

**EFFECTO DE LA DESHIDRATACIÓN POR RADIACIÓN INFRARROJA SOBRE
ALGUNAS CARACTERÍSTICAS FÍSICOQUÍMICAS DE INTERÉS COMERCIAL
DEL ALOE VERA (*Aloe barbadensis*)**

ADRIANA LUZELY MEJIA TERÁN

**UNIVERSIDAD DE LA SABANA
FACULTAD DE INGENIERÍA
CAMPUS UNIVERSITARIO PUENTE DEL COMÚN, CHIA
2011**

**EFFECTO DE LA DESHIDRATACIÓN POR RADIACIÓN INFRARROJA SOBRE
ALGUNAS CARACTERÍSTICAS FÍSICOQUÍMICAS DE INTERÉS COMERCIAL
DEL ALOE VERA (*Aloe barbadensis*)**

ADRIANA LUZELY MEJIA TERÁN

Proyecto de grado presentado como requisito para optar al título de:

**Magíster en Diseño y Gestión de Procesos
Énfasis Alimentos**

Directora

Ing. LUZ INDIRA SOTELO DÍAZ Ph.D

Codirector

Ing. JOSÉ MAURICIO PARDO BENITO Ph.D

**UNIVERSIDAD DE LA SABANA
FACULTAD DE INGENIERÍA
CAMPUS UNIVERSITARIO PUENTE DEL COMÚN, CHIA
2011**

Tabla de Contenido

1. INTRODUCCIÓN.....	9
1.1 Evolución de las tecnologías de secado en materiales biológicos	9
1.2 Tecnología de ventana refractiva (Refractance Window®).....	12
1.3 Modelo de Balance global de transferencia para el secado por radiación infrarroja	13
1.3.1 Balance de masa.....	15
1.3.2 Balance de energía.....	16
1.4 Aloe vera en polvo	18
1.4.1 Usos potenciales	20
1.4.2 Algunas características fisicoquímicas de interés comercial en la calidad de aloe vera en polvo.....	21
2 MATERIALES Y MÉTODOS.....	26
2.1 Pruebas preliminares en laboratorio.....	26
2.2. Pruebas equipo piloto de secado, diseño experimental.....	30
2.3. Métodos analíticos para la determinación de las características fisicoquímicas del polvo de aloe vera	33
2.3.1 Determinación de humedad	33
2.3.2 Propiedades de reconstitución.	33
2.3.3 Viscosidad.....	34
2.3.4 Isotermas de adsorción.....	36
2.3.5 Evaluación de color	38
2.4 Otros procedimientos, resultados de operación	38
3 RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	39
3.1 Resultados preliminares a nivel de laboratorio	39
3.2 Características fisicoquímicas del aloe vera en polvo obtenido en equipo piloto de secado por radiación infrarroja.....	42
3.2.1 Humedad del producto.....	42
3.2.2 Propiedades de reconstitución	43
3.2.3 Viscosidad del gel de aloe vera.....	45
3.2.4 Isotermas de adsorción.....	48
3.2.5 Color del gel reconstituido de polvo de aloe vera	50
3.3 Otros procedimientos, resultados de operación del equipo para la obtención de aloe vera deshidratado – Escala planta piloto	53

3.3.1	Espesor de lecho y tiempo de secado.....	53
3.3.2	Perfil de temperatura.....	54
3.3.3.	Balances alrededor del sistema de secado	56
4.	CONCLUSIONES.....	59
	RECOMENDACIONES	60
	AGRADECIMIENTOS	61
5.	BIBLIOGRAFÍA.....	62
	ANEXOS.....	70

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Comparación de cinco métodos de secado.....	11
Tabla 2. Ecuaciones balance de energía.....	16
Tabla 3. Resistencias térmicas unitarias.....	17
Tabla 4. Características del equipo: fondo, pared, película.....	17
Tabla 5. Características del agua (medio de calefacción) y aire.....	17
Tabla 6. Componentes y propiedades del aloe vera.....	19
Tabla 7. Valores de la humedad de la monocapa (X_m) obtenidos mediante la ecuación de GAB.....	24
Tabla 8. Ficha técnica del aloe vera en polvo.....	25
Tabla 9. Especificaciones contenidas en el aloe vera comercial reconstituido...	25
Tabla 10. Ficha Técnica del Equipo.....	27
Tabla 11. Contenido de humedad de aloe vera antes y después de deshidratar...	42
Tabla 12. Contenido de sólidos precipitables en metanol.....	44
Tabla 13. Densidad de gel fresco y reconstituidos.....	45
Tabla 14. Valores de los índices de comportamiento y consistencia del gel de aloe vera obtenidos a partir del reograma.....	46
Tabla 15. Constantes de la ecuación de GAB.....	48
Tabla 16. Ficha técnica del aloe vera en polvo.....	53
Tabla 17. Especificaciones contenidas en el aloe vera después de su reconstitución.....	53
Tabla 18. Parámetros de operación para la deshidratación por radiación infrarroja.....	54
Tabla 19. Relación entre el agua de calefacción y la temperatura del producto.....	55
Tabla 20. Balance de materia del sistema.....	56
Tabla 21. Balance de energía alrededor del sistema Q_{Exp}	57
Tabla 22. Balance de energía del sistema $Q_{Teórico}$ de diseño.....	58

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Esquema general de una hoja de aloe vera.....	18
Figura 2. Equipo piloto de secado por radiación infrarroja, propiedad de Universidad de las Sabana ubicado en el Biocentro.....	27
Figura 3. Adecuación de la Materia prima utilizada.....	28
Figura 4. Homogenización del gel de aloe.....	29
Figura 5. Diagrama de proceso para la obtención de aloe vera en polvo por radiación infrarroja.....	29
Figura 6. Pruebas preliminares para definir el lecho de secado.....	30
Figura 7. Pruebas preliminares para determinar la temperatura del medio calefactor.....	31
Figura 8. Control del proceso de secado.....	32
Figura 9. Aloe liofilizado en el equipo piloto de la Universidad de la Sabana...	32
Figura 10. Determinación de la humedad.....	33
Figura 11. Determinación de la viscosidad en el viscosímetro Brookfield.....	35
Figura 12. Equipo para la determinación de la actividad de agua.....	36
Figura 13. Determinación de la humedad de equilibrio.....	37
Figura 14. Polvo y aloe reconstituido obtenido por radiación infrarroja.....	38
Figura 15. Gel y polvo de aloe vera secado por radiación infrarroja.....	39
Figura 16. Evolución de la Coordenada a^* en el proceso de secado de aloe vera	40
Figura 17. Evolución de luminosidad (L^*) durante el secado por RW.....	41
Figura 18. Evolución del tono de color durante el proceso de secado de aloe vera por radiación infrarroja.....	41
Figura 19. Geles de aloe vera reconstituidos.....	43
Figura 20. Índice de Solubilidad en Agua de aloe vera en polvo a 20 y 40°C...	44
Figura 21. Efecto de la Velocidad de Corte en relación con el Esfuerzo Cortante	46
Figura 22. Viscosidad aparente en función de la velocidad de corte.....	47
Figura 23. Isotermas de adsorción para aloe vera seco.....	48
Figura 24. Isotherma de adsorción de aloe vera modeladas con la ecuación de GAB.....	49
Figura 25. Valores de la Coordenada b^*	51
Figura 26. Valores de la Coordenada a^* producto fresco y geles reconstituidos proceso de secado de aloe vera.....	51
Figura 27. Efecto del secado por radiación infrarroja y liofilización sobre la luminosidad (L^*).....	52
Figura 28. Retiro de aloe seco.....	54
Figura 29. Perfil de temperatura en secado infrarrojo.....	55
Figura 30. Proceso de secado de aloe vera lote de 5 kilogramos.....	57

Nomenclatura

Símbolos y abreviaturas

AOAC	Association of Official Agricultural Chemists
a^*	Coordenada de cromaticidad (+rojos, -verdes)
a_w	Actividad de agua (adimensional)
b^*	Coordenada de cromaticidad (*amarillos, -azules)
b.h.	Base húmeda
b.s.	Base seca
g	Gramos
h	Hora
IASC	International Aloe Science Council
I.S.A.	Índice de solubilidad en agua
Kg	Kilogramo
L^*	Coordenada de luminosidad
min	Minutos
mm	Milímetro
m_w	Tasa de evaporación (kg/s)
s	Segundo
RI	Radiación Infrarroja
RW	Refractance Window®
R^2	Coefficiente de regresión al cuadrado
X_m	Contenido de humedad monocapa
τ	Esfuerzo cortante (dinas/cm ²)
γ	Velocidad de corte (1/s)
η	Viscosidad aparente (poise)

OBJETIVOS ANTEPROYECTO

Este proyecto de maestría, se enmarca dentro del proyecto “Diseño y construcción de un equipo de secado basado en la transferencia de calor por radiación infrarroja para la obtención de aloe vera en polvo” aprobado por Colciencias en la convocatoria 429/07 denominada Mejora Productiva PYMES Distrito Capital – 2007. Con la participación de la empresa Dry Tech Ltda como beneficiaria y la Universidad de la Sabana como ejecutora.

El proyecto principal tuvo como objetivo desarrollar una línea piloto mediante la construcción de un equipo de secado basado en la tecnología de radiación infrarroja para luego ser implementada a escala industrial por Dry Tech Ltda. Se escogió como producto de estudio el aloe vera, teniendo en cuenta que Dry Tech tiene expectativas de nuevos mercados y la Universidad de la Sabana ha desarrollado proyectos de investigación.

El presente proyecto hace parte de la tercera etapa, que consiste en las pruebas de deshidratación, ajustes al equipo y selección de variables óptimas de proceso y apunta al cumplimiento del objetivo específico número dos con el cual se busca establecer el efecto de los parámetros de procesamiento sobre las características fisicoquímicas del producto final.

Los objetivos planteados y desarrollados en este proyecto de maestría fueron:

Objetivo General

Evaluar las propiedades fisicoquímicas que definen la calidad comercial de polvo de aloe vera (*Aloe barbadensis*) deshidratado por radiación infrarroja.

Objetivos Específicos:

- Determinar el contenido de humedad del polvo de aloe vera obtenido por el método de secado por radiación infrarroja.
- Evaluar las propiedades de reconstitución mediante la determinar la solubilidad del polvo de aloe vera reconstituido en agua y metanol.
- Caracterizar el aloe vera en polvo mediante la determinación del comportamiento reológico del producto
- Determinar las características de estabilidad del polvo de aloe vera en relación con su actividad de agua y humedad.
- Evaluar el color en el proceso de secado de aloe vera como parámetro de calidad utilizando el sistema CIELAB.
- Evaluar procedimientos como parámetros de proceso tiempo, temperatura y espesor de lecho en el proceso de secado por radiación infrarroja sobre la calidad del aloe vera deshidratado.

EFFECTO DE LA DESHIDRATACIÓN POR RADIACIÓN INFRARROJA SOBRE ALGUNAS CARACTERÍSTICAS FISCOQUÍMICAS DE INTERÉS COMERCIAL DEL ALOE VERA (*Aloe barbadensis*)

RESUMEN

En la actualidad, cobra importancia comercial el polvo de aloe vera (*Aloe barbadensis*) debido a su aptitud de uso en la industria cosmética, farmacéutica, alimentaria y su incorporación en diferentes matrices. Desde el punto de vista de su composición y estructura, el aloe vera es un sistema integrado y complejo; la estructura física del producto, las propiedades físicas de las macromoléculas y los procesos de secado afectan la utilidad del aloe vera en polvo, por lo tanto, la adecuación de nuevas tecnologías como el secado por radiación infrarroja, utilizado por conservar las características de materiales de origen biológico sensibles al calor, se convierte en una alternativa para la obtención de aloe vera en polvo. Esta tecnología de secado, se fundamenta en el principio de transferencia de calor por radiación infrarroja a través de una película refractiva. La energía térmica del agua caliente es trasferida al producto húmedo a través de una película plástica que es transparente a la radiación infrarroja, generando la evaporación rápida del agua en corto tiempo.

El objetivo de este estudio fue evaluar el efecto de la deshidratación por radiación infrarroja sobre las características fisicoquímicas que definen la calidad comercial del polvo de aloe vera. El diseño experimental se realizó con un factor definido: temperatura del medio calefactor 80° C; dos niveles: espesor del lecho de secado (1 y 3 mm); y seis variables de respuesta: humedad, solubilidad, color, viscosidad, estabilidad y temperatura del producto. El polvo de aloe vera deshidratado por radiación infrarroja presentó una humedad entre 4,3 y 4,5, (g de agua/100 g de producto b.h.); un índice de solubilidad en agua (I.S.A.) a 20° C entre 81,51% - 81,88%, similar al producto obtenido por liofilización con un I.S.A. de 82.82%. Cuando la temperatura de la solución hidratante (agua) fue 40° C, el índice de solubilidad aumentó entre 1,8 y 5,17%. El aloe vera reconstituido presento un comportamiento de un fluido pseudoplástico. La isoterma de adsorción del producto fue descrita por el modelo matemático de GAB, se obtuvo un valor de la monocapa de 0,1402 g agua/g de producto b.s. En cuanto al color, la coordenada b* del polvo de aloe vera fue la más sensible al secado por radiación infrarroja y presentó trayectorias que se encuentran en el espacio de los amarillos, los valores obtenidos de la luminosidad del aloe vera deshidratado presentaron un aumento entre el 4,36% y 6,45% con respecto al gel fresco. Con los parámetros de operación definidos, se obtuvo una tasa de evaporación de 6,067 kg/h y 13,512 kg/h para los espesores de lecho 1 y 3 mm, respectivamente.

Los resultados obtenidos en las características fisicoquímicas evidencian la alta aplicabilidad de la tecnología de secado por radiación infrarroja para la obtención de aloe vera en polvo de calidad comercial, puesto que los productos en polvo pueden sufrir alteraciones en función del proceso al que son sometidos, sus características físicas y químicas pueden ser vistas como una respuesta al cambio en el sistema del producto.

Palabras clave: *Aloe vera, calidad, características físico químicas, deshidratación, radiación infrarroja.*

ABSTRACT

Nowadays, Aloe vera (*Aloe barbadensis*) dust has commercial importance for its aptitude of use in cosmetic, pharmaceutical, and food industries, for incorporation in different matrix. In fact its composition physical structure are an integrated and complex system; the physical properties of macro-molecules and the processes of drying, affect the performance of aloe dust, therefore, the adjustment of new technologies like drying by infrared radiation, used for being able to conserve characteristics of heat sensitive biomaterials, it becomes an alternative to obtaining of aloe dust. This technology of drying is based on the heat transfer by infrared radiation through a refracting film thermal energy from circulating hot water is transferred to the wet product via a plastic interface that is transparent to infrared radiation, generating fast evaporation of the water in short times.

The objective of this study was to evaluate the effect of dehydration by infrared radiation on physic-chemical characteristics that define commercial quality of aloe dust. Experimental design was carried out with a defined factor: temperature of heat transfer medium (80° C); two levels of thickness (1 and 3mm); and six variables of answer: moisture, solubility, color, viscosity, stability and temperature of the product. The dust of aloe dehydrated by infrared radiation had moisture between 4,3 and 4,5, (g water/100g product w.m.); solubility in water to 20° C (I.S.A.) was between 81,51%-81,88%, similar to product obtained by freeze drying with an (I.S.A) of 82,82%. When temperature of moisturizer solution (water) was 40° C, the solubility index increased between 1,8 and 5,17%. Reconstituted aloe dust had a behavior of a pseudoplastic fluid. The sorption isotherm of the product was mathematically described by the GAB model, the value of monolayer obtained was 0,1402 g water/g product d.m. In color the value b* aloe dust is most sensitive to drying by infrared radiation and presents trajectories in space of yellows, It was obtained values of luminosity of dried aloe that increased between 4,36% y 6,45% with respect to fresh gel. A rate of evaporation of 5,56 kg/h was obtained for thicknesses (1 mm) and 16,68 kg/h for 3 mm.

Obtained results in the physic-chemical characteristics demonstrate high applicability of infrared radiation by drying technology for the production of aloe dust of commercial quality.

Keywords: *Aloe vera, drying method, infrared radiation, physic-chemical characteristics, quality.*

1. INTRODUCCIÓN

1.1 Evolución de las tecnologías de secado en materiales biológicos

El secado de material biológico es el método más antiguo de conservación de los productos perecederos (Casp y Abril, 2003). En la actualidad una gran cantidad de productos son secados por diversas razones como la preservación, la reducción de peso o volumen, el mejoramiento de su estabilidad (Hernández y Quinto, 2005), la reducción del contenido de agua, la inhibición del desarrollo de microorganismos y una serie de reacciones típicas de los productos con alta actividad de agua. Según Honorato *et al.*, (2005), los costos del secado son compensados, puesto que el producto final tiene un mayor valor agregado debido a la reducción en los costos de transporte y almacenaje a causa del menor volumen y peso del producto seco. La tecnología de secado brinda los medios para conservar los alimentos en condiciones estables y seguras cuando reduce la actividad de agua y se extiende el tiempo de caducidad (Zhang *et al.*, 2006).

El secado es una operación presente en casi todos los sectores industriales que van desde la agricultura a los productos farmacéuticos. La tecnología de secado consiste en el acoplamiento de los fenómenos de transporte y ciencia de los materiales y se ocupa no sólo de la eliminación del líquido para producir un producto sólido, sino también del desarrollo de criterios de calidad necesarios en el producto seco. A menudo, lo que es óptimo para las tasas de transferencia de calor y de masa no es lo más apropiado para el secado de materiales húmedos. La selección del sistema de secado, es una tarea compleja debido a las diversas características físicas y químicas tanto del material húmedo como del producto seco, así como el posible suministro de calor por convección, conducción y radiación, los costos, la energía y las limitaciones ambientales (Kudra y Mujumdar, 2009).

La tecnología de secado ha evolucionado en lo referente al proceso y al consumo de energía, ha pasado de equipos de secado con bandejas a la combinación de tecnologías de secado que conducen al mejoramiento de la calidad del producto final. Vega *et al.*, (2001) dividen las tecnologías del secado en cuatro generaciones. La primera generación involucra el uso de aire que fluye por encima de un producto para retirar el agua predominante de la superficie del material y su aplicación en alimentos está orientada para los granos, las rodajas, trozos cortos y gruesos. En la segunda generación se encuentran los métodos de secado diseñados para los líquidos y purés, como el secado por aspersión ampliamente utilizado para la extracción pulpa de tomate (Candelas, 2005), jugo de naranja (Goula *et al.*, 2008), secado de lecho fluido asistido por ultrasonidos de potencia evaluado por la Universidad Politécnica de Valencia (De la Fuente *et al.*, 2004) y secado de rodillo utilizado para la extracción de almidón de maíz (Vallous *et al.*, 2002).

La tercera generación incluye los métodos de liofilización y el secado osmótico. Estos métodos de deshidratación son empleados en la industria de alimentos para mantener la estructura y superar los problemas de calidad, como en el caso de la deshidratación de frutas tropicales (Marques *et al.*, 2009) y fresas (Amrani y Brigui, 2007). Por su parte la liofilización es un método costoso, pero la calidad del producto es generalmente alta (Nindo, 2003). En la cuarta generación se encuentran los últimos desarrollos tecnológicos

en la deshidratación que incluyen el secado al vacío, tendencias que se orientan a reducir el tiempo de secado para mejorar la calidad del producto como el secado por microondas para frutas y verduras (Zhang *et al.*, 2006); el uso de transferencia de calor por radiación infrarroja, estudiado en el secado de arándanos con lo cual se obtuvieron productos con una textura más firme, menos elásticos, mas cohesivos y en el que se redujo el tiempo de secado en 44% comparado con el secado por aire caliente (Shi *et al.*, 2008), y nuevos desarrollos que combinan la radiación infrarroja con la tecnología de secado por películas de contacto como Refractance Window® (RW), denominada comercialmente como ventana refractiva. Los secadores de cuarta generación como RW®, hacen énfasis en la retención de la calidad de los alimentos (Nindo, 2007)

En la actualidad, cobran importancia las nuevas tecnologías de secado, enfocadas en la retención de los atributos de calidad de los materiales de origen biológico y en la conservación de las cualidades sensoriales de los productos alimenticios finales, el desafío constante es desarrollar una tecnología que pueda entregar productos de alta calidad con un costo de operación más económico. El proceso RW es un método que permite la deshidratación de alimentos e ingredientes mientras mantiene su integridad con respecto a sabor, color y nutrientes (Clarke, 2004).

MCD Technologies, Inc. en Tacoma, Washington desarrolló el sistema de secado Refractance Window® para reemplazar los métodos tradicionales de secado y así procesar alimentos sensibles al calor, enzimas, y productos farmacéuticos, este método fue desarrollado sobre la base de varios años de investigación y desarrollo (Nindo, 2007). Actualmente, se conocen dos patentes estadounidenses del proceso, (US Magoon R., 1986; Saravese M, 2003) y además algunos estudios en los que se evalúan la eficiencia y la retención de calidad de origen biológico como el puré de zanahoria y fresa (Abonyi *et al.*, 1999); (Abonyi *et al.*, 2002); espárragos (Nindo *et al.*, 2003); frambuesa y arándanos (Nindo *et al.*, 2004) y paprika (Topuz *et al.*, 2009).

En respuesta a esta demanda, las recientes actividades de desarrollo en el diseño de secadores de alimentos incluye como un criterio importante la calidad del producto. El sistema de secado RW, es un método utilizado para la conversión de alimentos líquidos y materiales biológicos en polvo con valor agregado dando como resultado productos de excelente color, vitaminas y retención de antioxidantes (Nindo y Tang 2007). En la Tabla 1 se presenta una comparación de cinco métodos de secado.

Tabla 1. Comparación de cinco métodos de secado

Parámetro	Aire caliente	Secador de tambor	Secado por aspersión	Liofilizado	Refractance Window®
Tipo de producto	Los más utilizados en la industria de alimentos (Fito <i>et al.</i> , 2001). Ají dulce (González <i>et al.</i> , 2008), uchuva (Castro <i>et al.</i> , 2008)	Productos lácteos, puré de papa, cereales para desayuno, pulpas de verduras y frutas, almidón, pasta de tomate (Tang <i>et al.</i> , 2003)	Aloe vera (Pachanon, 2005); jugo de naranja (Goula <i>et al.</i> , 2008); pulpa de tomate (Candelas, 2005); cebada verde (García <i>et al.</i> , 2004)	Aloe vera (Rivera <i>et al.</i> , 2006), fresa (Amrani y Brigui 2007); (Cieurzyńska y Lenart, 2009), frutos tropicales (Marques, 2009)	Aloe vera, puré de zanahoria y fresa (Abonyi <i>et al.</i> , 1999); espárragos (Nindo <i>et al.</i> , 2003); frambuesa y arándanos (Nindo <i>et al.</i> , 2004) y paprika (Topuz <i>et al.</i> , 2009).
Operación	Fácil de operar (González <i>et al.</i> , 2008), sencillos de fácil manejo (Fito <i>et al.</i> , 2001)	Fácil de operar y mantener (Tang <i>et al.</i> , 2003)	Fácil de operar (Pachanon, 2005)	Complicado de operar (Pachanon, 2005)	Fácil de operar (Abonyi, 1999), (Clarke, 2004)
Costo unidad	Unidades de bajo costo	Alta inversión inicial	Alta inversión inicial (Nindo, 2007)	Unidad de alto costo (Pachanon, 2005); (Gómez, <i>et al.</i> , 2003), costo de operación cuatro veces más alto que el secado tradicional (Fito <i>et al.</i> , 2001).	Baratos en comparación con los equipos de liofilización. 1/3 a 1/2 de un equipo liofilizador que seca la misma cantidad de producto (Nindo, 2007)
Pérdidas en el proceso	No se presentan pérdidas	Perdidas por productos con alto contenido de azúcar que pueden quedar adheridos al tambor (Tang <i>et al.</i> , 2003)	Pérdida de la muestra (Pachanon, 2005) adhesión a las paredes del secador (Ceballos, 2009)	No se presentan pérdidas	Pérdidas por producto adherido a la película
Nivel de contaminación	Depende de la fuente de generación de aire. En combustión directa se presenta contaminación por los productos de la combustión (Fito <i>et al.</i> , 2001)	Proceso limpio e higiénico (Tang <i>et al.</i> , 2003).	Contaminación (Pachanon, 2005)	No contaminante (Pachanon, 2005)	No contaminante
Costo de mantenimiento	Bajo costo de mantenimiento	Alto costo al cambiar la superficie del tambor (Tang <i>et al.</i> , 2003), o cambio por desgaste de cuchillas	Si se desea prevenir pérdidas de producto, las instalaciones de filtros de sacos requieren alto costo.	---	Bajo costo de mantenimiento
Calidad en productos deshidratados de aloe vera	Modifica algunas propiedades funcionales en el tejido de aloe vera (Simal, 2000)	No reportado	Deterioro del ingrediente activo de aloe vera (Pachanon, 2005)	Preserva las propiedades físicas y el ingrediente activo en aloe vera (Pachanon, 2005)	Presenta buenas propiedades de reconstitución, fluye libremente y con atributos de color aceptables.

1.2 Tecnología de ventana refractiva (Refractance Window®)

Refractance Window®, es un método de secado de película fina que fue desarrollado para ser aplicado en materiales líquidos y pastosos y convertirlos en hojuelas y gránulos (Magoon, 1986). La tecnología de Refractance Window® (RW) usa agua circulante a presión atmosférica como medio de transmisión de energía térmica al material a deshidratar. En este método de secado, la energía térmica del agua caliente es transferida al material húmedo depositado como una delgada película sobre una cinta transportadora plástica. La cinta corre poniéndose en contacto con el agua caliente, lo que permite un proceso de secado mucho más rápido. Luego, el producto seco es recogido utilizando una lámina que cubre el ancho de la cinta transportadora (Nindo *et al.*, 2007).

El producto se seca en pocos minutos sobre la cinta móvil, contrario a procesos de secado por aire caliente o túnel que pueden durar varias horas o por liofilización que necesitan para secar toda una noche. El secado por RW presenta una ventaja sobre el secado por tambor o secado por atomización en lo que respecta a alimentos e ingredientes farmacéuticos puesto que expone al producto a temperaturas mucho más leves y los productos finales mantienen buenas cualidades sensoriales. La tecnología es relativamente económica y el equipo es simple de operar y mantener (Abonyi *et al.*, 1999).

Nindo y Tang, (2007) describen el método de RW como el secado basado en el principio de transferencia de calor por radiación infrarroja a través de una película refractiva en la cual se coloca una capa fina del producto a deshidratar sobre una película de poliéster transparente, que a su vez está en contacto, por la otra cara, con el líquido calefactor (generalmente agua). El calor transferido por radiación es absorbido por el producto, generando la evaporación rápida del agua. A diferencia de otros secadores, el equipo desarrollado en este método no presenta contacto directo entre el producto y el medio de transferencia de calor evitando la contaminación cruzada.

Aplicaciones alimentarias del sistema de secado

El método tiene la capacidad de manejar una amplia gama de productos líquidos, su aplicación práctica es transformar frutas, verduras, hierbas y otros productos relacionados en polvo de valor agregado y en concentrados. El secado por RW® se ha convertido en un método atractivo para el uso industrial en los alimentos, especialmente porque los productos secos son de alta calidad y el equipo es relativamente barato (Nindo y Tang, 2007).

En el procesamiento industrial de jugo de arándanos, etapas como la maceración, la calefacción, el tratamiento con enzimas, la filtración y la concentración final de jugo a 65°Brix pueden causar la reducción hasta del 90% del contenido inicial de ácido ascórbico. Nindo *et al.*, (2006) evaluaron la influencia de evaporadores de ventana refractiva sobre la calidad de jugos de frutos pequeños y encontraron que después del tratamiento en jugo de arándano, la vitamina C tuvo una reducción de 32% y 48% cuando fueron sometidas a temperaturas del medio calefactor de 85° C y 95° C, respectivamente.

En espárragos deshidratados por RW la Actividad Antioxidante Total (TAA) es significativamente más alta que los productos sometidos a tratamientos que involucran aire caliente. Los espárragos que conservaron la mayor cantidad de ácido ascórbico fueron los deshidratados por el método de RW. En la parte media del espárrago evaluada se obtuvo una TAA de $75,2 \pm 2,6$, seguido por los liofilizados con un TAA de $74,5 \pm 4,1$, luego por la combinación de microondas con lecho fluido $55,2 \pm 3,2$ y los que dieron como resultado la menor retención de ácido ascórbico fueron los deshidratados por secado de bandejas con un TAA de $45,7 \pm 3,3$ (Nindo, *et al.*, 2003).

Abonyi *et al.*, (1999) documentaron que cuando los productos se exponen a temperaturas más leves, se obtienen productos finales que mantienen buenas cualidades sensoriales, como el color y aroma. La experiencia publicada muestra una retención del 94% del ácido ascórbico en fresas deshidratadas por este método, comparada con el producto deshidratado por liofilización cuya retención fue del 93,6%. En muestras de puré de zanahoria las pérdidas de carotenos totales fueron del 8,7%, mientras que en las muestras deshidratadas por tambor fueron del 56% y de liofilizados del 4%. El color del puré de zanahoria secado por RW fue comparable al puré fresco. En las fresas el sistema de secado RW alteró la percepción global del aroma (Abonyi *et al.*, 2002).

1.3 Modelo de Balance global de transferencia para el secado por radiación infrarroja

La industria agroalimentaria utiliza la deshidratación como un método de conservación de un gran número de productos y se basa en la reducción del contenido de agua para prolongar la vida útil de los alimentos. Durante un proceso de secado, se elimina primero las moléculas de agua menos ligadas, la fracción que se extrae en último lugar corresponde a las moléculas de agua de estructura fuertemente ligadas por uniones electrostáticas, a macromoléculas orgánicas del extracto seco. El agua libre se comporta como el agua pura y requiere por lo tanto para evaporarse relativamente poca energía (del orden de 2400 KJ.Kg^{-1} de agua libre), por el contrario la evaporación del agua ligada es más difícil y requiere más energía. De esta manera, el secado se basa en la eliminación de agua por vía térmica, es una operación de transferencia de masa, que requiere una “activación” previa del agua con una cierta cantidad de energía aportada por una transferencia de calor. La transmisión de calor tiene lugar en el interior del alimento y está relacionada con el gradiente de temperatura existente entre su superficie y la correspondiente a la superficie del agua en el interior del alimento (Casp y Abril, 2003).

La deshidratación involucra simultáneamente la transferencia de calor, masa y momento. El calor penetra en el producto y la humedad es retirada por evaporación en forma de gas no saturado. Debido a la complejidad del proceso, actualmente no existe una teoría generalizada para explicar el mecanismo de movimiento interno de humedad. En el caso de los materiales capilares y porosos tales como frutas y verduras posiblemente en el transporte del agua tienen lugar una combinación de varios mecanismos dentro de la matriz de los alimentos (Gavrila *et al.*, 2008).

- **Transferencia de calor por radiación**

La transferencia de calor puede definirse como la transmisión de energía de una región a otra, como consecuencia de una diferencia de temperatura entre ellas y se reconocen tres mecanismos de transmisión de calor: por conducción a través de una superficie caliente, por convección a partir de vapor de agua recalentado o por la utilización de radiaciones en el cual el calor se transfiere de un cuerpo en virtud de su temperatura, sin la intervención de cualquier medio, a este proceso se llama radiación térmica (Kreith y Bohn, 2001).

La energía radiante es transportada por ondas electromagnéticas y los materiales emiten radiación electromagnética, las características de esta radiación dependerán de la composición y de la temperatura. Esta radiación viaja a través del vacío a la velocidad de la luz. La radiación es reflejada, transmitida o absorbida, cuando hace contacto con algún material dependiendo de las propiedades de éste. Solamente la radiación absorbida comunicará su energía y dará lugar a un cambio de temperatura (Adaptado de Lewis, 1993).

Los tres métodos de transferencia de calor como la conducción, la convección y la radiación ocurren en el agua. La pérdida de calor o energía del agua hacia su entorno ocurre por conducción o evaporación con convección y esencialmente procesos internos de radiación. Si una banda de material transparente es puesta sobre la superficie del agua, la pérdida de energía solo tendrá lugar por medio de conducción. Sin embargo, al colocar un producto húmedo sobre la superficie de este material, puede ocurrir una transferencia por radiación. Esto permite que el calor irradiado pase desde el agua al material húmedo y es conocido como “ventana” de oportunidad para la transferencia de energía, desde el agua hacia el material a ser deshidratado. En este momento, los tres métodos de transferencia de calor pueden ocurrir e inducen una transferencia de calor muy rápida en el producto, generando una rápida evaporación de la humedad. Esta ventana se cierra gradualmente debido a que el producto pierde humedad y la transferencia de calor decrece a medida que el producto se desplaza a lo largo de la banda (Clarke, 2004).

Kudra y Mujumdar (2009), describen el método como un mecanismo que consiste en un cinta sin fin elaborada de poliéster transparente al infrarrojo (película de Mylar®), la cual forma un cinturón o banda transportadora que lleva el producto formando una capa de 0,2 – 1 mm de espesor. El cinturón relativamente delgado flota en la superficie del agua caliente sobre un canal de poca profundidad. Así, el calor sensible del agua se transfiere a través del cinturón al material de secado, que es transportado a lo largo del secador con una velocidad de banda alrededor de 0,6 m/min. Cuando el material que se coloca en la cinta transportadora está húmedo, el calor es transferido por conducción y radiación. Así, en todas las superficies donde el material cubre el cinturón, se crea una ventana para el paso de la energía infrarroja, en la que la refracción en la interfaz cinta- material es minimizada. A medida que el contenido de humedad disminuye en el proceso de secado, la ventana infrarroja se cierra gradualmente, dejando la conducción como modo predominante de transmisión de calor. Debido a que la banda plástica es débil conductora de calor, se transfiere poco calor al material casi seco de esta manera el riesgo de recalentamiento se reduce considerablemente.

1.3.1 Balance de masa

En la evaluación de operaciones de procesamiento de alimentos por lotes, como el secado, es importante determinar la cantidad de material que interviene en la operación y se puede describir por medio de balances de materia; estos balances ponen de manifiesto la conservación de la masa y son fundamentales en el control de los procesos. De la misma forma, la cantidad de energía puede describirse por medio de balances de energía que pone de manifiesto la conservación de energía (Earle, 1998). En el proceso de secado se presentan varios fenómenos que generan como resultado una transferencia de masa, la cual se puede estimar a partir del balance de masa y el equilibrio de la materia seca.

Nindo *et al.*, (2004), evaluaron el consumo de energía de un evaporador de Refractance Window® y determinaron la capacidad del equipo midiendo la cantidad de agua evaporada por hora y expresaron el balance de masa alrededor del sistema de acuerdo con la siguiente ecuación:

$$m_{p,ent} = m_{p,sal} + m_w \quad (1)$$

$$m_{p,ent} * X_{ent} = m_{p,sal} * X_{sal} \quad (2)$$

Donde:

$m_{p,ent}$ = Tasa de flujo de masa (Kg. s⁻¹) en la entrada del deshidratador.

$m_{p,sal}$ = Tasa de flujo de masa (Kg. s⁻¹) en la salida del deshidratador.

m_w = Tasa de evaporación (Kg. s⁻¹)

X_{ent} = Fracción másica en la entrada en base húmeda

X_{sal} = Fracción másica en la salida en base húmeda

Para determinar la tasa de evaporación se combinan las ecuaciones 1 y 2 para obtener la siguiente expresión:

$$m_w = m_{p,ent} \left(1 - \frac{X_{ent}}{X_{sal}} \right) \quad (3)$$

El balance de masa es importante para determinar la capacidad del equipo de secado y evaluar el rendimiento del equipo, también puede utilizarse para evaluar las pérdidas que tienen lugar durante el procesamiento del producto.

1.3.2 Balance de energía

La ciencia de transferencia de calor busca predecir el intercambio de energía que puede tener lugar entre cuerpos materiales, como resultado de una diferencia de temperatura y pretende no sólo explicar cómo la energía térmica puede ser transferida, sino también predecir la rapidez con la que bajo ciertas condiciones específicas, tendrá lugar esa transferencia (Holman, 1990). Durante el secado tienen lugar los tres mecanismos por los que se transfiere el calor, es decir, conducción, convección y radiación. En el sistema de secado estudiado, el calor es transferido mediante varios mecanismos que ocurren en forma simultánea, el calor se transfiere al producto a través de la película por radiación y conducción, así mismo se transfiere calor a las paredes y el fondo del equipo por conducción y convección.

Por lo tanto, para evaluar el desempeño del equipo de secado se determinó la tasa de transferencia de calor (Q, Watts). Para ello, se realizó una verificación del calor teórico de diseño que transfiere el equipo (Q_{T2}) a partir del agua de calefacción proveniente de la caldera en el cual predomina la transmisión de calor por radiación, confrontado con el calor experimental usado (Q_{T1}), tanto para calentar el producto a la temperatura de evaporación (Q_S), como para generar la evaporación de agua del producto (Q_L); el resto lo constituyen las pérdidas térmicas alrededores del sistema (Q_P). Las ecuaciones globales que determinan el balance de energía para este sistema de secado se presentan a continuación:

Tabla 2. Ecuaciones balance de energía

Calor Experimental Q_{T1}	Calor de Diseño (Q_{T2})
$Q_{T1} = Q_S + Q_L + Q_{P1} + Q_{P2}$ Donde, Q_S = Calor usado para calentar el producto Q_L = Calor usado para evaporar el agua del producto Q_{P1} = Calor transferido o a través de la pared Q_{P2} = Calor transferido a través del fondo	$Q_{T2} = Q_{R1} + Q_{P1} + Q_{P2}$ Donde, Q_R = Calor transferido a través de la película Q_{P1} = Calor transferido a través de la pared Q_{P2} = Calor transferido a través del fondo
$Q_S = m_p c_p \Delta T_p$ $Q_L = m_w \lambda_w$ $Q_{P1} = \frac{\Delta T_1}{R_{T1}} \quad Q_{P2} = \frac{\Delta T_2}{R_{T2}}$	$Q_R = Q_{R2} + Q_C = \frac{\Delta T_r}{R_R} + \frac{\Delta T_r}{R_k}$ $Q_{P1} = \frac{\Delta T_1}{R_{T1}} \quad Q_{P2} = \frac{\Delta T_2}{R_{T2}}$
Donde, m_p = flujo másico m_w = Tasa de evaporación c_p = Calor específico del producto λ_w = Calor latente a 92° C R_{T1} = Resistencia total a través de la pared R_{T2} = Resistencia total a través del fondo ΔT_p = Diferencia de temperatura de producto ΔT_1 = Diferencia temperatura a través de la pared ΔT_2 = Diferencia temperatura a través del fondo	Donde, Q_{R2} = Calor por radiación Q_C = Calor por conducción R_R = Resistencia unitaria por radiación R_k = Resistencia unitaria por conducción R_{T1} = Resistencia total a través de la pared R_{T2} = Resistencia total a través del fondo ΔT_r = Diferencia de temperatura a través película ΔT_1 = Diferencia temperatura a través de la pared ΔT_2 = Diferencia temperatura a través del fondo

Para determinar la resistencia térmica Total (R_T) se tiene en cuenta las resistencias térmicas unitarias por conducción, convección y radiación presentadas en la tabla 3:

Tabla 3. Resistencias térmicas unitarias

Conducción	Convección	Radiación
$R_K = \frac{L}{KA}$	$R_C = \frac{1}{h_c A}$	$R_R = \frac{T_1 - T_2}{A \epsilon \sigma (T_1^4 - T_2^4)}$

De acuerdo con Ibarz y Barbosa-Cánovas (2005), para calcular el calor específico (Cp, J/Kg°C) del gel se tuvo en cuenta la ecuación usada para alimentos con alto contenido en agua:

$$C_p = 0.837 + 3349 X_{ent} \quad (4)$$

En el equipo de secado, la mayoría de las pérdidas de energía se producen a través de las paredes (Q_{P1}) y de fondo de la placa (Q_{P2}) que conforman el tanque. El fondo de la placa está construido por una lámina de acero recubierta con fibra de vidrio por lo tanto la razón del calor perdido a través del fondo de la placa (Q_{P1}) es:

$$Q_{P1} = \frac{\Delta T}{R_{T1}} = \frac{\Delta T}{R1+R2+R3+R4} = \frac{\Delta T}{\frac{1}{hA} + \frac{X}{KA} + \frac{X}{KA} + \frac{1}{hA}} \quad (5)$$

La pared está construida por una lámina de acero inoxidable de esta manera el calor perdido a través de la pared (Q_{P2}) es:

$$Q_{P2} = \frac{\Delta T_2}{R_{T2}} = \frac{\Delta T}{R1+R2+R3} = \frac{\Delta T}{\frac{1}{hA} + \frac{X}{KA} + \frac{1}{hA}} \quad (6)$$

Para el balance de energía se tuvieron en cuenta los siguientes datos:

Tabla 4. Características del equipo: fondo, pared, película

Área	Composición tanque de calefacción	Área (m ²)	K: Conductividad térmica (W/mK)		X (m)	
			acero	Fibra	acero	fibra
Fondo	acero + fibra de vidrio	6,4	25	0,06	0,001	0,03
Pared	acero inoxidable	0,7	25		0,001	-
Película	Tereftalato de polietileno	6,4	0,24			

Tabla 5. Características del agua (medio de calefacción) y aire

	Temperatura (K)	h: Coeficiente por convección (W/m ² K)	K: (W/mK)	ε Emitancia
Agua	353	60000	0.68	0,96
Aire	293	30		-

Para evaluar la eficiencia del equipo se calculó, $E_T = \frac{Q_{T \text{ Experimental}}}{Q_{T \text{ Diseño}}}$ y se determinó la cantidad de calor requerida para obtener un kilogramo de producto seco: $\frac{Q_T}{Kg}$, Watts/Kg

1.4 Aloe vera en polvo

Varios alimentos son comúnmente procesados y vendidos en forma de polvo. Uno de los productos deshidratados que en la actualidad ha adquirido gran importancia comercial es el polvo de aloe vera debido a su aptitud de uso en la industria cosmética, farmacéutica, alimentaria y su incorporación en diferentes matrices (Calzada y Pedroza, 2005). Los extractos o geles de aloe vera son ampliamente utilizados en productos para el cuidado de la piel (Devi y Rao, 2005), y últimamente, como suplemento en la salud de los seres humanos, es por ello que cada vez hay más interés en la producción de aloe vera seco de alta calidad.

El Aloe vera (*Aloe barbadensis*) pertenece a la familia Liliaceae, nativo de África, específicamente de la península de Arabia. El *A. barbadensis* es una planta utilizada por el hombre desde hace más de 3000 años. Como se presenta en la figura 1, del centro de sus hojas se obtiene un gel mucilaginoso, incoloro e insípido de olor vegetal característico que contiene alrededor de 98,5% de agua, rico en mucílagos formados por ácidos galacturónicos, glucorónicos unidos a azúcares como glucosa, galactosa y arabinosa. (Bozzi *et al.*, 2006; Vega *et al.*, 2005; He *et al.*, 2005). Se ha reportado que el gel de aloe vera también tiene alta proporción de manosa (Femenia *et al.*, 1999).



Fuente: El autor

Figura 1. Esquema general de una hoja de aloe vera

A nivel mundial se ha realizado una extensa investigación sobre los componentes de aloe vera. Autores como Calzada y Pedroza (2005) reportan que la hoja tiene más de 200 constituyentes diferentes producidos en la corteza exterior, de los cuales 75 tienen actividad biológica. Muchos estudios concluyen que las propiedades funcionales de aloe vera se deben a la sinergia de todos los componentes y que no se puede otorgar el efecto benéfico a un solo componente (Sierra, 2002). Autores como Pachanon, (2005), Calzada y Pedroza (2005), Atherton (1997), han presentado información sobre la composición y las propiedades del aloe vera las cuales se describen en la tabla 6.

Tabla 6. Componentes y propiedades del aloe vera

Constituyentes	Número e identificación	Propiedades y actividad
Azúcares	Monosacáridos: Glucosa, fructosa, (Pachanon, 2005) manosa (Sierra, 2002; Ni <i>et al.</i> , 2004). Calzada y Pedroza (2005) corroboraron la presencia de sacarosa y galactosa.	Antiinflamatorios y acción antiviral.
Polisacáridos	Glucomanosa y polimánosa.	
Aminoácidos	Proporciona 17 de los 22 aminoácidos necesarios para el ser humano; 7 de los 8 esenciales: alanina, arginina, ácido aspártico, cisteína, ácido glutámico, glicina, histidina, hidroxiprolina, isoleucina, leucina, lisina, metionina, fenilalanina, prolina, serina, tirosina, valina (Eshun y He, 2004; Vega <i>et al.</i> , 2005; Atherton, 1997).	Proporciona los bloques básicos de las proteínas en la producción del tejido muscular (Atherton, 1997).
Antraquinonas	Proporciona 12 antraquinonas: aloe emodina, ácido aloectico, aloína, antracina, antranol, barbaloina, ácido crisopánico, emodina, aceite etereal, éster cinamónico, ácido isobarbaloina, resistanol.	Se encuentra en la sabia. En concentraciones relativamente pequeñas junto con la fracción del gel proporcionan actividad analgésica, antibacteriana, antifúngica y antiviral. Son laxantes. En altas concentraciones pueden ser tóxicas.
Enzimas	Proporciona 8 enzimas: alinasa, amilasa, catalasa, lipasa, oxidasa fosfatasa alcalina, carboxipeptidasa, bradiquinasa, celulasa y peroxidasa.	Ayuda en el desdoblamiento de los alimentos, azúcares y grasas ayudando en la digestión y mejora la absorción de nutrientes.
Hormonas	Auxina, giberelinas.	Curación de heridas y antiinflamatorio
La lignina	Sustancia base de la celulosa.	Se piensa que proporciona al aloe vera el poder penetrante en la piel y actúa como soporte de otros componentes (Sierra, 2002).
Minerales	Proporciona 10 minerales: Calcio, sodio, potasio, magnesio, cromo, cobre, hierro, manganeso, zinc, y selenio. Calzada y Pedroza (2005), además determinaron contenido de boro y nitrógeno.	Esenciales para el funcionamiento apropiado de varios sistemas enzimáticos y metabólicos (Atherton, 1997).
Ácido salicílico	Compuesto semejante a la aspirina.	Analgésico
Saponinas	Glucósidos	Sustancia jabonosa tanto para la limpieza como antiséptico.
Esteroles	Proporciona 4 esteroles principales: Colesterol, Campesterol, lupeol, β -sitosterol.	Agentes antiinflamatorios.
Vitaminas	A, C, E, B1 (Tiamina), B2 (Riboflavina), B3 (Niacina), B6 (Piridoxina), ácido fólico, trazas de vitamina B12 (Atherton, 1997).	Antioxidantes (A, C, E): Neutraliza los radicales libres..

Adaptado de Pachanon, 2005.

1.4.1 Usos potenciales

Gran parte de las propiedades del gel se la han atribuido al contenido de polisacáridos (Ni *et al.*, 2004). Varios autores han reportado que más que 60% de la materia seca del tejido parenquimático está formado por polisacáridos (Femenia *et al.*, 1999) ligados a azúcares como glucosa, manosa, ramnosa, xilosa, arabinosa, galactosa y ácidos urónicos. McConaughy *et al.*, (2007), extrajeron del gel de aloe vera una serie de polisacáridos galacturónicos altamente purificados de alto peso molecular con una composición química única incluyendo ácido galactorónico (GalA) y de bajo grado de sustitución de esteres metílicos.

Las características humectantes y antimicrobianas del gel de aloe vera han sido estudiadas (Habeeb F *et al.*, 2007; Vega *et al.*, 2005). El gel de Aloe vera se ha evaluado como recubrimiento comestible de frutas y hortalizas. En cerezas y uvas, el uso del recubrimiento con Aloe vera en gel condujo a una reducción significativa en el recuento de aerobios mesófilos y de forma especial de mohos y levaduras (Serrano *et al.*, 2006). Rivero *et al.*, (2002), documentaron la actividad antiviral *in vitro* de un extracto de aloe vera frente al virus *Herpes simplex* tipo 1. Rodríguez *et al.*, 2006 realizaron un estudio de los beneficios del aloe en las afecciones de la piel y se demostró la eficacia del uso de la *Aloe Vera* en crema al 50% en tres afecciones de la piel, logrando la evolución satisfactoria en la mayoría de los pacientes.

Hu *et al.*, (2003), evaluaron el potencial antioxidante de extractos de aloe vera en plantas de dos, tres y cuatro años de edad y lo compararon con antioxidantes estándar como butil hidroxitolueno (BHT) y α – tocoferol. La capacidad de inhibición de lípidos en extractos de plantas de tres años fue significativamente más alta que los extractos de aloe vera de dos años y α – tocoferol, por su parte, no se presentaron diferencias significativas en las plantas de tres años y BHT. Todos los extractos de aloe vera presentaron actividad antioxidante significativa.

El gel de aloe vera contiene una fracción importante de carbohidratos (polisacáridos) que representan cerca del 20% de los sólidos totales del parénquima mucilaginoso de las hojas, demostrándose que aproximadamente 20 glicoproteínas asociadas con estos polisacáridos contribuyen a la actividad farmacológica del aloe vera en la estimulación de la proliferación celular y otras posibles actividades como antiinflamatoria, antiviral, anti hepatitis, antineoplásicas, antiulcerativas (García *et al.*, 2001).

El aloe vera ha sido utilizado como un recurso en los alimentos funcionales, especialmente para la preparación de bebidas para la salud sin presentar ningún efecto laxante. También es usado en otros productos alimenticios como leche, helados y confitería (Ramachandra *et al.*, 2008). Sierra (2002), realizó el estudio de un prototipo de bebida de sábila y naranja. Sanzana (2010), estudió la viabilidad del desarrollo de alimentos funcionales frescos por incorporación de aloe vera a la matriz estructural de algunas hortalizas mediante la técnica de impregnación a vacío. Se encontró que las 4 hortalizas estudiadas (brócoli, coliflor, endibia y zanahoria) son susceptibles de ser sometidas a impregnación a vacío con aloe vera. El producto obtenido conserva sus características de alimento fresco (alta a_w) y a la

vez incorpora las propiedades beneficiosas del aloe, lo que potencia la funcionalidad intrínseca de las hortalizas en estudio.

El potencial funcional del *Aloe vera* queda demostrado en la amplia literatura existente, con una importante evidencia científica de sus propiedades benéficas (Eshun y He, 2004). Diversos estudios sobre el aloe revelan sus cualidades biológicas beneficiosas y su potencial como ingrediente funcional, cruzando la barrera que separa el mito de la evidencia científica (Sanzana, 2010).

La creciente demanda de los subproductos de esta planta fomenta actualmente la búsqueda de alternativas de procesamiento y comercialización que incluyen el mercadeo de gel fresco y liofilizado, así como otros derivados fundamentales para la elaboración de medicamentos, cosméticos, bebidas, etc. (Sanzana, 2010; Ramachandra *et al.*, 2008; Pachanon, 2005). El gel fresco no puede ser guardado por mucho tiempo ni siquiera a bajas temperaturas, los ingredientes activos pueden destruirse fácilmente, por ello, para prolongar la vida efectiva del aloe vera se han utilizado dos métodos de procesamiento como el secado por liofilización y el secado por aspersion (Pachanon, 2005). En los últimos años ha crecido enormemente el interés por los productos derivados de este cultivo, Estados Unidos es el pionero en la industrialización de esta planta y para satisfacer su demanda de materia prima recurre a países como México (Calzada y Pedroza, 2005).

Desde el punto de vista de su composición y estructura el aloe vera es un sistema integrado y complejo. En este sentido, la composición de la microestructura, las propiedades físicas de las macromoléculas y los procesos de secado afectan la aptitud de uso del Aloe vera en polvo, por lo tanto, la adecuación de nuevas tecnologías como el secado por radiación infrarroja utilizado por conservar las características de plantas sensibles al calor, se convierte en una alternativa para la obtención de aloe vera en polvo.

1.4.2 Algunas características fisicoquímicas de interés comercial en la calidad de aloe vera en polvo

El conocimiento adecuado de las propiedades físicas es importante porque se aplica tanto en el diseño de procesos y equipos como en la evaluación de la calidad del producto. A partir del conocimiento de la estructura del alimento y el control de calidad, se puede realizar un control del buen funcionamiento del proceso productivo, determinar las características de las materias primas y el producto terminado. De esta manera existen algunas características fisicoquímicas que determinan la calidad comercial del polvo de aloe vera y que se definen a continuación:

1.5.2.1 Propiedades de reconstitución. Entre las propiedades físicas que determinan la calidad de aloe vera en polvo se encuentran la solubilidad que hace referencia a la solución de las partículas en el líquido. Las propiedades instantáneas son un parámetro importante en la evaluación de la calidad del producto final en polvo.

La solubilidad de un producto en polvo, depende del comportamiento de los componentes frente al agua, implica interacciones hidrogeno, fuerzas Van der Waals y fuerzas iónicas. El

equilibrio entre las interacciones está influenciado por la acumulación de las moléculas de soluto que dependen a su vez de la concentración, de su estado de desplegamiento y de su estado de asociación (microestructura). La retención de agua por parte de los polvos puede explicarse por las pequeñas cantidades de agua ligada fuertemente estructurada y a las fuerzas de capilaridad debidas a la organización de las moléculas de soluto o en microestructura. Este tipo de retención de agua se observa en suspensiones concentradas de polisacáridos. En los productos alimentarios, son sobre todo, las fuerzas capilares las que participan en la retención del agua.

La calidad del gel de sábila, puede ser determinada por el contenido de sólidos precipitables en alcohol (metanol) existentes en una muestra de gel. Esta prueba cuantitativa de polisacáridos precipitables en alcohol es aprobada por la entidad de certificación *International Aloe Science Council* (IASC), para ser utilizada por la industria de aloe en la certificación de sus productos y así evitar fraudes y falsos etiquetados (Calzada y Pedroza, 2005).

1.5.2.2 Viscosidad. La medición de la viscosidad es a menudo muy importante para el control de la calidad, sobre todo de productos que se supone deben tener una cierta consistencia en relación a su aspecto o paladar. La viscosidad puede definirse como el rozamiento interno que actúa dentro de un fluido, esto es, su resistencia a fluir. Un fluido situado en un vaso al que se invierte está sujeto a fuerzas gravitatorias; algunos fluidos fluirán fácilmente fuera del vaso, otros con dificultad y algunos no lo harán en absoluto. La viscosidad es también una medida de la tasa de flujo (Lewis, 1993). La pulpa de aloe vera forma un gel, en el que se ha identificado una larga cadena de monosacáridos, específicamente manosas acetiladas y glucosa, que originan un mucopolisacárido soluble denominado acemanano, componente funcional del aloe (Bozzi *et al.*, 2006; Femenia *et al.*, 1999). El manano, presente en el gel líquido del aloe es la base de sus propiedades viscoelásticas (Ni *et al.*, 2004).

1.5.2.3 Isotermas de adsorción. Actualmente, el conocimiento de la humedad y su relación con la isoterma de adsorción son muy importantes en la ciencia y tecnología de alimentos, es útil en el diseño y la optimización de procesos tecnológicos como la deshidratación, la mezcla con otros ingredientes, entre otros. Estos datos también pueden ayudar en el pronóstico de la estabilidad y en la vida útil de los productos durante el almacenamiento y el empaque.

Una isoterma de adsorción es la representación gráfica de la relación entre la actividad de agua de un alimento y su contenido de humedad a una temperatura constante. Varios factores pueden influir en la forma y las características de la isoterma, como la composición de los alimentos, el estado físico de sus componentes (amorfo, cristalino), y la temperatura (Martínez *et al.*, 1998). Por su parte el agua, que en la mayor parte de los alimentos representa el constituyente más abundante, tiene un papel esencial para la estabilidad de los alimentos, la estructura de los productos vegetales y su interacción con los constituyentes químicos de los mismos, actúa como disolvente en reacciones químicas, enzimáticas, microbiológicas y frecuentemente es responsable de la aptitud hacia el deterioro. De ahí que muchos métodos de conservación se fundamenten, al menos en parte,

en el descenso de la disponibilidad del agua. En el gel de aloe vera fresco, el contenido de humedad representa alrededor de 98 - 99% de su composición total (Vega *et al.*, 2005; Pachanon 2005; Femenia *et al.*, 1999).

El término de actividad de agua (a_w) representa la relación entre la presión de vapor ejercida por el alimento y la presión de vapor saturado de agua pura a la misma temperatura. Se puede expresar como la humedad relativa dividida entre 100, a la cual un alimento está en equilibrio con su medio. Una vez que se ha logrado este equilibrio, la humedad relativa en un alimento puede o no tener ganancia o pérdida de agua durante el almacenamiento al menos que la humedad del medio cambie (Salazar *et al.*, 1994).

En las isotermas de adsorción, la actividad de agua representa una medida del grado de enlace del agua en un alimento. De esta manera, una isoterma puede ser dividida en una región en la que se presenta una fuerte asociación de moléculas de agua a sitios específicos, llamada monocapa y una región en la cual el agua se congela fácilmente y tiene una presión de vapor igual a la del agua pura, la cual está disponible para reacciones biológicas y químicas. El agua que se encuentra por debajo de la monocapa no actúa como disolvente. La cantidad de agua ligada por un determinado sustrato se relaciona fácilmente con el valor de actividad de agua, mediante el análisis de las correspondientes isotermas de adsorción de humedad que pueden ser ajustadas a la ecuación de GAB. A partir de estos conceptos se pueden formular diferentes modelos que explican el efecto de diferentes factores capaces de modificar el valor de actividad de agua determinando las interacciones (superficiales, puentes de hidrógeno, capilares) del sustrato con el agua (Boatella *et al.*, 2004).

- **Ajuste de datos de sorción de humedad, modelo de Guggenheim Anderson de Boer (GAB, 1984)**

Para describir matemáticamente la relación entre la actividad de agua y la humedad de equilibrio (H_{eq}) de productos agrícolas se han empleado varios modelos (Domínguez *et al.*, 2007), entre ellos se encuentra el modelo de GAB. Este es el modelo que mejor se ajusta en la simulación del secado de alimentos (Bell y Labuza, 2000; Delgado y Orrego, 2002; Ocampo, 2006). El modelo de GAB ha sido utilizado para describir las isotermas de adsorción de varios productos entre ellos: pectina de café (Delgado *et al.*, 2002), harina de maíz (Vega *et al.*, 2006), semillas de jamaica (Domínguez *et al.*, 2007), polvo de guanábana deshidratada (Ceballos *et al.*, 2009), aloe vera secado por aire caliente (Vega *et al.*, 2007; Uribe *et al.*, 2008). El modelo, tiene en cuenta las propiedades modificadas del agua adsorbida en la región de multicapas (Kapsalis, 1987) describe parámetros fisicoquímicos claves como la humedad de la monocapa y los parámetros K y C. Este modelo fue generado por los investigadores Guggenheim, Anderson y de Boer (1966) y fue presentado formalmente por Van der Berg (1981). En la tabla 7 se ha recopilado de diferentes estudios referenciados algunos valores de la monocapa de alimentos obtenidas mediante la ecuación de GAB.

Tabla 7. Valores de la humedad de la monocapa (X_m) obtenidos mediante la ecuación de GAB.

X_m (g agua/g b.s.)	T ° C	Producto	Método de secado	Referencia
0,188	8	Aloe vera	Aire caliente	Uribe, Miranda, Lemus y Vega (2008)
0,087	30	Aloe vera	Aire caliente	Uribe, Miranda, Lemus y Vega (2008)
0,20	50	Aloe vera	Aire caliente	Vega, Uribe, Lemus y Miranda (2007)
0,0637	20	Guanábana con maltodextrina	No reportado	Ceballos, Giraldo y Orrego (2009)
0,0629	30	Guanábana con maltodextrina	No reportado	Ceballos, Giraldo y Orrego (2009)
0,115	7	Harina de maíz	No reportado	Vega, Lara y Lemus (2006)
0,082	22	Harina de maíz	No reportado	Vega, Lara y Lemus (2006)
0,17542	55	Pulpa de mango	Cámara de deshidratación	Ocampo (2006)
0.011	40	Pectina de café (pulpa)	Convección	Delgado y Orrego (2002)
0.0007	40	Pectina de café (mucílago)	Convección	Delgado y Orrego (2002)
0,044	25	Proteína hidrolizada de carne de pollo con 30% maltodextrina	Aspersión	Kurozawa, Park y Hubinger (2009)

Fuente: Recopilación del autor

1.5.2.4 Color. Una propiedad importante en las características de un producto procesado son los atributos de color. Para ser más comprensibles a nivel comercial estos atributos deben ser cuantificados con valores numéricos. Dentro de los sistemas desarrollados para cuantificar los atributos de color se encuentra el sistema CIELAB, el cual fue desarrollado por la *Commission Internationale d'Eclairage* (CIE). Este sistema permite posicionar el color en un espacio tridimensional que se define por una combinación de coordenadas donde un punto se asocia a un único color. De esta manera, L^* corresponde a la Coordenada de luminosidad, a^* (+rojos, -verde) y b^* (+amarillo, - azul) corresponden a coordenadas de cromaticidad, C^* intensidad y H° tinte (CIE). El gel de aloe vera es incoloro, sin embargo al ser sometido a diferentes tratamientos puede cambiar su aspecto, aunque los cambios de color tienen poca relación con la efectividad terapéutica del gel estabilizado, son poco aceptados psicológicamente por el usuario. En algunos productos el cambio de color es totalmente inaceptable (Ramachandra, 2008).

Teniendo en cuenta las características de los productos en polvo a nivel comercial, en la tabla 8 y 9 se presenta la ficha técnica de aloe vera comercial en polvo y algunas características después de su reconstitución.

Tabla 8. Ficha técnica del aloe vera en polvo comercial

Especificación	Aloe en polvo Liofilizado
Apariencia	Polvo finamente granular
Olor	Característico del aloe vera
Color	Blanco opaco – medianamente bronceado
Malla	98,305% pasante a través de la malla 80
Contenido de humedad	Menor que 6,5 % b.h.

Fuente: Ficha técnica producto de Aloe Jaumave S.A. DE C. V.

Tabla 9. Especificaciones contenidas en el aloe vera comercial reconstituido

Especificación	Aloe reconstituido obtenido por liofilizado
Característica	Solución clara
Sólidos precipitables en metanol	3.000 mg/Lt \pm 20%
Reología	Fluye libremente
pH	4,00 - 5,7
Test de Yodo	Negativo
Solubilidad	Satisfactoria

Fuente: Ficha técnica producto de Aloe Jaumave S.A. DE C. V.

Las características de estabilidad, solubilidad, viscosidad y color describen como los procesos de secado afectan la aptitud de uso del aloe vera en polvo. Los productos en polvo pueden sufrir alteraciones en función del proceso al que son sometidos, por lo tanto, las características físicas y químicas pueden ser vistas como una respuesta al cambio en el sistema del producto. Los alimentos son sistemas físicoquímicos y biológicamente activos, por lo tanto la calidad es un estado dinámico que se mueve continuamente hacia niveles más bajos y que influyen en la aceptación por el consumidor (Casp y Abril, 2003).

Con base en lo anteriormente descrito, el objetivo de este estudio fue evaluar el efecto de la deshidratación por radiación infrarroja sobre las características fisicoquímicas que definen la calidad comercial de polvo de aloe vera (*Aloe barbadensis*).

2 MATERIALES Y MÉTODOS

Con base en el principio de transferencia de calor por radiación infrarroja se realizó un montaje previo a nivel de laboratorio y en una segunda fase se realizaron las pruebas de deshidratación en un equipo piloto de secado por radiación infrarroja diseñado y construido por la Universidad de la Sabana.

2.1 Pruebas preliminares en laboratorio

El montaje a nivel de laboratorio, se realizó en un recipiente contenedor del líquido calefactor (agua), el cual estaba en contacto directo con una película de acetato de celulosa de 0.2 mm de grosor, sobre la cual se depositó una capa fina del producto a deshidratar, en este caso el gel de aloe vera. La temperatura del medio calefactor fue menor al punto de ebullición (80° C).

El diseño experimental se realizó con tres tratamientos, aloe vera puro, aloe con la adición 10% (p/p) de maltodextrina como encapsulante y aloe vera con 0,1% (p/p) de ácido ascórbico como antioxidante. La maltodextrina ((C₆H₁₀O₅)_n), empleada es un polímero sacárido nutritivo no dulce que consiste en unidades de D-glucosa unidas principalmente por enlaces (α)-1-4 y que tiene un equivalente de dextrosa (D.E.) menor que 20 (Code of Federal Regulations, F.D.A.).

Evaluación del cambio de color. Se analizó el color de los polvos obtenidos a través del análisis de imágenes mediante el sistema CIELAB.

Procesamiento de imágenes. Se tomaron ocho imágenes de cada tratamiento en intervalos de cinco minutos a los tiempos de secado 5, 10, 15, 20, 25, 30, 35 y 40 minutos, se utilizó una cámara digital marca Sony DSC – W30 con una resolución de 6 megapíxeles. Los datos se tomaron por triplicado, reportando el valor medio para cada tiempo. Para el análisis y procesamiento de imágenes se utilizó el software libre ImageJ.

Equipo piloto de Secado por radiación infrarroja

Este proyecto de maestría se enmarca dentro del proyecto “*Diseño y construcción de un equipo de secado basado en la transferencia de calor por radiación infrarroja para la obtención de aloe vera en polvo*” aprobado por Colciencias en la convocatoria 429/07 denominada Mejora Productiva PYMES Distrito Capital – 2007. Con la participación de la empresa Dry Tech Ltda como beneficiaria y la Universidad de La Sabana como ejecutora. El resultado de este proyecto fue el diseño y la construcción de un equipo a nivel piloto, para el estudio de la tecnología de secado por calentamiento infrarrojo en el cual se desarrolla esta investigación y que se describe a continuación:

- **Características del equipo**

El equipo deshidratador diseñado y construido con base en la transferencia de calor por radiación infrarroja presenta las siguientes características: consta de una campana con

sistema de extracción de vapores por medio de tres ventiladores. La banda transportadora es de material translúcido de 6 m de longitud entre ejes de rodillos con sistema de transmisión por motor reductor de 1 HP y variador de frecuencia adaptable al producto a deshidratar. Cuenta con un tanque de calentamiento en acero inoxidable con capacidad de 550 litros, recubierto con aislamiento térmico y un tanque para agua fría en acero inoxidable con capacidad 150 litros. La bandeja para agua caliente está diseñada con un sistema recirculante en acero inoxidable con dos drenajes de retorno y un sistema hidráulico de tubería en polipropileno, recubierta en su parte interior por un colchón en fibra de vidrio (Pardo y Tesone, 2009). El equipo piloto en el que se realizaron los ensayos es de propiedad de la Universidad de la Sabana y se presenta en la figura 2.



Figura 2. Equipo piloto de secado por radiación infrarroja, ubicado en el Biocentro

- **Ficha técnica del equipo**

Para el control del sistema el equipo cuenta con un tablero de mando que permite ajustar la variación de la frecuencia de la banda, encendido y apagado de las resistencias y control de las bombas de agua. La ficha técnica del equipo se resume en la tabla 10.

Tabla 10. Ficha Técnica del Equipo

Componente	Características	
Equipo dimensiones	Longitud total	6,0 m
	Ancho total	1,5 m
	Alto total	3,0 m
Área efectiva de secado	5,74	m ²
Tanque de H ₂ O para obtener energía infrarroja	Capacidad	550 m ³
Sistema de Calefacción	Temperatura	70-90 °C
	Potencia	68 KW
Banda transportadora	Ancho	1,4 m
	Largo	12,5 m
	Espesor	0,2 mm
Extractores de aire	2 Unidades	500CFM
	1 unidad	1200 CFM

Fuente: Pardo y Tesone, 2009

- **Adecuación de la materia prima utilizada**

El gel utilizado en este estudio proviene de hojas frescas de *Aloe vera* variedad *barbadensis* Miller de origen Colombiano. El material vegetal se preparó separando el gel de la corteza en forma manual y así evitar la contaminación del producto con aloína (liquido amarillento de sabor amargo que se encuentra en las células pericíclicas de los vasos vasculares debajo de la corteza de la hoja, que al consumirlos tienen fuertes efectos secundarios, por lo que su presencia es indeseable en productos de sábila tanto para consumo interno como externo. (Sierra, 2002)). Para la extracción del filete, se retiró con un cuchillo, la base, la parte superior de la hoja y las espinas laterales como se presenta en la figura 3.



Fuente: El autor

Figura 3. Adecuación de la Materia prima utilizada

Se establecieron las siguientes condiciones fijas de formulación: al gel de aloe vera se adicionó maltodextrina en una relación másica equivalente 1 g maltodextrina/1 g de sólidos totales como agente encapsulante. La maltodextrina es un carbohidrato incoloro, inodoro y de baja viscosidad a altas concentraciones, permite la formación de polvos de libre flujo sin enmascarar el sabor original (Candelas *et al.*, 2005). Estos polímeros de glucosas, son utilizados principalmente en materiales que presentan dificultades para su deshidratación, como pulpa de lulo (Gabas, 2009), reducen los problemas de adherencia y aglomeración durante el almacenamiento, mejorando así la estabilidad del producto (Silva, 2006).

Como antioxidante, se adicionó ácido cítrico en una relación 0,07 g ácido cítrico/1 g de sólidos totales. El ácido cítrico evita reacciones de pardeamiento y mejora el sabor del jugo del gel de aloe vera (Ramachandra y Srinivasa, 2008). Para obtener un gel uniforme, el filete se trituro en una homogenizadora industrial como se presenta en la figura 4.



Fuente: El autor

Figura 4. Homogenización del gel de aloe

Para cada ensayo de deshidratación del gel de aloe vera se empleo como base de cálculo de producción un total de 5,0 kilogramos por lote. En la figura 5 se presenta las etapas de proceso que se realizan para la obtención de aloe vera por radiación infrarroja:

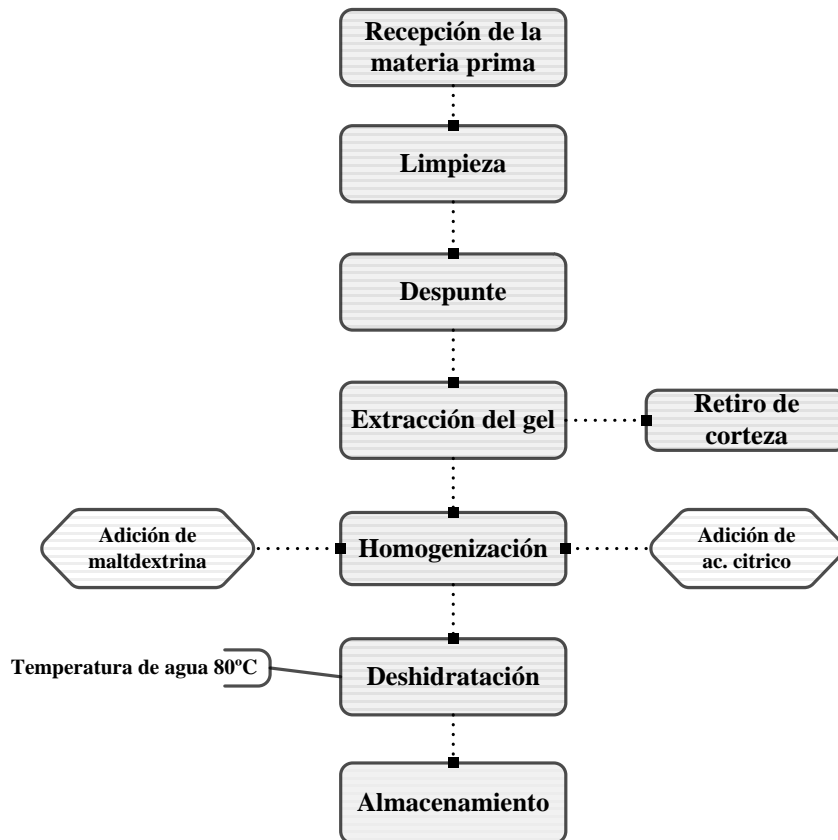


Figura 5. Diagrama de proceso para la obtención de aloe vera en polvo por radiación infrarroja

2.2. Pruebas equipo piloto de secado, diseño experimental

Se realizó un diseño factorial aleatorizado con 2 variables, 1 factor definido y 6 parámetros de respuesta medidas por triplicado como se explica a continuación:

- **Variable:** Espesor de lecho

Uno de los principales parámetros para la operación del equipo es el espesor de lecho del material a secar. Resultados de estudios previos, del método de secado por Refractance window® en frutas y vegetales presentados por Abonyi (2002), indican que existe un límite máximo para el espesor del lecho (1 mm), en los purés por encima de este límite el producto es difícil de secar.

Con base en esta referencia, para definir los niveles del espesor de lecho a escala planta piloto se realizaron pruebas preliminares en laboratorio, como se presentan en la figura 6. Se evaluaron espesores de lecho de aloe vera menores a 1mm, sin embargo se dificultó el retiro del producto seco, porque quedó adherido a la película. A partir de 1 milímetro la película empieza a desprender con mayor facilidad por lo tanto se definió como límite mínimo 1 mm.

Teniendo en cuenta que el aloe vera contiene alrededor de 98,5% de agua, para definir el límite superior, se realizaron pruebas preliminares con espesores de lecho de 3, 4 y 5 mm de espesor. Los resultados previos indicaron que por encima de 3 mm de espesor en el producto se evidencia pardeamiento. Por lo tanto se definió como límite máximo 3 mm de espesor. De esta manera se definió como variable de estudio dos niveles:

Variable: Dos espesores del lecho de secado: 1 mm, 3 mm



Figura 6. Pruebas preliminares para definir el lecho de secado

- **Factor:** Temperatura del medio calefactor

Para definir la temperatura del medio calefactor se tomaron como referentes los siguientes estudios: Estudio sobre el efecto del método de secado de refractance window en las características de color de paprika (Topuz, *et al.*, 2009), y el estudio sobre la deshidratación de puré de espárragos por el método de refractance window®. En estos trabajos se utiliza agua circulante a una temperatura de 95 -97°C. (Nindo, *et al.*, 2003). Abonyi, *et al.*, (2002)

presento el estudio sobre la retención de la calidad en puré de fresa y zanahoria secados por el sistema de Refractance window. en este estudio trabajó a una temperatura de 95°C.

Con base en estos estudios y para definir la temperatura del agua circulante utilizada en el secado por radiación infrarroja de aloe vera se realizaron pruebas preliminares a nivel de laboratorio utilizando como medio calefactor agua a temperaturas de: 70⁰C, 80⁰C y 90⁰C como se presentan en la figura 7. Se tomo como parámetro de respuesta el cambio de color, presentando mejores resultados el tratamiento en el que el líquido calefactor (agua) se encontraba a una temperatura menor al punto de ebullición 80°C. Los resultados del cambio de color a 80°C se presentan en el artículo: Evaluación del cambio de color en el proceso de secado de aloe vera (*Aloe barbadensis Miller*) por el método ventana refractiva

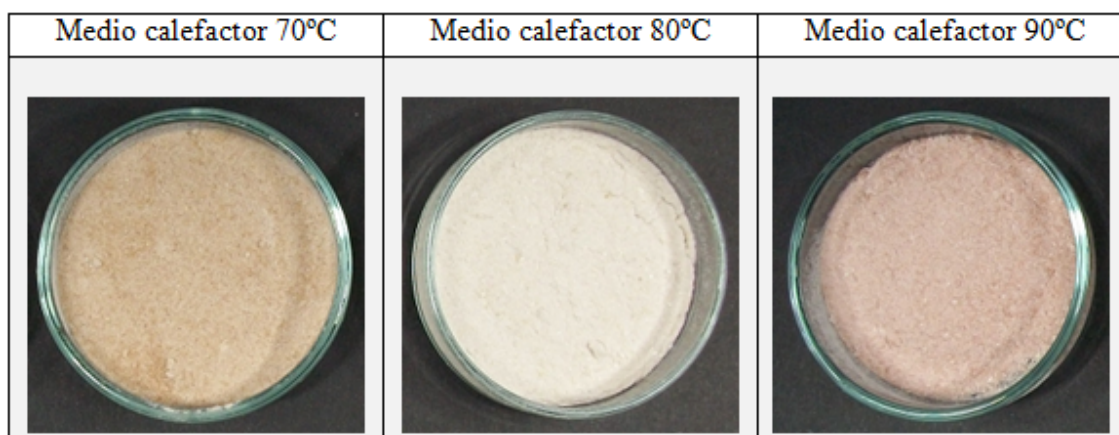


Figura 7. Pruebas preliminares para determinar la temperatura del medio calefactor

- **Parámetros de respuesta:** Humedad, solubilidad, color, viscosidad, estabilidad y temperatura del producto.



Figura 8. Control del proceso de secado

A nivel industrial, el método de liofilización junto con el secado por aspersión, son los procesos que se han utilizado para prolongar la vida útil del gel de aloe vera. La liofilización es un proceso de secado mediante sublimación que se ha desarrollado con el fin de reducir las pérdidas de los compuestos responsables del sabor y aroma en los alimentos, los cuales se afectan en gran medida durante los procesos convencionales de secado. La liofilización involucra varias etapas: congelación a bajas temperaturas, secado por sublimación del hielo del producto congelado a baja presión y almacenamiento del producto seco en condiciones controladas. Al liofilizar adecuadamente un material se puede almacenar por periodos muy largos con reducciones muy bajas de sus características organolépticas, físicas químicas y biológicas. Los productos liofilizados, a diferencia de los deshidratados por otras técnicas de secado, conservan prácticamente 100% su forma y propiedades naturales, tienen mayor vida de anaquel y son fácilmente rehidratable (Gómez, *et al.*, 2003).

Por las características que presentan los productos liofilizados, se utilizó como blanco aloe vera liofilizado obtenido en la Universidad de La Sabana en un equipo piloto marca Labconco modelo Freezone 6.0 durante 72 horas a una temperatura de -40°C y una presión de vacío de $5\ \mu\text{m}$ de Hg. El aloe obtenido por liofilización se presenta en la figura 9.



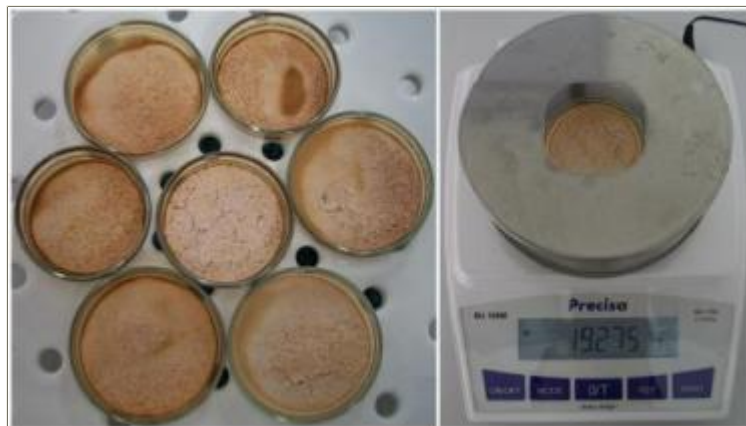
Fuente: El autor

Figura 9. Aloe liofilizado en el equipo piloto de la Universidad de la Sabana

2.3. Métodos analíticos para la determinación de las características fisicoquímicas del polvo de aloe vera

2.3.1 Determinación de humedad

La determinación del contenido humedad se realizó siguiendo el método AOAC 934.06 (AOAC, 2007). Este método consiste en la determinación de la pérdida de peso de 10 g del producto tan uniforme como sea posible en una estufa, se ajusto, se peso y se seco durante 24 horas a $110^{\circ}\text{C} \pm 1^{\circ}\text{C}$ con circulación de aire, hasta que la muestra presente un peso constante, se enfrió en un desecador y se peso como se presenta en la figura 10. Se utilizó una estufa de secado con convección natural marca Binder (Rango de temperatura: 5 – 300 °C) y una balanza compacta BJ 100M Precisa de ± 0.001 g de precisión.



Fuente: El autor

Figura 10. Determinación de la humedad

2.3.2 Propiedades de reconstitución.

- ***Índice de solubilidad***

El método que se siguió para la determinación del índice de solubilidad en agua (I.S.A) fue el planteado para analizar la solubilidad de productos en polvo como la harina de yuca (Rodríguez *et al.* 2006) el cual se basa en la técnica planteado por Anderson *et al.* (1969) con algunas modificaciones. La técnica de Anderson esta descrita en la Guía técnica para producción y análisis de almidón de yuca publicada por la FAO (Aristizábal y Sánchez, 2007) y utilizada también para determinar el I.S.A. en ñame y mapuey (Rincón *et al.*, 2000). El polvo de aloe vera fue reconstituido de acuerdo con su contenido de agua original con base en los sólidos totales contenidos en el gel. Para ello, se colocó en un vaso de precipitado agua destilada y se llevo a un agitador magnético con calentamiento Modelo MR Hei – Standard marca Heidolph. La velocidad de la agitación se va incrementando poco a poco conforme se agrego la muestra hasta 1400 R.P.M., se continuó la agitación durante cinco minutos hasta completar la disolución del producto.

Se tomo una alícuota de 10 g de la suspensión y se centrifugó a temperatura ambiente a 4900 RPM durante 15 minutos en una centrífuga Hettich Universal 32R. El sobrenadante se decantó y se secó a 100° C durante 24 horas. Este método se utilizó para evaluar la solubilidad en agua destilada a 20° C, agua destilada 40° C y etanol. Las pruebas se realizaron por triplicado. El I.S.A. se determinó de acuerdo con las ecuaciones presentadas a continuación:

$$\text{Peso de la muestra(g)} = \frac{\text{Peso seco muestra (g)}}{\text{Peso seco muestra(g)+agua(g)}} * \text{alícuota(g)} \quad (7)$$

$$\text{Índice de solubilidad en agua I.S.A. (\%)} = \frac{\text{Peso sobrenadante(g)-peso seco sobrenante (g)}}{\text{Peso muestra (g)}} * 100 \quad (8)$$

- ***Sólidos precipitables en alcohol.***

Esta es una prueba cuantitativa para determinar la calidad del gel de aloe vera y es aprobada por la entidad de certificación *International Aloe Science Council* (IASC). Las pruebas de polisacáridos precipitables en alcohol sirven para determinar hexosas de *Aloe*. La determinación de polisacáridos se realizó mediante el método de separación por precipitación en alcohol y detección por medidas de azúcar precipitado.

2.3.3 Viscosidad

La determinación de viscosidad del gel de aloe vera fresco y del gel de aloe vera rehidratado, se llevó a cabo en un viscosímetro Digital rotacional Brookfield RVDV – I. Este método se basa en la medición de la resistencia que ofrece un fluido, cuando se le aplica una fuerza interna que lo induce al movimiento, bajo condiciones establecidas.

Preparación de la muestra: el polvo de aloe vera fue reconstituido de acuerdo con el contenido de agua original con base en los sólidos totales contenidos en el gel. El gel rehidratado se dejó estabilizar durante 15 minutos. Una muestra de 400 ml fue llevada al viscosímetro Brookfield a una temperatura de 20° C, y se seleccionó el spin 2, como se presenta en la figura 11.



Fuente: El autor

Figura 11. Determinación de la viscosidad en el viscosímetro Brookfield

Con base en el Manual de uso de Viscosímetro Brookfield Engineering Labs., Inc, se tomaron las lecturas y se realizaron los cálculos correspondientes aplicando las ecuaciones utilizadas para agujas cilíndricas:

$$\text{Esfuerzo cortante (dinas/cm}^2\text{): } \tau = \frac{M}{2\pi Rb^2L} \quad (9)$$

$$\text{Velocidad de corte (s}^{-1}\text{): } \gamma = \frac{2\omega Rc^2Rb^2}{X^2(Rc^2 - Rb^2)} \quad (10)$$

$$\text{Viscosidad (poise): } \eta = \frac{\tau}{\gamma} \quad (11)$$

Donde:

- ω = Velocidad angular de la aguja (rad/sec)
- R_c = Radio de vaso de precipitado (centímetros)
- R_b = Radio de eje (centímetros)
- X = Radio del esfuerzo cortante
- M = Torque
- L = Longitud efectiva

Para muchos fluidos se ha encontrado que hay una relación lineal cuando se representan la fuerza de cizalla frente al gradiente de cizalla en coordenadas doblemente logarítmicas. La ecuación que relaciona entre sí la fuerza de cizalla con el gradiente de cizalla bajo estas condiciones se conoce como la ecuación de la ley de potencia (Lewis, 1993), y presentan la siguiente expresión:

$$\tau = K \left(\frac{dy}{dx} \right)^n \quad (12)$$

2.3.4 Isotermas de adsorción

Para calcular el contenido de humedad de equilibrio del producto, se calculo la isoterma de adsorción del aloe deshidratado, se utilizó la metodología del *American National Standards Institute* (2002), método gravimétrico estático de soluciones de sales saturadas que consiste en colocar una muestra del producto, durante un periodo de tiempo prolongado, en un recipiente cerrado cuyo interior se encuentra a humedad relativa y temperatura constante, el cual ha sido reportado por varios estudios entre ellos: Ceballos *et al.*, 2009 en polvo de fruta deshidratada; Uribe *et al.*, 2008 y Vega *et al.*, 2007 en aloe vera secado por aire caliente, Ocampo, 2006 en pulpa de mango. Para determinar la actividad de agua se empleo novasina que se presenta en la figura 12.



Fuente: El autor

Figura 12. Equipo para la determinación de la actividad de agua

Las muestras con una actividad de agua conocida, se colocaron en matraces herméticamente cerrados que contiene una solución de sal saturada, sin circulación de aire, que permiten obtener humedades relativas constantes hasta alcanzar un estado de equilibrio. El peso de la muestra fue medido por única vez después de 4 semanas (tiempo referenciado en estudios previos con aloe vera por Vega *et al.*, 2007) hasta que el peso fue constante. En cada muestra se determino la humedad final, que fue considerada como la humedad de equilibrio a una humedad relativa y temperatura específica.

La soluciones saturadas de sales utilizadas fueron: Sílica gel, $MgCl_2$, $MgNO_3$, NaCl, KCl, y agua (en desecadoras tapadas), los porcentajes de humedad relativa que se obtienen con cada uno de los sistemas son de 11, 33, 53, 75, 85 y 100, respectivamente, y se mantuvieron a una temperatura de $18 \pm 1^\circ C$; como se presenta en la figura 13:



Fuente: El autor

Figura 13. Determinación de la humedad de equilibrio

El procedimiento se realizó por triplicado y con los promedios de los datos se construyeron las correspondientes isothermas de adsorción. Los datos experimentales se ajustaron al modelo matemático GAB.

Valor de la monocapa

Para determinar el valor de la monocapa (X_m), se utilizó el modelo de GAB. El cual se presenta mediante la ecuación 13.

$$\frac{X}{X_m} = \frac{C \cdot K \cdot a_w}{(1 - K \cdot a_w)(1 - K \cdot a_w + 1 - C \cdot K \cdot a_w)} \quad (133)$$

De acuerdo con Labuza (2002) se reorganizó la ecuación 13 como un polinomio de segundo orden, lo que permite determinar X_m (valor de la monocapa) y los parámetros C y K, a partir de la siguiente ecuación:

$$\frac{a_w}{X} = \frac{K}{X_m} \left(\frac{1}{C} - 1 \right) a_w^2 + \frac{1}{X_m} \left(1 - \frac{2}{C} \right) a_w + \frac{1}{X_m K C} \quad (144)$$

Se ajustaron los datos experimentales por medio de una correlación binomial lo que permite obtener la solución que se muestra en la siguiente ecuación (Ocampo, 2006):

$$K = \frac{(\beta^2 - 4\alpha\varepsilon)^{0,5} - \beta}{2\varepsilon} \quad (15)$$

$$C = \frac{\beta}{\varepsilon K} + 2 \quad (16)$$

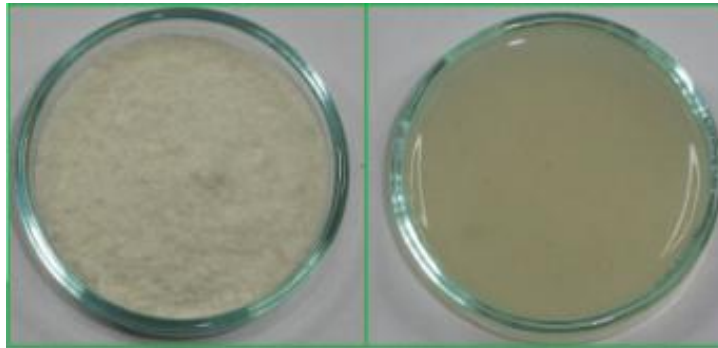
$$X_o = \frac{1}{\varepsilon K C} \quad (17)$$

Donde α , β y ε son los coeficientes de la ecuación, cuyo valor numérico se encuentra a partir de la correlación respectiva.

2.3.5 Evaluación de color

Determinación de las coordenadas de color. La medición de los parámetros de color se realizó utilizando el sistema CIELAB, donde L^* corresponde a la coordenada de luminosidad, a^* (+rojos, -verdes) y b^* (+amarillos, -azules) corresponden a coordenadas de cromaticidad y H° tono.

Procesamiento de imágenes. Se analizaron imágenes de 4 geles: gel de aloe vera fresco, el gel reconstituido del polvo de aloe vera en lecho de 1 m y gel reconstituido de polvo de aloe vera en lecho de 3 mm obtenidos secados por radiación infrarroja y gel reconstituido de polvo de aloe vera obtenido por liofilización. Se utilizó una cámara digital marca Sony DSC – W30 con una resolución de 6 megapíxeles. Los datos se tomaron por triplicado, reportando el valor promedio para cada gel. Para el análisis y procesamiento de imágenes se utilizó el software libre ImageJ. En la figura 14 se presenta el aloe vera en polvo y reconstituido obtenido por radiación infrarroja en lecho de 1 mm.



Fuente: El autor

Figura 14. Polvo y aloe reconstituido obtenido por radiación infrarroja

2.4 Otros procedimientos, resultados de operación

- **Evolución del perfil de temperatura de producto**

El perfil de temperatura del producto fue evaluado a lo largo del proceso de secado del gel de aloe vera, los datos fueron medidos cada cinco minutos con un termómetro infrarrojo digital para alimentos I.R.F.S. (Rango de temperatura -55°C a 280°C) directamente sobre el lecho del secado de 1 mm y 3 mm de espesor.

- **Balance de materia y energía**

En este estudio, se establecieron los parámetros de proceso en cuanto al espesor de lecho y se realizó una verificación de los cálculos teóricos (balances de materia y energía) confrontándolos con el desempeño del equipo.

3 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1 Resultados preliminares a nivel de laboratorio

A continuación se presentan los resultados de la evaluación del cambio de color en el polvo de aloe vera secado por radiación infrarroja obtenido a nivel de laboratorio

Cambio de color en el proceso de secado de aloe vera

Las coordenadas más representativas que describen el cambio de color en el proceso de secado de Aloe vera en los diferentes tratamientos son a^* , L^* H° . En la figura 15 se presentan los tres tratamientos antes y después de ser sometidos al proceso de secado por radiación infrarroja.

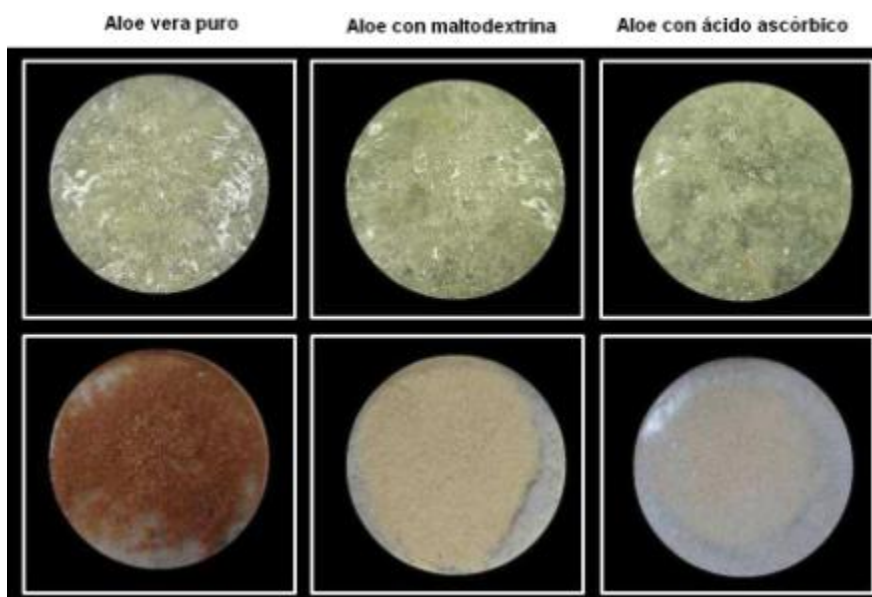


Figura 15. Gel y polvo de aloe vera secado por radiación infrarroja

En la figura 16 se presenta la evolución de la coordenada a^* después de 40 minutos de secado. La gráfica muestra que el tratamiento de gel puro presenta un marcado cambio en el comportamiento de la coordenada a^* con respecto a la muestra inicial, con valores que van desde el verde al rojo mostrando desviación hacia los rojos, lo que se puede atribuir a un pardeamiento no enzimático dominado por los grupos reductores de los polisacáridos. El pardeamiento no enzimático es el resultado de reacciones originadas por las condensaciones entre compuestos carbonilos y aminados; o por la degradación de compuestos con dobles enlaces conjugados a grupos carbonilo.

Los tratamientos con maltodextrina y ácido ascórbico presentaron trayectorias diferentes, con valores negativos que indican la tonalidad en el sentido del verde y no se evidenciaron cambios drásticos, con lo cual la coordenada a^* muestra mayor estabilidad. El cambio del aloe vera puro muestra que la variable a^* cambia 5,22 veces, mientras que el tratamiento de

aloe vera con maltodextrina cambia 2,05 y el aloe vera con ácido ascórbico cambia 0,29 veces frente al parámetro inicial.

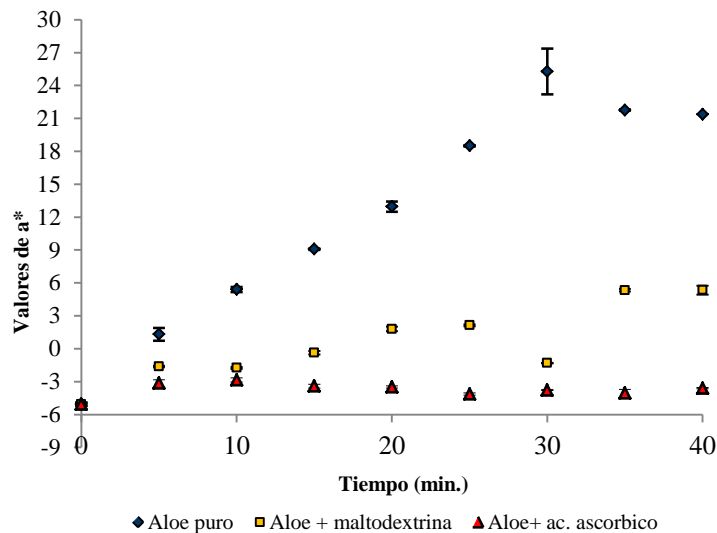


Figura 16. Evolución de la Coordenada a* en el proceso de secado de aloe vera

El tratamiento con ácido ascórbico fue el menos sensible frente al producto fresco esto se debe a que al ácido ascórbico actúa como un potente antioxidante. Pinto (2003) atribuye esta característica a la estructura antioxidante endiol con una fuerte capacidad de donar electrones, donde los grupos hidroxilos en las posiciones 2 y 3 se clasifican como “puntos críticos” para una favorable actividad antioxidante.

En la figura 17 se presentan la coordenadas cromáticas L* como indicador de luminosidad. Se observan valores decrecientes en L* lo que indica una tendencia hacia el negro desde un color pálido hacia un color oscuro. El aloe vera deshidratado sin aditivos presenta mayor pérdida de luminosidad.

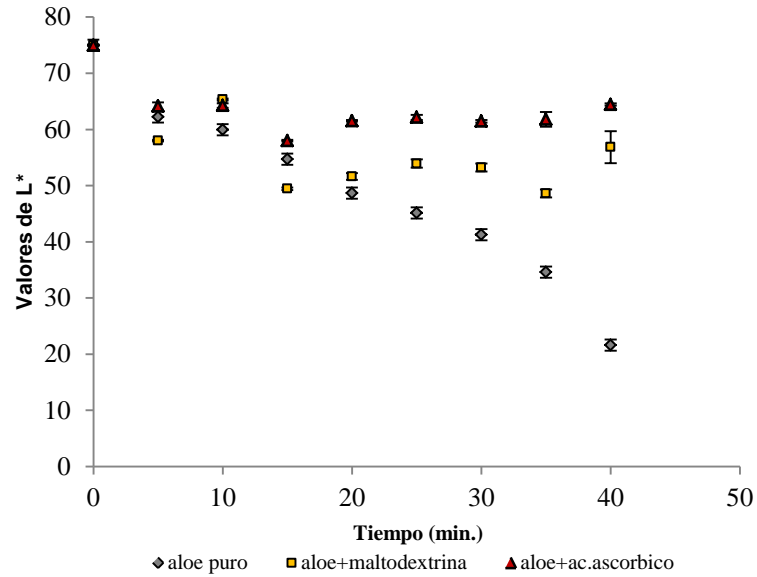


Figura 17. Evolución de luminosidad (L*) durante el secado por RW

En la figura 18 se presenta la evolución del tono de color con la luminosidad. Las gráficas muestran que en la medida que pasa el tiempo la saturación se incrementó en los tres tratamientos, el cambio principal se da en el tratamiento de aloe vera puro con un descenso acusado de luminosidad hacia un tono profundo dominado por los rojos.

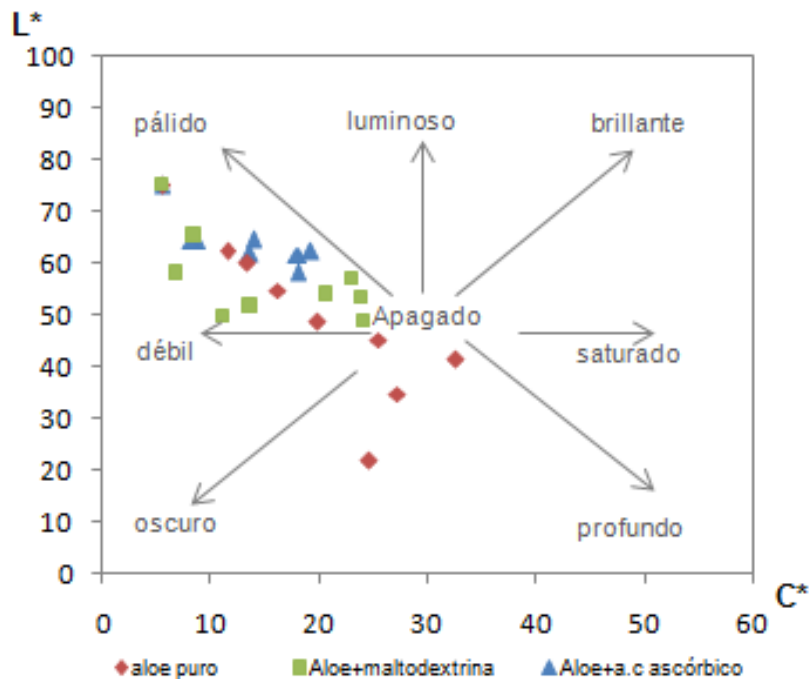


Figura 18. Evolución del tono de color durante el proceso de secado de aloe vera por radiación infrarroja

El bajo cambio en el tono con la adición de maltodextrina en este proceso de secado por Ventana refractiva lo explican Abonyi *et al.*, (1999) en un estudio con fresas y zanahorias que presentan menos degradación de color al ser tratadas con maltodextrina. Otras aplicaciones de la maltodextrina han sido estudiadas por Escalona (2004), quién logró obtener un colorante verde natural producto de la mezcla de luteína y enocianina encapsulado con maltodextrina. Este polisacárido ejerce una interacción con los grupos carboxilos libres, actúa como encapsulante evitando la acción con el oxígeno.

3.2 Características fisicoquímicas del aloe vera en polvo obtenido en equipo piloto de secado por radiación infrarroja

3.2.1 Humedad del producto

El contenido de humedad tiene un papel esencial en todos los aspectos del manejo general de cualquier tipo de polvo. En productos alimenticios en polvo, el contenido de humedad es importante, a menor humedad es mayor el tiempo de vida de anaquel, lo cual reduce costos y facilita el transporte. El gel de aloe vera fresco con tratamiento (adición 1g maltodextrina/1 g de sólidos totales y 0,07 g ácido cítrico/1 g de sólidos totales) utilizado en este estudio presentó un contenido de humedad inicial de 97,95 g de agua/100 g de producto de b.h. Al finalizar el proceso de deshidratación por radiación infrarroja se obtuvo un polvo que presentó una humedad entre 4,3 y 4,5 (g de agua/100 g de producto de b.h.). El contenido de humedad fue calculado por el método AOAC 934.06 (AOAC, 2007) el cual fue descrito en materiales y métodos. Los resultados obtenidos se presentan en la tabla 11.

Tabla 11. Contenido de humedad de aloe vera antes y después de deshidratar

Método de secado	Peso g		Contenido humedad: g de agua/100g de producto b.h. ^a		Agua retirada en g
	m _i	m _f	h _i	h _f	
RI – 1 mm	5.000	89,38 ± 1,6	97,952	4,33 ± 1	4910,62
RI – 3 mm	5.000	97,32 ± 0,5	97,952	4,53 ± 0,8	4902,68
Liofilizado	1.000	21,8 ± 0,5	97,952	6,14 ± 0,5	978,2

m_i: Peso inicial de la muestra, m_f: Peso final de la muestra, h_i: Contenido de humedad inicial base húmeda, h_f: Contenido de humedad final base húmeda. ^a Media de tres repeticiones.

La humedad es crítica para manejar, almacenar y procesar alimentos en polvo. Afecta cualquier propiedad secundaria como la densidad, la cohesividad, la adhesividad, la solubilidad (Ibarz y Barbosa-Cánovas, 2005). En este trabajo, los valores de humedad obtenidos para los dos espesores del lecho estudiados, se encuentran dentro de los parámetros establecidos en los productos en polvos, en los cuales se ha determinado que para su estabilidad, es importante que un producto en polvo contenga un contenido de humedad menor del 10% (Huntington, 2004).

3.2.2 Propiedades de reconstitución

Índice de solubilidad en agua

Dentro de las propiedades funcionales importantes de los alimentos en polvo se encuentra la hidratación, relacionada con la retención de agua y la solubilidad. El índice de solubilidad en agua (I.S.A.) indica el peso en gramos de sólidos solubles que se obtienen cuando un producto sólido es reconstituido en agua destilada. El polvo de aloe vera deshidratado por radiación infrarroja fue reconstituido de acuerdo con el contenido de humedad inicial (97,95%) contenidos en el gel de aloe vera con adición de maltodextrina en una relación másica equivalente 1 g maltodextrina/1 g de sólidos totales y 0,07 g ácido cítrico/1 g de sólidos totales. En la figura 19 se presenta el gel fresco y los geles reconstituidos obtenidos por radiación infrarroja y aloe liofilizado.



Figura 19. Geles de aloe vera reconstituidos

En la figura 20 se reportan los valores promedios de tres replicas del índice de solubilidad en agua del polvo de aloe vera a una temperatura de 20 y 40° C comparado con aloe vera obtenido por liofilización.

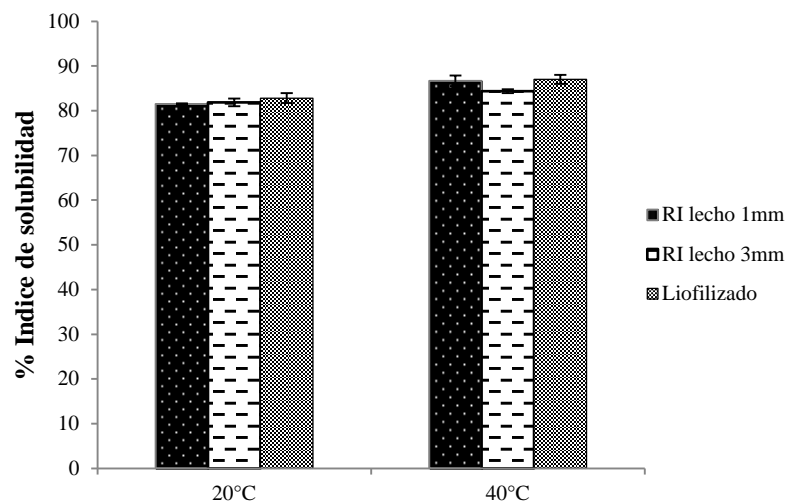


Figura 20. Índice de Solubilidad en Agua de aloe vera en polvo a 20 y 40°C

El polvo de aloe vera deshidratado por radiación infrarroja presentó un índice de solubilidad en agua (I.S.A.) a 20° C entre 81,51 - 81,88%, similar al producto obtenido por liofilización con un I.S.A. de 82,82%. Al reconstituir el polvo de aloe vera deshidratado por radiación infrarroja se obtuvo un gel con características similares al gel de aloe vera fresco. Del análisis de varianza (ANOVA) del I.S.A., se obtuvo un valor de $P < 0,05$, lo que significa que no existe influencia significativa del espesor del lecho de secado sobre el índice de solubilidad dentro del rango de espesor de lecho de 1 – 3 mm.

Por otra parte, al aumentar la temperatura de la solución rehidratante (agua) a 40° C aumenta el índice de solubilidad en un 5,7% en el polvo de lecho de 1 mm de espesor y un 2,5% en el polvo deshidratado a 3 mm de espesor. Las muestras presentaron un aumento en los valores de I.S.A con el aumento de temperatura de la solución rehidratante. Esto indica que el contenido de humedad de equilibrio aumentó cuanto mayor fue la temperatura de rehidratación. Esto se debe a que al aumentar la temperatura, se presentó un gradiente de calor entre el interior del alimento y el agua de inmersión, además se ejerce alta presión sobre los gases que pudiesen estar atrapados entre los espacios intercelulares, permitiendo que se muevan por difusión o capilaridad, tomando ese lugar el líquido hidratante (agua).

Sólidos precipitables en alcohol. Como prueba de calidad del gel de aloe vera, se determinó el contenido de sólidos precipitables en metanol existentes en el gel obtenido de la reconstitución del polvo de aloe secado por radiación infrarroja y liofilizado. Los resultados se presentan en la tabla 12:

Tabla 12. Contenido de sólidos precipitables en metanol

Parámetro	Secado radiación infrarroja lecho 1 mm		Secado radiación infrarroja lecho 3 mm		Liofilizado	
	g/dL	% sólidos totales precipitados	g/dL	% sólidos totales precipitados	g/dL	% sólidos totales precipitados
	0,285 ± 0,01	13,93 ± 0,15	0,390 ± 0,02	19,03 ± 1,22	0,362 ± 0,01	17,66 ± 0,81

Según Atherton (1997), al agregar KOH metanólico a soluciones de sábila, alrededor del 20 a 25% del total de sólidos precipitan, parte de éstos son los mucopolisacáridos que consisten en polisacáridos, glicoproteínas y sales de ácidos orgánicos. Dependiendo del origen de las hojas de sábila, las condiciones de cosecha y el proceso de las hojas, los polisacáridos pueden representar alrededor de 1/2 a 2/3 de los sólidos precipitables en metanol. Los polisacáridos del *Aloe* pueden ser medidos por medio de hexosas precipitables en alcohol. Sólo el 25% de los sólidos precipitables en alcohol son polisacáridos de hexosas, el resto es un complejo de cationes de metal (Ca⁺⁺ y Mg⁺⁺) y ácidos orgánicos tales como malato, oxalato y citratos. (Calzada y Pedroza, 2005)

El porcentaje de hexosas precipitables en el polvo de aloe vera obtenido por el método de secado por radiación infrarroja en lecho de 1mm y 3 mm se encuentra dentro del rango aceptable (menores del 20 % de sólidos totales) 3,5% y 4,75% respectivamente similar al obtenido en el ensayo del aloe liofilización; de acuerdo con lo estipulado por *The International Aloe Science Council, Inc.*; una elevación en el porcentaje se atribuye a polisacáridos extraños.

3.2.3 Viscosidad del gel de aloe vera

La medición de la viscosidad es importante para el control de la calidad y para obtener información sobre la estructura del alimento, así como para predecir los cambios estructurales durante los procesos de acondicionamiento y elaboración a los que son sometidos. En este estudio se evaluó la viscosidad de aloe vera fresco y de los geles reconstituidos obtenidos por radiación infrarroja y por liofilización; la medición de la viscosidad se realizó a una temperatura de 20°C. El aloe vera en polvo fue reconstituido de acuerdo con el método descrito en la determinación del índice de solubilidad a una temperatura de 20°C. Para analizar el comportamiento reológico del gel reconstituido frente al fresco, también se tuvo en cuenta la densidad, la cual se presentan en la tabla 13.

Tabla 13. Densidad de gel fresco y reconstituidos.

Muestra	Densidad (g/ml)
Aloe fresco	1,0047
Aloe liofilizado	1,0036
Aloe RI 1 mm	1,0027
Aloe RI 3 mm	1,0029

La figura 21, presenta el esfuerzo cortante en función de la velocidad de corte para el aloe vera fresco con adición de maltodextrina y ácido cítrico y gel reconstituido de aloe vera en polvo obtenido por radiación infrarroja y liofilización. La figura muestra que tanto el gel de aloe vera fresco, como los geles reconstituidos obtenidos por radiación infrarroja y liofilizado, son fluidos no newtonianos por presentar una relación no lineal entre la fuerza de cizalla (esfuerzo cortante) y el gradiente de cizalla (velocidad de corte).

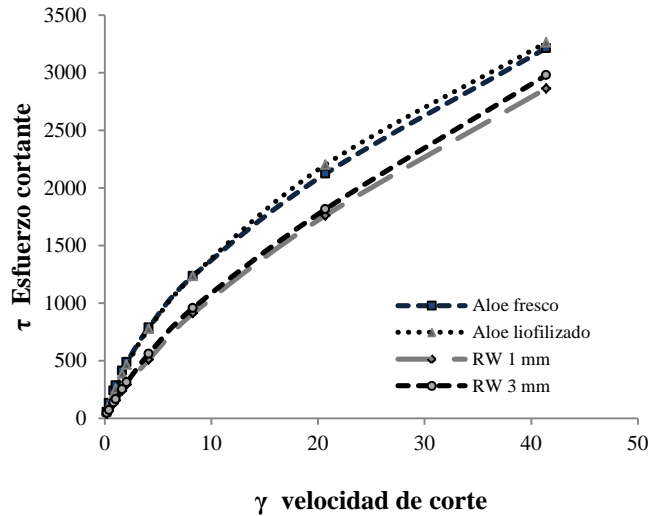


Figura 21. Efecto de la Velocidad de Corte en relación con el Esfuerzo Cortante

En estos fluidos también se evaluó la dependencia del tiempo y se encontró que los fluidos presentaron un comportamiento independiente del tiempo, es decir, la viscosidad aparente es independiente del proceso de cizallamiento previo. En el reograma se observa que el esfuerzo que debe hacer el gel fresco para fluir, es mayor que el gel reconstituido, por lo tanto el gel reconstituido fluye a mayor velocidad. Esto tiene relación con los valores más bajos obtenidos en la densidad por el gel reconstituido.

Asumiendo que el comportamiento reológico de los gels de aloe sigue la ley de potencia, se calcularon los parámetros K y n de acuerdo con la expresión de la ecuación 12, los valores de n y K obtenidos se presentan en la tabla 14:

Tabla 14. Valores de los índices de comportamiento y consistencia del gel de aloe vera obtenidos a partir del reograma

Parámetro	Gel fresco	Gel liofilizado	Gel obtenido por RI lecho 1mm	Gel obtenido por RI lecho 3mm
Índice de comportamiento (n)	0,736	0,748	0,820	0,824
Índice de consistencia (k)	2,4	2,38	2,17	2,21
R2	0,982	0,992	0,999	0,998

Los índices de comportamiento del flujo (n) tanto en el gel fresco, como los gels reconstituidos del polvo obtenidos por secado con liofilización y radiación infrarroja presentaron valores $n < 1$ lo cual corrobora que son fluidos pseudoplásticos. El gel fresco presentó mayor desviación del comportamiento newtoniano.

Los valores obtenidos en el índice de consistencia, son mejores en los gels rehidratados obtenidos por radiación infrarroja, esto indican que al presentar un menor valor en K, la suspensión del gel rehidratado por radiación infrarroja es menos estable que la suspensión del gel fresco.

En la figura 22 se presenta la curva de la viscosidad aparente en función de la velocidad de corte para el gel fresco y los geles reconstituidos, en ella se observa que la viscosidad de los fluidos se redujo a medida que aumenta la velocidad de corte, lo cual indica que es un fluido pseudoplástico.

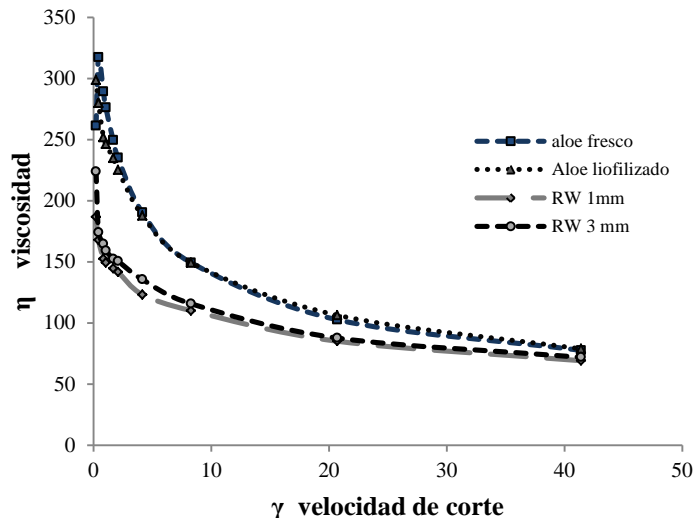


Figura 22. Viscosidad aparente en función de la velocidad de corte

La deshidratación puede alterar la estructura de los tejidos de aloe vera modificando sus propiedades fisicoquímicas (Simal *et al.*, 2000). Las características de reconstitución dependen del método de secado seleccionado y de los ajustes de las condiciones de secado. En el secado por liofilización se obtienen partículas de alimentos con estructura de poro abierto, que absorbe fácilmente el agua cuando son reconstituidos, por ello, pueden dar como resultado un producto con buenas propiedades de rehidratación y mejores propiedades instantáneas que otros métodos (Barbosa *et.*, al 2005), en este caso la viscosidad del gel liofilizado es similar al gel fresco.

Durante el proceso de evaporación del agua por el método secado por RI, la temperatura del producto alcanzó una temperatura aproximada de 65° C, lo cual puede influenciar la estructura del gel. Cohen y Yang, (1995), realizaron estudios sobre el aloe vera liofilización y encontraron que el aloe vera secado por liofilización mantiene la estructura de matriz de la pared celular, mientras que el secado con calor puede promover una falla en la red de los polisacáridos de la pared celular. La disminución en la viscosidad de los geles obtenidos por RI, pueden indicar que el proceso de secado por radiación infrarroja modificó algunas de las propiedades funcionales en el tejido del aloe vera.

3.2.4 Isotermas de adsorción

Las isotermas de adsorción obtenidas para el aloe deshidratado en las dos condiciones de espesor (1 y 3 mm), muestran la relación entre el comportamiento de la actividad del agua (a_w) y el contenido de humedad en condiciones de equilibrio en el producto deshidratado, a una temperatura de 18° C y presión atmosférica constante de 560 mm Hg. En la figura 23 se presentan las isotermas de adsorción de aloe vera seco obtenidos a dos lechos de secado. Del análisis de varianza (ANOVA) se obtuvo un valor de $P < 0,05$, lo que significa que no existe influencia significativa del espesor del lecho de secado sobre la isoterma de adsorción dentro del rango de lecho estudiado.

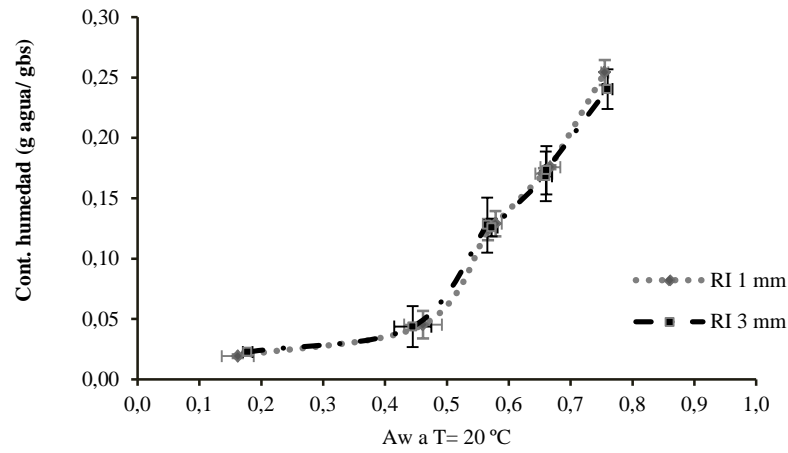


Figura 23. Isoterma de adsorción para aloe vera seco

Los datos experimentales fueron correlacionados con el modelo matemático de GAB el cual tiene un rango de aplicabilidad de 0,1-0,9 de a_w . La tabla 15 presenta los valores de las constantes X_m , C y K obtenidas con la ecuación propuesta por GAB, obtenidos al modelar la isoterma de adsorción a 18°C de aloe vera deshidratado. El valor de R^2 muestra el ajuste de los datos con el modelo de GAB.

Tabla 15. Constantes de la ecuación de GAB

Constantes	Valores	
	Lecho 1 mm	Lecho 3 mm
X_m	0,1402	0,1440
C	0,8194	0,9526
K	0,8714	0,8289
R^2	0,999	0,999

Con los datos obtenidos y presentados en la tabla 15, se obtuvo la isoterma de adsorción modelada con la ecuación de GAB la cual se presenta en la figura 24:

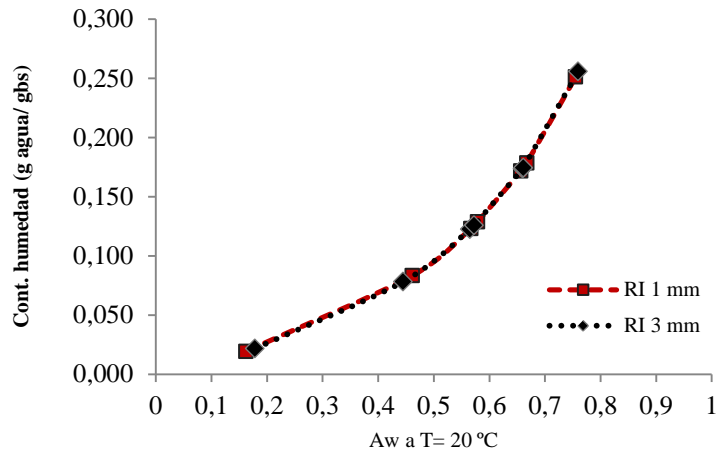


Figura 24. Isoterma de adsorción de aloe vera modeladas con la ecuación de GAB

Los resultados de este estudio presentaron que el modelo de GAB se ajustó a los datos experimentales y describen adecuadamente la isoterma de adsorción con un R^2 0,999. Confirmando que la ecuación de GAB es un buen modelo para predecir la humedad de equilibrio en el aloe vera deshidratado por radiación infrarroja.

El coeficiente X_m representa el contenido de humedad de la monocapa, estima la humedad a la cual las alteraciones en la calidad del producto son mínimas y presentó un valor de 0,1402 g agua/g de producto b.s y 0,1440 g agua/ g de producto b.s para el lecho de secado de 1 mm y 3 mm respectivamente, que equivale a una actividad de agua entre 0,60 y 0,70. La obtención de los valores de X_m es importante, toda vez que el agua está fuertemente ligada al alimento debajo de este valor y no se encuentra disponible para ninguna reacción deteriorativa ni como solvente ni como sustrato (Domínguez *et al.*, 2007) y se puede interpretar como un parámetro de las posibilidades de adsorción de humedad de los alimentos. Cuando el valor de X_m tiende a ser menor, refleja una disminución en el número de sitios activos debido a cambios físicos y químicos del producto (McMinn y Magee, 2003).

Los resultados de las isotermas de absorción indicaron que el polvo de aloe vera con un valor de a_w entre 0,44 y 0,46 manifestó sus capacidades de adsorción y pérdida de humedad con el tiempo, presentó un comportamiento de un material higroscópico (absorbente), cedió humedad al medio cuando fue sometido a una atmósfera del 11% (silica gel) y absorbió humedad cuando fue sometido a atmosferas mayores del 33% con las cuales no estaba en equilibrio, presentando un alto valor en la monocapa manifestando su tendencia a adsorber grandes cantidades de agua. Este valor de la monocapa tiene un interés importante a nivel comercial para la incorporación de aloe vera en polvo, en la formulación de productos de interés alimentario y cosmético, ya que puede reconstituirse fácilmente. Por otro lado, esto indica que a altas humedades puede sufrir humectación, pérdida de textura y presentar contaminación microbiológica principalmente debido al crecimiento de moho o bacterias que puede ocurrir si el contenido de humedad del producto supera el nivel crítico, lo cual sugiere

que para conservar las características físicas, químicas y microbiológicas, se emplee empaques con una mayor barrera al vapor de agua.

El valor de la humedad de monocapa obtenido en este estudio, fue superior a otros productos vegetales secos, como los reportados en la tabla 7. Los valores más altos de humedad de equilibrio indican que los sitios activos en la monocapa son mayores o que la cantidad de agua ligada presente en el producto en polvo es mayor, factor que repercute directamente en la estabilidad del producto durante el almacenamiento, ya que tiene mayor cantidad de agua para un mismo valor de a_w medido a la misma temperatura (Ceballos *et al.*, 2009). El valor de la monocapa indica la cantidad de agua capaz de interaccionar con todos los sitios de adsorción disponibles en un material seco (Velázquez *et al.*, 2000).

Resultados similares presentaron Vega *et al.*, (2007) en el valor de monocapa de aloe vera deshidratado por aire caliente (0,188 g agua/g de producto b.s.), explicando que el valor alto de la monocapa, probablemente se deba a que el polvo de aloe vera conserva algunas características de la planta fresca como son las adaptaciones xerofíticas. El aloe vera es una planta que presenta adaptaciones que pueden ser de tipo fisiológico que le permite absorber agua de soluciones edáficas progresivamente concentradas y adaptación de tipo anatómico que les permite conservar agua en los tejidos especiales de las plantas suculentas Montserrat, (1959). En estudio previo de la evaluación de isoterma de adsorción en cereales para el desayuno, Prieto, (2006) reportó que el maíz presentó un valor mayor de la monocapa que el trigo y el arroz, indicando que los productos con alto contenido de azúcares simples, presentan elevada capacidad de sorción a nivel de la monocapa relacionada con las propiedades típicas de sorción de estos en el cual a bajas a_w tienden a adsorber grandes cantidades de agua.

3.2.5 Color del gel reconstituido de polvo de aloe vera

Las coordenadas más representativas que describen el cambio de color en el gel reconstituido del polvo de aloe vera obtenido por radiación infrarroja a espesores de lecho de 1 y 3 mm en comparación con el gel fresco y el gel sometido a secado por liofilización, fueron las coordenadas b^* y L^* . Tanto el gel fresco como los geles reconstituidos presentaron valores positivos en la coordenada b^* , lo que indica la tonalidad en el espacio de los amarillos, como se presenta en la figura 25.

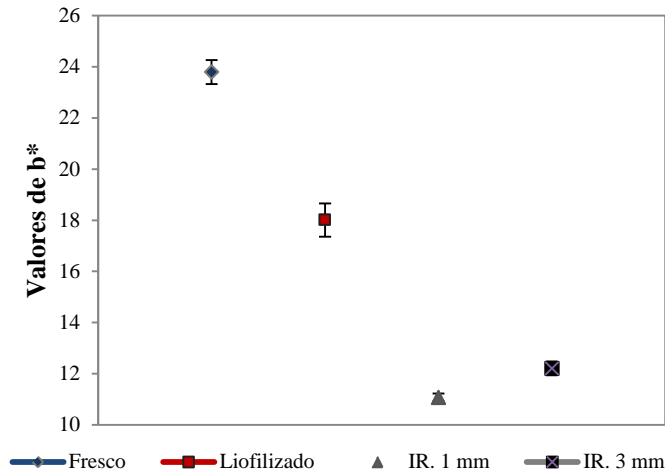


Figura 25. Valores de la Coordenada b*

La coordenada a*(+rojo, -verde) graficada en la figura 26, fue menos sensible al tratamiento de secado infrarrojo con respecto a la muestra inicial, con valores negativos que se encuentran en el espacio de los verdes. La gráfica 24, presenta que el lecho de secado (1mm, 3 mm), no tuvo influencia en la variación de la coordenada a*, presentando valores cercanos que se encuentran entre -0,181 y -0,282.

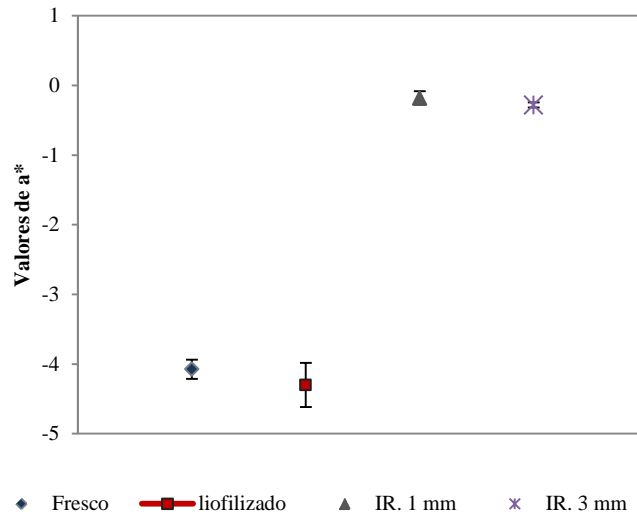


Figura 26. Valores de la Coordenada a* producto fresco y geles reconstituidos proceso de secado de aloe vera

Estudios preliminares, indicaron que el aloe vera sin tratamiento (aloe vera puro), presentó un cambio marcado en el comportamiento de la coordenada a* con respecto a la muestra inicial, con valores que presentaban desviación hacia los rojos, lo que se puede atribuir a un pardeamiento no enzimático. El aloe vera seco por radiación infrarroja tratado con

maltodextrina y ácido cítrico es más estable que el aloe deshidratado sin ningún tratamiento previo.

La figura 27, presenta la coordenada L^* indicador de la luminosidad. En la gráfica se observan valores crecientes en L^* , lo que indica que tanto el secado por infrarrojo como el secado por liofilizado, aumenta la luminosidad. El cambio más significativo lo presentó el aloe vera secado por radiación infrarroja con espesor de lecho de 1 mm, con un aumento de 6,45% con respecto a la muestra inicial, seguido del liofilizado con un 4,7% y del aloe vera secado por radiación infrarroja con lecho de secado 3 mm con una aumento de 4,36% con respecto a la muestra inicial.

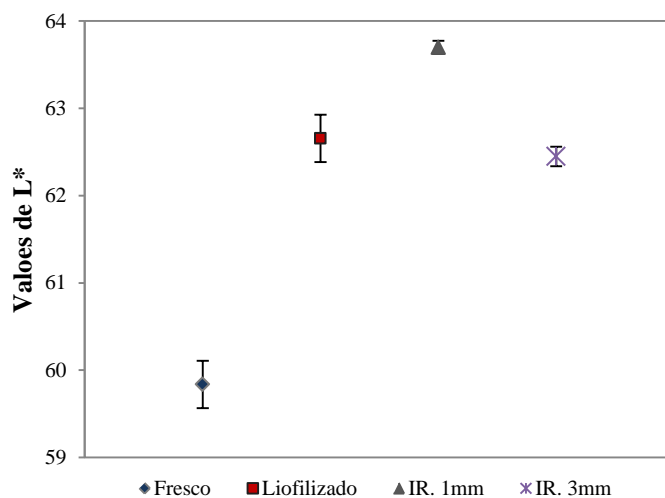


Figura 27. Efecto del secado por radiación infrarroja y liofilización sobre la luminosidad (L^*)

Topuz, *et al.*, (2009) presentaron resultados en el que la coordenada L^* también aumentó en muestras de paprika sometida a tratamiento de secado de RW, al igual que las muestras sometidas al secado por liofilización, aire caliente y secado natural. Las muestras de paprika que tuvieron menos alteraciones fueron las sometidas a liofilizados y a RW; esto puede atribuirse a que se presenta menor descomposición en los carotenoides y menor formación de colorantes no deseados debido a que en estos procesos las condiciones de secado no son tan drásticas en comparación con el secado por aire caliente y convección natural, así mismo, el método de secado por RW previene la oxidación y la descomposición debido a la menor exposición al oxígeno cuando tiene lugar a una intensa evaporación en la superficie del producto, así como un calentamiento reducido en la etapa final del secado por RW.

Resultados similares fueron informados en estudios previos, en los cuales el aumento en la coordenada L^* en productos sometidos a secado fue atribuido a un aumento en la concentración de pigmentos brillantes (Schweigert, *et al.*, 2005).

Principales características físico químicas de aloe vera en polvo y reconstituido seco de carácter comercial

A continuación, en la tabla 16 y 17 se presenta un resumen de las características fisicoquímicas tanto en el polvo de aloe vera como el gel reconstituido de aloe vera obtenido por el método de secado por radiación infrarroja teniendo en cuenta la ficha técnica de un polvo de aloe vera comercial como la presentada en las tablas 8 y 9.

Tabla 16. Ficha técnica del aloe vera en polvo obtenido por radiación infrarroja

Especificación	Secado radiación infrarroja lecho 1 mm	Secado radiación infrarroja lecho 3 mm
Apariencia	Polvo finamente granular	Polvo finamente granular
Olor	Característico del aloe vera	Característico del aloe vera
Color	Blanco opaco	Medianamente bronceado
Malla	70,13% pasante acumulado a través de la malla 80	69,39% pasante acumulado a través de la malla 80
Contenido de humedad	4,33 ± 1,03 % b.h.	4,53 ± 0,88 % b.h.

Tabla 17. Especificaciones contenidas en el aloe vera después de su reconstitución

Especificación	Secado radiación infrarroja lecho 1 mm	Secado radiación infrarroja lecho 3 mm
Característica	Solución clara	Solución clara
Sólidos precipitables en metanol	2.853 ± 31 mg/L	3.898 ± 250 mg/L
Reología	Fluye libremente	Fluye libremente
pH	4,78 ± 0,19	4,45 ± 0,41
Test de Yodo	Negativo	Negativo
Solubilidad	20°C = 81,74 ± 0,26	20°C = 81,88 ± 0,84
	40°C = 86,67 ± 1,17	40°C = 83,68 ± 0,87

Las características físico químicas del aloe vera obtenido por radiación infrarroja se encuentra dentro del rango de las especificaciones de las fichas técnicas comerciales, las cuales se basan en las normas de calidad estipuladas por *International Aloe Science Council* (IASC), asociación certificadora dedicada a velar por la calidad, integridad y estándares científicos de materias primas y productos de Aloe vera.

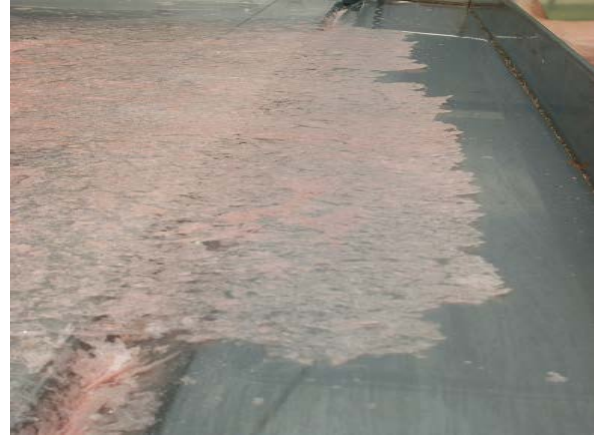
3.3 Otros procedimientos, resultados de operación del equipo para la obtención de aloe vera deshidratado – Escala planta piloto

3.3.1 Espesor de lecho y tiempo de secado

Uno de los principales parámetros para la operación del equipo es el espesor de lecho del material a secar. Para este estudio se evaluaron 2 niveles en el espesor de lecho, nivel 1: 1mm (pruebas preliminares con espesores menores a 1mm, dificultan el retiro del producto seco, porque queda adherido a la película) y con el fin de evaluar la capacidad de flujo del equipo y mejorar la eficiencia se definió como nivel 2: espesor de lecho de 3 mm.



Lecho menor a 1 mm de espesor



Lecho 3 mm de espesor

Figura 28. Retiro de aloe seco

En cada ensayo de deshidratación del gel de aloe vera se empleó como base de cálculo de producción un total de 5 kilogramos por lote en espesores de lecho de 1 y 3 mm. Los parámetros de operación se presentan en la tabla 18.

Tabla 18. Parámetros de operación para la deshidratación por radiación infrarroja

Espesor lecho (mm)	Peso inicial gel aloe (g)	Peso final polvo de aloe (g)	Rendimiento (%)	Tiempo de secado por lote (min)	Capacidad máxima de alimentación(kg)	Capacidad flujo de producto kg/h
1	5000	89,38 ± 1,6	83,5 ± 1,4	57 ± 3	5,7	6,5
3	5000	97,32 ± 0,5	90,7 ± 0,5	80 ± 3	17	12,7

Resultados de la evaluación del método de secado por Refractance window® en frutas y vegetales presentados por Abonyi (2002), indican que existe un límite para el espesor del lecho (1 mm), en los purés por encima de este límite el producto es difícil de secar. En este estudio se evaluó el incremento del lecho a 3 mm, el tiempo de secado para la obtención del producto aumentó en 25 minutos, sin embargo la capacidad de flujo por hora incremento 2 veces frente a lecho de 1 mm y se obtuvo un producto seco con una humedad similar y dentro de los parámetros establecidos para productos en polvo.

3.3.2 Perfil de temperatura

El perfil de temperatura del secado por radiación infrarroja, presenta el cambio de temperatura del gel aloe vera a lo largo del proceso, para las 2 condiciones de espesor (1 y 3 mm) en intervalos de cinco minutos, el medio de calefacción (agua) se mantiene alrededor de los 80 °C. Los datos obtenidos del perfil de temperatura se presentan en la tabla 19.

Tabla 19. Relación entre el agua de calefacción y la temperatura del producto

Tiempo de residencia	Temperatura agua de calefacción °C	Temperatura producto lecho 1 mm °C	Temperatura producto lecho 3 mm °C	LMTD*	
				1 mm	3 mm
0	18	18	18,0	49,2	50,2
5	42,7	43	41,0	36,3	38,4
10	42,5	45,6	42,2	34,8	36,6
15	42,8	45,6	43,6	34,6	36,7
20	45,1	47,9	44,0	32,4	34,4
25	47	48,8	48,1	29,3	31,4
30	48,1	53,3	49,1	27,5	30,9
35	48,4	54	49,2	26,8	29,9
40	49,8	55	52,0	24,4	27,0
45	54,3	58,3	55,0	21,6	23,5
50	55,6	59,5	57,0	20,3	21,8
55	59,1	60	58,4	-	21,1
60	81	-	60,5	-	20,0
65	80	-	60,5	-	20,2
70	82	-	61,1	-	19,5
75	80	-	61,8	-	17,6
80	81	-	63,9	-	-

Con los datos se graficaron, la temperatura del agua del proceso y la temperatura del producto en función del tiempo las cuales se presentan en la figura 29.

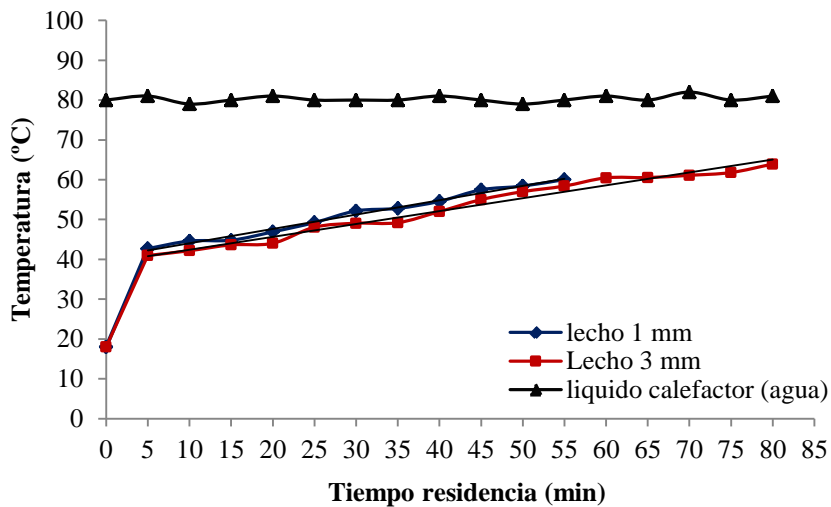


Figura 29. Perfil de temperatura en secado infrarrojo

La temperatura del producto va en aumento con el tiempo de secado. El cambio más notorio se presenta en los primeros cinco minutos debido al potencial de transferencia de energía ΔT de 62° C y a la diferencia de temperatura media logarítmica (LMTD) entre 49 y 50, superior al resto del proceso. En esta parte del proceso, la temperatura del producto aumenta en promedio 24° C.

El agua circula con un caudal de 400 litros/minuto lo que permite que la temperatura del medio de calefacción sea constante, alrededor de 80° C. En estas condiciones, en la figura 29 después de los primeros cinco minutos de iniciar el proceso, se aprecia una tendencia lineal en el aumento de la temperatura del producto (T_p) con relación al tiempo de proceso (t), por lo cual se puede establecer a partir de este tiempo de proceso una relación de acuerdo con la siguiente expresión:

- Ecuación para lecho de secado 1 mm: $T_{p1} = 0,361(t) + 40,4$
- Ecuación para lecho de secado 3 mm: $T_{p3} = 0,3323(t) + 39,2$

Teniendo en cuenta que la temperatura del producto es afectada por la temperatura del medio de calefacción, es importante controlar la temperatura del proceso para mantener la temperatura del producto en un nivel deseado. De esta relación se puede observar que hay poca diferencia en la temperatura que adquiere el producto en los dos espesores de lecho.

3.3.3. Balances alrededor del sistema de secado

- **Balance de materia**

Para determinar la capacidad de producción del equipo piloto deshidratador por radiación infrarroja se realizó el balance global de materia y se determino la cantidad de agua evaporada por hora. Los resultados del balance se presentan en la tabla 20.

Tabla 20. Balance de materia del sistema

Método de secado	Tasa de flujo de masa (Kg/h)			Sólidos		Tasa de evaporación (Kg/h)
	m_{ent}	m_{sal}	m_{per}	X_{ent}	X_{sal}	
RI – 1 mm	5,3	0,12	0,023	0,0204	0,96	5,18
RI – 3 mm	3,68	0,25	0,025	0,0204	0,96	3,6

m_{ent} : masa en la entrada del deshidratador, m_{sal} : masa en la salida del deshidratador, m_{per} : masa perdida adherida a la película, X_{ent} : fracción másica entrada, X_{sal} : fracción másica en la salida, m_w : tasa de evaporación.

La tasa de evaporación obtenida en el espesor de lecho de 1 mm, es similar a los resultados obtenidos por Abonyi; *et al* (1999) en equipo piloto RW, quienes obtuvieron una tasa de evaporación de 7,61 Kg/h en fresa sin aditivos, 6,75 Kg/h en puré de zanahoria y 4,46 Kg/h en fresa con maltodextrina. En espesor de lecho de 3 mm el equipo de secado es más eficiente, la tasa de evaporación aumenta en un 96%. Nindo, *et al.*, 2007, presentaron una tasa de evaporación promedio de 28,5 Kg/h en equipos RW tipo evaporadores, esto indica que con el equipo de secado RW con un ángulo de inclinación en el diseño, se obtienen condiciones de procesamiento más eficientes.

- **Balance de energía**

Para evaluar el desempeño del equipo se determinó la tasa de transferencia de calor por unidad de superficie; las pruebas de secado fueron realizadas en lotes de 5 kilogramos de gel de aloe vera en el equipo piloto de secado por radiación infrarroja.

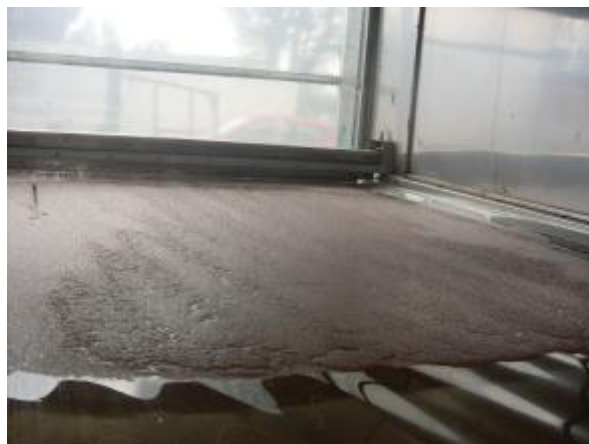


Figura 30. Proceso de secado de aloe vera lote de 5 kilogramos

La tabla 21, presenta los resultados del balance de energía alrededor del sistema obtenido en forma experimental:

Tabla 21. Balance de energía alrededor del sistema Q_{Exp}

Método de secado	Flujo másico (Kg/h)	Tasa de evaporación (Kg/h)	Transferencia de calor W				Q_{Exp} Total (W)
			Q Exp. usado por el producto		Q_P (W) Calor alrededores		
			Q_S (W)	Q_L (W)	Q_{P1} (piso)	Q_{P2} (pared)	
RI – 1 mm	5,3	5,18	207,05	3278,29	831,30	1078,17	5395
RI – 3 mm	3,68	3,6	154,03	2278,35	719,96	1257,57	4410

Q_S = Calor sensible producto, Q_L =Calor latente, Q_P = pérdidas alrededores

Para obtener 1 kilogramo de producto seco de aloe vera en lecho de secado con espesor de 1 mm se necesita 1017 W/Kg y para lecho de secado con espesor de 3 mm se necesita 1198 W/Kg. No existe gran diferencia en el consumo de energía, sin embargo de acuerdo con el balance de masa la capacidad de producción de secado con lecho de secado de 3 mm, es 96% más alta.

En la tabla 22 se presenta la verificación de los cálculos teóricos de diseño del equipo piloto de secado por radiación infrarroja.

Tabla 22. Balance de energía del sistema $Q_{\text{Teórico}}$ de diseño

Método de secado	Transferencia de calor W				Q_{EXP} Total (W)
	Q transferido a través de la película		Q_P (W) Calor alrededores		
	Q_{R2} (W)	Q_C (W)	Q_{P1} (piso)	Q_{P2} (pared)	
RI – 1 mm	3032	530	831,30	1078,17	5472
RI – 3 mm	3032	177	719,96	1257,57	5187

Q_{R2} = Calor por radiación, Q_C = Calor por conducción

La eficiencia del equipo se evaluó confrontando Q_{T1} obtenido de los datos experimentales y el Q_{T2} de datos teóricos de diseño.

$$E_T = \frac{Q_{T \text{ Experimental}}}{Q_{T \text{ Diseño}}}$$

Eficiencia del equipo de secado con 1 mm de espesor de lecho. $E_t = \frac{5395}{5472} = 0,98$

Eficiencia del equipo de secado con 3 mm de espesor de lecho. $E_t = \frac{4410}{5187} = 0,85$

Los resultados de los análisis indican una eficiencia térmica del 98% y 85% para espesor de lecho de 1 mm y 3 mm, respectivamente. La eficiencia térmica en el espesor de lecho de 3 mm es menor debido a que la base de cálculo experimental (5 kilogramos) en el equipo ocupa únicamente la tercera parte de la capacidad máxima de alimentación, por lo cual se presenta una subutilización del equipo.

Con respecto a las pérdidas de energía, parte del calor que genera el equipo de secado se disipa alrededor del sistema a través de las paredes 20% y el fondo 15%. La mayor pérdida se presenta alrededor de las paredes del equipo porque a pesar de tener un área de contacto menor, no cuenta con un aislante térmico como la fibra de vidrio que recubre el fondo del equipo. Por lo tanto, es recomendable aislar completamente el sistema. Se debe tener en cuenta que además se pueden presentar pérdidas de energía debido a la evaporación del agua caliente, principalmente en el extremo de la entrada del agua al fondo colector. Por otra parte, los resultados de cantidad de energía utilizada pudieron haber sido afectados porque no se tuvieron en cuenta las pérdidas de calor en el canal y tuberías.

Con los resultados presentados, es importante resaltar que se logró aumentar la eficiencia de secado, al aumentar el espesor de lecho 3 veces con respecto a lo reportado por la literatura, aumentando la tasa de evaporación en un 96% y se obtuvo un producto con características fisicoquímicas que se encuentran dentro de los parámetros establecidos para el polvo de aloe vera. Esto evidencia que el secado por radiación infrarroja tiene alta aplicabilidad en la deshidratación del gel de aloe vera.

4. CONCLUSIONES

Con la aplicación de la tecnología de secado por radiación infrarroja enfocada en la retención de los atributos de calidad de materiales de origen biológico y sensible al calor, se analizaron las principales características fisicoquímicas de interés comercial del aloe vera como contenido de humedad, solubilidad, viscosidad, color y estabilidad que evidencian su alta aplicabilidad y su aptitud de uso como producto en polvo en la industria alimenticia, cosmética, farmacéutica y su incorporación en diferentes matrices. Se obtuvo un producto en polvo finamente granular con atributos de calidad en el que se destacan las siguientes características:

En los dos espesores de lecho estudiados, se obtuvo un polvo que al ser reconstituido fluye libremente, que presenta alto índice de solubilidad en agua mayor que el 80%, similar al gel fresco, que lo convierten en un producto aceptable por el consumidor.

Los resultados presentan que la variable b^* es la más sensible durante el proceso de secado de aloe vera por radiación infrarroja. La variable b^* cambia 0,535 veces para el lecho de 1 mm y 0,487 veces para el lecho de 3 mm frente al parámetro inicial. Tanto el gel fresco como los geles reconstituidos presentaron valores positivos en la coordenada b^* , y valores negativos en la coordenada a^* . Con respecto al gel fresco, se presentaron valores crecientes en la luminosidad del gel reconstituido, el gel secado a espesor de lecho de 1 mm aumento de 6,45% con respecto a la muestra inicial, seguido del liofilizado con un 4,7% y del aloe vera secado por radiación infrarroja con lecho de secado 3 mm con una aumento de 4,36%. Los geles reconstituidos presentan atributos de color aceptables sin diferencias significativas al polvo de aloe obtenido por el método de secado por liofilización.

Los resultados de este estudio presentaron que el espesor del lecho de secado no influye en las características fisicoquímicas como contenido de humedad, solubilidad, viscosidad, isoterma de adsorción del aloe vera deshidratado por radiación infrarroja, lo que indica que no hay diferencias significativas en la estructura del gel seco dentro del rango de lecho de secado estudiado. Sin embargo de acuerdo con las condiciones de procesamiento, se obtuvo diferencias en la tasa de evaporación de 6,36 Kg/h y 12,44 Kg/h para 1 mm y 3 mm. Lo cual indica que a un espesor de lecho de secado de 3 mm es el recomendado porque aumenta la capacidad de producción 1,95 veces con respecto al lecho de secado de 1 mm.

El estudio realizado evidencia el potencial uso del método de secado por radiación infrarroja para la deshidratación de aloe vera al obtener un polvo y un gel reconstituido que tiende a formar la estructura del gel fresco, con características físicoquímicas que se encuentran dentro del rango de las especificaciones de fichas técnicas comerciales de productos certificados por las normas de calidad estipuladas por la IASC y similares a las obtenidas por el método de secado por liofilización.

RECOMENDACIONES

Con relación al aloe vera como materia prima y teniendo en cuenta que este gel cuando se expone al aire es muy susceptible al paldemiento, se recomienda realizar estudios de pre-acondicionamiento y estabilización del gel que permitan almacenar la materia prima por mayor tiempo y estudiar como el almacenamiento afecta sus características fisicoquímicas y actividad biológica.

Con respecto al producto seco obtenido: Las características físicas y químicas pueden ser vistas como una respuesta al cambio en el sistema del producto, sin embargo se recomienda realizar estudios específicos que corroboren la actividad biológica y propiedades funcionales del aloe vera en polvo secado por este método así evaluar otras variables de respuesta como actividad antioxidante y antimicrobiana.

Es necesario evaluar el comportamiento del polvo de aloe vera cuando es incorporación en diferentes matrices según su uso alimentario, cosmético o farmacéutico.

En cuanto al diseño del equipo se recomienda ajustar la velocidad de la banda en las que se disminuya el recorrido con el fin de poder realizar procesos continuos, que se ajusten a los tiempos de secado de las diferentes materias primas. El equipo cuenta con un tanque de recolección del agua caliente el cual no tiene un medidor de agua por lo tanto se recomienda incluir un medidor o automatizar el proceso de tal manera que cuando el tanque este lleno se active la bomba de agua caliente y se evite derrames de agua.

En cuanto al proceso de secado: En Colombia esta tecnología está siendo recién explorada y teniendo en cuenta la diversidad de productos de interés comercial, se recomienda realizar estudios para la obtención de polvos de diferentes frutas y otros productos que en presentación de polvo pueden ser de alto valor en el mercado local e internacional. El estudio sobre nuevas materias primas, abre las puertas para generación de nuevos conocimientos en la línea de secado de materiales de origen biológico y permite el desarrollo de nuevos productos.

Para futuros proyectos, se recomienda plantear nuevos diseños experimentales en el que se tenga en cuenta mayores combinaciones de las variables entre velocidad de la banda, espesor de lecho, temperatura de agua de calefacción y tiempo de secado, acordes al tipo de material a secar.

Teniendo en cuenta que la temperatura del medio calefactor es importante y que a mayor temperatura disminuye el tiempo de secado, se recomienda evaluar a nivel de planta piloto el efecto de temperaturas superiores a 80°C sobre las características de calidad diferentes materias primas.

El agua de calefacción recircula a un flujo de 400 litros/min. Con el fin de optimizar el proceso en cuanto a gasto de energía, se recomienda realizar estudios sobre el flujo del

agua de calefacción y su efecto sobre la temperatura del lecho de secado y la eficiencia del equipo.

AGRADECIMIENTOS

A la Universidad de La Sabana, a la Facultad de Ingeniería especialmente a Indira Sótelo por ser mi Maestra y tutora por su invaluable orientación, empeño y motivar el aprendizaje continuo, a Mauricio Pardo por su orientación y sugerencias. A Mauricio e Indira, por la confianza al permitirme hacer parte de este proyecto, al Proyecto Colciencias Código 029-2007 y a la empresa Dry-Tech por el apoyo brindado para la realización de este estudio.

A Clementina Cueto y los docentes de la Maestría por su apoyo incondicional. En general a todas las personas que trabajan en la Universidad de la Sabana por hacer posible que la educación y la investigación sean un proyecto de vida en el cual hay mucho que descubrir.

5. BIBLIOGRAFÍA

ABONYI, B., TANG, J., and EDWARDS, C.G. Evaluation of energy efficiency and quality retention for the Refractance Window™ drying system. Research Report, Washington State University, Pullman WA. Department of Biological Systems Engineering, Department of Food Science and Human Nutrition. 1999

ABONYI, B. I.; FENG, H.; TANG, J.; EDWARDS, C. G.; MATTINSON, D. S.; y FELLMAN, J. K. Quality retention in strawberry and carrot purees dried with Refractance Window™ system. *Journal of Food Science*. 2002. Vol. 67, pp. 1051–1056. Disponible en: <<http://www.nnmi.ca/pdf/education/Research%20Article.%201.pdf>> ISSN: 0737-3937 print/1532-2300 [online]. doi: 10.1080/07373930601152673

A.O.A.C. Official Methods of Analysis. Association of Analytical Chemists. Washington, D.C. 2007

AMRANI, M.; y BRIGUI, J. Impacto del proceso de liofilización en la calidad de las fresas. *Ingeniería e Investigación*. 2007, Vol. 27, n. 002, pp. 51-55. ISSN (Versión impresa) 0120-5609.

ARISTIZÁBAL, J. SÁNCHEZ, T. Guía técnica para producción y análisis de almidón de yuca. Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación. Roma, 2007. ISBN 978-92-5-305677-4

ATHERTON, P. The essential Aloe vera the actions and the evidence. 1997, 2 Ed. Mill Enterprises, Reino Unido. 355 p.

BOATELLA, J. Codony, R. López, P. Química y Bioquímica de los alimentos II. 2004. Publicacions i Edicions de la Universitat de Barcelona. España. ISBN: 84-475-2838-04

BOZZI, A., PERRIN, C., AUSTIN, S. y ARCE VERA, F. Quality and authenticity of commercial aloe vera gel powders. *Food Chemistry*, 103, 22-30. 2006

CALZADA, A. y PEDROZA, A. Evaluación físico-química del gel y jugo de la hoja de sábila (*A. Barbadosensis*) en diferentes prácticas de manejo. *Revista Chapingo. Serie Zonas Áridas* [en línea]. 2005, Vol. 4 No. 2. [Fecha de consulta: 20 Octubre 2009]. Disponible en: <http://www.chapingo.uruza.edu.mx/rebiza.pdf> ISSN: 0186-3231

CANDELAS, M. G.; ALANÍS, M. G.; BAUTISTA, M.; DEL RÍO, F.; y GARCÍA, C. Contenido de licopeno en jugo de tomate secado por aspersión. *Revista Mexicana de Ingeniería Química*. 2005, Vol.4, pp. 299-307. Disponible en: <<http://redalyc.uaemex.mx/pdf/620/62040309.pdf>>.

CASP, A.; y ABRIL, J. Procesos de conservación de alimentos. 2003. 2 ed. Mundi-Prensa. España. 500 p.

CASTRO, A.; RODRÍGUEZ, L.; y VARGAS, E. Secado de uchuva (*Physalis peruviana* L) por aire caliente con pretratamiento de osmodeshidratación. *Vitae, Revista de la Facultad de Química Farmacéutica*. Universidad de Antioquia, Medellín, Colombia. 2008, Vol. 15, n. 2, pp. 226-231. ISSN 0121-4004.

CEBALLOS, A.; GIRALDO G.; y ORREGO C. Evaluación de varios modelos de isotermas de adsorción de agua de un polvo de fruta deshidratada. *Revista Vector*. 2009, Vol. 4, pp. 107 – 116.

CIURZYŃSKA, A.; y LENART, A. The influence of temperature on rehydration and sorption properties of freeze-dried strawberries *Croat. J. Food Sci. Technol.* 2009, Vol. 1, n. 1, pp. 15-23.

CLARKE, P. REFRACTANCE WINDOW TM - “DOWN UNDER”. *Drying 2004 – Proceedings of the 14th International Drying Symposium (IDS)*. 2004, Vol. B, pp. 813-820. Disponible en: <<http://www.feq.unicamp.br/~ids2004/volB/pp%20813-820.pdf>>.

De la FUENTE, S.; RODRÍGUEZ, G.; RIERA, E.; GALLEGO, J.A.; y MULET A. Desarrollo de un Sistema de Secado mediante Lecho Fluido Asistido por Ultrasonidos de Potencia. *Acustica*. 2004, pp.1-8, paper ID: 144.

DELGADO, E.; y ORREGO, C. Isotermas de sorción y secado de pectinas de café. *Revista Colombiana de Física*. 2002. Vol. 34, n. 2, pp. 541-544. Disponible en: <http://www.rcf-online.org/vol34_2/articulos/pdf/3402541.pdf>

DEVI, R.; y RAO, M. Cosmeceutical applications of Aloe vera. *J. Nat. Prod. Radiance*, 2005, Vol. 4, n. 4, pp. 322-327. IPC Code; Int. cl. - A61K 7/00, A61K 35/78, A61P 17/00.

DOMÍNGUEZ-DOMÍNGUEZ, S.; DOMÍNGUEZ-LÓPEZ A.; GONZÁLEZ-HUERTA, A.; y NAVARRO-GALINDO, S. Cinética de imbibición e isotermas de adsorción de humedad de la semilla de jamaica (*hibiscus sabdariffa* l.). *Revista Mexicana de Ingeniería Química*. 2007, Vol. 6, n. 3, pp. 309-316. Disponible en: <<http://redalyc.uaemex.mx/pdf/620/62060310.pdf>>, ISSN (Versión impresa): 1665-2738.

EARLE, R. Ingeniería de los alimentos. 2ª ed. España: Ed. Acribia S.A. 1998.

ESCALONA, S. Encapsulados de luteína-enocianina y su aplicación en alimentos. Trabajo de grado. Departamento de ciencia de los alimentos y Tecnología Química. Universidad de Chile. 2004.

ESHUN, K.; HE, Q. Aloe vera: A valuable ingredient for the food, pharmaceutical and cosmetic industries – A review. *Critical Review. J. Food Science and Nutrition*. 2004, Vol 44, pp. 91-96.

FEMENIA, A; SANCHEZ, E.S.; SIMAL, S.; y ROSSELLO, C. Compositional features of polysaccharides from Aloe vera (*Aloe barbadensis* Miller) plant tissues. *J. Carbohydrate*.

Polymers, 1999, Vol 39, pp. 109-117. ISSN 0144-8617, doi:10.1016/S0144-8617(98)00163-5.

GABAS, A. TELIS, J. GIRALDO, G. y TELIS, V. Propiedades termodinámicas de sorción de agua de la pulpa de lulo en polvo con encapsulantes. *Ciencia y Tecnología de Alimentos*. Campinas, 29(4): 911-918, 2009. ISSN 0101-2061

GARCÍA-GUTIÉRREZ, C.; GONZÁLEZ-MALDONADO, M. B.; OCHOA-MARTÍNEZ, L. A.; y MEDRANO-ROLDÁN, H. Microencapsulación de jugo de cebada verde mediante secado por aspersión. *Cienc. Tecnol. Aliment.* 2004, Vol. 4, n. 4, pp 262-266. Disponible en: <<http://redalyc.uaemex.mx/redalyc/pdf/724/72440406.pdf>> ISSN 1135-8122.

GAVRILA, C.; GHIAUS, A.; y GRUIA, I. Heat and Mass Transfer in Convective Drying Processes. Excerpt from the Proceedings of the COMSOL Conference 2008.

GÓMEZ, H.; PARRA, J.; de SANTOS, J.; y RENÉ, F. Modelo computacional para la liofilización de alimentos de geometría finita. *e-Gnosis* [en línea] 2003, [fecha de consulta: 1 de septiembre de 2010] Disponible en: <<http://redalyc.uaemex.mx/redalyc/src/inicio/ArtPdfRed.jsp?iCve=73000111>> ISSN 1665 - 5745

GONZÁLEZ, A; ESPINOZA, A.; CAÑIZARES, A.; y MÉNDEZ, J. Obtención de un polvo de ají dulce (*Capsicum chinense*) producido mediante deshidratación por aire forzado. *Revista Científica UDO Agrícola*. 2008, Vol. 8, n. 1, pp. 118-126. Disponible en: <<http://www.bioline.org.br/request?cg08015>>.

GOULA, A.M.; y ADAMOPOULOS, K. G. A new technique for spray drying orange juice concentrate. *Innovative Food Science and Emerging Technologies*. 2010, Vol. 11, pp. 342–351. ISSN 1466-8564 doi:10.1016/j.ifset. 2009. 12.001

HABEEB, F. SAHKIR, E.; BRADBURY, F; CAMERON P.; TARAVATI, MR.; DRUMMOND AJ.; GRAY, AI; FERRO VA. Screening methods used to determine the antimicrobial properties of Aloe Vera inner gel. *Methods*. 2007, 42 (4): 315-320.

HE, Q.; CHANGHONG, L.; KOJO, E. y TIAN, Z. Quality and safety assurance in the processing of *Aloe vera* gel juice. *Food Control*. 2005, 16, 95-104.

HERNÁNDEZ, J.; y QUINTO, P. Secado de medios porosos: una revisión a las teorías actualmente en uso Científica [en línea] 2005, 9 (abril-junio): [fecha de consulta: 6 de agosto de 2010] Disponible en: <<http://redalyc.uaemex.mx/redalyc/src/inicio/ArtPdfRed.jsp?iCve=61490203>> ISSN 1665-0654

HOLMAN, J.P. Transferencia de calor. Octava ed. España. McGraw Hill. 1998.

HONORATO, G.; OLIVEIRA, E.; de S. ALSINA, O. y MAGALHAES, M. Estudio del Proceso Cinético del Secado de Cefalotórax de Camarón. *Inf. tecnol.* [online]. 2005, vol.16,

n.4, pp. 3-10. Disponible en:
<http://www.scielo.cl/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0718-07642005000400002&lng=es&nrm=iso>. ISSN 0718-0764. doi: 10.4067/S0718-07642005000400002.

HU, Y.; XU, J.; y HU, Q. Evaluation of antioxidant potential of Aloe vera (*Aloe barbadensis* Miller) extracts. *J. Agric. Food Chem.* 2003, vol. 51, n. 26, pp. 7788-7791. Disponible en <<http://pubs.acs.org/doi/abs/10.1021/jf034255i>>, doi: 10.1021/jf034255i

HUNTINGTON, D. H. The influence of the Spray Drying Process on Product Properties. *Drying Technology.* 2004, 22(6). 1261-1287.

IBARZ, A. y BARBOSA-CANOVAS G. Operaciones unitarias en la ingeniería de alimentos. Madrid, España: Mundi-Prensa. 2005

KAPSALIS, J. G. 1987. Influences of Hysteresis and temperature on moisture sorption isotherms. In *Water activity: theory and applications to food*. Rockland, L. B. and Beuchat, L. R. (Ed.). p 173-213. Marcel Dekker, Inc. New York, U.S.A.

KREITH, F. y BOHN, M. Principios de transferencia de Calor. 6ª. ed. México: Thomson Learning. 2001. 700 p. ISBN 970-686-063-0

KUDRA, T. y MUJUMDAR, A. Advanced Drying Technologies. 2009. CRC Press, Boca Raton. 412 p.

LABUZA, T. IFT Short course: Water activity and sorption isotherms. University of Minnesota. USA 2002.

LEWIS, M. J., ZAPICO, J. y BARRIO, J. P. Propiedades físicas de los alimentos y de los sistemas de procesado. Acribia, D.L 1993. 494 p.

MAGOON R., 1986, US Patent 4.631.837.

Manual de uso de Viscosímetro Brookfield Engineering Labs., Inc.

MARQUES, L.; PRADO, M.; y FREIRE, j. Rehydration characteristics of freeze-dried tropical fruits. *LWT - Food Science and Technology.* 2009, 42 (7), pp. 1232-1237

MARTÍNEZ , R.; y MORALES, U. Estudio de la deshidratación del maguey (*Agave atrovirens* Karw) para la obtención de un producto seco con alto contenido de Fructooligosacáridos. 2007, pp. 11-19

MARTÍNEZ, N.; ANDRÉS, A.; CHIRALT, A.; y FITO, P. Termodinámica y cinética de sistemas alimento entorno. Servicio de Publicaciones, Universidad Politécnica de Valencia. Ref. 98.4034, 1998.

McCONAUGHY, S. D.; STROUD, P. A.; BOUDREAUX, B.; HESTER, R. D.; y McCORMICK, C. L. Structural characterization and solution properties of a galacturonate polysaccharide derived from aloe vera capable of in situ gelation. *J. Biomacromolecules*. 2008, Vol. 9, pp. 472–480. doi: 10.1021/bm7009653.

McMINN, W. A. M., & MAGEE, T. Thermodynamic properties of moisture sorption of potato. *Journal of Food Engineering*, 2003, 60, 157-165.

NI, Y.; TURNER, D.; YATES, K. M.; y TIZARD, I. Isolation and characterization of structural components of Aloe vera L. leaf pulp. *Int. Immunopharmacol.* 2004, Vol 4, pp. 1745-1755. ISSN 1567-5769, doi:10.1016/j.intimp.2004.07.006

NINDO, C. I.; y TANG, J... Refractance Window dehydration technology: A novel contact drying method. *Drying Tech.* 2007. Vol. 25, n. 1, pp. 37-48. Disponible en: <<http://www.bsyse.wsu.edu/tang/Previouswebsite/Resources/pdfdocs/articles-published/tang133a.pdf>> ISSN: 0737-3937 print/1532-2300 [online], doi: 10.1080/07373930601152673.

NINDO, C. I.; TANG, J.; y POWERS, J. R. Influence of Refractance Window® evaporation on quality of juices from small fruits. *LWT-J. Food Science & Technology*. 2006, Vol. 40, pp. 1000–1007. ISSN 0023-6438, doi:10.1016/j.lwt.2006.07.006.

NINDO, C. I.; TANG, J.; POWERS, J. R.; y BOLLAND, K. Energy consumption during Refractance Window® evaporation of selected berry juices. *International Journal of Energy Research*. 2004, Vol 28, n. 12, pp. 1089–1100. Disponible en: <<http://www.bsyse.wsu.edu/tang/Previouswebsite/Resources/pdfdocs/Novel-Drying/tang97.pdf>>, doi: 10.1002/er.1017.

NINDO, C. I.; SUN, T.; WANG, S. W.; TANG, J.; y POWERS, J. R. Evaluation of drying technologies for retention of physical quality and antioxidants in asparagus (*Asparagus officinalis*, L.). *LWT- J. Food Science and Technology*, 2003, Vol. 36, n. 5, pp. 507-516. Disponible en: <<http://sednanutra.com/pdf/education/Research%20Article.%203.pdf>>, ISSN 0023-6438, doi: 10.1016/S0023-6438(03)00046-X

OCAMPO, A. Modelo cinético del secado de la pulpa de mango. *Revista Escuela de Ingeniería de Antioquia*. 2006. n. 5 pp. 119-128. ISSN 1794-1237

PACHANON, Chaidan. A study of the elements in *aloe vera* powder by Neutron activation analysis. Tesis (Master of Radiological Science). Tailandia. Mahidol University, Faculty of Graduate Studies, 2005.

PARDO, M. TESONE, D. Informe técnico y financiero final. Secretaría Distrital De Desarrollo Económico. Asociación Colombiana para el Avance de La Ciencia Colciencias. 2009

PINTO, R. Estudios visando a síntese de híbridos de Tocoferol com ácido ascórbico. Trabajo de grado de maestría, Programa de Pós-graduação em Química. Universidade Federal de Pernambuco. 2003

PRIETO, F. GORDILLO, A., PRIETO, J., GÓMEZ, C., ROMÁN, A. Evaluación de las isotermas de sorción en cereales para desayuno Superficies y vacío [en línea] 2006, 19 (marzo): [fecha de consulta: 22 de junio de 2009] Disponible en: <<http://redalyc.uaemex.mx/redalyc/src/inicio/ArtPdfRed.jsp?iCve=94219103>> ISSN 1665-3521

RAMACHANDRA, C.T.; y SRINIVASA, P. Processing of Aloe vera gel: a review. *Am. J. Agric. Biol. Sci.* 2008, Vol 3, n. 2, pp. 502–510. Disponible en: <<http://www.akademik.unsri.ac.id/download/journal/files/scipub/AJAB32502-510-16082009.pdf>>, ISSN 1557-4989.

RIVERA, G., MERCADO, I., POOL, J.E.M. y CARDÓS, A. Secado por liofilización del gel de sábila: efecto de la altura de la matriz. III Reunión Estatal de Investigación Agropecuaria, Forestal y Pesca. México. Instituto Tecnológico de Mérida- Universidad Autónoma de Campeche. 2006

RIVERO, R. Rodríguez, E. MENÉNDEZ, R. FERNÁNDEZ, J. DEL BARRIO, G. GONZÁLEZ, M. Obtención y caracterización preliminar un extracto de Aloe vera L. con actividad antiviral. *Rev Cubana Plantas Medic* 2002; 7: 32-38

RODRIGUEZ, I. SANTANA, O. RECIO, O. y FUENTES, M. Beneficios del Aloe Vera L. (sábila) en las afecciones de la piel. *Rev Cubana Enfermer* [online]. 2006, vol.22, n.3. Disponible en: <http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0864-03192006000300004&lng=es&nrm=iso>. ISSN 0864-0319.

RODRÍGUEZ, E. QUINTERO, A. ALCALÁ, L. y OSPINA, B. Reología de suspensiones preparadas con harina precocida de yuca. *Ingeniería y desarrollo* [en línea] 2006, (enero-junio): [fecha de consulta: 30 de septiembre de 2009] Disponible en: <<http://redalyc.uaemex.mx/redalyc/src/inicio/ArtPdfRed.jsp?iCve=85201902>> ISSN 0122-3461

SALAZAR E., HERNÁNDEZ, H. OLIVER, M. y ZAMBRANO M. Evaluación de parámetros termodinámicos en productos biológicos. Depto. de Graduados e Investigación en Alimentos. Departamento Ingeniería Bioquímica. Escuela Nacional de Ciencias Tecnológicas. Instituto Politécnico Nacional. Vol. 5 (1), 57-62. México. 1994.

SANZANA, Sigrid. Viabilidad del desarrollo de alimentos funcionales frescos por incorporación de aloe vera a la matriz estructural de endibia (*Cichorium intybus* L. var. *foliosum*), brócoli (*Brassica oleracea* var. *italica*), coliflor (*Brassica oleracea* var. *botrytis*) y zanahoria (*Daucus carota* L.) mediante la técnica de impregnación a vacío. Tesis Doctoral. Valencia, España: Universidad Politécnica de Valencia, Instituto Universitario de Ingeniería de Alimentos para el Desarrollo, 2010

SAVARESE, M.; 2003, US Patent, 6.539.645.

SERRANO, M.; VALVERDE, J.; GUILLÉN, F.; CASTILLO, S.; MARTÍNEZ-ROMERO, D.; y VALERO, D. Use of Aloe vera gel coating preserves the functional properties of table grapes. *J. Agric. Food Chem.*, [online]. 2006, vol 54, n. 11, pp. 3882-3886. Disponible en: <<http://pubs.acs.org/doi/abs/10.1021/jf060168p>>, ISSN 3882-6, doi:10.1021/jf060168p.

SHI, J.; PAN, Z.; McHUGH, T.; WOOD, D.; HIRSCHBERG, E.; y OLSON D. Drying and quality characteristics of fresh and sugar-infused blueberries dried with infrared radiation heating. *LWT - Food Science and Technology*. 2008, Vol. 41, pp. 1962-1972 Disponible en: <<http://ddr.nal.usda.gov/dspace/bitstream/10113/25724/1/IND44123278.pdf>>. ISSN 0023-6438, doi:10.1016/j.lwt.2008.01.003.

SIERRA, Aída. Desarrollo de un prototipo de bebida de sábila (*Aloe vera barbadensis* Miller) y naranja. Tesis (Ingeniero Agrónomo). Honduras: Zamorano, 2002.

SILVA, M. A.; SOBRAL, P. J. A.; KIECKBUSCH, T.G. State diagrams of freeze-dried camu-camu (*myrciaria dubia* (hbk) mc vaugh) pulp with and without maltodextrin addition. *Journal of Food Engineering*, v. 77, p. 426-432, 2006.

SIMAL, S.; FEMENIA, A.; LLULL P.; y ROSSELLO C. Dehydration of Aloe vera: simulation of drying curves and evaluation of functional properties. *J. Food Eng.*, 2000, Vol 43, pp. 109-114. ISSN 0260-8774 doi: 10.1016/S0260-8774(99)00139-9.

SCHWEIGGERT, U., MIX, K., SCHIEBER, A., & CARLE, R. An innovative process for the production of spices through immediate thermal treatment of the plant material. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 2005, 6(2), 143-153.

TANG, J.; FENG, H.; y SHEN, G. Drum Drying. *Encyclopedia of Agricultural, Food, and Biological Engineering*. pp. 211-214. doi: 10.1081/E-EAFE 120007091

TOPUZ, A.; FENG, H.; y KUSHAD, M. The effect of drying method and storage on color characteristics of paprika *LWT - Food Science and Technology*. 2009, Vol. 42, pp. 1667-1673. ISSN 0023-6438, doi:10.1016/j.lwt.2009.05.014

URIBE, E.; MIRANDA, M.; LEMUS, R.; y VEGA-GÁLVEZ, A. Moisture Adsorption and Desorption Isotherms of Aloe Vera (*Aloe Barbadensis* Miller) and Determination of Sorption Heats. 2008. *International Journal of Food Engineering*: Vol. 4 : Iss. 4, Article 12. <<http://www.bepress.com/ijfe/vol4/iss4/art12>>. doi: 10.2202/1556-3758.1262.

VALLOUS, N. A.; GAVRIELIDOU, M.; KARAPANTSIOS, T. D.; y KOSTOGLU, M. Performance of a double drum dryer for producing pregelatinized maize starches. *Journal of Food Engineering*. 2002. Vol. 51, pp. 171-183. Disponible en:

<http://users.auth.gr/~karapant/tdk/Publications/files/Valous_et_al_2002.pdf>. ISSN 0260-8774, PII: S0260-8774 (01) 00041-3.

VEGA-Mercado, H, GONGORA-Nieto, M.M. and BARBOSA-Canovas, G.V. Advances in dehydration of foods, *Journal of Food Engineering*. 2001, 49, pp. 271-289

VEGA, A.; AMPUERO, N.; DIAZ, L., y LEMUS, R. El Aloe vera (*Aloe barbadensis* Miller) como componente de alimentos funcionales. *Rev. chil. nutr.* [online]. 2005, Vol.32, n.3, pp. 208-214. Disponible en: <http://www.scielo.cl/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0717-75182005000300005&lng=es&nrm=iso>. ISSN 0717-7518, doi: 10.4067/S0717-75182005000300005.

VEGA, A.; URIBE, E.; LEMUS, R.; y MIRANDA, M. Hot-air drying characteristics of *Aloe vera* (*Aloe barbadensis* Miller) and influence of temperature on kinetic parameters. *LWT-J. Food Science & Technology*. 2007, Vol. 40, pp. 1698–1707. ISSN 0023-6438, doi:10.1016/j.lwt.2007.01.001.

VEGA, A.; LARA, E.; y LEMUS, R. Isotermas de adsorción en harina de maíz (*Zea mays* L.). *J. Ciênc. Tecnol. Aliment., Campinas*. 2006, Vol. 26, n. 4, pp. 821-827.

VELÁZQUEZ, G. “Estudio de los Cambios Estructurales en Películas Poliméricas en Función de la Temperatura y Humedad Relativa.” Ph.D. Dissertation. DIPA, Universidad Autónoma de Querétaro. February 2000.

ZHANG, M; TANG, J.; MUJUMDAR, A.S.; y WANG, S. Trends in microwave related drying of fruits and vegetables. *Trends in Food Science & Technology*. 2006, Vol. 17, pp. 524-534 Disponible en: <<http://www.wsu.edu/~sjwang/mw-dry-rev.pdf>>. ISSN 0924-2244, doi:10.1016/j.tifs.2006.04.011

ANEXOS

ANEXO 1. Tablas de datos para determinar el Índice de Solubilidad en Agua (I.S.A.) de aloe vera en polvo a 20 y 40°C.

Método de secado	Solubilidad a 20°C			Solubilidad a 40°C		
	Replicas	Promedio	desviación	Replicas	Promedio	desviación
RI – 1 mm	81,59	81,51	0,13	87,94	86,68	1,17
	81,36			85,62		
	81,57			86,47		
RI – 3 mm	81,17	81,88	0,85	83,89	84,38	0,44
	82,82			84,49		
	81,65			84,75		
Liofilizado	83,98	82,82	1,10	86,01	87,02	0,99
	82,7			87,99		
	81,79			87,05		

ANEXO 2. Datos y cálculos realizados para el análisis de viscosidad, los valores corresponden al promedio de tres réplicas.

- **Valores obtenidos de la lectura del viscosímetro Brookfield para aloe vera fresco**

Velocidad de giro R.P.M.	M (torque)	W	τ esfuerzo cortante (dinas/cm ²)	γ velocidad corte (1/s)	η viscosidad(poise)
0,5	0,7	0,05236	54,08	0,2070	261,2755
1	1,7	0,10472	131,35	0,4140	317,2631
2	3,1	0,20944	239,51	0,8280	289,2693
2,5	3,7	0,2618	285,87	1,0350	276,2055
4	5,4	0,41888	413,35	1,6560	249,6114
5	6,3	0,5236	486,75	2,0700	235,1479
10	10,2	1,0472	788,07	4,1400	190,3579
20	16,0	2,0944	1236,19	8,2799	149,3003
50	27,5	5,236	2124,70	20,6998	102,6439
100	41,6	10,472	3214,10	41,3995	77,6361
100	41,5	10,472	3206,37	41,3995	77,4495
50	26,7	5,236	2062,89	20,6998	99,6579
20	14,4	2,0944	1112,57	8,2799	134,3703
10	8,9	1,0472	683,77	4,1400	165,1634
5	5,3	0,5236	405,63	2,0700	195,9566
4	4,4	0,41888	336,09	1,6560	202,9551
2,5	2,9	0,2618	220,20	1,0350	212,7529
2	2,4	0,20944	185,43	0,8280	223,9504
1	1,5	0,10472	115,89	0,4140	279,9380
0,5	0,7	0,05236	54,08	0,2070	261,2755

- **Valores obtenidos de la lectura del viscosímetro Brookfield para aloe vera liofilizado**

Velocidad de giro R.P.M.	M (torque)	W	τ esfuerzo cortante (dinas/cm ²)	γ velocidad corte (1/s)	η viscosidad(poise)
0,5	0,8	0,05236	61,81	0,2070	298,6006
1	1,5	0,10472	115,89	0,4140	279,9380
2	2,7	0,20944	208,61	0,8280	251,9442
2,5	3,3	0,2618	254,96	1,0350	246,3455
4	5,0	0,41888	388,89	1,6560	234,8369
5	6,0	0,5236	466,15	2,0700	225,1946
10	10,1	1,0472	777,77	4,1400	187,8695
20	16,0	2,0944	1236,19	8,2799	149,3003
50	28,5	5,236	2201,97	20,6998	106,3765
100	42,2	10,472	3263,03	41,3995	78,8181
100	42,3	10,472	3268,18	41,3995	78,9425
50	29,1	5,236	2250,90	20,6998	108,7404
20	16,1	2,0944	1246,49	8,2799	150,5445
10	9,9	1,0472	767,47	4,1400	185,3812
5	5,9	0,5236	453,27	2,0700	218,9737
4	4,9	0,41888	378,58	1,6560	228,6161
2,5	3,2	0,2618	249,81	1,0350	241,3688
2	2,7	0,20944	208,61	0,8280	251,9442
1	1,5	0,10472	115,89	0,4140	279,9380
0,5	0,9	0,05236	69,54	0,2070	335,9256

• Valores obtenidos de la lectura del viscosímetro Brookfield aloe vera seco - RI 1mm

Velocidad de giro R.P.M.	M (torque)	W	τ esfuerzo cortante (dinas/cm ²)	γ velocidad corte (1/s)	η viscosidad(poise)
0,5	0,5	0,05236	38,63	0,2070	186,6254
1	0,9	0,10472	69,54	0,4140	167,9628
2	1,6	0,20944	126,19	0,8280	152,4107
2,5	2,0	0,2618	154,52	1,0350	149,3003
4	3,1	0,41888	239,51	1,6560	144,6346
5	3,8	0,5236	293,60	2,0700	141,8353
10	6,6	1,0472	509,93	4,1400	123,1727
20	11,8	2,0944	911,69	8,2799	110,1090
50	22,8	5,236	1761,57	20,6998	85,1012
100	37,1	10,472	2863,84	41,3995	69,1758
100	37,0	10,472	2858,69	41,3995	69,0514
50	22,5	5,236	1740,97	20,6998	84,1058
20	11,7	2,0944	901,39	8,2799	108,8648
10	6,6	1,0472	512,50	4,1400	123,7948
5	3,7	0,5236	285,87	2,0700	138,1028
4	2,9	0,41888	221,48	1,6560	133,7482
2,5	1,8	0,2618	139,07	1,0350	134,3703
2	1,6	0,20944	121,04	0,8280	146,1899
1	0,8	0,10472	61,81	0,4140	149,3003
0,5	0,5	0,05236	38,63	0,2070	186,6254

• Valores obtenidos de la lectura del viscosímetro Brookfield aloe vera seco - RI 3mm

Velocidad de giro R.P.M.	M (torque)	W	τ esfuerzo cortante (dinas/cm ²)	γ velocidad corte (1/s)	η viscosidad(poise)
0,5	0,6	0,05236	46,36	0,2070	223,9504
1	0,9	0,10472	72,11	0,4140	174,1837
2	1,8	0,20944	136,50	0,8280	164,8524
2,5	2,1	0,2618	164,83	1,0350	159,2536
4	3,3	0,41888	252,39	1,6560	152,4107
5	4,0	0,5236	311,62	2,0700	150,5445
10	7,3	1,0472	561,44	4,1400	135,6144
20	12,4	2,0944	958,05	8,2799	115,7077
50	23,5	5,236	1815,66	20,6998	87,7139
100	38,6	10,472	2979,74	41,3995	71,9752
100	38,6	10,472	2984,89	41,3995	72,0996
50	23,0	5,236	1774,45	20,6998	85,7232
20	11,7	2,0944	906,54	8,2799	109,4869
10	6,9	1,0472	533,11	4,1400	128,7715
5	3,9	0,5236	301,32	2,0700	145,5678
4	3,3	0,41888	252,39	1,6560	152,4107
2,5	2,2	0,2618	167,40	1,0350	161,7420
2	1,8	0,20944	139,07	0,8280	167,9628
1	1,0	0,10472	74,69	0,4140	180,4045
0,5	0,6	0,05236	43,78	0,2070	211,5087

• Especificaciones de los elementos usados en la medición de la viscosidad

Rc -Radio Beaker	Rb - Radio Aguja	Radio Esfuerzo Cortante	Long Efectiva
4,5	1,7345	1,337	4,921

ANEXO 3. Datos para el cálculo de isotermas de adsorción para aloe vera seco

• **Datos contenido de humedad y actividad de agua para aloe seco RI-1mm**

Sal saturada - humedad relativa	h.b.s.	Promedio h.b.s.	aW	Promedio aW	Des_est h.b.s.	Des_est aW
Sílica gel -11%	0,0183	0,0194	0,155	0,162	0,0012	0,026
	0,0192		0,140			
	0,0206		0,191			
Muestra 0	0,0444	0,0453	0,477	0,4613	0,0113	0,031
	0,0571		0,481			
	0,0345		0,426			
MgCl - 33 %	0,1144	0,1241	0,562	0,566	0,0088	0,006
	0,1265		0,573			
	0,1315		0,565			
MgNO3 52%	0,1266	0,1290	0,5700	0,579	0,0104	0,0103
	0,1404		0,5845			
	0,1199		0,5812			
NaCl - 75%	0,1655	0,1704	0,646	0,657	0,0044	0,014
	0,1718		0,652			
	0,1740		0,672			
KCl- 85%	0,1743	0,1758	0,660	0,667	0,0016	0,016
	0,1755		0,656			
	0,1775		0,685			
Agua - 100%	0,2576	0,2542	0,750	0,755	0,0103	0,006
	0,2623		0,761			
	0,2426		0,754			

• **Datos contenido de humedad y actividad de agua para aloe seco RI-3mm**

Sal saturada - humedad relativa	h.b.s.	Promedio h.b.s.	aW	Promedio aW	Des_est h.b.s.	Des_est aW
silica gel -11%	0,0233	0,0227	0,187	0,178	0,0006	0,008
	0,0224		0,173			
	0,0223		0,173			
Muestra 0	0,0586	0,0438	0,478	0,445	0,0170	0,030
	0,0252		0,420			
	0,0475		0,436			
MgCl - 33 %	0,1460	0,1279	0,566	0,565	0,0228	0,005
	0,1023		0,560			
	0,1352		0,569			
MgNO3 52%	0,1208	0,1258	0,572	0,572	0,0072	0,010
	0,1225		0,582			
	0,1340		0,563			
NaCl - 75%	0,1720	0,1681	0,656	0,660	0,0205	0,010
	0,1459		0,653			
	0,1864		0,671			
KCl- 85%	0,1829	0,1732	0,662	0,661	0,0199	0,003
	0,1502		0,658			
	0,1863		0,663			
Agua - 100%	0,2336	0,2403	0,765	0,760	0,0164	0,008
	0,2283		0,750			
	0,2590		0,763			

ANEXO 4. Valores de la Coordenada a*, b*, L*.

Método de secado	Coordenada a*			Coordenada b*			Coordenada L*		
	a*	Promedio	Des_est a*	b*	Promedio	Des_est b*	L*	Promedio	Des_est b*
Aloe Fresco	-4,071	-4,074	0,139	23,792	23,792	0,466	60,13	59,837	0,271
	-4,214			23,156			59,787		
	-3,937			24,064			59,595		
Liofilizado	-4,008	-4,300	0,316	18,008	18,008	0,646	62,555	62,655	0,272
	-4,635			18,478			62,447		
	-4,258			17,201			62,962		
RI – 1 mm	-0,121	-0,181	0,097	11,074	11,074	0,151	63,612	63,699	0,075
	-0,128			10,962			63,741		
	-0,293			10,775			63,743		
RI – 3 mm	-0,32	-0,282	0,037	12,208	12,208	0,272	62,439	62,448	0,112
	-0,247			11,815			62,564		
	-0,28			12,338			62,34		

Productos de esta investigación:

Anexo 5. Artículo publicado en revista científica. Colombia, Alimentos Hoy ISSN: 1794-8371, 2009 Vol:18 fasc: 1

EVALUACIÓN DEL CAMBIO DE COLOR EN EL PROCESO DE SECADO DE ALOE VERA (*Aloe barbadensis Miller*) POR EL MÉTODO VENTANA REFRACTIVA RW®

Adriana Mejía Terán¹, Luz Indira Sotelo Díaz², José Mauricio Pardo Benito³, Gabriela Rabe Cáez Ramírez⁴

¹Estudiante de Maestría en Diseño y Gestión de Procesos, Universidad de La Sabana. e-mail: adriana.mejia@unisabana.edu.co

²PhD. En Ciencia y tecnología de alimentos, Docente Universidad de La Sabana
PhD. En Ingeniería de Alimentos, Docente Universidad de La Sabana
Msc. En Diseño y Gestión de Procesos, Docente Universidad de La Sabana

*Universidad de La Sabana
Facultad de Ingeniería
Campus Universitario, Puente del Común, Chía, Colombia.*

RESUMEN

Por su aptitud de uso el polvo de Aloe vera (*Aloe barbadensis Miller*) es de gran interés en la industria medicinal, farmacéutica y alimentaria. Entre las propiedades físicas que determinan la calidad de aloe vera en polvo se encuentra el color. El objetivo de este trabajo fue evaluar el cambio de color en el proceso de secado de Aloe vera por el método ventana refractiva® durante 40 minutos de secado. El diseño experimental se realizó con tres tratamientos: aloe vera puro; aloe con 10 % (p/p) de maltodextrina como agente encapsulante y aloe con 0,1 % (p/p) de ácido ascórbico como antioxidante. La evaluación de las coordenadas de color a*, L*, H° se realizó utilizando el sistema CIELab. El tratamiento de menor estabilidad en el color fue el de aloe vera puro. La pérdida de H° (tono) para el aloe vera puro sigue una cinética de primer orden, de manera que se presenta disminución en el tono a medida que transcurre el tiempo de secado. En las coordenadas evaluadas se encontró que la adición de maltodextrina y ácido ascórbico reduce el cambio en el color en el proceso de secado de aloe vera.

Palabras claves: Aloe vera, CIELab, color, ventana refractiva®.

ABSTRACT

For its performance Aloe vera dried (*Aloe barbadensis Miller*), is of great interest in medicinal, pharmaceutical and food industries. The colour is one the most important physical properties that determined aloe vera dried quality. The aim of this work was to evaluate changes in colour on the drying process, by the refractance window® method during 40 minutes. The experiment design was carried out through three treatments: pure Aloe vera, Aloe with 10% (w/w) of maltodextrin as encapsulating agent and aloe with 0,1 % (w/w) of ascorbic acid as antioxidant. CIELab system was used to evaluated of colour coordinates a*,L*, H°. The treatment with less stability in the colour, was pure aloe vera. The loss of H° (tone) for the pure aloe vera, followed a kinetic of first order, in that way there is loss in the tone during the time of dry process. In the coordinates that were evaluated it was found that the addition of maltodextrin and ascorbic acid reduces the change in colour in the aloe vera's dry process.

Key words: Aloe vera, CIELab, colour, refractance window®.

Anexo 6. Poster Congreso CIBIA VII – 2009. VII Congreso Iberoamericano de Ingeniería de alimentos CIBIA 2009, realizado en Bogotá, Colombia del 06 al 09 de septiembre de 2009

Anexo 7. Poster 10° Congreso ACTA – 2010. 10° Congreso Nacional de Ciencia y Tecnología de Alimentos – ACTA realizado en Bogotá del 21 al 24 de Septiembre de 2010.