiempo requerido puede ser elevado, ya que la velocidad de secado es baja.

Cuadro 9. Resultados de los tiempos de predicción, experimental y humedad de equilibrio obtenidas para las tres temperaturas de secado

Temp. (°C)	Tiempos (horas)				Humedad de equilibrio	
	predecido			experimental	$\left(\frac{Kg\ agua}{Kg\ s.s} \right)$	
	Periodos		Suma de periodos	Suma de periodos	Humedad Final exp.	GAB (X*)
	const.	decrec.				
40	1,820	2,400	4,220	4,583	0,152	0,110
50	1,440	2,450	3,890	4,000	0,140	0,100
60	1,320	1,620	2,950	2,833	0,129	0,095

De los resultados obtenidos (Cuadro 9), cabe destacar que existe una clara tendencia del aumento de la humedad de equilibrio de las rodajas de mashua a medida que disminuye la temperatura de secado y la humedad de equilibrio en todos los casos estuvo por debajo del máximo permitido 16% para harina de pimentón, según la norma UNE N° 34029 (Vega *et al.*, 2005); no obstante se recomienda; que para tener una mayor estabilidad en el almacenamiento, la humedad final no debe ser superior a 11% (Govindarajan, 2005 citado por Vega *et al.*, 2005). Según Sandoval (2007) menciona que la harina de papa deberá tener un máximo de 12% de humedad.

4.4 EFECTO DE LA TEMPERATURA DE SECADO EN BANDEJA SOBRE LA ACTIVIDAD ANTIOXIDANTE HIDROFILICA DE LA MASHUA

Los resultados del porcentaje de retención de actividad antioxidante hidrofílica de la mashua cultivar “zapallo amarillo”, siguiendo el proceso de secado en bandeja con tres temperatura de trabajo, se ilustran en el Cuadro 10 y la Figura 13. La comparación se realizó con respecto a la mashua fresca y expresado en base seca.

De acuerdo a los métodos estadísticos aplicados a los resultados obtenidas en esta investigación, el Análisis de Variancia (ANVA), con un nivel de significación de $p < 0,05$; indica que existen alta significación entre los tres niveles de temperatura sobre la pérdida de actividad antioxidante hidrofílica (Apéndice 8,1). El análisis de comparaciones múltiples de medias, prueba de Tukey, con un nivel de significación de $p < 0,05$; confirma dicha significación. Resultando la mayor retención de actividad antioxidante hidrofílica de la mashua seca, correspondiente al tratamiento para 40°C (Apéndice 8, 2).

Cuadro 10. Resultados de actividad antioxidante hidrofílica de la mashua, posterior al secado en bandeja a diferentes temperaturas de secado.

	Niveles de tratamiento	Actividad antioxidante (*) Y ± DS	Retención de actividad antioxidante hidrofílica (%)
Mashua fresca	Sin tratamiento	4939,91 ± 49,84	100
Temperatura	40°C	1702,88 ^a ± 40,27	34,47
	50°C	1577,86 ^b ± 35,29	31,94
	60°C	1304,56 ^c ± 34,30	26,41

a, b y c : valores con igual letra, no presenta diferencias estadísticamente significativas para Tukey ($p < 0,5$)

Y : Promedio de 3 repeticiones

DS : Desviación estándar

(*) :µg Eq. Trolox /g de mashua

El uso de diferentes temperaturas de secado, resultaron variables sobre la pérdida de la actividad antioxidante hidrofílica de la mashua. Investigaciones recientes mencionan que el ácido ascórbico y compuestos fenólicos son los principales componentes de la

actividad antioxidante hidrofílica, generalmente los cultivares de color púrpura contienen alto contenido de compuestos fenólicos, mientras los cultivares de color anaranjado contienen mayor cantidad de ácido ascórbico.

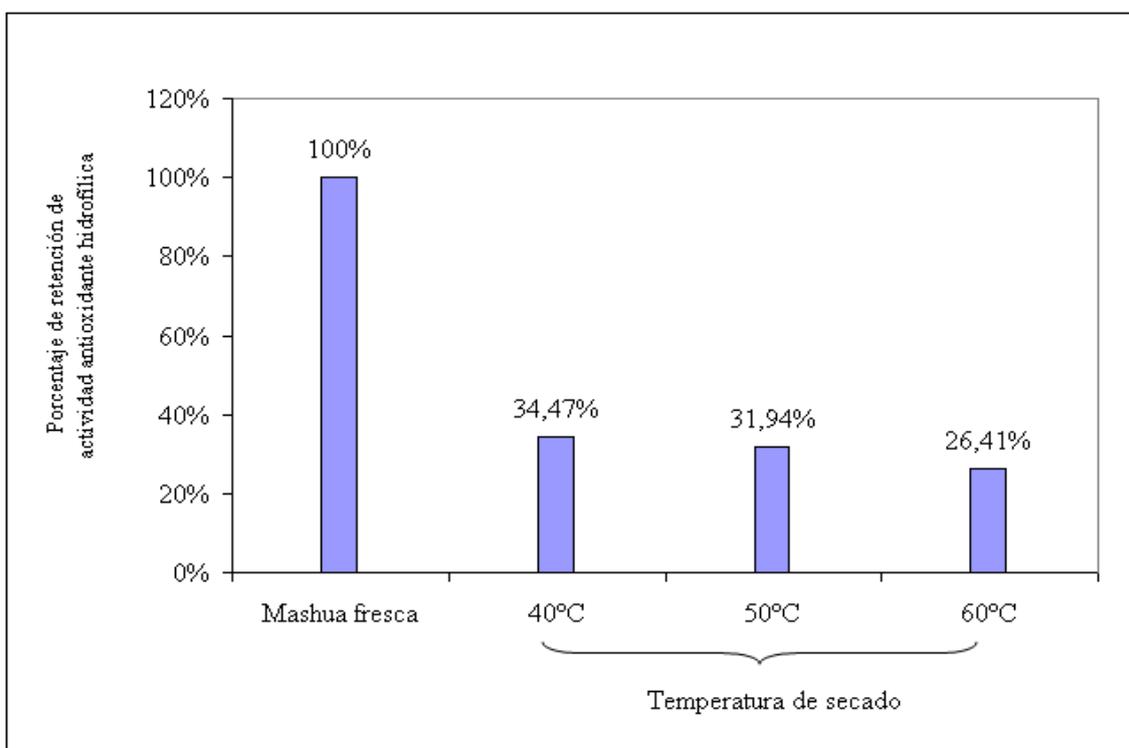


Fig. 13: Resultado del contenido de actividad antioxidante hidrofílica de la mashua fresca y seca

Lin *et al.* (1998) indican que el proceso de secado frecuentemente afecta los compuestos fenólicos, ácido ascórbico y otros fitoquímicos específicos en las frutas y verduras. Al respecto Zanoni *et al.* (1999) mencionan que la temperatura alta y secado por mucho tiempo esta asociado a menudo con el daño que afecta adversamente la textura, color, sabor y valor nutritivo de los productos. Los investigadores Rojas y Gerschenson (2001) mencionan que la degradación de ácido ascórbico, depende de varios factores que incluyen al oxígeno, catálisis de ion de metal, luz, temperatura y grado higrométrico.

Un incremento en la oxidación, durante el secado, ha sido relacionado con el contenido de humedad (Labuza 1971; Zanoni, Pagliarini, Foschino, 2000 todos ellos mencionado por Toor y Savage, 2006). Tomates secados a temperaturas de 60°C han sido reportados que absorbe más agua en rehidratación que aquellos secados a 70°C y 80°C

(Olorunda *et al.*, 1990 citado por Toor y Savage, 2006). Esto ha sido apoyado por Zanoni *et al.* (1999) donde mencionan que si se utiliza temperaturas bajas, si se aumenta el grosor de las rodajas y remueve parcialmente la humedad se puede reducir la oxidación en el producto secado.

Estudios recientes mencionan que altas temperaturas de secado causan una pérdida considerable de ácido ascórbico. Por ejemplo, Zanoni *et al.* (1999) sometieron tomates en mitades a secado en bandeja a temperaturas de 80°C y 110°C, en un tiempo de secado a 350 minutos, observaron una pérdida considerable de ácido ascórbico de 81,7% y 100% respectivamente.

Kwok *et al.* (2004) sometieron bayas variedad “Thiessen” a secado en bandeja a temperatura de 75°C, y determinaron que los compuestos fenólicos totales se reducían en 65,50% y actividad antioxidante sufrió una pérdida de 73,7%.

Toor y Savage (2006) sometieron tomates cultivar “Tradiro” a secado en tipo bandeja a temperatura de 42°C por 18 horas, y encontraron que los compuestos fenólicos totales se reducían en 30%; flavonoides en 13,3%; ácido ascórbico en 28,34% y actividad antioxidante sufrió una pérdida de 23,75%.

Nindo *et al.* (2003) sometieron espárragos de rodajas de 2-4mm de espesor previo escaldado a secado en bandeja a temperaturas de 50°C, 60°C y 75°C, y observaron que la actividad antioxidante fue reducida en 26,9%, 27,6% y 28,6% respectivamente. La reducción del contenido de ácido ascórbico fue variable en diferentes partes del espárrago como: la porción de la punta (76,2%), medio (60,87%) y base (50%), secado a 60°C.

Giovanelli *et al.* (2002) sometieron tomates en mitades con un grosor de rodajas de 15 a 20 mm de espesor a secado en bandeja a temperatura de 70°C, y encontraron que el ácido ascórbico se reducía en 87,88% y la actividad antioxidante hidrofílica aumentó en un promedio de 100%.

Piga *et al.* (2003) sometieron ciruelas cultivar “presidente” a secado en tipo bandeja utilizando dos temperaturas 60°C y 85°C, observaron una pérdida sustancial en contenido de ácido ascórbico en 60,71% y 80,36% respectivamente. En cuanto a la actividad antioxidante no encontraron variación para 60°C, pero si para 85°C la actividad antioxidante se duplicó. Los mismos investigadores reportaron para casos específicos como: El ácido neochlogenic para 60°C se reduce ligeramente, mientras para 85°C no observaron variación; el contenido de Cyanidin- 3rutinoside para 60°C y 85°C fue reducido casi en su totalidad; y el rutin para 60°C y 85°C, se reduce en 65% y 62% respectivamente. Todas las comparaciones las efectuaron respecto al producto fresco y en base seca.

Pocorny y Schmidt (2001) indican que en los alimentos originales, las gotitas de lípido, lisosomas o membranas son protegidos por las capas de proteínas hidratadas, contra el acceso de oxígeno del aire. Debido al secado, la capa protectora es deteriorada, por tanto, los lípidos y estructuras no lipídicas son expuestas al oxígeno, siendo la oxidación de lípidos (incluido los esteroides) y estructuras no lipídicas más rápidos, que en alimentos originales ricos en agua. Altas concentraciones de radicales libres implica mayor pérdida de los antioxidantes. Los cambios en la actividad antioxidante relacionado con la remoción de agua es relativa, si la evaporación del agua es moderada y el tiempo de remoción es corto; los antioxidantes no son dañados usualmente durante el secado.

El contenido de compuestos fenólicos y carotenoides de tomate han sido reportados que son estable durante el procesamiento bajo altas condiciones de temperaturas, y el proceso térmico ha sido reportado que puede aumentar los compuestos fenólicos debido al rompimiento de las células constituyente (Dewanto *et al.*, 2002 citado por Toor y Savage 2006).

Piga *et al.* (2003) explican que el aumento de la actividad antioxidante podría ser el resultado de dos factores: a) la oxidación parcial de los compuestos fenólicos aumenta el poder antioxidante presentes en la muestra (pero es temporal), b) alta temperatura permite la formación de nuevos compuestos con mayor capacidad antioxidante, tales como los que se forman en la reacción de Maillard. Al respecto Giovanelli *et al.* (2000); Stewart *et al.* (2000) citado por Giovanelli *et al.* (2002) mencionan que el tratamiento térmico incrementa el nivel de flavonoles libres, que tiene considerable actividad antioxidante.

Anese *et al.* (1999); Nicoli *et al.* (1997) citado por Toor y Savage (2006) mencionan que el calentamiento es la causa principal de la pérdida de los antioxidantes tales como el ácido ascórbico, pero también el calentamiento puede inducir a la formación de compuestos tales como melanoidinas, por la reacción de Maillard, y este compuesto tiene efectos antioxidantes, estos compuestos se generan con el uso de altas temperaturas 90°C por un corto tiempo de secado. Sin embargo, en nuestro estudio no fueron usadas temperaturas altas, por tanto no se observó este efecto.

Baldeón (2004) menciona, que la caigua secada por aire caliente presentó menor capacidad antioxidante (22,57 $\mu\text{mol trolox/g m s}$) y en caigua secada por atomización la capacidad antioxidante fue mayor en 28,9% respecto a la caigua secada por aire caliente.

4.5 EFECTO DE FACTORES DE SECADO POR ATOMIZACION SOBRE LA ACTIVIDAD ANTIOXIDANTE HIDROFILICA DE LA MASHUA

Los resultados del porcentaje de retención de actividad antioxidante hidrofílica de la mashua cultivar “zapallo amarillo”, siguiendo el proceso de secado por atomización con dos niveles de encapsulante (miracap) de 10% y 15%; dos niveles de temperatura de entrada de 160°C y 180°C y dos niveles de velocidades del rodete del atomizador, de 30000 y 35000 revoluciones por minuto (rpm), se ilustran en la Figura 14 y Cuadro 11. La comparación se realizó con respecto a la mashua fresca y expresado en base seca.

4.5.1 EFECTO DEL FACTOR ENCAPSULANTE

De acuerdo, a los métodos estadísticos aplicados, a los resultados obtenidas en esta investigación. El ANVA, con un nivel de significación $p < 0,05$; indica que existen alta significación entre los niveles de encapsulante sobre la pérdida de actividad antioxidante hidrofílica (Apéndice 9,1). El análisis de comparaciones múltiples de medias, prueba de Tukey, con un nivel de significación de $p < 0,05$; confirma dicha significación. Resultando la menor pérdida de actividad antioxidante hidrofílica de la mashua seca, correspondiente al nivel de encapsulante de 10% (Apéndice 9, 2).

El uso de diferentes niveles de encapsulante en el extracto de mashua, durante el secado por atomización, resultaron variables sobre la retención de actividad antioxidante hidrofílica. Al respecto Bangs y Reineccius (1981) señalan que el aumento del contenido de sólidos puede llevar al material a un incremento en la viscosidad. La viscosidad del material es otra característica que influye sobre el secado por atomización. Es conocido que viscosidades incrementadas producen partículas grandes y huecas que resultan con una densidad aparente baja.

Finney *et al.* (2002) señalan que las características físico químicas, la estabilidad y vida en anaquel, del producto final, dependen principalmente de la porosidad de partículas secas.

Finney *et al.* (2002) mencionan que la concentración de los sólidos es considerablemente importante, determinan la retención del sabor. Al respecto Shiga *et al.* (2004) mencionan que la retención del sabor decrece con el incremento del encapsulante. A si mismo Gibbs *et al.* (1999) afirman que la retención del sabor decrece con el aumento de maltodextrina.

Goubet *et al.* (2001) citado por Shiga *et al.* (2004) indican que los encapsulantes ampliamente utilizados en secado por atomización, para retener los sabores son: maltodextrina, goma arábiga y almidones modificados, pero sufren la desventaja de producir soluciones de alta viscosidad cuando se disuelve a altas concentraciones.

Rosenberg *et al.* (1985) citado por Sarmiento (2003) observaron en capsulas de dextrosa equivalente (DE) 20, que la superficie de las partículas tenían poros, grietas y abolladuras profundas, por lo que al encapsular un material volátil o un ingrediente oxidativo se obtendrá un producto pobre. Por otro lado Main (1978) citado por Sarmiento (2003) observó que las microcapsulas formadas con goma arábiga y maltodextrinas presentaban superficies externas con algunas abolladuras, pero libres de poros y grietas.

Desde luego que el tipo de material encapsulante tendrá influencia en la estabilidad de la emulsión antes de secar, en el tamaño de partícula, en las propiedades de flujo, y en la vida útil del material deshidratado (Bangs and Reineccius 1981; Risch 1995, Re 1998 citado por Pedroza 2002).

4.5.2 EFECTO DEL FACTOR TEMPERATURA

De acuerdo, a los métodos estadísticos aplicados, a los resultados obtenidas en esta investigación. El ANVA, con un nivel de significación $p < 0,05$; indica que existen alta significación entre los niveles de temperatura sobre la pérdida de actividad antioxidante hidrofílica (Apéndice 9,1). El análisis de comparaciones múltiples de medias, prueba de Tukey, con un nivel de significación de $p < 0,05$; confirma dicha significación. Resultando la menor pérdida de actividad antioxidante hidrofílica de la mashua seca, correspondiente al nivel de temperatura de 160°C (Apéndice 9, 3).

El uso de diferentes niveles de temperatura de entrada, en el secado del extracto de la mashua resultaron variables sobre la retención de la actividad antioxidante hidrofílica. Al respecto Verhey (1972) a,b citado por Finney *et al.*, (2002) señalan que un incremento en la temperatura de ingreso eleva la capacidad evaporativa del secador a niveles constantes del aire, promueve la formación de partículas ligeramente más grandes, que secando a temperaturas bajas, debido a que el secado rápido promueve el endurecimiento de la capa exterior de la partícula y un subsiguiente atrapamiento de la humedad residual, causando expansión y los productos secan a una estructura más porosa, y con ello promueven una reducción en la densidad aparente.

Tavella (1972) menciona que el grado de hueco o vacío de la partícula será mayor con el incremento de la temperatura.

Rulkens y Thijssen (1972) citado por Finney *et al.* (2002) señala que la retención del sabor esta influenciada por la entrada y salida de la temperatura del aire. En general, una entrada bastante alta de la temperatura de aire permitir formación rápida de una membrana semipermeable en la superficie de la gota. Pero aun no es tan alto para causar daño por calor al producto seco.

Reineccius (2001) citado por Finney *et al.* (2002) indican que la porosidad de la partícula expuesta al oxígeno, es el mayor factor que determina vida en anaquel de polvos deshidratados por atomización. Así mismo Finney *et al.* (2002) observaron una reducción sustancial en la retención del sabor, con una entrada elevada temperatura de aire, y mencionan que las características físico químicas, la estabilidad y vida en anaquel del

producto final, dependen principalmente de la porosidad de partículas secas.

Finney *et al.* (2002) observaron en microfotografías, que las muestras obtenidas con temperatura de entrada baja (170°C) presentaron partículas con ondulaciones y afiladas en la superficie de la partícula seca. En contraste con la superficie muy lisa observada para muestras obtenidas a una temperatura de entrada alta (220°C). Por otro lado, las partículas obtenidas a temperatura de entrada alta, presentaron el área de la superficie pequeña, que la temperatura de la entrada baja.

Las partículas pequeñas son normalmente más densas que las partículas más grandes. El polvo más denso, es más compacto, tiene la permeabilidad más bajo al oxígeno y, por consiguiente, una vida en anaquel más larga. Sin embargo, no sólo es la densidad que esta involucrado, si no también el tamaño de las partículas, geometría, y porosidad que influyen en la permeabilidad de la matriz al oxígeno y finalmente en la vida en anaquel del producto (Buffo y Reineccius 2000 citado por Finney *et al.*, 2002).

Cuadro 11. Resultados del efecto de factores de secado por atomización sobre la pérdida de actividad antioxidante hidrofílica de la mashua

Parámetros	Niveles de factores	Actividad antioxidante (*) Y ± DS	Retención (%)
Mashua Fresca	Sin tratamiento	4939,91±49,84	100
Encapsulante (%)	10	3131,43 ^a ±226,95	63,39
	15	2740,67 ^b ±226,28	55,48
Temperatura (°C)	160	3161,58 ^a ±196,97	64,00
	180	2710,52 ^b ±196,29	54,87
Velocidad del atomizador (rpm)	30 000	2956,32 ^a ±301,66	59,85
	35 000	2915,78 ^b ±295,35	59,02

a y b : valores con igual letra, no presenta diferencias estadísticamente significativas para Tukey (P < 0,05)

Y : Promedio de 5 repeticiones

DS : Desviación estándar

(*) : µg Eq. Trolox /g de mashua seca

Shiga *et al.* (2004) mencionan que los parámetros tales como sólidos alimentados, son considerados importantes en la retención de los sabores, mientras que una elevada

entrada de temperatura reduce la retención del sabor, también algunos materiales sensibles pueden sufrir daño por calor si se expone altas temperaturas, como los fenoles se degradan durante el deshidratado con aire caliente.

4.5.3 EFECTO DEL FACTOR VELOCIDAD DEL RODETE (ATOMIZADOR)

De acuerdo a los métodos estadísticos aplicados, a los resultados obtenidas en esta investigación. El ANVA, con un nivel de significación $p < 0,05$; indica que existen alta significación entre los niveles de velocidad del rodete sobre la pérdida de actividad antioxidante hidrofílica (Apéndice 9,1). El análisis de comparaciones múltiples de medias, prueba de Tukey, con un nivel de significación de $p < 0,05$; confirma dicha significación. Resultando la menor pérdida de actividad antioxidante hidrofílica de la mashua seca, correspondiente a la velocidad de rodete de 30 000 rpm (Apéndice 9, 4).

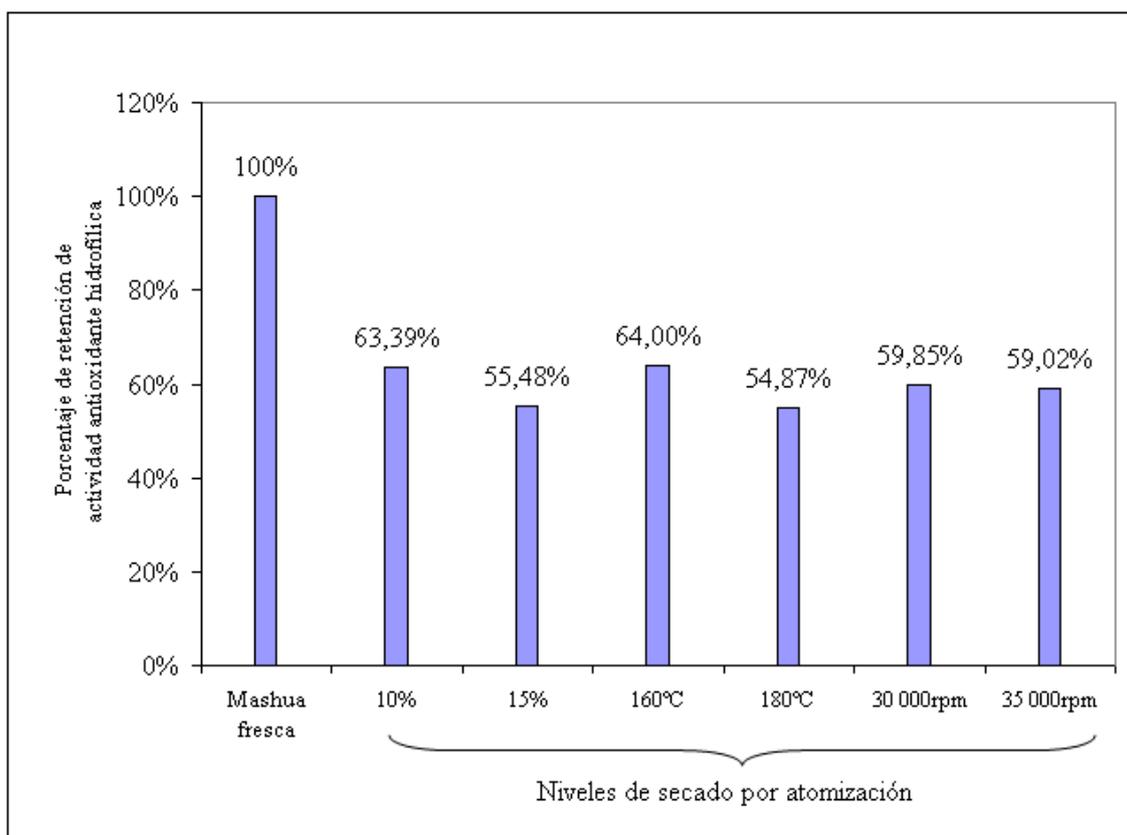


Fig.14: Resultados del contenido de actividad antioxidante hidrofílica de la mashua fresca y seca

El uso de diferentes niveles de velocidad del atomizador en el secado del extracto de la mashua, resultaron variables sobre la retención de la actividad antioxidante. Al respecto Reineccius (2001) citado por Finney *et al.* (2002) mencionan que, en la atomización, la rueda centrífuga, la velocidad rotatoria, el diámetro de la rueda del pulverizador, orificio de la boquilla y las propiedades físicas de la matriz (como la viscosidad y concentración de los sólidos) principalmente determinan el tamaño de las partículas. Una presión alta y el orificio pequeño producirán partículas menores y las condiciones opuestas en las partículas más grandes.

Tavella (1972) señala que, con bajas velocidades de atomización son producidas partículas esféricas sólidas, conforme se aumenta la velocidad se obtendrá gotitas menores y la densidad aparente remanente es aproximadamente constante. Como la velocidad es aumentada, las partículas llegan a ser más huecas y hay disminución de densidad, hasta que eventualmente las partículas llegan a ser tan frágiles que se rompen y esta situación es usual para encontrar un ligero incremento de la densidad aparente.

Brennan *et al.* (1971) indican que, en los experimentos ejecutados, en los cuales la velocidad del atomizador fue variada desde 25 000 rpm, hasta 37 000 rpm., manteniendo constantes otros parámetros. Dentro de este rango la velocidad del atomizador no tuvo efectos sobre el contenido de humedad, tamaño de partícula y contenido de sólidos insolubles. La densidad de la masa fue incremento ligeramente con el incremento de la velocidad del atomizador.

Campos *et al.* (1985) mencionan que, el aumento de la velocidad de atomización, de 22 000 rpm a 35 000 rpm, no afectó: la solubilidad, la capacidad de emulsificación ni la capacidad de formar espuma, de las proteínas del suero de sangre; sin embargo, la densidad aparente y el tamaño de partícula del suero en polvo variaron en relación inversa con la velocidad de atomización.

El tamaño de las partículas varía en razón inversa a la velocidad del disco o de la presión de las toberas, pero hay que determinar la relación exacta entre las variables. Se ha sugerido que existen presiones máximas por encima de las cuales es inútil gastar energía adicional (Perry, 1966).

V. CONCLUSIONES

- De acuerdo a los resultados obtenidos en esta investigación, se comprobó la validez de la ecuación de GAB para modelar y determinar la humedad de equilibrio X^* , de la isoterma de desorción de la mashua para las tres temperaturas de trabajo.
- En el proceso de secado en bandeja, de las rodajas de mashua, se demostró que existe dos periodos de secado (constante y decreciente), para las tres temperaturas de secado.
- La mayor retención de actividad antioxidante hidrofílica de la mashua, mediante el secado en bandeja, se obtuvo con la temperatura de 40°C.
- En el secado por atomización la mayor retención de actividad antioxidante hidrofílica de la mashua se obtuvo cuando se realizó esta operación a 160°C, 30 000 rpm (velocidad del rodete del atomizador) y cuando se utilizó un 10% de encapsulante.
- Entre los métodos usados para el secado de la mashua. El método de secado por atomización resultó con mayor retención de actividad antioxidante hidrofílica en contraste con el método de secado en bandeja que se obtuvo la menor retención. Estos resultados son útiles para valorar el efecto de los métodos de secado y que sus efectos benéficos (actividad antioxidante) podría ser interesante en términos de nutrición.

VI. RECOMENDACIONES

- Realizar estudios de aplicaciones de la mashua seca como alimento funcional.
- Realizar pruebas de secado de mashua en bandeja con otras medidas de espesor de rodajas y diferentes velocidades de aire.
- Realizar pruebas con otros encapsulantes y mezclas de encapsulantes en secado por atomización para mejorar la retención de actividad antioxidante.

VII. BIBLIOGRAFIA

- A.O.A.C. (1998). Official Methods of Analysis of the Association the Official Agricultural Chemists. De Board. USA.
- BALDEÓN, E. (2004). Evaluación de las propiedades fisicoquímicas de la caigua (*Cyclanthera pedata* L.) deshidratada como fuente de fibra dietética. Tesis de post grado Especialidad de tecnología de alimentos UNALM.
- BANGS, W y REINECCIUS, A. (1981). Influence of dryer infeed matrices on the retention of volatile flavor compounds during spray drying. Journal of food science vol. 47. pp. 254-258.
- BARBOSA, G Y VEGA, H. (2000). Deshidratación de Alimentos. Editorial Acribia, S.A. Zaragoza- España.
- BELL L y LABUZA T. (2000). Moisture sorption. Practical aspects of isotherm measurement and use. American association of cereal chemists, Inc. USA. second edition.
- BRAND, W.; CUVELIER, M y BERSET, C. (1995). Use of free radical method to evaluate antioxidant activity, pp 25-30.
- BRENNAN, J; HERRARA, J y JOWITT, R (1971). Un estudio de los factores concernientes al secado por rociada de jugo concentrado de naranja, a escala de laboratorio. Food technology N°6 pp. 295-307.
- BRITO, B y ESPIN, S. (1999). Variabilidad en la composición química de raíces y tubérculos andinos del ecuador, en: www.cipotato.org/library/pdfdocs/RTA59120.pdf

- CACEDA, F y ROSSEL, J. (1991). Sistema de producción y control de plagas en los cultivos andinos. Puno-Perú, pp.12-15.
- CAICEDO, C. (1999). Estudio y promociones de las tuberosas andinas dentro del agro ecosistema andino en Ecuador. Alimentos del mundo andino. Centro internacional de la papa.
- CAMPOS, D. (1985). Obtención de suero de sangre de bovinos secado por atomización y evaluación de sus propiedades funcionales. Tesis UNALM.
- CAMPOS, D.; NORATTO, G.; CHIRINOS, R.; ARBIZU, C.; ROCA, W y CISNEROS-ZEVALLOS, L. (2006). Antioxidant capacity and secondary metabolites in four species of Andean tuber crops: native potato (*Solanum sp.*), mashua (*Tropaeolum tuberosum* Ruiz & Pavón), Oca (*Oxalis tuberosa* Molina) and ulluco (*Ullucus tuberosus* caldas). Journal of the Science of Food and Agriculture 86: 1481-1488.
- CAÑAS, M y BUSCHIAZZO, H. (2000). Antioxidantes: suplemento o dieta. Publicado en Femeba. Año VI N° 57, pp.8-9.
- CARR, A y FREI, B. (1999). Does vitamin C act as a pro-oxidant under physiological conditions ?. The FASEB Journal, vol. 13, pp.1007-1020.
- CASP, V. y ABRIL, R. (1999). Procesos de conservación de alimentos. Ediciones Mundi Prensa. España.
- CHACÓN, S. (1960). Estructura y Variabilidad de *Tropaeolum tuberosum* R & P. Instituto de Interamericana de Ciencias Agrícolas, Costa Rica.
- CHEFTEL, C. (1984). Introducción a la bioquímica y tecnología de los Alimentos. Editorial Acribia, Zaragoza España.
- CHIRIFE, J. (1999). Predicción de la actividad de agua en alimentos. Facultad de ciencias exactas y naturales Universidad de Buenos Aires- Argentina.

- CHIRINOS, R.; CAMPOS, D.; ARBIZU, C.; ROGEZ, H.; REES J-F; LARONDELLE., NORATTO, G y CISNEROS-ZEVALLOS, L. (2006). Effect of genotype, maturity stage and post-harvest storage on phenolic compounds, carotenoid content and antioxidant capacity, of Andean mashua tubers (*Tropaeolum tuberosum* Ruiz & Pavón). Journal of the Science of Food and Agriculture 87: 437-446.
- CHOU, K y CHUA, J. (2001). New hybrid drying technologies for heat sensitive foodstuffs. Trends in Food Science and Technology, 12, pp. 359 –369.
- CHRISTENSEN, G. (1970). Algunos ejemplos de la aplicación del secado por atomización en la industria de alimentos, Copenhagen.
- COLLAZOS, C.; PHILIP, W.; VIÑAS, E.; ALVISTUR, J.; URQUIETA, A.; VAZQUES, J; URQUIETA, A; VASQUEZ, J; DIAS, C; QUIROZ, A; ROCA, A; MARK, H; BRANDFIELD, R; HERRERA, N; FACHING, A; ROBLES, N; HERNANDEZ, E y ARIAS, M. (1993). Composición de alimentos de mayor consumo en el Perú. 6ta. Edición; Ministerio de Salud, Instituto Nacional de Nutrición. Lima. Perú.
- DELGADO, C. (1978). Características morfológicas asociadas al rendimiento en mashua (*Tropaeolum tuberosum* R y P) bajo condiciones de allpachaka (3600 msnm). Universidad Nacional de San Cristóbal de Huamanga- Programa Académico de Agronomía.
- DESMARCHELIER, C. (1997). Total reactive antioxidant potential (TRAP) and total antioxidant reactivity (TAR) of medicinal plants used in Southwest Amazonian (Bolivia and Peru). International Journal of Pharmacognosy. En. 35 (4): 288.296.
- DOYMAZ, I. y PALA, M. (2003). The thin – layer drying characteristics of corn. Journal of Food Engineering, 60, pp. 125- 130.

- ECHEGARAY, J. (1998). Diferencia patogénica, morfológica y bioquímica entre aislamientos de *Rhizopus* Sp. Obtenido de tubérculo andino. Tesis UNALM.
- ERENTURK, S; GULABOGLU, S y GULTEKING, S. (2005). The Effects of Cutting y Drying Medium on the Vitamin C Content of Rosehip during Drying. *Journal of Food Engineering* 68, pp. 513-518.
- ESPINOZA, S.; MONTEGHIRFO, M.; ALVAREZ, J y ARNAO, I. (2002). Análisis electroforético unidimensional y bidimensional de las proteínas de *Tropaeolum tuberosum* (Mashua). Centro de investigación de Bioquímica y nutrición, laboratorio de química bioorgánica. (UNMSM).
- FENNEMA, O. (2000). Química de los Alimentos. Editorial Acribia, Zaragoza - España.
- FINNEY, J; BUFFO, R y REINECCIUS (2002). Effects of type of atomization and processing temperatures on the physical properties and stability of spray-dried flavours. *Journal of food science* vol.67, n°3 pp. 1108-1113.
- FLORES, A. (2003). Reactores catalíticos. Universidad Iberoamericana- Santa Fe – Bogota.
- FREI, B. (1999). Molecular and biological mechanisms of antioxidant action. *The FASEB Journal*. Vol. 13 June. Pp.963-964.
- GEANKOPLIS, C. (1998). Procesos de transporte y operaciones unitarias. Editorial Continental. México.
- GIBBS, F; KERMASHA, S.; ALLI, I y MULLIGAN, N. (1999). Encapsulation in the food industry. *International Journal of Food Sciences and nutrition* n° 50, pp. 213 -224.

- GIOVANELLI, G.; ZANONI, B.; LAVELLI, V y NANI, R. (2001). Water sorption, drying and antioxidant properties of dried tomato products. *Journal of food engineering*, N° 52, pp. 135 – 141.

- GONZÁLEZ, M; MUÑIZ, P y VALLS, V. (2001). Actividad antioxidante de la cerveza: estudios in vitro e in vivo. Departamento de Biotecnología y Ciencia de los Alimentos, Universidad de Burgos departamento de Pediatría, Ginecología y Obstetricia. Universidad de Valencia.

- HALVORSEN, L.; HOLTE, K; MYRSTAD, A.; BARIKMO, B y HVATTUM, E. (2002). A Systematic Screening of Total Antioxidants in Dietary Plants. *American Society for Nutritional Sciences*. pp. 461-471.

- HATAMIPOUR, S. y MOWLA, D. (2002) Shrinkage of carrots during drying in an inert medium fluidized bed. *Journal of Food Engineering*, 55, pp, 247-252.

- HERMOSILLA, M.; JIMÉNEZ, G; GARRIDO, F Y GUARDA, A. (Sin Año). Diseño e implementación de un programa para la docencia interactiva en ingeniería de alimentos. En: www.upv.es/dtalim/herraweb.htm#VII taller.

- HERNÁNDEZ, B y LEÓN, J. (1992). Cultivos marginados otra perspectiva de 1492. Organización de las naciones unidas para la agricultura y la alimentación Roma. pp. 150-151.

- HUAMÁN, M. (2001). Predicción de la actividad de agua utilizando el modelo matemático de GAB en el proceso de deshidratación osmótica del capulí (*Physalis peruviana*). Tesis para optar el título de magíster scientiae en la Universidad Nacional Agraria la Molina. Perú.

- IGLESIAS, H y CHIRIFE, J. (1982). *Handbook of Food Isotherms: Water sorption parameters for food and food components*. Academic Press. New York.

- KWOK, I; DURANCE, HU y KITTS, D. (2004). Dehydration Techniques Affect Phytochemical Contents and Free Radical Scavenging Activities of Saskatoon Berries (*Amelanchier alnifolia Nutt.*). Journal of food science- vol.69, N° 3.
- LEE, K y SHIBAMOTO, T. (2002). Toxicology and antioxidant activities of non-enzymatic browning reaction products: review. Food Reviews International. Vol.18, n° s. 2 and 3, pp.151-175.
- LIN, M.; DURANCE, D y SCAMAN, H. (1998). Characterization of vacuum microwave, air and freeze dried carrots slices. Food Research International, Vol.31 N° 2 pp. 111 – 117.
- LOMUARO, C.; BAKSHI, A y LABUZA, T. (1985). Evaluation of food moisture sorption isotherms equations. Part II: Milk, Coffee, Tea, Nuts, Oilseeds, Species and Starchy Foods. Lebensm wiss. U. Technol. Vol 18: 118.
- LUTSENKO, E.; CARCOMO, J y GOLDE, D. (2002). Vitamin C Prevents DNA Mutation Induced by Oxidative Stress. The journal of Biological Chemistry. Vol. 277, n°. 19, May 10, pp. 16895- 16899. Printed in U.S.A.
- MEZA, G.; CORTES, H.; ZELA, G. y GONZA, V. (1997). Cultivo de mashua. Universidad nacional de san Antonio Abad del Cuzco. Centro de investigación en cultivos andinos. Asociación Arariwa. IX Congreso Internacional de Cultivos Andinos.
- MILLER G, (1959). Use of dinitrosalicylic acid reagent for determination of reducing sugar. Anal. Chem. 31:426-428.
- NATIONAL RESEARCH COUNCIL (1989). Lost Crops of the Incas: Little Know Plants of the Andes With Promise For Worldwide Cultivation. National Academy Press. Washington D.C.

- NAVAS, G.; VEGA DE ROJAS, B y SORIARE, L. (1993). La mashua (*Tropaeolum tuberosum*) fuente potencial de carbohidratos. Escuela Politécnica Nacional. Instituto de investigación Tecnológica. Simposio en carbohidratos. pp.233-237.
- NINDO, C.; SUN, T.; TANG, J.; WANG, S y POWERS, R. (2003). Evaluation of drying technologies for retention of physical quality and antioxidants in asparagus (*Asparagus officinalis*, L.). *Lebensm Wiss. U. Technol.* N° 36, pp. 507-516.
- ORTEGA, L. (1992). Usos y valor nutritivo de los andinos. Instituto Nacional de Investigación Agropecuaria y Agroindustria (INIAA). Programa de Investigación de Cultivos Andinos (PICA).
- PAOLINI, M.; ANTELLI, A.; POZZETTI, L.; SPETLOVA, D.; PEROCCO, P., VALGIMIGLI, L.; PEDULLI, F.; CANTILLI, G. (2001) Induction of cytochrome P450 enzymes and over- generation of oxygen radicals in beta-carotene supplemented rats. *Carcinogenesis* vol.22, N° 9.pp. 1483-1493.
- PEDROZA, R. (2002). Alimentos microencapsulados: particularidades de los procesos para la microencapsulacion de alimentos para larvas de especies agrícolas. Universidad Iberoamericana. Departamento de Ingenierías santa fe de México.
- PERRY, H. (1966). Manual de ingeniero químico. Tercera Edición Ed. Uteha.
- PIGA, A; DEL CARO, A, y CORDA, G. (2003). From Plums to Prunes: Influence of Drying Parameters on Polyphenols And Antioxidant Activity. *Agriculture and food Chemistry.* 51, 3675-3681.
- POCORNY, J y SCHMIDT, S. (2001). Natural antioxidant functionality during food processing. Wood head publishing limited Cambridge England. Part 4.
- PRIOR, L y CAO, G. (2000). Antioxidant Phytochemicals in fruits and Vegetables: Diet and Health Implications. *Hort Science*, Vol. 35 n° 4, pp. 588-592.

- RAMALLO, Z. (1999). Diseño de una planta procesadora de harina de Isaño como base de la alimentación porcina. Tesis. Universidad Privada de Bolivia.
- RIOS, C. (2004). Contribución al estudio de algunos compuestos bioactivos y de la capacidad antioxidante presente en diez genotipos de mashua (*Tropaeolum tuberosum Ruiz & Pavon*) y a la evaluación de su estabilidad. Tesis para optar el grado académico de ingeniero en industrias alimentarias en la Universidad Nacional Agraria La Molina. Perú.
- ROJAS, M. y GERSCHENSON, N. (2001). Ascorbic acid destruction in aqueous model systems: an additional discussion. *Journal of the Science of Food and Agriculture* vol, 81, pp. 1433 – 1439.
- SALAS, F. (1998). Procesamiento de raíces y tubérculos andinos: Fascículos. Centro Internacional de la Papa (CIP) pp. 14-17.
- SANCHEZ, C.; JIMENEZ, A y SAURA, F. (2002). LDL Oxidizability indexes in measurement of antioxidant Activity in selected Spanish wines. *ELSEVIER. Nutrition Research*. 22:pp. 507-517.
- SARMIENTO, H. (2003). Estabilidad físico química y actividad antioxidante de las betalainas del ayrampo (*Opuntia soherensii*) durante el proceso de atomizado. Tesis para optar el título de magíster scientiae en la Universidad Nacional Agraria La Molina. Perú.
- SANDOVAL, A. (2007). Elaboración de harina precocida de papa *solanun tuberosum*, en autoclave, con las variedades Superchola y Gabriela, consumo humano. Universidad Técnica de Ambato. Disponible en: <http://fcial.uta.edu.ec/archivos/HPapaPrecocida.pdf>
- SHI, H.; NOGUCHI, N y NIKE, E. (2001). *Introducing natural antioxidants*. Wood head publishing limited – Cambridge England. Part 3.

- SHIGA, H.; YOSHII, H.; OHE, H.; YASUDA, M.; FURUTA, T.; KUWAHARA, H.; OHKAWARA, M y LINKO, P. (2004). Encapsulation of shiitake (*Lentinus edodes*) flavores by spray drying. *Biosci biotechem*, 68 (1), pp. 66-71.
- STALEY MANUFACTURING COMPANY (2000). Mira-cap starch and speciality. Products. Group. N° 217, pp. 423.
- TAPIA, M. (1984). Los Tubérculos andinos. En: Avances en las investigaciones sobre tubérculos alimenticios de los andes. Lima, Perú. PISCA-IICA- CIID. PP.45-61.
- TAVELLA, J. (1972). Elaboración de polvo deshidratado por atomización a base de cefalo torax de camarón de río.
- TEMOCHE, M.; CAMPOS, D; CHIRINOS, R y CISNEROS, L (2004). Evaluación de los compuestos bioactivos y la capacidad antioxidante presente en 30 genotipos de mashua. *Anales Científicos UNALM*.
- TINEO, J. (1993). Cultivo de mashua. Instituto Nacional de Investigación Agraria. Folleto N° 6-93, pp. 1-9.
- TOOR, K y SAVAGE, P. (2006). Effect of semi-drying on the antioxidant components of tomatoes. *Food Chemistry* 94, 90-97.
- TORRES (1991). Curso conceptos modernos de preservación de alimentos en el mercado norteamericano. UNALM-PERU.
- VEGA, A.; ANDRÉS, A y FITO P (2005) modelado de la cinética de secado del pimiento rojo (*Capsicum annuum l. cv lamuyo*). *Información tecnológica- vol. 16 N°6: Págs.: 3-11.*
- VEGA, A; TELLO, C y LEMUS, M. (2007). Simulación matemática del proceso de secado de la Gracilaria Chilena (*Gracielaria chilensis*). *Revista chilena de ingeniería*, vol. 15 N° 1, pp. 55-64.

- VIDAL, D.; MAUPOEY, P y TARRAZA, J. (1986). La actividad de agua en alimentos. Alimentación. Equipos y tecnología. Vol. 5: 37.
- WANG, H.; CAO, G y PRIOR, L. R. (1996). Total Antioxidant Capacity of Fruts. J. Agric. Food Chem. 44, pp. 701-705.
- WEN-CHI, H.; MEI-HSIEN, L.; HSIEN-JUNG, C.; WEN-LEE, L., CHUAN-HSIAO, H.; YEN-WENN, L Y YAW-HUEI. L. (2001). Antioxidant activities of Dioscorin, the Storage Protein of Yam (*Dioscorea batatas* Decne) Tuber. Journal Agriculture. Food Chem. En. 49, pp. 4956-4960.
- YOUNG, A y LOWE, G. (2001). Antioxidant and Prooxidant Properties of Carotenoids. Archives of Biochemistry and Biophysics. Vol.385, N°.1, January 1, pp. 20-27.
- YOUNG, S y WOODSIDE, V. (2001). Antioxidants in health and disease. Department of clinical biochemistry, institute of clinical Science, Grosvenor Road, Belfast, Northern Ireland. J Clin Pathol; 54. Pp176-186.
- ZANONI, B.; PERI, C.; NANI, R. y LAVELLI, V. (1999). Oxidative heat damage of tomato halves as affected by drying. Food Research International, Vol. 31, N°. 5, pp. 395-401.

limpio, correr un blanco con 150µL del solvente puro (de acuerdo a la solución de extracción) hasta obtener un factor de corrección (debido a la solución)

1.9. Dejar que la muestra y el DPPH reaccionen en un agitador en la oscuridad y cerrar los viales. La temperatura ambiente debe ser 20°C.

1.10. En diferentes intervalos de tiempo (15 min.) transferir la solución a una cubeta de vidrio limpia. Golpear la cubeta hasta eliminar las burbujas y tomar la lectura del espectrofotómetro 515 nm.

1.11. Repetir las lecturas a través del tiempo hasta que se observe que no hay cambios significativos en la absorbancia. El punto final de la absorbancia es usado para calcular la actividad antioxidante.

1.12. Si la lectura de la absorbancia (Paso 1.11) es por debajo de 0.1, diluir el extracto de la muestra a un factor conveniente y repetir el ensayo de nuevo (Paso 1.8). Por ejemplo, 50µL de muestra es añadida a 100µL de solvente hasta formar un total de 150µL

1.13. Calcular la disminución de la absorbancia debido a los antioxidantes como sigue:

$$\Delta\text{DPPH} = \Delta\text{DPPH}_d - (A_{515}) \text{ muestra}$$

Donde:

ΔDPPH : Disminución en la absorbancia debido solo al antioxidante

ΔDPPH_d : Absorbancia del DPPH debido al efecto de la dilución con 150uL de solvente (este valor es cerca de 1,1 cuando la medida es a 515 nm. Sin embargo, se puede determinar en el ensayo). Este control puede cambiar durante el experimento y no sería más de que el 5%.

1.14. Estimar la actividad antioxidante como equivalente de Trolox usando la respectiva curva estándar (Apéndice 10).

$$Eq.Trolox = \left(\frac{0,25}{g.de.muestra} \right) \left(\frac{150 \mu L.de.muestra.reac.tante}{\mu L.extracto.de.muestra} \right)$$

$$Eq.Trolox = \frac{\mu L.Equivalente.Trolox}{g.de.muestra}$$

PREPARACIÓN DEL REACTIVO DPPH

a) Solución madre: Disolver 24mg. De DPPH en una fiola volumétrica de 100ml. En metanol, esta solución obtenida es la solución madre; la cual se debe cubrir con papel aluminio y se guarda en refrigeración, su uso no debe extenderse por más de una semana.

b) Solución de trabajo: De la solución madre y una vez atemperado a ambiente, se extrae 10 ml; y se añade a esta 45ml de metanol; deberá chequearse la absorbancia a 515nm (llevando el espectrofotómetro a cero con metanol), y esta no debe estar alrededor de $1,1 \pm 0,02$, esta solución debe taparse y cubrir con papel de aluminio (Brand *et al.*, 1995)

APENDICE 2: RESULTADO DEL CONTENIDO DE HUMEDAD DE LA MASHUA “zapallo amarillo” FRESCA

Cultivar	Humedad (%)	Promedio (Y)	Desviación Estándar (\pm DS)
Zapallo Amarillo	89,38	88,1	1,00
	87,96		
	86,94		

APENDICE 3: CARACTERÍSTICAS FÍSICAS DE LA MASHUA “zapallo amarillo” FRESCA

Características	Unidad	Valor
Peso promedio de una mashua	(g)	45 rango (14-94)
Suciedad de la mashua al llegar a la planta	(%)	1,0
Densidad de la mashua fresca (ρ_f)	(Kg/m ³)	1015,04

APENDICE 4: SECUENCIA DEL PROGRAMA PARA DETERMINAR LAS CONSTANTES DE LA ECUACIÓN DE GAB DE LA ISOTERMA DE DESORCIÓN



Fig. 4.1: Pantalla del menú del programa de secado.

Al presionar el botón "G.A.B." éste, lo llevará a una hoja de cálculo como la que se muestra a continuación (Figura 4,2).

Número de Nodos <=10	3			
Número de Vertices	6			
Criterio de Convergencia	1.00E-06			
Iteraciones	300			
Numero de pares de datos <=20	10			

CALCULAR CONSTANTES

Maximo de la Función	2.578712
K	0.676835
Xm	7.599980
C	7.899995

Valor de las Constantes para Modelo de GAB

alfa	0.077784
beta	0.098268
gamma	0.024608

	Aw	X exp
1	0.05	3
2	0.1	3.8
3	0.2	4.8
4	0.3	6.3
5	0.4	7.6
6	0.5	9.1
7	0.6	10.9
8	0.7	12.9
9	0.8	15.1
10	0.9	17.7
11		
12		
13		
14		
15		
16		
17		
18		
19		
20		

ELIMINAR DATOS

X CALCULADOS

SALIR

Fig. 4,2: Hoja de cálculo para programa GAB

Para comenzar se debe eliminar los datos presionando el botón "Eliminar Datos", dejando la hoja de cálculo como se aprecia en la Figura 4,3.



Fig. 4,3: Hoja de cálculo para el ingreso de datos.

Se debe ingresar el Número de pares de Datos (programa diseñado para trabajar con un máximo de 20 pares de datos), en la celda indicada para ello y luego ingresar los datos de a_w y X (contenido de humedad).

Al presionar "Calcular Constantes" aparecerán ventanas para el ingreso de los límites aproximados de las constantes, como se muestra a continuación (Figura 4,4).

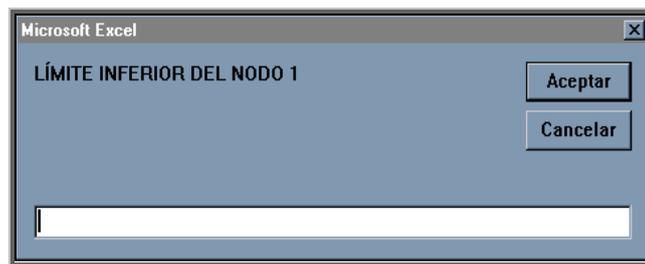


Fig. 4,4: Ventana para el ingreso de los límites de cada constante.

Así es necesario ingresar, para este ejemplo los siguientes datos:

	K (Nodo 1)	X_m (Nodo 2)	C (Nodo 3)
Límite Inferior	0,6	7,5	7,7
Límite Superior	0,7	7,6	7,9
Valor de la Variable del Nodo	0,68	7,56	7,81

Obteniéndose los siguientes resultados (Figura 4,5).

Número de Nodos <=10	3	Aw	X exp	
Número de Vertices	6	1	0.1	3
Criterio de Convergencia	1.00E-06	2	0.2	4.8
Iteraciones	300	3	0.3	6.3
Numero de pares de datos <=20	9	4	0.4	7.6
CALCULAR CONSTANTES		5	0.5	9.1
Maximo de la Función	-0.2067491	6	0.6	10.9
K (Nodo 1)	0.6753928	7	0.7	12.9
Xm (Nodo 2)	7.5999991	8	0.8	15.1
C (Nodo 3)	7.8999926	9	0.9	17.7
Valor de las Constantes para Modelo de GAB		10		
alfa	0.077618	11		
beta	0.098268	12		
gamma	0.024661	13		
		14		
		15		
		16		
		17		
		18		
		19		
		20		

Fig. 4,5: Valor de las constantes para el modelo de GAB.

El programa entrega los valores estimados de K, X_m y C, junto con los valores de alfa, beta y gamma (constantes de GAB). Al presionar el botón "X calculados" se obtendrán los nuevos valores de X y el % RMS, para dichos valores. Figura 4,6.

$X_{calc} = \frac{Aw}{(\alpha \cdot Aw^2 + \beta \cdot Aw + \gamma)}$				Con Xcalc y Xexp obtenemos el %RMS	
	Aw	X exp	Xcalc	%RMS	1.39
1	0.1	3	2.966		
2	0.2	4.8	4.853		
3	0.3	6.3	6.362		
4	0.4	7.6	7.760		
5	0.5	9.1	9.193		
6	0.6	10.9	10.776		
7	0.7	12.9	12.632		
8	0.8	15.1	14.926		
9	0.9	17.7	17.917		
10					
11					
12					
13					
14					
15					
16					
17					
18					

Fig. 4,6: Hoja de cálculo con los nuevos valores de x, según el valor de las constantes.

Si desea realizar un nuevo cálculo se presiona el botón "Nuevo Cálculo", presentando nuevamente la hoja de cálculo inicial. Para finalizar la ejecución sólo se debe presionar el botón "Salir"

Fuente: www.upv.es/dtalim/herraweb.htm#VII taller

APENDICE 5: ISOTERMA DE DESORCION EXPERIMENTAL Y MODELADAS CON LA ECUACION DE GAB PARA LAS TRES TEMPERATURAS DE TRABAJO

Apéndice 5,1: Resultados de la isoterma de desorción de la mashua experimental y modelada con la ecuación de GAB para 40°C

Soluciones saturadas	a _w tabular	Humedad de equilibrio $\left(\frac{Kg H_2O}{Kg s.s}\right)$	
		Experimental	Modelada por GAB
Cloruro de litio	0,113	0,099	0,101
Acetato de potasio	0,207	0,131	0,127
Cloruro de magnesio	0,316	0,151	0,151
Dicromato de sodio	0,510	0,207	0,205
Nitrito de sodio	0,620	0,262	0,250
Cloruro de sodio	0,747	0,341	0,329
Cromato de potasio	0,840	0,436	0,427

Apéndice 5,2: Resultados de la isoterma de desorción de la mashua experimental y modelada con la ecuación de GAB para 50°C

Soluciones saturadas	a _w tabular	Humedad de equilibrio $\left(\frac{Kg H_2O}{Kg s.s}\right)$	
		Experimental	Modelada por GAB
Cloruro de litio	0,111	0,094	0,099
Acetato de potasio	0,200	0,123	0,121
Cloruro de magnesio	0,305	0,142	0,144
Dicromato de sodio	0,500	0,193	0,196
Nitrito de sodio	0,610	0,243	0,240
Cloruro de sodio	0,740	0,328	0,323
Cromato de potasio	0,830	0,418	0,421

Apéndice 5,3: Resultados de la isoterma de desorción de la mashua experimental y modelada con la ecuación de GAB para 60°C

Soluciones saturadas	a _w tabular	Humedad de equilibrio $\left(\frac{Kg H_2O}{Kg s.s}\right)$	
		Experimental	Modelada por GAB
Cloruro de litio	0,110	0,091	0,096
Acetato de potasio	0,190	0,119	0,114
Cloruro de magnesio	0,290	0,137	0,134
Dicromato de sodio	0,490	0,176	0,183
Nitrito de sodio	0,600	0,229	0,224
Cloruro de sodio	0,720	0,292	0,293
Cromato de potasio	0,820	0,393	0,393

**APENDICE 6: DATOS TEORICOS, EXPERIMENTALES Y CALCULOS
REALIZADOS PARA DETERMINAR LAS CURVAS Y TIEMPO
DE SECADO**

Apéndice 6,1: Datos teóricos y experimentales, determinados para la mashua “zapallo
amarillo”

	Unidades	40°C	50°C	60°C
Humedad de equilibrio (X^*)	Kg agua / Kg s.s	0,115	0,106	0,100
Monocapa (X_m)	Kg agua / Kg s.s	0,120	0,110	0,106
Humedad relativa	%	12	11	10
Peso de sólido seco (W_s)	Kg s.s	0,0138	0,0129	0,0128
Coef. de difusividad (D_L)	m ² /h	2,71x10 ⁻⁶	2,97x10 ⁻⁶	4,2x10 ⁻⁶
Calor latente (w)	Kcal / kg	585,40	582,80	580,15
Hum. inicial libre (X_1)	Kg agua / Kg s.s	7,291	7,296	7,301
Hum. Crítica libre ($X_2 = X_c$)	Kg agua / Kg s.s	2,537	2,753	2,395
Hum. final libre (X_3)	Kg agua / Kg s.s	0,037	0,025	0,029
Coef. de Transf. de calor (h)	w / m ² °K	20,46	19,88	19,49
Temp. de bulbo seco (T)	°C	40	50	60
Temp. de bulbo húm.(T_w)	°C	19	24	29
Velocidad de masa (G)	Kg vap./m ² h	5644,80	5443,20	5312,16
Volumen especifico (v)	m ³ / kg aire seco	0,897	0,931	0,961
Razón de humedad (H)	Kg vap./kg aire seco	0,0050	0,0088	0,0130
Densidad del aire (ρ)	kg vap./m ³	1,120	1,080	1,054
Velocidad del aire (v)	m/h	5040		
Espesor de la rodaja(d)	m	0,002		
Área de la bandeja (A)	m ²	0,064		
Porcentaje de Humedad	%	88,1		
Porcentaje de masa seca	%	11,9		
Peso de bandeja	Kg	0,3076		
Densidad de la mashua fresca (ρ_f)	(Kg/m ³)	1015,04		
Kg. Sólido seco (L_s)	Kg	0,0155		

Apéndice 6,2: Cálculos realizados para determinar el tiempo de secado del periodo de velocidad constante.

$$t = \frac{L_s \cdot \lambda_w (X_1 - X_2)}{A \cdot h (T - T_w)}$$

reemplazando los datos del apéndice 6,1 tenemos:

$$t_{40^\circ C} = \frac{0,0155 \text{Kg}_{s.s} \cdot 585400 \frac{\text{cal}}{\text{Kg}_{H_2O}} (2,291 - 2,537) \frac{\text{Kg}_{H_2O}}{\text{Kg}_{s.s}}}{0,064 \text{m}^2 \cdot 20,46 \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \text{K}} (13 - 292) \text{K}}$$

$$t_{40^\circ C} = 1568,69 \frac{\text{cal}}{\text{W}}$$

$$t_{40^\circ C} = 6536,21 \text{s} = 108,94 \text{min} = 1,82 \text{h}$$

$$t_{50^\circ C} = \frac{0,0155 \text{Kg}_{s.s} \cdot 582800 \frac{\text{cal}}{\text{Kg}_{H_2O}} (2,296 - 2,753) \frac{\text{Kg}_{H_2O}}{\text{Kg}_{s.s}}}{0,064 \text{m}^2 \cdot 19,88 \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \text{K}} (23 - 297) \text{K}}$$

$$t_{50^\circ C} = 1240,58 \frac{\text{cal}}{\text{W}}$$

$$t_{50^\circ C} = 5169,10 \text{s} = 86,15 \text{min} = 1,44 \text{h}$$

$$t_{60^\circ C} = \frac{0,0155 \text{Kg}_{s.s} \cdot 580150 \frac{\text{cal}}{\text{Kg}_{H_2O}} (2,301 - 2,395) \frac{\text{Kg}_{H_2O}}{\text{Kg}_{s.s}}}{0,064 \text{m}^2 \cdot 19,49 \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \text{K}} (33 - 302) \text{K}}$$

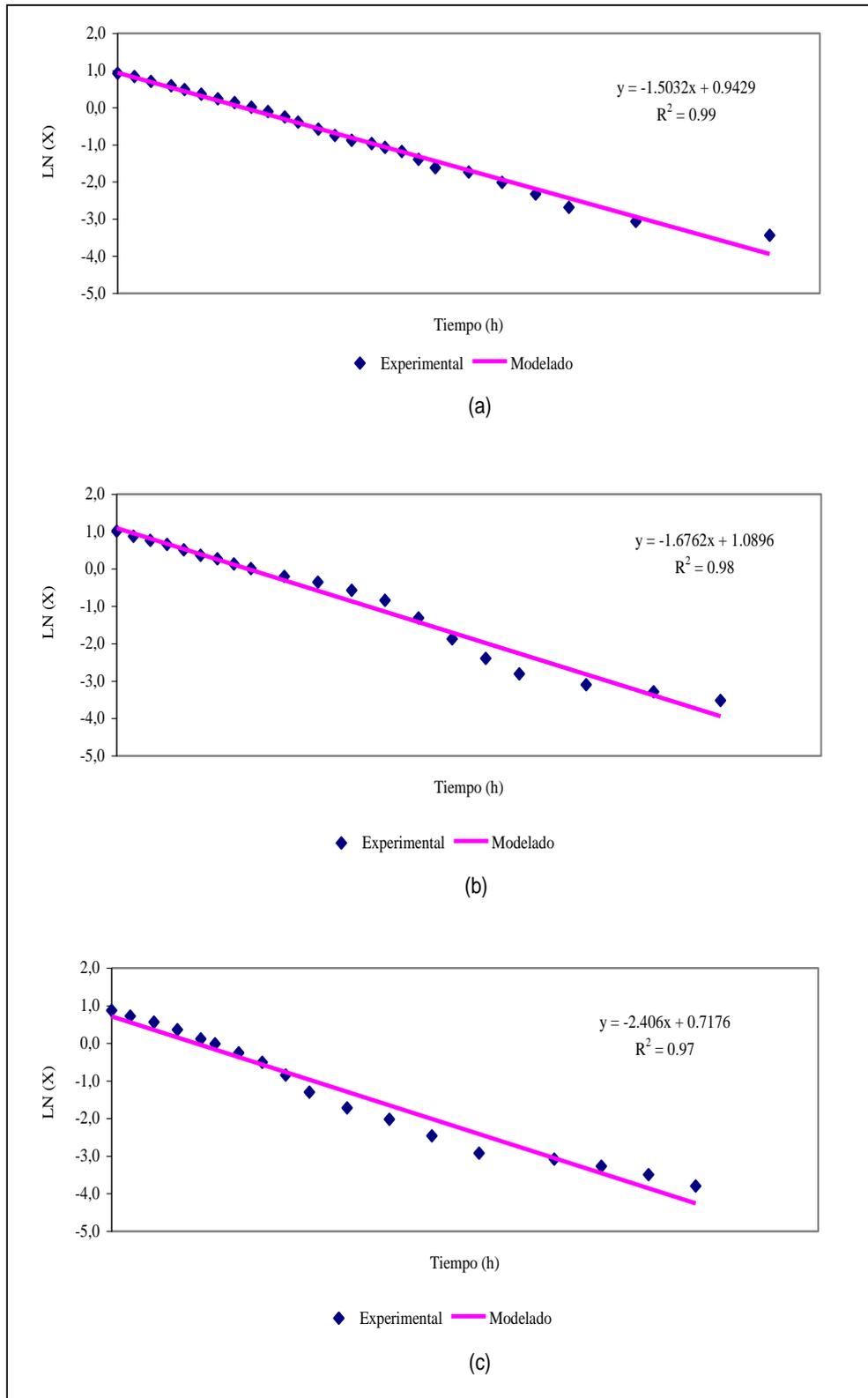
$$t_{60^\circ C} = 1140,90 \frac{\text{cal}}{\text{W}}$$

$$t_{60^\circ C} = 4753,73 \text{s} = 79,23 \text{min} = 1,32 \text{h}$$

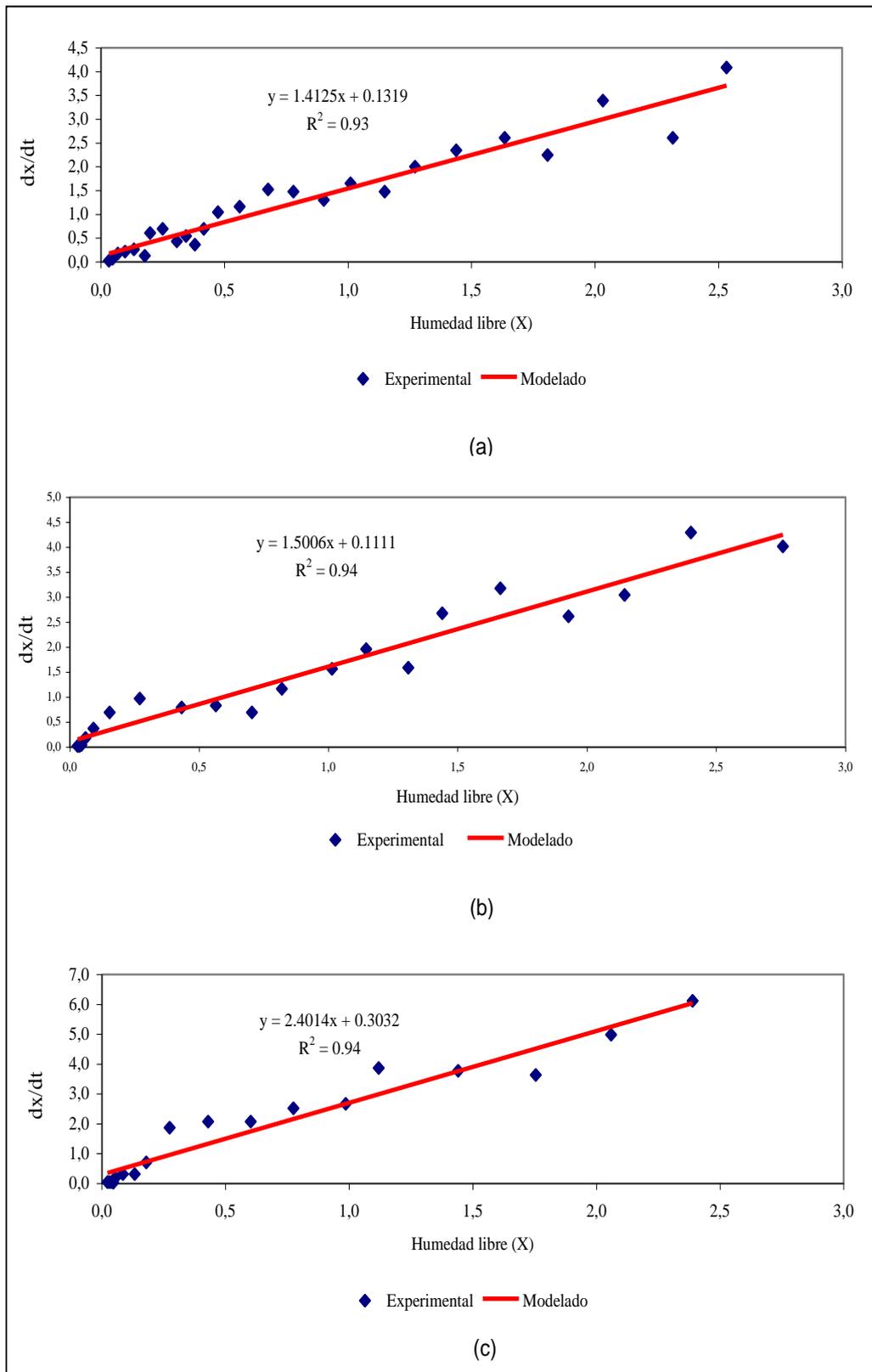
$$W = \frac{J}{s}$$

$$\text{Joule}(J) = 0,24 \text{cal}$$

Apéndice 6,3: Representación gráfica para describir el mecanismo que gobierna la migración del agua de las rodajas de mashua en el periodo decreciente, a) 40°C, b) 50°C y c) 60°C.



Apéndice 6,4. Representación gráfica para hallar el coeficiente de difusividad líquida (D_L), a) 40°C, b) 50°C y 60°C.



Apéndice 6,5: Cálculos realizados para determinar el tiempo de secado del periodo de velocidad decreciente por el método de difusividad.

$$t = \frac{4d^2}{\pi^2 D_L} \ln \frac{8X_2}{\pi^2 X_3}$$

reemplazando los datos del apéndice 6,1 tenemos:

$$t_{40^\circ C} = \frac{4(0,002)^2 m^2 .h}{\pi^2 .2,71 \times 10^{-6} m^2} \ln \frac{8(2,537)}{\pi^2 (0,037)}$$

$$t_{40^\circ C} = (0,598)4,02h$$

$$t_{40^\circ C} = 2,40h$$

$$t_{50^\circ C} = \frac{4(0,002)^2 m^2 .h}{\pi^2 .2,97 \times 10^{-6} m^2} \ln \frac{8(2,753)}{\pi^2 (0,025)}$$

$$t_{50^\circ C} = (0,545)4,49h$$

$$t_{50^\circ C} = 2,45h$$

$$t_{60^\circ C} = \frac{4(0,002)^2 m^2 .h}{\pi^2 .4,2 \times 10^{-6} m^2} \ln \frac{8(2,395)}{\pi^2 (0,029)}$$

$$t_{60^\circ C} = (0,386)4,20h$$

$$t_{60^\circ C} = 1,62h$$

**APÉNDICE 7: CÁLCULOS REALIZADOS PARA DETERMINAR LAS CURVAS DE
SECADO PARA LAS TEMPERATURAS DE SECADO**

Apéndice 7,1: Cálculos realizados para determinar la curva y curva de velocidad de secado
experimental para 40°C

Tiempo (h)	Wt (Kg)	W (Kg)	Xt (Kg _{agua} /Kg _{s.s.})	X (Kg _{agua} /Kg _{s.s.})	dt (h)	dX (Kg _{agua} /Kg _{s.s.})	dX / dt	R Experimental (Kg _{agua} /m ² h)
0.000	0.4236	0.116	7.406	7.291				
0.083	0.4196	0.112	7.116	7.001	0.083	-0.290	-3.478	0.842
0.167	0.4151	0.108	6.790	6.675	0.083	-0.326	-3.913	0.947
0.250	0.4106	0.103	6.464	6.349	0.083	-0.326	-3.913	0.947
0.333	0.4066	0.099	6.174	6.059	0.083	-0.290	-3.478	0.842
0.417	0.4014	0.094	5.797	5.682	0.083	-0.377	-4.522	1.094
0.517	0.3971	0.090	5.486	5.371	0.100	-0.312	-3.116	0.754
0.583	0.3936	0.086	5.232	5.117	0.067	-0.254	-3.804	0.921
0.667	0.3901	0.083	4.978	4.863	0.083	-0.254	-3.043	0.737
0.750	0.3861	0.079	4.688	4.573	0.083	-0.290	-3.478	0.842
0.833	0.3813	0.074	4.341	4.226	0.083	-0.348	-4.174	1.010
0.917	0.3769	0.069	4.022	3.907	0.083	-0.319	-3.826	0.926
1.000	0.3736	0.066	3.783	3.668	0.083	-0.239	-2.870	0.694
1.083	0.3695	0.062	3.486	3.371	0.083	-0.297	-3.565	0.863
1.167	0.3664	0.059	3.261	3.146	0.083	-0.225	-2.696	0.652
1.250	0.3627	0.055	2.993	2.878	0.083	-0.268	-3.217	0.779
1.333	0.3580	0.050	2.652	2.537	0.083	-0.341	-4.087	0.989
1.417	0.3550	0.047	2.435	2.320	0.083	-0.217	-2.609	0.631
1.500	0.3511	0.044	2.152	2.037	0.083	-0.283	-3.391	0.821
1.600	0.3480	0.040	1.928	1.813	0.100	-0.225	-2.246	0.544
1.667	0.3456	0.038	1.754	1.639	0.067	-0.174	-2.609	0.631
1.750	0.3429	0.035	1.558	1.443	0.083	-0.196	-2.348	0.568
1.833	0.3406	0.033	1.391	1.276	0.083	-0.167	-2.000	0.484
1.917	0.3389	0.031	1.268	1.153	0.083	-0.123	-1.478	0.358
2.000	0.3370	0.029	1.130	1.015	0.083	-0.138	-1.652	0.400
2.083	0.3355	0.028	1.022	0.907	0.083	-0.109	-1.304	0.316
2.167	0.3338	0.026	0.899	0.784	0.083	-0.123	-1.478	0.358
2.233	0.3324	0.025	0.797	0.682	0.067	-0.101	-1.522	0.368
2.333	0.3308	0.023	0.681	0.566	0.100	-0.116	-1.159	0.281
2.417	0.3296	0.022	0.594	0.479	0.083	-0.087	-1.043	0.253
2.500	0.3288	0.021	0.536	0.421	0.083	-0.058	-0.696	0.168
2.600	0.3283	0.021	0.500	0.385	0.100	-0.036	-0.362	0.088
2.667	0.3278	0.020	0.464	0.349	0.067	-0.036	-0.543	0.132
2.750	0.3273	0.020	0.428	0.313	0.083	-0.036	-0.435	0.105
2.917	0.3265	0.019	0.370	0.255	0.167	-0.058	-0.348	0.084
3.083	0.3258	0.018	0.319	0.204	0.167	-0.051	-0.304	0.074
3.250	0.3249	0.017	0.254	0.139	0.167	-0.065	-0.391	0.095
3.417	0.3244	0.017	0.217	0.102	0.167	-0.036	-0.217	0.053
3.583	0.3240	0.016	0.188	0.073	0.167	-0.029	-0.174	0.042
3.917	0.3237	0.016	0.167	0.052	0.334	-0.022	-0.065	0.016
4.583	0.3235	0.016	0.152	0.037	0.666	-0.014	-0.022	0.005

Apéndice 7,2: Cálculos realizados para determinar la curva y curva de velocidad de secado
estimada para 40°C

Tiempo (h)	X (Kg agua/ Kg s.s)	X Estimado (Kg agua/ Kg s.s)	X Promedio (Kg agua/ Kg s.s)	dt (h)	dx (Kg agua/ Kg s.s)	dx/dt	R Estimado (Kg agua/ m ² h)	R Experimental (Kg agua/ m ² h)
0.000	7.291	7.318						
0.083	7.001	6.996	7.157	0.083	-0.322	-3.881	0.939	0.842
0.167	6.675	6.670	6.833	0.084	-0.326	-3.881	0.939	0.947
0.250	6.349	6.348	6.509	0.083	-0.322	-3.881	0.939	0.947
0.333	6.059	6.026	6.187	0.083	-0.322	-3.881	0.939	0.842
0.417	5.682	5.700	5.863	0.084	-0.326	-3.881	0.939	1.094
0.517	5.371	5.312	5.506	0.100	-0.388	-3.881	0.939	0.754
0.583	5.117	5.055	5.183	0.066	-0.256	-3.881	0.939	0.921
0.667	4.863	4.729	4.892	0.084	-0.326	-3.881	0.939	0.737
0.750	4.573	4.407	4.568	0.083	-0.322	-3.881	0.939	0.842
0.833	4.226	4.085	4.246	0.083	-0.322	-3.881	0.939	1.010
0.917	3.907	3.759	3.922	0.084	-0.326	-3.881	0.939	0.926
1.000	3.668	3.437	3.598	0.083	-0.322	-3.881	0.939	0.694
1.083	3.371	3.115	3.276	0.083	-0.322	-3.881	0.939	0.863
1.167	3.146	2.789	2.952	0.084	-0.326	-3.881	0.939	0.652
1.250	2.878	2.467	2.628	0.083	-0.322	-3.881	0.939	0.779
1.333	2.537	2.052	2.422	0.083	-0.322	-3.881	0.939	0.989
1.417	2.320	1.783	1.918	0.084	-0.269	-3.197	0.774	0.631
1.500	2.037	1.553	1.668	0.083	-0.231	-2.781	0.673	0.821
1.600	1.813	1.314	1.433	0.100	-0.239	-2.388	0.578	0.544
1.667	1.639	1.175	1.244	0.067	-0.139	-2.076	0.502	0.631
1.750	1.443	1.023	1.099	0.083	-0.152	-1.832	0.443	0.568
1.833	1.276	0.890	0.956	0.083	-0.132	-1.595	0.386	0.484
1.917	1.153	0.774	0.832	0.084	-0.117	-1.387	0.336	0.358
2.000	1.015	0.674	0.724	0.083	-0.100	-1.207	0.292	0.400
2.083	0.907	0.586	0.630	0.083	-0.087	-1.050	0.254	0.316
2.167	0.784	0.510	0.548	0.084	-0.077	-0.914	0.221	0.358
2.233	0.682	0.456	0.483	0.066	-0.053	-0.806	0.195	0.368
2.333	0.566	0.386	0.421	0.100	-0.070	-0.702	0.170	0.281
2.417	0.479	0.336	0.361	0.084	-0.051	-0.602	0.146	0.253
2.500	0.421	0.292	0.314	0.083	-0.043	-0.524	0.127	0.168
2.600	0.385	0.247	0.270	0.100	-0.045	-0.450	0.109	0.088
2.667	0.349	0.221	0.234	0.067	-0.026	-0.391	0.095	0.132
2.750	0.313	0.193	0.207	0.083	-0.029	-0.345	0.083	0.105
2.917	0.255	0.146	0.169	0.167	-0.047	-0.281	0.068	0.084
3.083	0.204	0.110	0.128	0.166	-0.035	-0.212	0.051	0.074
3.250	0.139	0.084	0.097	0.167	-0.027	-0.161	0.039	0.095
3.417	0.102	0.063	0.073	0.167	-0.020	-0.122	0.029	0.053
3.583	0.073	0.048	0.056	0.166	-0.015	-0.092	0.022	0.042
3.917	0.052	0.027	0.038	0.334	-0.020	-0.061	0.015	0.016
4.583	0.037	0.009	0.018	0.666	-0.018	-0.028	0.007	0.005

Apéndice 7,3: Cálculos realizados para determinar la curva y curva de velocidad de secado experimental para 50°C

Tiempo (h)	Wt (Kg)	W (Kg)	Xt (Kg agua/ Kg s.s)	X (Kg agua/ Kg s.s)	dt (h)	dX (Kg agua/ Kg s.s)	dX / dt	R Experimental (Kg agua/ m ² h)
0.000	0.4161	0.1085	7.411	7.296				
0.083	0.4126	0.1050	7.140	7.025	0.083	-0.271	-3.269	0.791
0.167	0.4061	0.0985	6.636	6.521	0.084	-0.504	-5.999	1.452
0.250	0.4007	0.0931	6.217	6.102	0.083	-0.419	-5.043	1.221
0.333	0.3958	0.0882	5.837	5.722	0.083	-0.380	-4.576	1.107
0.417	0.3904	0.0828	5.419	5.304	0.084	-0.419	-4.983	1.206
0.500	0.3844	0.0768	4.953	4.838	0.083	-0.465	-5.604	1.356
0.583	0.3803	0.0727	4.636	4.521	0.083	-0.318	-3.829	0.927
0.667	0.3748	0.0672	4.209	4.094	0.084	-0.426	-5.076	1.228
0.750	0.3710	0.0634	3.915	3.800	0.083	-0.295	-3.549	0.859
0.833	0.3652	0.0576	3.465	3.350	0.083	-0.450	-5.417	1.311
0.917	0.3618	0.0542	3.202	3.087	0.084	-0.264	-3.138	0.759
1.000	0.3575	0.0499	2.868	2.753	0.083	-0.333	-4.016	0.972
1.083	0.3529	0.0453	2.512	2.397	0.083	-0.357	-4.296	1.040
1.167	0.3496	0.0420	2.256	2.141	0.084	-0.256	-3.045	0.737
1.250	0.3468	0.0392	2.039	1.924	0.083	-0.217	-2.615	0.633
1.333	0.3434	0.0358	1.775	1.660	0.083	-0.264	-3.175	0.768
1.417	0.3405	0.0329	1.550	1.435	0.084	-0.225	-2.676	0.648
1.500	0.3388	0.0312	1.419	1.304	0.083	-0.132	-1.588	0.384
1.583	0.3367	0.0291	1.256	1.141	0.083	-0.163	-1.961	0.475
1.667	0.3350	0.0274	1.124	1.009	0.084	-0.132	-1.569	0.380
1.833	0.3325	0.0249	0.930	0.815	0.166	-0.194	-1.167	0.283
2.000	0.3310	0.0234	0.814	0.699	0.167	-0.116	-0.696	0.169
2.167	0.3292	0.0216	0.674	0.559	0.167	-0.140	-0.836	0.202
2.333	0.3275	0.0199	0.543	0.428	0.166	-0.132	-0.794	0.192
2.500	0.3254	0.0178	0.380	0.265	0.167	-0.163	-0.975	0.236
2.667	0.3239	0.0163	0.264	0.149	0.167	-0.116	-0.696	0.169
2.833	0.3231	0.0155	0.202	0.087	0.166	-0.062	-0.374	0.090
3.000	0.3227	0.0151	0.171	0.056	0.167	-0.031	-0.186	0.045
3.333	0.3225	0.0149	0.155	0.040	0.333	-0.016	-0.047	0.011
3.667	0.3224	0.0148	0.147	0.032	0.334	-0.008	-0.023	0.006
4.000	0.3223	0.0147	0.140	0.025	0.333	-0.008	-0.023	0.006

Apéndice 7,4: Cálculos realizados para determinar la curva y curva de velocidad de secado
estimada para 50°C

Tiempo (h)	X (Kg agua/ Kg s.s.)	X Estimado (Kg agua/ Kg s.s.)	X Promedio (Kg agua/ Kg s.s.)	dt (h)	dx (Kg agua/ Kg s.s.)	dx/dt	R Estimado (Kg agua/ m ² h)	R Experimental (Kg agua/ m ² h)
0.000	7.296	7.369						
0.083	7.025	6.950	7.160	0.083	-0.419	-5.048	1.222	0.791
0.167	6.521	6.526	6.738	0.084	-0.424	-5.048	1.222	1.452
0.250	6.102	6.107	6.316	0.083	-0.419	-5.048	1.222	1.221
0.333	5.722	5.688	5.898	0.083	-0.419	-5.048	1.222	1.107
0.417	5.304	5.264	5.476	0.084	-0.424	-5.048	1.222	1.206
0.500	4.838	4.845	5.054	0.083	-0.419	-5.048	1.222	1.356
0.583	4.521	4.426	4.636	0.083	-0.419	-5.048	1.222	0.927
0.667	4.094	4.002	4.214	0.084	-0.424	-5.048	1.222	1.228
0.750	3.800	3.583	3.792	0.083	-0.419	-5.048	1.222	0.859
0.833	3.350	3.164	3.374	0.083	-0.419	-5.048	1.222	1.311
0.917	3.087	2.740	2.952	0.084	-0.424	-5.048	1.222	0.759
1.000	2.753	2.236	2.488	0.083	-0.424	-5.048	1.222	0.972
1.083	2.397	1.920	2.078	0.083	-0.315	-3.799	0.919	1.040
1.167	2.141	1.646	1.783	0.084	-0.274	-3.261	0.789	0.737
1.250	1.924	1.414	1.530	0.083	-0.232	-2.798	0.677	0.633
1.333	1.660	1.215	1.314	0.083	-0.199	-2.403	0.582	0.768
1.417	1.435	1.041	1.128	0.084	-0.173	-2.062	0.499	0.648
1.500	1.304	0.895	0.968	0.083	-0.147	-1.770	0.428	0.384
1.583	1.141	0.768	0.831	0.083	-0.126	-1.520	0.368	0.475
1.667	1.009	0.659	0.714	0.084	-0.110	-1.305	0.316	0.380
1.833	0.815	0.486	0.572	0.166	-0.173	-1.041	0.252	0.283
2.000	0.699	0.358	0.422	0.167	-0.128	-0.767	0.186	0.169
2.167	0.559	0.264	0.311	0.167	-0.094	-0.565	0.137	0.202
2.333	0.428	0.194	0.229	0.166	-0.069	-0.416	0.101	0.192
2.500	0.265	0.143	0.169	0.167	-0.051	-0.307	0.074	0.236
2.667	0.149	0.105	0.124	0.167	-0.038	-0.226	0.055	0.169
2.833	0.087	0.078	0.092	0.166	-0.028	-0.167	0.040	0.090
3.000	0.056	0.057	0.068	0.167	-0.021	-0.123	0.030	0.045
3.333	0.040	0.031	0.044	0.333	-0.026	-0.079	0.019	0.011
3.667	0.032	0.017	0.024	0.334	-0.014	-0.043	0.010	0.006
4.000	0.025	0.009	0.013	0.333	-0.008	-0.023	0.006	0.006

Apéndice 7,5: Cálculos realizados para determinar la curva y curva de velocidad de secado experimental para 60°C

Tiempo (h)	Wt (Kg)	W (Kg)	Xt (Kg agua/ Kg s.s)	X (Kg agua/ Kg s.s)	dt (h)	dX (Kg agua/ Kg s.s)	dX / dt	R Experimental (Kg agua/ m ² h)
0.000	0.4148	0.1072	7.401	7.301				
0.083	0.4081	0.1005	6.876	6.776	0.083	-0.525	-6.326	1.531
0.167	0.4013	0.0937	6.343	6.243	0.084	-0.533	-6.344	1.535
0.250	0.3944	0.0868	5.803	5.703	0.083	-0.541	-6.515	1.577
0.333	0.3866	0.0790	5.191	5.091	0.083	-0.611	-7.365	1.782
0.417	0.3801	0.0725	4.682	4.582	0.084	-0.509	-6.064	1.468
0.500	0.3729	0.0653	4.118	4.018	0.083	-0.564	-6.798	1.645
0.583	0.3660	0.0584	3.577	3.477	0.083	-0.541	-6.515	1.577
0.667	0.3600	0.0524	3.107	3.007	0.084	-0.470	-5.598	1.355
0.767	0.3522	0.0446	2.495	2.395	0.100	-0.611	-6.113	1.479
0.833	0.3480	0.0404	2.166	2.066	0.066	-0.329	-4.987	1.207
0.917	0.3441	0.0365	1.861	1.761	0.084	-0.306	-3.639	0.881
1.000	0.3401	0.0325	1.547	1.447	0.083	-0.313	-3.777	0.914
1.083	0.3360	0.0284	1.226	1.126	0.083	-0.321	-3.871	0.937
1.133	0.3343	0.0267	1.092	0.992	0.050	-0.133	-2.665	0.645
1.217	0.3316	0.0240	0.881	0.781	0.084	-0.212	-2.519	0.610
1.300	0.3294	0.0218	0.708	0.608	0.083	-0.172	-2.077	0.503
1.383	0.3272	0.0196	0.536	0.436	0.083	-0.172	-2.077	0.503
1.467	0.3252	0.0176	0.379	0.279	0.084	-0.157	-1.866	0.452
1.600	0.3240	0.0164	0.285	0.185	0.133	-0.094	-0.707	0.171
1.750	0.3234	0.0158	0.238	0.138	0.150	-0.047	-0.313	0.076
1.900	0.3228	0.0152	0.191	0.091	0.150	-0.047	-0.313	0.076
2.067	0.3224	0.0148	0.160	0.060	0.167	-0.031	-0.188	0.045
2.333	0.3223	0.0147	0.152	0.052	0.266	-0.008	-0.029	0.007
2.500	0.3222	0.0146	0.144	0.044	0.167	-0.008	-0.047	0.011
2.667	0.3221	0.0145	0.136	0.036	0.167	-0.008	-0.047	0.011
2.833	0.3220	0.0144	0.129	0.029	0.166	-0.008	-0.047	0.011

Apéndice 7,6: Cálculos realizados para determinar la curva y curva de velocidad de secado estimada para 60°C

Tiempo (h)	X (Kg agua/ Kg s.s)	X Estimado (Kg agua/ Kg s.s)	X Promedio (Kg agua/ Kg s.s)	dt (h)	dx (Kg agua/ Kg s.s)	dx/dt	R Estimado (Kg agua/ m ² h)	R Experimental (Kg agua/ m ² h)
0.000	7.301	7.297						
0.083	6.776	6.770	7.033	0.083	-0.527	-6.345	1.535	1.531
0.167	6.243	6.237	6.503	0.084	-0.533	-6.345	1.535	1.535
0.250	5.703	5.710	5.974	0.083	-0.527	-6.345	1.535	1.577
0.333	5.091	5.184	5.447	0.083	-0.527	-6.345	1.535	1.782
0.417	4.582	4.651	4.917	0.084	-0.533	-6.345	1.535	1.468
0.500	4.018	4.124	4.387	0.083	-0.527	-6.345	1.535	1.645
0.583	3.477	3.597	3.861	0.083	-0.527	-6.345	1.535	1.577
0.667	3.007	3.064	3.331	0.084	-0.533	-6.345	1.535	1.355
0.767	2.395	2.430	2.500	0.084	-0.533	-6.345	1.535	1.479
0.833	2.066	1.632	1.784	0.066	-0.304	-4.612	1.116	1.207
0.917	1.761	1.313	1.472	0.084	-0.319	-3.800	0.920	0.881
1.000	1.447	1.059	1.186	0.083	-0.254	-3.061	0.741	0.914
1.083	1.126	0.854	0.956	0.083	-0.205	-2.468	0.597	0.937
1.133	0.992	0.750	0.802	0.050	-0.104	-2.075	0.502	0.645
1.217	0.781	0.603	0.677	0.084	-0.147	-1.747	0.423	0.610
1.300	0.608	0.487	0.545	0.083	-0.117	-1.407	0.340	0.503
1.383	0.436	0.393	0.440	0.083	-0.094	-1.135	0.275	0.503
1.467	0.279	0.316	0.354	0.084	-0.077	-0.914	0.221	0.452
1.600	0.185	0.224	0.270	0.133	-0.092	-0.692	0.167	0.171
1.750	0.138	0.152	0.188	0.150	-0.072	-0.480	0.116	0.076
1.900	0.091	0.103	0.127	0.150	-0.049	-0.326	0.079	0.076
2.067	0.060	0.067	0.085	0.167	-0.036	-0.216	0.052	0.045
2.333	0.052	0.033	0.050	0.266	-0.033	-0.125	0.030	0.007
2.500	0.044	0.022	0.028	0.167	-0.012	-0.070	0.017	0.011
2.667	0.036	0.014	0.018	0.167	-0.008	-0.046	0.011	0.011
2.833	0.029	0.009	0.012	0.166	-0.005	-0.030	0.007	0.011

Wt : peso total (bandeja +muestra)

W : peso de la muestra (agua+sólido seco)

R : velocidad de secado

Xt : humedad expresada en base seca

Ws : peso de sólido seco

X : contenido de humedad de libre

X* : humedad de equilibrio determinado por isoterma de desorción (GAB)

$$X = X_t - X^*$$

$$R = - \frac{L_s}{A} \frac{dX}{dt}$$

L_s = Porcentaje de material seco (ρ_f · A·d)

APENDICE 8: ANÁLISIS DE VARIANCIA Y LA PRUEBA DE TUKEY PARA EVALUAR EL EFECTO DE LAS TEMPERATURAS SECADO EN BANDEJA SOBRE LA ACTIVIDAD ANTIOXIDANTE HIDROFÍLICA DE LA MASHUA

Apéndice 8,1: Análisis de variancia para evaluar si existe diferencias entre las medias del contenido de actividad antioxidante hidrofílica de la mashua, para las tres temperaturas de secado

Fuente	G.l	Suma de cuadrados	Cuadrado medio	F Calculado	Signific
Temperaturas	2	414967,4803	207483,7402	153,93	0,0001**
Error	12	16175,3506	1347,9459		
Total	14	431142,8309			
Cv	2.4				

** : Alta significación

Apéndice 8,2: Prueba de comparación del contenido de actividad antioxidante hidrofílica, determinado con diferentes temperaturas de secado.

TRATAMIENTO	MEDIAS	SIGNIFICACION
40°C	1702,88	A
50°C	1577,86	B
60°C	1304,56	C

Valores con igual letra, no presenta diferencias estadísticamente significativas (Tukey: 0.05)

APENDICE 9: ANÁLISIS DE VARIANCIA Y LA PRUEBA DE TUKEY PARA EVALUAR EL EFECTO DE LOS FACTORES DE SECADO POR ATOMIZACIÓN SOBRE LA ACTIVIDAD ANTIOXIDANTE HIDROFÍLICA DE LA MASHUA

Apéndice 9,1: Análisis de variancia para evaluar si existe diferencias entre las medias del contenido de actividad antioxidante hidrofílica de la mashua, para los diferentes niveles de secado

Fuente	G.I	Suma de cuadrados	Cuadrado medio	F Calculado	Signific.
Encapsulante (E)	1	1526900.171	1526900.171	17863.3	0.0001**
Temperatura (T)	1	2034565.670	2034565.670	23802.5	0.0001**
Velocidad del atomizador (V)	1	16439.538	16439.538	192.33	0.0001**
E x T	1	0.283	0.283	0.00	0.9545 ns
E x V	1	253.573	253.573	2.97	0.0947 ns
T x V	1	158.667	158.667	1.86	0.1826 ns
E x T x V	1	58.042	58.042	0.68	0.4160 ns.
Error	32	2735.259	85.477		
Total	39	3581111.203			
Cv	0.31				

** : alta significación
 ns : no significativo

Apéndice 9,2: Prueba de comparación del contenido de actividad antioxidante hidrofílica, determinado con diferentes niveles de encapsulante.

TRATAMIENTO (encapsulante)	MEDIAS	SIGNIFICACION
10%	3131,429	A
15%	2740,673	B

Valores con igual letra, no presenta diferencias estadísticamente significativas para Tukey ($p < 0,05$)

Apéndice 9,3: Prueba de comparación del contenido de actividad antioxidante hidrofílica, determinado con diferentes niveles de temperatura

TRATAMIENTO (temperatura)	MEDIAS	SIGNIFICACION
160°C	3161,582	A
180°C	2710,520	B

Valores con igual letra, no presenta diferencias estadísticamente significativas (Tukey < 0,05)

Apéndice 9,4: Prueba de comparación del contenido de actividad antioxidante hidrofílica, determinado con diferentes niveles de velocidad del atomizador.

TRATAMIENTO (velocidad del atomizador)	MEDIAS	SIGNIFICACION
30 000 rpm	2956,324	A
35 000 rpm	2915,778	B

Valores con igual letra, no presenta diferencias estadísticamente significativas Tukey (p < 0,05)

APENDICE 10: DETERMINACIÓN DE LA CURVA ESTÁNDAR DE TROLOX A 515 nm EN METANOL DPPH

Datos experimentales para determinar la curva estándar de Trolox

Absorbancia	Concentración de Trolox
1,087	1000
0,854	800
0,754	600
0,525	400
0,234	200
0	0

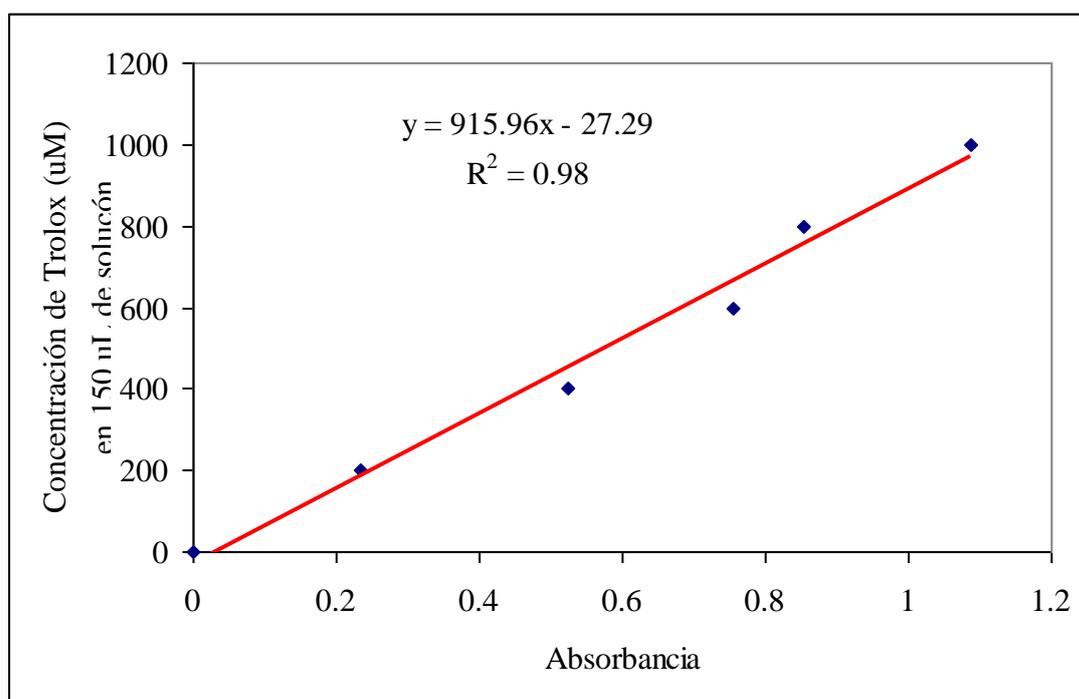


Fig.1: Curva estándar de trolox a 515 nm en metanol (DPPH)

Ecuación: $y = 915,96x - 27,29$

Donde:

y : mM Equivalente Trolox / litro

x : Absorbancia blanco- Absorbancia muestra (515nm).