ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL

Facultad de Ingeniería Mecánica y Ciencias de la Producción

"Determinación de Permeabilidad Máxima Permitida para el Empaque de Café Industrializado"

TESIS DE GRADO

Previo a la obtención del Título de:

INGENIERO DE ALIMENTOS

Presentada por:

José Luis Coloma Hurel

GUAYAQUIL – ECUADOR

Año: 2005

AGRADECIMIENTO

Agradezco a Dios por darme la fortaleza para culminar esta etapa, a mi directora de tesis, la Ing. Fabiola Cornejo por su invalorable ayuda, a mis familiares y amigos por estar siempre a mi lado

DEDICATORIA

A mis padres

A mis hermanos

A mi hermana

TRIBUNAL DE GRADUACIÓN

Ing. Eduardo Rivadeneira P.
DECANO DE LA FIMCP
PRESIDENTE

Ing. Fabiola Cornejo Z.
DIRECTORA DE TESIS

Ing. Luis Miranda S.
VOCAL

ESPOL
1958

DECLARACIÓN EXPRESA

"La responsabilidad del contenido de ésta Tesis de Grado, me corresponden exclusivamente; y el patrimonio intelectual de la misma a la ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL"

(Reglamento de Graduación De la Espol)

José Luis Coloma Hurel

RESUMEN

El mantenimiento de la estabilidad del producto durante el almacenamiento es uno de los mayores problemas a los que se enfrentan los industriales productores de café en el Ecuador, ya que es una parte de la cadena de abastecimiento en donde se producen cuantiosas pérdidas; debido a una mala selección de empaque.

El objetivo de ésta tesis es determinar la permeabilidad máxima de vapor de agua para el empaque de café liofilizado, atomizado y de pasar, los cuales son producidos por distintos métodos de industrialización. El valor de la permeabilidad máxima será un dato un dato muy útil para la industria cafetera, ya que les permitirá realizar la selección del empaque más adecuado.

Para poder determinar ésta permeabilidad se realizarán las isotermas de adsorción de cada tipo de café, obteniéndose datos de la capacidad de adsorción de humedad de los productos. Adicionalmente, se analizará el efecto del tipo de secado en el comportamiento de las isotermas. Posteriormente, se determinará la humedad crítica de los tres tipos de café o el rango de actividad de agua en donde el producto mantiene buenas características organolépticas o microbiológicas. Para esto se realizarán

evaluaciones sensoriales con análisis de varianza y pruebas microbiológicas según sea el caso.

Una vez obtenidas las isotermas de adsorción y las humedades críticas se calculará la permeabilidad de vapor de agua de los tres tipos de café para que los productos mantengan óptimas condiciones durante su almacenamiento, tanto en condiciones de Quito y Guayaquil.

INDICE GENERAL

Pág.

RESUMEN…….. ..II
ÍNDICE GENERAL……III
ABREVIATURAS…… ... IV
SIMBOLOGÍA……V
ÍNDICE DE FIGURAS……..VI
ÍNDICE DE TABLAS……VII
INTRODUCCIÓN……1

CAPÍTULO 1
1. GENERALIDADES…… .2
1.1 Industrialización del café en Ecuador…….. .2
1.1.1 Importancia, producción, variedades…….....3
1.1.2 Métodos de industrialización…….....6
1.2 Acción del agua en los alimentos…… ...12
1.2.1 Actividad de Agua…… …....12
1.2.2 Monocapa de BET (Brunauer – Emmett – Teller)…….. ..15
1.2.3 Estabilidad del producto versus actividad de agua…….... .16
1.2.4 Isotermas de adsorción……...18
1.3 Envases plásticos para alimentos…….... 22
1.3.1 Definición y clasificación de los plásticos……..….22
1.3.2 Barrera a la transmisión de vapor de agua……..…….27
1.3.3 Diseño de empaque……..…....28

CAPÍTULO 2
2. MATERIALES Y MÉTODOS……..……...30
2.1 Construcción de isotermas de adsorción……. ……..….....30
2.2 Definición de humedades críticas……..……..……..37

2.3 Cálculo de los coeficientes globales de transferencia de masa de café liofilizado, atomizado y de pasar……...……..43
2.4 Predicción de empaque en condiciones de Guayaquil y Quito… ….....44
2.5 Diseño de empaque……...….48

CAPÍTULO 3
3. ANÁLISIS DE RESULTADOS…….....…….49
3.1 Análisis de la monocapa de BET de los tres tipos de café y su relación con la estabilidad en percha……....49
3.2 Análisis de la diferencia en la adsorción de agua dependiendo del tipo de secado…… ……..56
3.3 Análisis del rango de actividad de agua permitido para mantener óptimas las características de los productos…… 58
3.4 Análisis de la permeabilidad máxima de vapor de agua para empaques de café en condiciones de Quito y Guayaquil……69
3.5 Análisis del efecto de la relación de volumen de producto versus volumen de empaque……..……..…….83

CAPÍTULO 4
4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES…….. .90

APÉNDICES

BIBLIOGRAFÍA

ABREVIATURAS

A	Ärea
Atm	Atmósfera
a_w	Actividad de Agua
BET	Brunauer – Emmett – Teller
BOPP	Polipropileno Biorientado
Cc	Centímetros Cúbicos
°C	Grados Centígrados
CO_2	Dióxido de Carbono
Fig	Figura
GAB	Guggenheim-Anderson-de Boer
Gr	Gramos
g H_2O/100 g SS	Gramos de agua por 100 gramos de sólido seco
g/cm3	Gramos por centímetros cúbicos
h	Hora
Kg	Kilogramo
Máx	Máximo
Min	Mínimo
Min	Minuto
Mm	Milímetro
MCDB	Contenido de humedad en base seca
PEHD	Polietileno de alta densidad
Pw	Presión de vapor de agua en el producto
Pw^0	Presión de vapor de agua pura
Ref	Referencia
T	Tiempo
tm	Tonelada Métrica
µm	Micrómetro
W	Cantidad máxima de humedad permitida

SIMBOLOGÍA

%	Porcentaje
#	Número

INDICE DE FIGURAS

Pág.

Fig 1.1 Principales zonas cafetaleras del Ecuador……...5
Fig 1.2 Gráfico de velocidad de reacciones vs a_w……..16
Fig 1.3 Tipos de isotermas de adsorción……..18
Fig 1.4 Efecto de la temperatura en las isotermas de adsorción……..21
Fig 2.1 Isotermas de adsorción a 32 ^oC…….....33
Fig 2.2 Isotermas de adsorción a 14 ^oC……...34
Fig 2.3 Sistema utilizado para predicción de empaque……..45
Fig 3.1 Isoterma de adsorción de café liofilizado a 32 ^oC……..49
Fig 3.2 Isoterma de adsorción de café atomizado a 32 ^oC ……...50
Fig 3.3 Isoterma de adsorción de café de pasar a 32 ^oC ……50
Fig 3.4 Isoterma de adsorción de café liofilizado a 14 ^oC ……51
Fig 3.5 Isoterma de adsorción de café atomizado a 14 ^oC ……51
Fig 3.6 Isoterma de adsorción de café de pasar a 14 ^oC……..52
Fig 3.7 Estructura del café liofilizado……54
Fig 3.8 Estructura del café atomizado……...54
Fig 3.9 Isotermas de adsorción de café liofilizado, atomizado y de pasar a 32 ^oC ……..…57
Fig 3.10 Isotermas de adsorción de café liofilizado, atomizado y de pasar a 14 ^oC ……58
Fig 3.11 Determinación del coeficiente global de transferencia de masa del café liofilizado……..……..…67
Fig 3.12 Determinación del coeficiente global de transferencia de masa del café atomizado……68
Fig 3.13 Determinación del coeficiente global de transferencia de masa del café de pasar……68
Fig 3.14 Tiempo de vida útil del café liofilizado a 32 ºC y 83 % HR……74
Fig 3.15 Tiempo de vida útil del café liofilizado a 14 ºC y 75 % HR……75
Fig 3.16 Tiempo de vida útil del café atomizado a 32 ºC y 83 % HR.....78
Fig 3.17 Tiempo de vida útil del café atomizado a 14 ºC y 75 % HR……...79
Fig 3.18 Tiempo de vida útil del café de pasar a 32 ºC y 83 % HR……. 81
Fig 3.19 Tiempo de vida útil del café de pasar a 14 ºC y 75 % HR……..82
Fig 3.20 Tiempo de vida útil del café liofilizado a 32 ºC y 83 % HR ……85
Fig 3.21 Tiempo de vida útil del café atomizado a 32 ºC y 83 % HR……...87
Fig 3.22 Tiempo de vida útil del café de pasar a 32 ºC y 83 % HR……. 89

INDICE DE TABLAS

Pág.

Tabla 1 Especificaciones técnicas del café liofilizado……. 7
Tabla 2 Especificaciones técnicas del café atomizado…….. 10
Tabla 3 Especificaciones técnicas del café de pasar…….. 12
Tabla 4 Clasificación de los alimentos por su actividad de agua……. 14
Tabla 5 Ejemplos de plásticos termoplásticos…….. 23
Tabla 6 Ejemplos de plásticos termofijos……. 24
Tabla 7 Valores de actividad de agua de soluciones saturadas de sales seleccionadas…….. 30
Tabla 8 Contenidos de humedad de muestras de café liofilizado para determinación de humedad crítica……..59
Tabla 9 Resultados de análisis de varianza de muestras de café liofilizado……60
Tabla 10 Contenidos de humedad de muestras de café atomizado para determinación de humedad crítica……61
Tabla 11 Resultados de análisis de varianza de muestras de café atomizado…….. 62
Tabla 12 Monocapas y humedades críticas de café liofilizado y atomizado en las dos condiciones de estudio……..63
Tabla 13 Condiciones de muestras de café de pasar para determinación de humedad crítica……65
Tabla 14 Permeabilidades requeridas para café liofilizado, atomizado y de pasar……...70
Tabla 15 Características de polietileno de alta densidad……. 72
Tabla 16 Características del laminado 1……. 72
Tabla 17 Características del laminado 2……. 73
Tabla 18 Características del laminado 3……. 73
Tabla 19 Ganancia de humedad del café liofilizado 32 ^{o}C y 83% HR…..74
Tabla 20 Ganancia de humedad del café liofilizado 14 ^{o}C y 62% HR…..75
Tabla 21 Resultados del café liofilizado almacenado a 32 ^{o}C - 83% y 14 ^{o}C y 62% HR …….. 76
Tabla 22 Ganancia de humedad del café atomizado 32 ^{o}C y 83% HR…78
Tabla 23 Ganancia de humedad del café atomizado 14 ^{o}C y 62% HR…79
Tabla 24 Resultados del café atomizado almacenado a 32 ^{o}C - 83% y 14 ^{o}C y 62% HR……80
Tabla 25 Ganancia de humedad del café de pasar 32 ^{o}C y 83% HR…...81
Tabla 26 Ganancia de humedad del café de pasar 14 ^{o}C y 62% HR…...82

Tabla 27 Resultados del café de pasar almacenado a 32 °C - 83% y 14 °C y 62% HR……83
Tabla 28 Ganancia de humedad del café liofilizado (25% - 50% - 75%)……84
Tabla 29 Tiempo de vida útil del café liofilizado……..85
Tabla 30 Ganancia de humedad del café atomizado (25% - 50% - 75%)……86
Tabla 31 Tiempo de vida útil del café liofilizado……..87
Tabla 32 Ganancia de humedad del café atomizado (25% - 50% - 75%)……88
Tabla 33 Tiempo de vida útil del café liofilizado……..89

INTRODUCCIÓN

Uno de los grandes problemas en la industria alimenticia es el mantenimiento de la estabilidad del producto durante el almacenamiento, ya que en múltiples productos es en ésta etapa en donde se producen reacciones de deterioro, que pueden ser de origen físico, químico o microbiológico.

El objetivo de éste trabajo es determinar a través de un modelo matemático, el empaque que provea la mayor protección al vapor de agua durante el almacenamiento de café liofilizado, atomizado, y tostado y molido. Además, analizar la diferencia en la adsorción de agua en las condiciones de Quito y Guayaquil.

Para lograr éste objetivo, se realizaron diversos experimentos tales como:

1. Determinación de isotermas de adsorción en condiciones de Quito y Guayaquil.
2. Determinación de la humedad crítica
3. Pruebas de adsorción con diversos plásticos disponibles en el mercado, determinando el plástico que provea el mayor tiempo de vida en percha.
4. Pruebas de diseño de empaque, determinándose la importancia del diseño del empaque en la estabilidad del producto

De ésta forma éste trabajo contribuirá al mejoramiento de la calidad del café liofilizado, spray dried, y tostado y molido durante el almacenamiento, reduciendo pérdidas económicas a la industria cafetera.

CAPÍTULO 1

1. GENERALIDADES

1.1 Industrialización del café en Ecuador

1.1.1. Importancia, producción, variedades

El café ha sido uno de los cultivos que se han destacado en las exportaciones agrícolas del país, el mismo que conjuntamente con el cacao y el banano han constituido fuente de empleo y de divisas por décadas para la economía ecuatoriana. Dieron origen al desarrollo de otras importantes actividades económicas como el comercio, la industria, entre otras. Tradicionalmente, la zona de Jipijapa en la provincia de Manabí, ha sido uno de los lugares preponderantes en los cuales se ha cultivado este producto.

Según los datos del último Censo Agropecuario existen 151,900 hectáreas de cultivo de café solo y 168,764 hectáreas de cultivo de café asociado. Ref 2. En la superficie únicamente de café, Manabí ocupa el 38.6%, Sucumbíos el 17.36%, Orellana 11.89%, El Oro

7.67%, Loja el 4.01% y la diferencia en otras provincias; en tanto que en la superficie asociada de café, Manabí ocupa un 24.25%, Los Ríos 17.9%, Guayas 9.22%, Esmeraldas 7.94%, Pichincha 13.90%, Bolívar un 7.05% y el resto en otras provincias productoras.

La producción de café en el Ecuador ha ido disminuyendo paulatinamente a partir desde 1997, es así como durante los últimos años el volumen producido es inferior a un millón de sacos de 60 Kg., por lo que su aporte a la producción mundial de café ha ido en descenso, contribuyendo en la actualidad en no más del 1%. Uno de los problemas fundamentales es el bajo rendimiento, estimado entre 5 a 6 qq/ha al año, considerado uno de los más bajos comparado con otros países productores, debiéndose en gran parte a la falta de capacitación y transferencia de tecnología, la no disponibilidad de créditos, la ausencia de organización y fortalecimiento gremial, entre otros factores. En alrededor del 90%, la superficie de cultivo es manejada bajo el sistema tradicional. Ref 2

Las exportaciones de café en grano, de igual manera han ido disminuyendo, es así como en el año 1997 se ubicaron en el exterior 709.000 sacos de 60 Kg., en tanto que en el 2001, se exportó 392.000 sacos y en el 2002, se estima una cantidad no superior a los 200.000

sacos de 60 Kg. El ingreso de divisas por este rubro, ha disminuido considerablemente, si incluso tomamos en cuenta durante este último año los bajos precios internacionales, causados por la sobreoferta de este producto en el mercado mundial.

En el caso de los elaborados, las exportaciones también han disminuido con relación a años anteriores, en el año 2000 alcanzan la cifra de 6.005 tm, en el 2001 fue de 8100 tm y en el 2002 el volumen ubicado en el exterior es superior a los 8.000 tm, habiéndose arrojado divisas por 20, 27 y aproximadamente 30 millones de dólares, respectivamente. El aporte de las exportaciones de café en grano y elaborados frente a las exportaciones totales del país, en estos últimos años se ha reducido, pasando de un aporte superior al 3% en años anteriores a menos del 1% en los períodos 2001 y 2002. Por lo tanto, conociendo los grandes problemas que enfrenta el sector cafetalero en la producción y en vista del bajo rendimiento obtenido, se convierte en un aspecto esencial que el producto obtenido después de procesos de liofilización, atomización y tostado – molido sea de máxima calidad, y que no se presenten más pérdidas durante el almacenamiento, así la selección del empaque más adecuado y el estudio de la estabilidad del producto toman gran importancia con el objetivo de incrementar las exportaciones y aumentar el ingreso de divisas al país.

Variedades de Café Utilizado para la Elaboración de Café Liofilizado y Atomizado

En nuestro país se cultivan las dos especies de café, arábigo y Robusta. Aproximadamente, el 55% de la superficie total es de arábigo. La producción de arábigo, considerado de mejor calidad se concentra específicamente en Manabí , la provincia de Loja y las estribaciones de la Cordillera Occidental de los Andes, en tanto que el robusta se cultiva en la Amazonía, es decir en Sucumbíos y Orellana, en su mayor porcentaje; tal como indica la fig 1.1

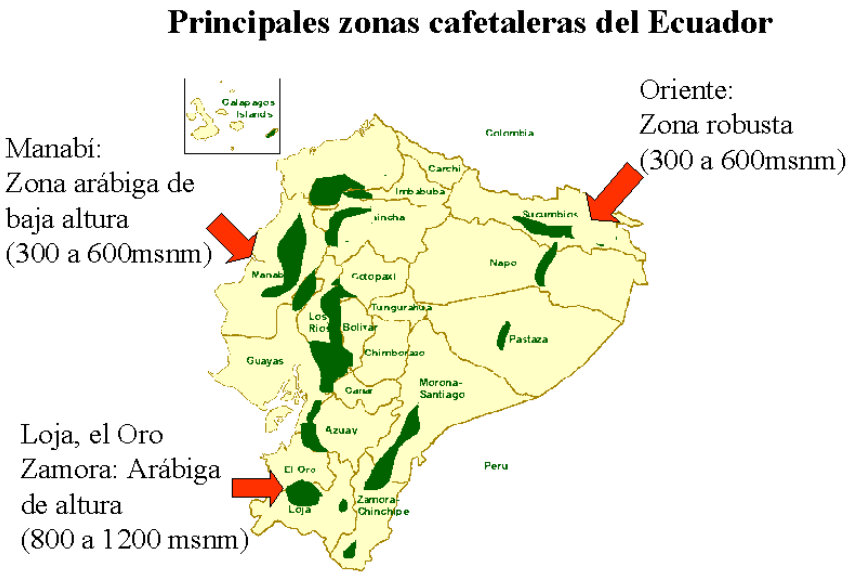


Fig. 1.1 PRINCIPALES ZONAS CAFETALERAS DEL ECUADOR

Fuente: Banco Central del Ecuador

1.1.2 Métodos de Industrialización

El café es uno de los productos que se industrializa de muy variadas formas; algunas de éstas son: café soluble (café instantáneo o extracto de café deshidratado), extracto acuoso de café, café soluble atomizado, café soluble aglomerado, café deshidratado al frío, café soluble descafeinado, café soluble torrado, sucedáneos del café, café tostado y molido.

Sin embargo dos tipos de café soluble elaborados por distintos métodos de industrialización, han tenido gran aceptación por los consumidores. Estos son:

Café liofilizado: Es el café instantáneo que ha sido obtenido por un proceso en el cual el producto en estado líquido es congelado y el hielo es removido por sublimación.

El café elaborado de esta forma tiene las características que se muestran en la tabla 1.

TABLA 1

ESPECIFICACIONES TÉCNICAS DEL CAFÉ LIOFILIZADO

Especificaciones Técnicas		Análisis de Malla Café Liofilizado		
Parámetros		**Malla #**	**mm**	**Min - Máx**
% humedad máximo	3	5	4.00	
Densidad de flujo libre	180 - 230	8	2.36	1 - 10
Color	60 – 90	14	1.40	20 – 40
pH	4.70 – 5.20	18	1.00	10 - 20
Acidez	4.50 – 6.85	25	0.71	1 - 10
Cafeína (min)	2.8	35	0.50	3 – 15
		40	0.42	1 – 10
		60	0.25	1 - 5

El principio básico de la liofilización en el proceso de producción de café instantáneo es la remoción del agua por sublimación. El café liofilizado ha crecido en popularidad hasta convertirse en un método muy común. Esto es porque a pesar de ser comúnmente más costoso que otros métodos de secado, generalmente resulta un producto de mayor calidad, un factor muy importante en el mercado de café instantáneo.

El proceso de liofilización consiste en:

- El extracto de café es congelado (en el café instantáneo este es un proceso muy importante). El congelamiento muy rápido produce cristales grandes y un producto muy poroso y también puede ser afectado el color de los gránulos de café.
- El café congelado es ubicado en el secador, a menudo en bandejas metálicas.
- El vacío es creado en la cámara. La magnitud del vacío es crítica en la velocidad del secado y en la calidad del producto.
- La cámara de secado es calentada, generalmente por radiación, sin embargo la conducción es usada en algunas plantas y la convección ha sido propuesta en plantas piloto.
- Condensación.- el agua previamente congelada en los gránulos de café expande en 10^7 su volumen, la remoción de éste vapor de agua de la cámara es muy importante, convirtiendo al condensador en uno de los componentes más críticos y caros de una planta de liofilización.

Café soluble atomizado.- Es el café instantáneo que ha sido obtenido por un proceso en el cual el extracto acuoso de café es atomizado en atmósfera caliente y transformado en partículas secas por evaporación del agua.

En algunas ocasiones este método de secado es preferido a la liofilización porque su costo es menor, tiempos de secado más cortos, y produce partículas esféricas de un tamaño aproximado a 300 µm con una densidad de 0.22 g/cm^3

Algunas características típicas de este método de producción son:

- El café atomizado se obtiene en 5–30 segundos (dependiendo de factores tales como el calor, tamaño de partícula, y diámetro del secador).
- Cambio de contenido de humedad, Entrada : 75–85% Salida : 3–3.5%
- Temperatura del aire, Entrada : 270 °C Salida : 110 °C

Una vez sometido a éste proceso, el café soluble atomizado presenta las características mostradas en la tabla 2

TABLA 2

ESPECIFICACIONES TÉCNICAS DEL CAFÉ ATOMIZADO

Especificaciones Técnicas		Análisis de Malla Café Soluble Atomizado		
Parámetros		**Malla #**	**mm**	**Min - Máx**
% humedad máx	3	5	4.00	
Densidad de flujo libre	160 - 260	7	2.8	
Color	45 – 90	14	1.40	
pH	4.70 – 5.20	18	1.00	0 – 2
Acidez	4.50 – 6.85	25	0.71	0 – 5
Cafeína (min)	2.8	35	0.50	3 – 15

Otro tipo de café es el tostado y molido, el cual a pesar de no ser soluble es objeto de este estudio debido a la facilidad del proceso y a que no requiere de equipos muy sofisticados, por lo cual se convierte en una buena alternativa para los pequeños productores, los cuales podrían comercializar un producto terminado con valor agregado.

Las características principales del café tostado y molido son:

El grano de café verde no tiene un aroma deseable por si solo, este debe ser tostado para obtener el aroma y flavor. Este proceso es el mismo para café tostado y molido como para café instantáneo.

Luego, cilindros rotatorios contienen los granos verdes y gases de combustión calientes, este proceso es usado en la mayoría de las plantas. Cuando la temperatura del grano alcanza y excede los 165 ºC el proceso de tostado empieza, acompañado con un sonido similar al que produce el canguil. El proceso dura cerca de 8 a 15 minutos con una eficiencia del 25% al 75%.

Si se trabaja con lecho fluidizado solo toma de 0.5 a 4 minutos y opera a más bajas temperaturas lo cual permite una gran retención del aroma del café.

Las especificaciones técnicas del café tostado y molido también conocido como café de pasar se muestran en la tabla 3

TABLA 3

ESPECIFICACIONES TÉCNICAS DEL CAFÉ DE PASAR

Especificaciones Técnicas		Análisis de Malla Café Tostado y Molido		
Parámetros		**Malla #**	**mm**	**Min - Máx**
% humedad max	1 – 2	20	0.85	5 – 10
Contenido máx de cafeína robusta	2.4	60	3.35	40 – 60
Contenido máx de cafeína arábiga	1.3	80	2.80	20 - 30
		100	2.36	5 - 10

1.2 Acción Del Agua En Alimentos

1.2.1 Actividad de Agua

El agua es el constituyente más abundante de la mayor parte de alimentos que se encuentran en estado natural, a excepción de los granos. Es por esto que su estudio toma vital importancia en la determinación de la vida útil de un producto, ya que es un medio ideal para que se produzcan toda clase de reacciones, además influye notablemente en las cualidades organolépticas del mismo. Ref 1

Pero toda el agua de los alimentos no se encuentra igualmente disponible para que sucedan reacciones, es así que podemos distinguir básicamente dos tipos de agua: libre y ligada.

El agua libre es la que se encuentra disponible para que sucedan todo tipo de reacciones, y es la que principalmente se elimina durante los procesos de conservación.

El agua ligada está mucho menos disponible para todo tipo de reacciones, se encuentra más unida al alimento en interacciones con los componentes del mismo. Sin embargo, el agua ligada puede estar más o menos fuertemente unida, de tal forma que el estado del agua presente en un alimento es tan importante, para la estabilidad del mismo, como su contenido total.

El sistema más fácil para tener una medida de la mayor o menor disponibilidad del agua en los diversos alimentos es la actividad de agua (a_w) definida como la medida de la presión de vapor relativa de las moléculas de agua en el espacio de cabeza por encima del alimento, el cual está en un recipiente aislado, comparado con la presión que ejerce el agua pura a la misma temperatura. Ref 3

$$a_w \approx \frac{P_w}{P_w^o}$$;donde:

Pw = presión parcial de vapor de agua de una solución o de un alimento.

Pw^o = Presión parcial del vapor de agua pura a la misma temperatura.

Como podemos ver, la actividad de agua es una relación entre dos magnitudes de las mismas dimensiones y por consiguiente constituye una medida relativa por relación a un estado standard, tomado como termino de comparación; el estado standard escogido es el agua pura cuya actividad se fija, como norma, igual a la unidad, con lo que la actividad del agua de una solución o de un alimento siempre es inferior a 1. Se puede explicar éste descenso de actividad físico – química, diciendo que los constituyentes químicos presentes, movilizan parcialmente el agua y disminuyen así su capacidad a vaporizarse y probablemente su reactividad química.

Barbosa y Vega (1996) definieron distintos rangos de actividad de agua, en función de cuán unida esté el agua al alimento.

TABLA 4

CLASIFICACIÓN DE ALIMENTOS POR SU ACTIVIDAD DE AGUA

Actividad de agua (aw)	Tipo de Alimento
0 – 0.6	Alimentos Secos
0.6 – 0.9	Alimentos de Humedad Intermedia
0.9 – 1	Alimentos Perecibles (frutas, carne)

Fuente: Barbosa y Vega, 1996. Deshidratación de alimentos

1.2.2. Monocapa de BET (Brunauer-Emmett-Teller)

El cálculo de la monocapa de BET es un dato muy importante y útil. Una de sus principales aplicaciones se da en estudios de predicción de la vida útil de un producto, ya que nos permite conocer de forma sencilla el valor de a_w en el cual el producto tiene la mayor estabilidad, es por esto que el valor de la monocapa de BET puede ser considerado como un contenido de humedad crítico o valor crítico de actividad de agua; sin embargo es importante recalcar que la humedad crítica deberá ser calculada haciendo un análisis del posible deterioro que puede sufrir el producto, y asegurándose que la aceptación de los consumidores hasta el contenido de humedad crítico sea óptimo.

Estudios de las velocidades de reacciones de deterioro de la mayoría de alimentos secos han mostrado que por debajo del contenido de humedad de la monocapa de BET, la velocidad de pérdida de calidad es despreciable Ref 5. Este contenido de humedad es determinado de la ecuación de la isoterma de BET y está generalmente en valores de actividad de agua entre 0.2 y 0.4. Es importante que el valor de humedad crítico hallado sea mantenido el mayor tiempo posible mediante un buen empaque, ya que un incremente de actividad de agua de 0.1 en ésta región, disminuye el tiempo de vida del producto de 2 a 3 veces.

La fig. 1.2 demuestra la importancia de la monocapa en las velocidades de reacciones de deterioro.

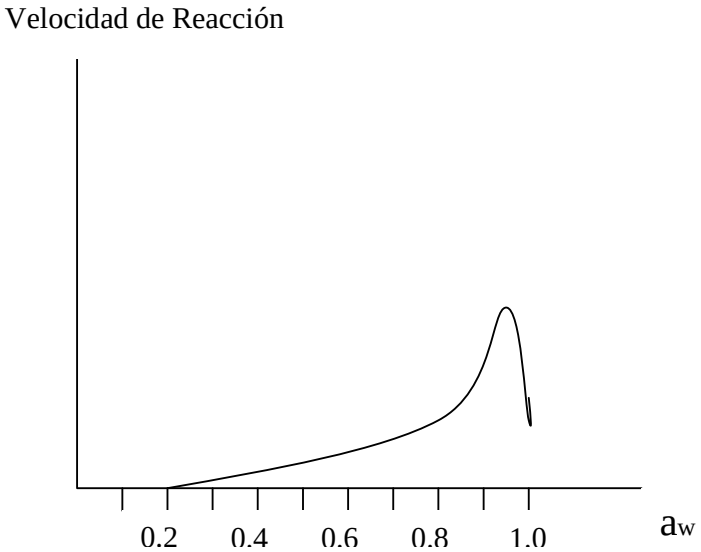


Fig. 1.2 GRÁFICO DE VELOCIDAD DE REACCIONES VS aw

Fuente: LABUZA THEODORE, Pracical Aspects of Isotherm Measurement and Use

1.2.3 Estabilidad del Producto versus Actividad de Agua

La estabilidad de los alimentos tiene estrecha relación con la actividad de agua y su conocimiento es más relevante que el contenido de humedad, ya que es mucho más importante conocer la disponibilidad que tiene el agua en el alimento para que se desarrollen las reacciones de deterioro que el contenido total de la misma.

Entre los factores que pueden disminuir la estabilidad del producto encontramos:

1) Cambios microbianos
2) Reacciones enzimáticas y no enzimáticas
3) Cambios físicos y estructurales
4) Destrucción de nutrientes, aroma y gusto

Sin embargo todas esta reacciones o cambios ocurren a distintas actividades de agua, por lo tanto es necesario hacer un análisis del producto y determinar cuál o cuales de estos factores son los de mayor importancia en la estabilidad del producto, a fin de que la humedad crítica que se determine sea la óptima para proteger al producto de todos los factores que puedan afectar su estabilidad.

En el caso del café, por ser un producto seco, muy higroscópico, se ve seriamente afectado por la ganancia de humedad, provocando su aglomeración y en consecuencia se convierte inaceptable para el consumidor, por lo tanto la pérdida de cualidades sensoriales es la mayor consideración en la elección del empaque adecuado y la humedad crítica que se defina deberá tomar en cuenta este factor y al mismo tiempo asegurar que ese contenido de humedad protege al producto de todos los otros factores.

Para la elección del empaque del café soluble no existe riesgo microbiológico y no es una fuente considerable de nutrientes en la dieta, por lo tanto la pérdida de nutrientes no es una consideración.

1.2.4 Isotermas de Adsorción

Una isoterma de adsorción (o desorción) es la curva que indica, en el equilibrio y para una temperatura determinada, la cantidad de agua retenida por un alimento en función de la humedad relativa de la atmósfera que le rodea.

Es necesario indicar que no todas las isotermas presentan el mismo comportamiento, es decir, existen tres tipos clásicos de isotermas de adsorción, graficados en la fig. 1.3

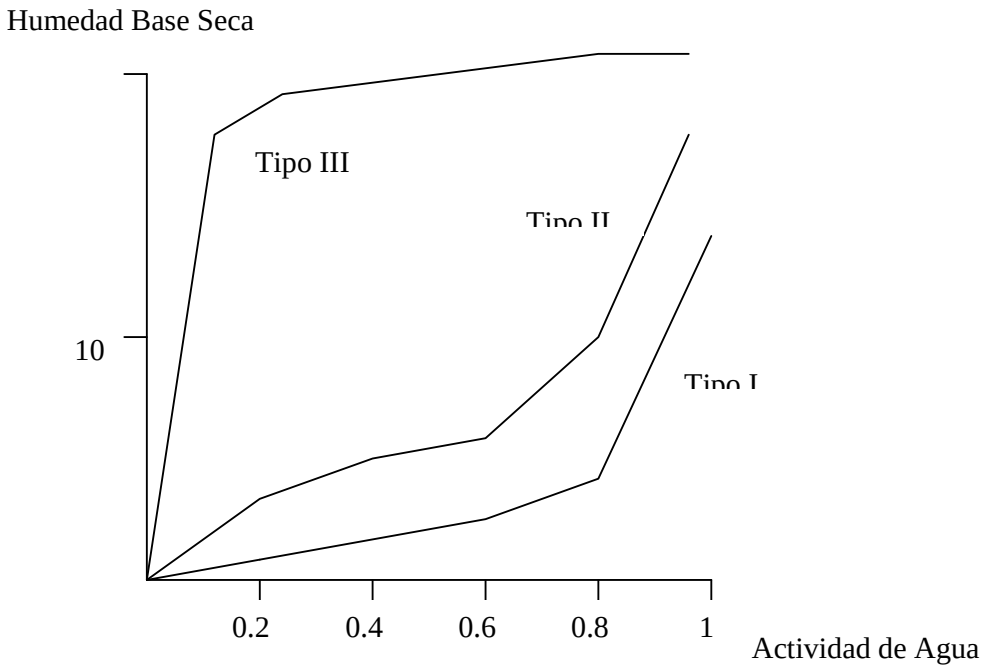


Fig. 1.3. TIPOS DE ISOTERMAS DE ADSORCIÓN

Fuente: LABUZA THEODORE, Pracical Aspects of Isotherm Measurement and Use

Isoterma Tipo I:

El isoterma tipo I es una isoterma para el azúcar puro cristalino. Muestra una muy pequeña ganancia de humedad hasta que la actividad de agua llega a 0.7 – 0.8 en donde la humedad sube en gran medida, esto es debido a que el único efecto del agua son enlaces de hidrógeno con el grupo OH del azúcar, por lo tanto es sólo un efecto de la superficie. Es importante determinar el tamaño de los cristales, porque si se redujera el tamaño del azúcar, más cantidad de agua se adicionaría y se elevaría la humedad. A bajas aw el efecto dieléctrico del agua no es muy fuerte para romper las moléculas de azúcar, pero a altas aw se produce una disociación de las moléculas de azúcar y más agua penetra en los cristales.

Algunos de los productos que presentan éste comportamiento son los productos secados y congelados en donde se realiza la congelación del producto seguida de la sublimación al vacío del hielo, éste sistema coincide con el método de elaboración del café liofilizado, lo cual explica que la isoterma de adsorción del café liofilizado muestre el mismo comportamiento del azúcar.

Otro de los productos que tienen éste comportamiento es la leche en polvo elaborada por desecación por pulverización o en cilindros, coincidiendo

con el método de elaboración del café spray dried, lo cual nuevamente explica por qué la isoterma de adsorción del café spray dried tiene el comportamiento del azúcar.

Isoterma Tipo II:

La mayoría de los alimentos siguen la forma sigma característica de éste tipo de isoterma. La curva resultante es causada por los efectos de la Ley de Raoult, efectos capilares e interacciones agua – superficie.

Isoterma Tipo III:

Es típico de agentes antiapelmazantes, éste tipo de ingrediente adsorbe agua en sitios específicos, pero la unión de enlaces es muy fuerte, por lo tanto disminuye la actividad de agua drásticamente. Cuando todos los sitios en los cuales el agua se puede unir están ocupados, cualquier incremento de la humedad causa un incremento grande en la actividad de agua, esto es debido a que el producto no se disuelve, de tal manera que el agua añadida interacciona sólo con el agua que ya está presente a través de un enlace de hidrógeno muy débil.

Es importante destacar que en la elaboración de una isoterma de adsorción para luego predecir el tiempo de vida de un producto, debemos especificar una temperatura que sea representativa de las condiciones

externas y mantenerla constante; ya que debido a la forma en que el agua está unida al alimento, a una actividad de agua constante, los alimentos a altas temperaturas captan menos agua que los alimentos sometidos a temperaturas más bajas.

Es por esto, que el presente trabajo es realizado simulando las condiciones de Quito y Guayaquil, ya que al tener temperaturas distintas, sus isotermas de adsorción presentan comportamientos distintos.

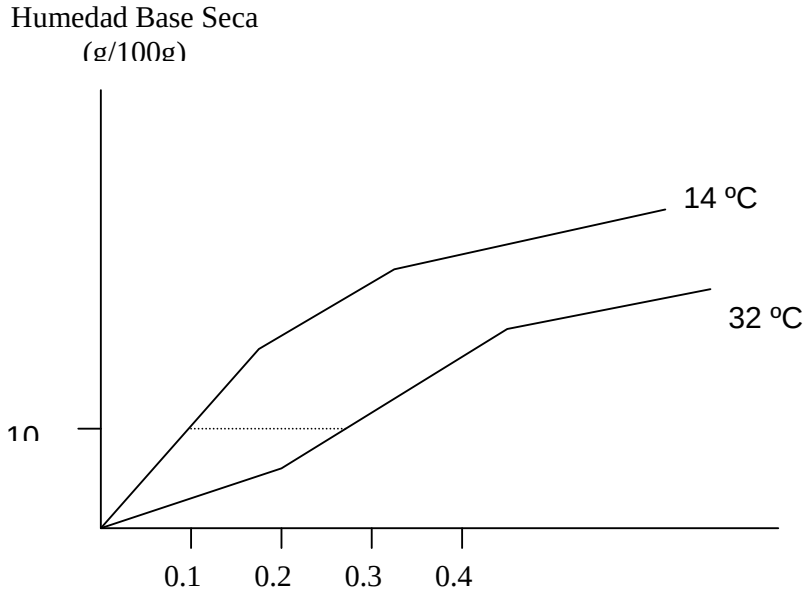


Fig. 1.4 EFECTO DE LA TEMPERATURA EN LAS ISOTERMAS DE ADSORCIÓN

Fuente: LABUZA THEODORE, Pracical aspects of isotherm measurement and use

En la fig. 1.4 podemos notar claramente el efecto que tiene la temperatura sobre las isotermas de adsorción, ya que a una humedad constante del producto (humedad final de fábrica) la temperatura del medio en donde se encuentra almacenado el producto influye en gran medida en el incremento de actividad de agua, es decir a mayor temperatura de almacenamiento el agua estará más disponible para reacciones que a menor temperatura de almacenamiento.

Debido a esto, el empaque debe ser diseñado tomando en cuenta las temperaturas de los lugares en donde el producto será consumido. Por tanto, las isotermas de adsorción dan la posibilidad de preveer el comportamiento de un alimento después de su tratamiento, es decir, predecir la cantidad de humedad que adsorberá el producto, dependiendo de las condiciones en que se realice el almacenamiento.

1.3 Envases Plásticos para Alimentos

1.3.1 Definición y Clasificación de los plásticos

Los plásticos son materiales susceptibles de moldearse mediante procesos térmicos, a bajas temperaturas y presiones. Las materias plásticas son sustancias orgánicas caracterizadas por su estructura macromolecular y polimérica.

Los plásticos se dividen en dos grandes grupos de acuerdo a las propiedades que presenta el producto final:

Termoplásticos: En estos plásticos ya no hay reacción, pueden moldearse, pueden ser reutilizados mediante su granulación y su posterior proceso de remoldeo. Ejemplos de termoplásticos se muestran a continuación en la tabla 5

TABLA 5

EJEMPLOS DE PLÁSTICO TERMOPLÁSTICOS

TERMOPLÁSTICOS	
Nombre	**Abreviatura (en inglés)**
Acetato de Celulosa	CA
Poliestireno expandido	EPS
Polietileno alta densidad	HD-PE
Polietileno baja densidad	LD-PE
Poliamida	PA
Polietilen Tereftalato	PET
Polipropileno	PP
Poliestireno	PS
Acetato de Polivinilo	PVAC
Cloruro de Polivinilo	PVC

Fuente: VIDALES GIOVANNETTI, MA. DOLORES. El mundo del envase. 1995

Termofijos: Son aquellos plásticos en los que durante su proceso de moldeo ocurre una reacción química de polimerización, de tal manera que al terminar este proceso, estos materiales ya no son susceptibles de una nueva fusión. Tienen un costo mayor que los termoplásticos. Algunos ejemplos de termofijos se muestran en la tabla 6

TABLA 6

EJEMPLOS DE PLÁSTICOS TERMOFIJOS

TERMOFIJOS	
Nombre	**Abreviatura**
Resinas o masas de colada melamina – formaldehído	MF
Resinas o masas de moldeo de fenol – formaldehído	PF
Polimetil - metacrilato	PMMA
Polimetil penteno	PMP
Poliacetal	POM
Poliuretanos	PUR
Hule natural	
Hule sintético	

Fuente: VIDALES GIOVANNETTI, MA. DOLORES. El mundo del envase. 1995

Ventajas del uso de plásticos

A continuación se presentan las características que hacen a los materiales plásticos especialmente útiles en el envase y embalaje de alimentos:

- Baja densidad
- Flexibilidad
- Resistencia a la fatiga
- Bajo coeficiente de fricción
- Baja conductividad térmica
- Resistencia a la corrosión
- Resistencia al impacto
- Propiedades ópticas
- Economía
- Higiene
- Seguridad

Desventajas del uso de plásticos

Como todos los materiales, los plásticos también tienen limitaciones y en muchos casos presentan serios inconvenientes para su utilización. Los principales son:

- Baja resistencia a temperaturas elevadas
- Baja resistencia a los rayos ultravioleta y a la intemperie
- Deterioros en la superficie
- Resistencia variable a la abrasión
- Flamabilidad

- Deformación térmica
- Orientación
- Menor vida de anaquel

Plásticos utilizados en el envasado de café

El café es un producto altamente higroscópico y por lo tanto necesita una alta barrera a la transmisión de agua. Debido a esto, para el envasado de café se utilizan principalmente laminaciones en donde se combinan dos o más películas, papeles o foils, convirtiéndose en una sola lámina que protege al producto adecuadamente contra el vapor de agua, oxígeno, etc.

Las principales laminaciones utilizadas para el envasado de café son:

Polifan (celofán / termosello)

Material de barrera media al vapor de agua y a los gases, con una perfecta transparencia, permitiendo que el consumidor pueda apreciar el producto. Se ha usado con éxito en café tostado y molido con o sin azúcar.

Propiflex (BOPP / termosello)

Se usa mucho en envases de café soluble ya sea con azúcar o 100% puro. Resiste al rasgado, las punciones, tensión y elongación, humedad y grasa, se recomienda para productos que van a ser comercializados en zonas húmedas o tropicales.

Celopolifoil (celofán, polietileno, aluminio, termosello)

Se usa en café instantáneo. Tiene alta protección a los gases y a la humedad, resiste el manejo y tiene excelente presentación, es ideal para producto higroscópicos, con inyección de nitrógeno envasado por el proceso de vacío y para productos altamente sensibles a la luz en caso de que la vida de anaquel sea mayor de 4 meses.

1.3.2 Barrera de Transmisión de Vapor de Agua

La transmisión de vapor de agua se define como la cantidad de vapor de agua que penetra a través de 1 m^2 del material con un espesor de 25 µm en 24 horas.

$$WVTR \approx \frac{W}{T \times A} \quad \left(\frac{gr}{m^2 \times 24h} \right)$$

donde: $W \approx$ Cantidad máxima de humedad permitida

$T \approx$ Tiempo de vida útil

$A \approx$ Área superficial del empaque en m^2

En vista de que los cafés: soluble y tostado, tienen un contenido de humedad muy bajo y gran facilidad para captar agua, es importante impedir la transmisión de vapor desde el ambiente al producto.

Para la elección del plástico adecuado se deben considerar factores importantes sobre el producto tales como:

- Comprender las propiedades del producto, cuan sensible es a los cambios
- Conocer las condiciones de temperatura y humedad en las cuales el producto va a ser almacenado y distribuido

1.3.3 Diseño de Empaque

El diseño del empaque es un aspecto básico en el envasado de productos alimenticios. Definir el área de empaque y su relación con la cantidad de producto a empacar es importante ya que la permeabilidad al vapor de

agua del empaque cambia de acuerdo a su área superficial. Además, es necesario considerar que el plástico utilizado en el empaque de productos tenga la permeabilidad necesaria para que el producto mantenga sus características organolépticas durante el almacenamiento, por ello, es necesario considerar ciertos factores que afectan la permeabilidad del envase tales como:

- La permeabilidad es inversamente proporcional al espesor.
- La manipulación del envase aumenta la permeabilidad.
- La permeabilidad en los envases se incrementa con la temperatura.

CAPÍTULO 2

2. MATERIALES Y MÉTODOS

2.1 Construcción de Isoterma de Adsorción

Las sales utilizadas para la obtención de las isotermas de adsorción de los tres tipos de café y sus respectivas humedades de equilibrio se muestran en la tabla 7.

TABLA 7

VALORES DE ACTIVIDAD DE AGUA DE SOLUCIONES SATURADAS DE SALES SELECCIONADAS

Sales	a_w a 32 °C	a_w a 14 °C
Cloruro de Magnesio	0,32	0,33
Carbonato de Potasio	0,43	0,43
Nitrato de Magnesio	0,51	0,55
Yoduro de Potasio	0,67	0,71
Cloruro de Sodio	0,74	0,75
Sulfato de Amonio	0,80	0,81
Cloruro de Potasio	0,83	0,85

Fuente: LABUZA THEODORE, Pracical Aspects of Isotherm Measurement and Use

Todas las sales son químicamente puras y tienen un valor de actividad de agua preestablecido .

Consideraciones para el Uso de las Sales

Para la construcción de la isoterma de adsorción se utilizan varias soluciones saturadas de ácidos o bases orgánicas así como también sales inorgánicas que producen una presión de vapor de agua constante en el ambiente que los rodea a una temperatura constante Ref. 5

Algunas consideraciones son necesarias:

1) Las sales y el agua deben ser puras. Solo agua destilada y sales grado ACS pueden ser usadas y deben ser mezcladas en recipientes limpios. Especiales cuidados en el manejo de estas sales deben ser tomados ya que algunas soluciones saturadas son muy cáusticas (Ej. dicromato de potasio, cloruro de potasio) y otras pueden ser muy tóxicas (Ej. cloruro de litio, nitrito de sodio). La solución saturada usada debe tener cristales presentes. Soluciones alcalinas como el carbonato de potasio, absorben grandes cantidades de CO_2 después de cierto tiempo, lo que causa una significativa reducción de la a_w .

2) La solución debe ser hecha a la temperatura a la cual la isoterma será construido a una temperatura superior. Cuando las sales saturadas son llevadas a una temperatura mayor puede ocurrir un aumento significativo de la actividad de agua porque la solubilidad de muchas sales incrementa significativamente con la temperatura, y la cantidad de sal utilizada puede ser insuficiente.
3) Cuando la solución es introducida en el recipiente, esta debe cubrir completamente el fondo del mismo. No deben haber cristales que estén por encima de la capa líquida, la cual no debe ser de más de 1.5 a 2 mm de espesor. Ref 5

Isotermas de Adsorción

Las isotermas de adsorción de los tres tipos de café fueron determinadas a partir de la humedad inicial de los productos y construidas por el método isopiéstico. Este método es el más simple y comúnmente utilizado para la construcción de isotermas de adsorción.

Consiste en colocar una muestra de un peso conocido en un recipiente cerrado con una solución saturada, de actividad de agua conocida y mantenidos a temperatura constante. Luego se pesa la muestra periódicamente hasta que su peso se mantenga constante. El contenido de humedad de la muestra es determinado ya que se

conoce el peso inicial y el final cuando se ha alcanzado el equilibrio. Se utilizaron frascos plásticos con tapa con diámetro de 9 centímetros y altura de 5 centímetros.

El primer paso para la construcción de las isotermas por este método es saturar las soluciones con agua destilada, llevarlas a la estufa a 32 ºC o a la refrigeradora a 14°C y estabilizarlas, tal como indica las figuras 2.1 y 2.2 respectivamente. Este proceso puede llevar de dos a cuatro días, dependiendo de la facilidad con que las soluciones saturadas se estabilicen.

Fig. 2.1 ISOTERMAS DE ADSORCIÓN A 32°C

FIG. 2.2 ISOTERMAS DE ADSORCIÓN A 14°C

Una vez que las soluciones están estabilizadas se colocan 2 g de muestra por duplicado, en un plato hecho de papel filtro y aluminio como soporte y son introducidas nuevamente en la estufa a 32 ºC.

Finalmente se va registrando la ganancia de humedad de las muestras tomando los pesos periódicamente, y cuando ya no se registra cambio alguno, significa que la muestra y la solución saturada han llegado al equilibrio y por lo tanto las dos tienen la misma humedad y la misma actividad de agua.

La ganancia de humedad de las muestras se transforma a humedad en base seca, y como la actividad de agua de la solución saturada es conocida, obtenemos el primer punto para graficarlo en la isoterma.

La fórmula para transformar el porcentaje de humedad en humedad en base seca es la siguiente:

$$MCDB \approx \frac{g\ H_2O}{g\ de\ sólidos} \approx \frac{(\%\ H_2O)}{100 - (\%H_2O)}$$

donde:

MCDB = contenido de humedad en base seca

(% H_2O) = contenido de humedad en base húmeda

Ref. 5

Este procedimiento es simultáneo entre todas las muestras de café liofilizado, atomizado y de pasar y de esta forma hallamos la relación de humedad y actividad de agua para los tres tipos de café.

La velocidad de obtención del equilibrio depende de:

- Gradiente de actividad de agua
- La cantidad, forma, tamaño, tipo de alimento.
- Área superficial de la muestra.
- Relación de áreas entre la muestra y el tamaño del envase. Ref 5

Modelo de GAB (Guggenheim-Anderson-de Boer)

El método anteriormente descrito permite obtener una isoterma de adsorción experimental, la cual tiene tantos puntos como sales sean utilizadas. Sin embargo, existen métodos empíricos y teóricos de isotermas de adsorción, los cuales permiten ajustar la curva obtenida experimentalmente, de tal forma que obtenemos una isoterma de adsorción más idónea para realizar el estudio.

Uno de los métodos más usados y considerado como la mejor ecuación que se ajusta a las isotermas de productos alimenticios, es el modelo de GAB, el cual se aplica en un rango de valores de actividad de agua de 0 a 0.9.

La ecuación de GAB es la siguiente:

$$\frac{X}{Xm} \approx \frac{C * K * aw}{(1 - K * aw)(1 - K * aw + C * K * aw)}$$

donde: $Xm \approx$ Humedad que corresponde a la monocapa de BET

$C \approx$ Constante que depende de la temperatura

$K \approx$ Factor de corrección

Ref. 7

Como podemos observar es una ecuación que tiene 3 constantes (Xm, C y K) y dos variables (X y a_w), por lo tanto para poder resolverla, se necesitan mínimo 5 puntos en el gráfico, es decir, elaborar una isoterma experimental con 5 sales como mínimo.

Para el ajuste de la curva utilizamos el programa estadístico Origin 6.0 Professional, en donde una vez definida la ecuación de GAB, realiza una regresión no lineal por medio de iteraciones sucesivas.

De esta forma el programa encuentra los valores de las tres constantes y así, podemos predecir la relación entre la actividad de agua del producto a cualquier contenido de humedad, lo cual es un paso muy importante para determinar posteriormente la vida útil de los tres tipos de café en estudio.

2.2 Definición de la Humedad Crítica

La definición de la humedad crítica es uno de los pasos más importantes en la determinación de la barrera de vapor de agua requerida por el alimento. Consiste en conocer el contenido de humedad en el cual el producto se vuelve no apto para el consumo humano desde cualquier punto de vista, ya sea microbiológico o sensorial. Sin embargo, es necesario tomar en cuenta otros factores que influyen en gran medida en la selección del empaque, tales como:

propiedades mecánicas (resistencia, tensión), costo, permeabilidad a otros vapores, etc. Por lo tanto, es necesario llegar a un compromiso entre todos estos factores para que el empaque seleccionado sea el ideal, tanto desde el punto de vista técnico como económico.

El análisis de la humedad crítica debe ser realizado a cada producto por separado, ya que todos los productos se deterioran a humedades distintas, incluso en productos del mismo género. Este es el caso del café soluble (liofilizado y atomizado), en donde el principal problema es la aglomeración del café debido a la ganancia de humedad, lo cual ocurre a bajas actividades de agua en donde el producto es seguro microbiológicamente, por lo tanto, el mayor problema del café soluble es sensorial. Sin embargo la velocidad de deterioro de estos dos tipos de café es distinta, lo cual será analizado posteriormente en el capítulo 3.

El experimento consiste en colocar muestras de café liofilizado y atomizado en un recipiente con agua en la base, de esta forma se consigue un ambiente de 100 % de humedad relativa. Las muestras de cada tipo de café son introducidas en el recipiente en distintos intervalos de tiempo previamente establecidos, pudiéndose obtener muestras con distintos contenidos de humedad; las cuales son

sometidas al juicio de 25 jueces no calificados, los cuales determinarán el grado de aceptación de las distintas muestras por medio de una escala hedónica.

Finalmente se determina el contenido de humedad crítica del café liofilizado y atomizado por medio de un análisis de varianza con niveles de significancia de 5% y 1%, pudiéndose conocer el contenido de humedad máximo aceptable para el consumidor.

Las fórmulas utilizadas en el análisis de varianza son las siguientes:

$$GL_v \approx Grados\ de\ libertad\ de\ variable \approx m - 1$$
$$donde\ m \approx niveles\ de\ la\ variable\ (humedad)\ bajo\ estudio \quad (2.1)$$

$$GL_j \approx Grados\ de\ libertad\ de\ jueces \approx n - 1$$
$$donde\ n \approx número\ de\ jueces \quad (2.2)$$

$$GLt \approx Grados\ de\ libertad\ totales \approx (n)(m) - 1$$
$$GLr \approx Grados\ de\ libertad\ residual \approx GLt - GLv - GLj \quad (2.3)$$

$$FC \approx Factor\ de\ corrección \approx \frac{TT^2}{(n)(m)}$$
$$donde\ TT^2\ es\ el\ total\ de\ todas\ las\ observaciones \quad (2.4)$$

$$SC_v \approx Suma\ de\ cuadrados\ de\ la\ variable \approx `$$

$$SC_v \approx \frac{(T_{c1})^2 + (T_{c2})^2 + ... + (T_{cm})^2}{n} - FC \qquad (2.5)$$

$$donde\ T_{cj}\ son\ los\ totales\ de\ cada\ columna,\ j \approx 1,2,.....m$$

$$SC_j \approx Suma\ de\ cuadrados\ de\ jueces$$

$$SC_j \approx \frac{(T_{r1})^2 + (T_{r2})^2 + ... + (T_{rm})^2}{m} - FC$$

$$donde\ T_{ri}\ son\ los\ totales\ de\ cada\ renglón, i \approx 1,2,.....n$$

(2.6)

$$SC_t \approx Suma\ de\ cuadrados\ totales$$

$$SC_t \approx Suma\ de\ cada\ observación\ al\ cuadrado - FC$$

$$SC_t \approx \{(X_{11})^2 + (X_{12})^2 + ... + (X_{mn})^2\} - FC$$

(2.7)

$$SC_r \approx Suma\ de\ cuadrados\ de\ residual \approx SC_t - SC_v - SC_j$$

(2.8)

Después de realizar todos estos cálculos previos, se obtiene la varianza dividiendo la suma de los cuadrados entre los grados de libertad correspondientes.

$$V_v \approx Varianza\ \ debido\ \ a\ la\ \text{var}\ iable \approx \frac{SC_v}{GL_v}$$

(2.9)

$$V_j \approx Varianza\ \ debido\ \ a\ \ jueces \approx \frac{SC_j}{GL_j}$$

(2.10)

$$V_r \approx Varianza\ \ de\ residual \approx \frac{SC_r}{GL_r}$$

(2.11)

Finalmente se obtiene el valor de F calculadas:

$$F_v \approx \frac{V_v}{V_r}$$

(2.12)

$$F_j \approx \frac{V_j}{V_r}$$

(2.13)

y se comparan con F de tablas presentadas estandarizadas, realizándose el siguiente razonamiento: si F calculada es menor que F de tablas, entonces no hay efecto significativo de la fuente de variación de los resultados, en cambio, si es mayor o igual, sí hay diferencia significativa.

En el caso del café para pasar el análisis es distinto, ya que este producto presenta una alta estabilidad a la aglomeración; por lo tanto el mayor problema debido a la ganancia de humedad que puede presentar este producto es el crecimiento de mohos cuando las condiciones de temperatura y humedad del producto sean propicias durante el almacenamiento en percha. Por lo tanto, la humedad crítica del café para pasar es la máxima humedad alcanzada por el producto sin que se produzca crecimiento de mohos. Para esto realizamos siembras en agar PDA (Potato Dextrosa Agar) del producto a distintas humedades en donde teóricamente pueden crecer mohos y levaduras y las incubamos a 32 ºC por 5 días.

2.3 Cálculo del Coeficiente Global de Transferencia de Masa en Distintos Tipos de Café

El coeficiente global de transferencia de masa es una medida de la facilidad o dificultad para la transferencia de masa, ya sea adsorción o desorción. Todos los productos transfieren agua en forma distinta, dependiendo principalmente de la estructura final producida por el método de industrialización empleado.

El coeficiente global de transferencia de masa en el café puede servir como un indicativo de la rapidez con que se van llenando los capilares del producto hasta alcanzar la humedad crítica y deteriorarse, aunque también es importante considerar el valor de la monocapa de BET por su relevancia en la estabilidad de los productos. Ref 8

El experimento es sencillo, consiste en colocar una cantidad determinada de café en un desecador con agua, produciéndose un ambiente de 100% de humedad relativa, y registrar la ganancia de humedad. El coeficiente global de transferencia de masa se determina calculando la pendiente de la ganancia de humedad versus la raíz cuadrada del tiempo.

2.4 Predicción de Empaque en condiciones de Quito y Guayaquil

Como se ha dicho anteriormente, el empaque debe ser seleccionado en función de las condiciones ambientales en que el producto será almacenado. Es por esto que el presente estudio presenta el requerimiento de barrera a la transmisión de vapor de agua en las condiciones de Quito y Guayaquil, porque estas dos ciudades presentan distintas humedades relativas de equilibrio.
Los productos estudiados son secos, por lo cual el ambiente externo tiene gran relevancia en el tiempo de vida de los mismos, por lo tanto, el tiempo de vida del café liofilizado, atomizado y de pasar estará en función de la mayor o menor humedad relativa del ambiente externo.

Para el desarrollo de este experimento es necesario utilizar un desecador con una sal saturada en su interior, produciéndose una humedad constante en su espacio de cabeza y manteniéndose una temperatura constante. Para simular las condiciones de Guayaquil se mantuvo constante la temperatura en 32 ºC y se utilizó Cloruro de Potasio la cual provee una humedad de 83% aproximadamente, valor que está por encima de la humedad ambiental promedio, sin embargo se la utilizó con el fin de analizar el comportamiento del plástico en condiciones extremas. En el caso de Quito, la sal utilizada fue Cloruro de Sodio que proporciona una humedad del 75% y la temperatura de 14 ºC.

En el interior del desecador se colocaron bolsas de 5.5 cm x 5.5 cm de polietileno de alta densidad y tres tipos de laminados que tienen buenas características de barrera al vapor de agua, con el producto en estudio en su interior y por duplicado, como muestra la figura 2.3.

FIG. 2.3 SISTEMA UTILIZADO PARA PREDICCIÓN DE EMPAQUE

La cantidad de producto colocada en el interior está en función de la densidad de los mismos y de la relación $\frac{Volumen\ de\ producto}{Volumen\ de\ empaque} \approx 50\%$. De esta forma se establece un volumen constante de producto pero una cantidad variable del mismo que esta en función de su densidad.

Una vez armado el sistema, se realizan tomas de peso periódicamente, registrándose la ganancia de humedad del producto con el pasar del tiempo, obteniéndose una línea recta y una vez alcanzada la humedad crítica previamente establecida en el experimento anterior, se determina el tiempo de vida útil de los tres tipos de café, con polietileno de alta densidad, laminado 1 (BOPP-Aluminio-Polietileno), laminado 2 (Poliéster-Polipropileno-Polietileno) y laminado 3 (PP-CPP)

Se decidió realizar este experimento con bolsas plásticas selladas porque se conoce que el sello tiene vital importancia en la permeabilidad del plástico, y de esta forma se asegura que sea un experimento real porque considera el efecto del sellado en la adsorción de humedad del producto.

Este experimento nos permite conocer si el empaque utilizado es el adecuado para el producto, se pueden hacer comparaciones con otros tipos de plásticos que presenten un tiempo de vida similar, pudiéndose tener algunas opciones para el empaque del producto y finalmente con un análisis de costos, resistencia mecánica, durabilidad y tiempo de vida útil, poder hacer la selección del empaque que mejor cubra las necesidades del producto y de los consumidores.

La fórmula (2.14) permite calcular la permeabilidad a la transmisión de vapor de agua requerida (k/x) para que el producto se mantenga en óptimas condiciones.

$$\ln \tau \approx \ln\left(\frac{me - mi}{me - m}\right) \approx \frac{k}{x}\frac{A}{w_s}\frac{Po}{b}\theta$$

(2.14)

donde: $\tau \approx$ contenido de humedad no completado

$me \approx$ contenido de humedad en la isoterma que está en equilibrio con la temperatura y humedad externa.

$mi \approx$ contenido de humedad inicial en base seca

$m \approx$ contenido de humedad a un determinado tiempo

$\frac{k}{x} \approx$ permeabilidad máx del alimento en gH_2O/día m^2 mmHg

$A \approx$ Area del empaque (m^2)

$Ws \approx$ Peso de sólidos secos (g)

$Po \approx$ Presión de vapor de agua a la temperatura T (mmHg)

$b \approx$ Pendiente de la isoterma.

Ref. 5

2.5 Diseño de Empaque

Seleccionar el tipo de plástico más conveniente para los cafés liofilizado, atomizado y de pasar es muy importante, sin embargo es también necesario analizar el efecto que tiene el área de empaque con diversas cantidades de producto.

Para realizar este experimento, empacamos los tres tipos de café con tres relaciones de volumen de producto versus volumen de empaque de 25%, 50% y 75%. Utilizamos el mismo sistema descrito en el experimento anterior, es decir, 85 % de humedad relativa a 32 ºC, y el plástico utilizado fue polietileno de baja densidad.

Posteriormente se toma periódicamente los pesos de las bolsas plásticas y se determina la ganancia de peso por la transmisión de vapor de agua a través de la película, obteniéndose un gráfico de tiempo de vida útil versus cantidad de producto empacado, siendo el contenido de humedad crítica el factor limitante para determinar el tiempo de vida útil de distintos pesos de producto. De esta forma se puede analizar el efecto que tiene la humedad en distintas cantidades de producto y la rapidez con que alcanza la humedad crítica hasta convertirse en no apto para el consumo.

CAPÍTULO 3

3.1 Análisis de la Monocapa de BET de los tres Tipos de Café y su relación con la estabilidad en percha

Las isotermas de adsorción elaboradas experimentalmente por el método isopiéstico y ajustadas por medio del modelo matemático de GAB se muestran en las figuras 3.1, 3.2, 3.3, 3.4, 3.5 y 3.6:

Isotermas de Adsorción de Café Liofilizado, Atomizado y de Pasar a 32 ºC

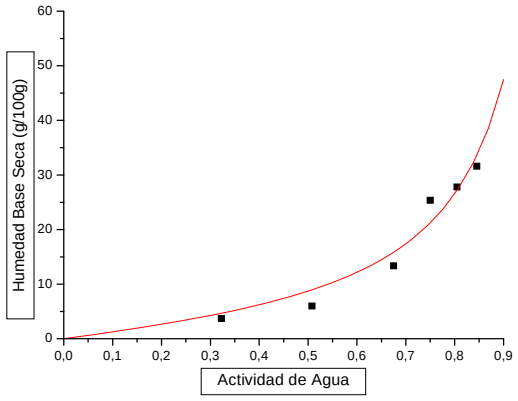


Fig 3.1 Isoterma de Adsorción Café Liofilizado a 32 ºC

Monocapa:	7.515 g/100g

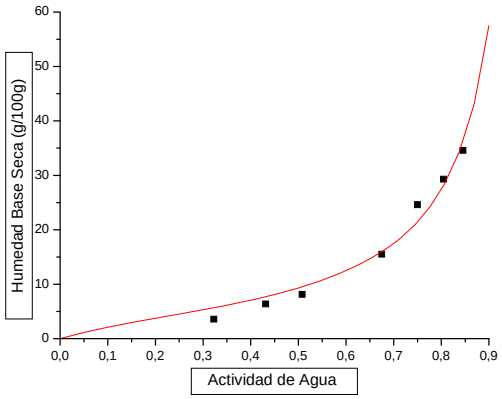


Fig. 3.2 Isoterma de Adsorción Café Atomizado a 32 ºC

Monocapa:	5.706 g/100g

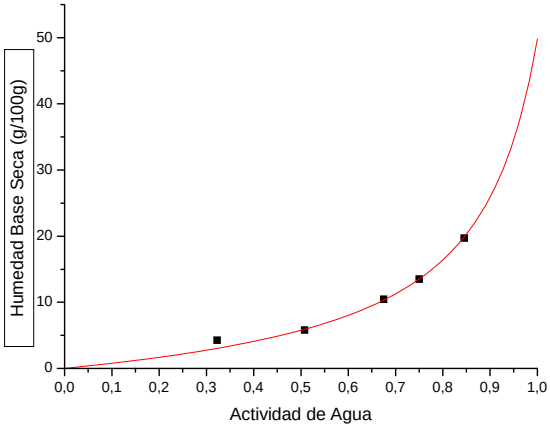


Fig. 3.3 Isoterma de Adsorción Café de Pasar a 32 ºC

Monocapa:	4.413 g/100g

Isotermas de Adsorción de Café Liofilizado, Atomizado y de Pasar a 14 ºC

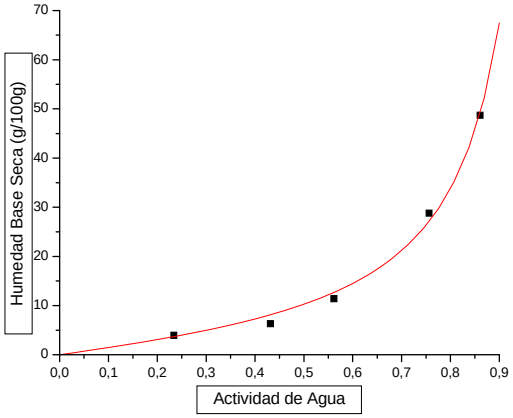


Fig. 3.4 Isoterma de Adsorción de Café Liofilizado a 14ºC

Monocapa:	8.31 g/100g

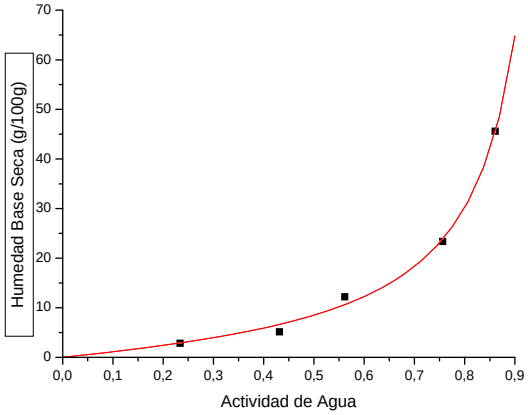


Fig. 3.5 Isoterma de Adsorción de Café Atomizado a 14ºC

Monocapa:	6.585 g/100g

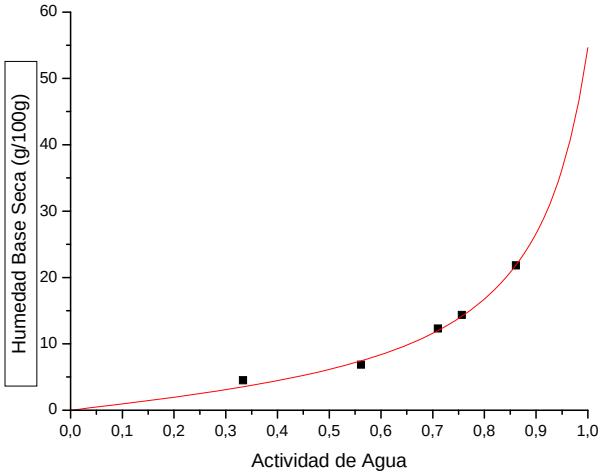


Fig. 3.6 Isoterma de Adsorción de Café de Pasar a 14ºC

Monocapa:	5.660 g/100g

Analizando el comportamiento de las isotermas a 32 ºC podemos notar que el contenido de humedad de la monocapa del café liofilizado es 7.515 g H_2O/100 g SS, mientras que del café atomizado es 5.706 g H_2O/100 g SS y del café de pasar es 4.413 g H_2O/100 g SS, es decir, la monocapa del café liofilizado es mayor que la de los otros dos tipos de café, lo cual deja notar claramente que el método de producción de los alimentos influye considerablemente en el valor de la monocapa de los mismos, sin importar que la materia prima utilizada para la elaboración de los productos sea la misma.

Es necesario precisar que la monocapa es el contenido de humedad que forma la primera capa de agua en contacto con las moléculas del alimento y que el valor de la monocapa está íntimamente relacionado con la estabilidad de los mismos, es decir, mientras mayor es el contenido de la monocapa mayor es la estabilidad del producto ya que puede adsorber mayor cantidad de agua hasta formar la primera capa en contacto con el alimento.

Las figuras 3.7 y 3.8 muestran la estructura del café liofilizado y atomizado por medio del estereoscopio, notándose claramente que el primero presenta una estructura mucho más compacta; mientras que el café atomizado tiene muchos espacios vacíos en su estructura. Debido a éstas diferencias en sus estructuras, el café liofilizado necesitaría una mayor cantidad de agua para alcanzar el mismo grado de deterioro que el café atomizado; viéndose esto reflejado en su valor más alto de monocapa.

Fig # 3.7 Estructura del Café Liofilizado

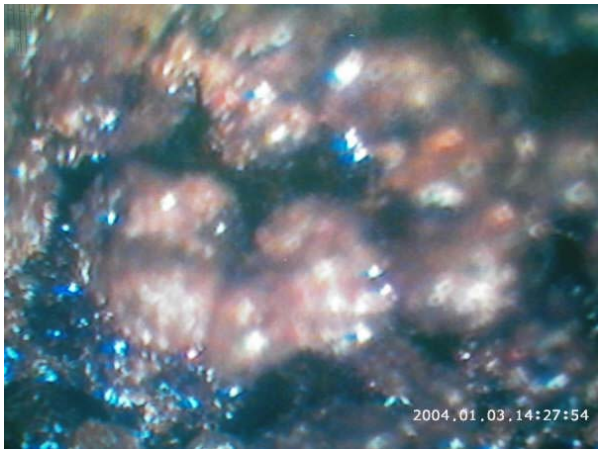


Fig # 3.8 Estructura del Café Atomizado

Los valores de las monocapas de los tres tipos de café nos indican el contenido de humedad en el cual los productos presentan su mayor estabilidad, siendo de 7.515 $gH_2O/100gSS$ para el café liofilizado, 5.706 $gH_2O/100gSS$ para el café atomizado y de 4.413 $gH_2O/100gSS$ para el café de pasar. Sin embargo, es necesario resaltar que la forma como va

introduciéndose el agua dentro del alimento después de alcanzar la monocapa, es un factor que puede incidir en la estabilidad de los productos. Por lo tanto, este es un análisis primario basado únicamente en las monocapas obtenidas de las isotermas de adsorción; ya que la determinación del tipo de café más estable será realizada posteriormente mediante el análisis de la humedad crítica.

Las isotermas realizadas a 14 ºC muestran un comportamiento similar a las analizadas a 32 ºC, en donde el café liofilizado presenta un valor de monocapa más alto (10.41 gH_2O/100g) que el del café atomizado (6.400 gH_2O/100 g SS) y que el de pasar (5.660 gH_2O/100 g SS).

Al comparar las monocapas del mismo tipo de café a las dos temperaturas de estudio notamos que la monocapa del café liofilizado a 14 ºC presenta un valor más alto (10.41 gH_2O/100g) con respecto al de 32 ºC (7.151 gH_2O/100g), lo cual es lógico considerando el comportamiento típico de las isotermas de adsorción que pueden adsorber mayor contenido de humedad a menor temperatura. Por lo dicho anteriormente y observando el valor de las monocapas a las dos temperaturas, podemos decir que el café liofilizado a 14ºC es más estable que a 32ºC, pudiendo ser ésta una de las principales

explicaciones al por qué los productos como el café son más estables en Quito (14ºC) que en Guayaquil (32ºC).

Este mismo comportamiento es observado en el café obtenido por atomización y el tostado y molido.

3.2 Análisis de la Diferencia en la Adsorción de Agua Dependiendo del Tipo de Secado.

El método utilizado para la industrialización del café puede influir en gran medida en la isoterma de adsorción del producto. La fig. 3.9 muestra las isotermas de adsorción de los tres tipos de café, en donde podemos apreciar que los dos tipos de café soluble (liofilizado y atomizado) muestran isotermas de adsorción con comportamientos muy parecidos. Sin embargo, la isoterma obtenida para el café de pasar (tostado y molido) muestra características muy distintas.

Mientras el café soluble, a actividad de agua de 0.9 alcanza valores de 50 a 60 gH_2O/gss, el café de pasar llega solo a valores cercanos a 30 gH_2O/gss.

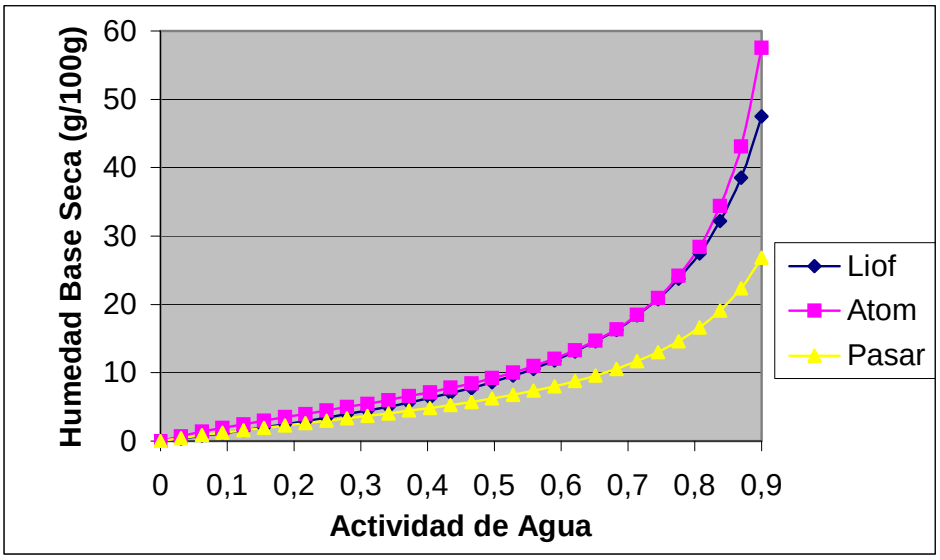


Fig 3.9 Isotermas de Adsorción de Café Liofilizado, Atomizado y de Pasar a 32 ºC

Además, a una humedad constante determinada, los dos tipos de café soluble presentan similares valores de actividad de agua, mientras que el café de pasar presenta valores más altos, lo cual deja notar que con el proceso de industrialización para obtener café liofilizado y atomizado, a medida que se va incrementando el contenido de humedad el agua se encuentra más ligada al alimento en comparación con el café de pasar, lográndose que el café soluble (liofilizado y atomizado) esté más protegido desde cualquier punto de vista, ya sea microbiológico, químico o enzimático.

La fig.# 3.10 muestra las isotermas de adsorción de los tres tipos de café a 14 ºC, observándose comportamientos similares a los descritos en las isotermas a 32 ºC

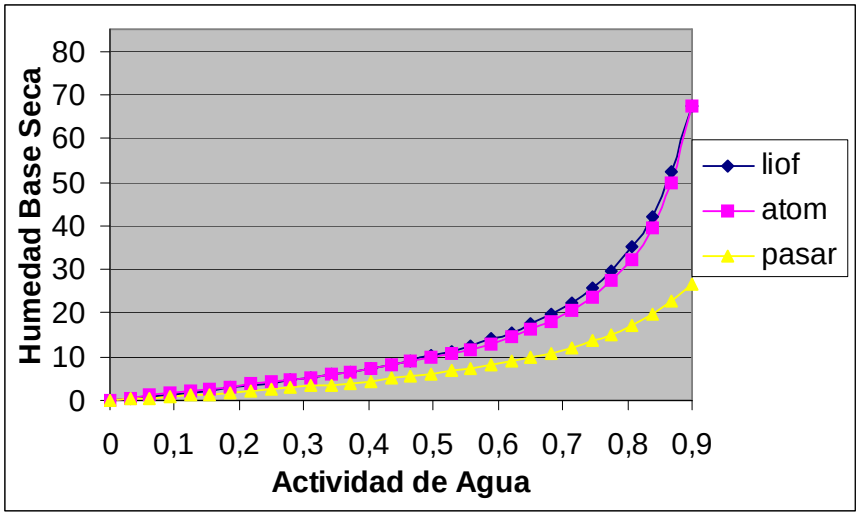


Fig 3.10 Isotermas de Adsorción de Café Liofilizado, Atomizado y de Pasar a 14 ºC

3.3 Análisis del Rango de Actividad de Agua Permitido para Mantener las Características de los Productos.

Para poder determinar el rango de actividad de agua máximo en donde los productos mantienen sus características, se estudió cual era el principal efecto negativo en los productos debido a la transmisión de vapor de agua.

Así, el principal problema por la ganancia de humedad en los dos tipos de café soluble, es la aglomeración del mismo.

Para determinar la humedad crítica del café liofilizado a 32 ºC se sometió al criterio de 25 jueces no calificados, cuatro muestras del producto con distintos contenidos de humedad, como indica la tabla 8:

TABLA 8

CONTENIDOS DE HUMEDAD DE MUESTRAS DE CAFÉ LIOFILIZADO PARA DETERMINACIÓN DE HUMEDAD CRÍTICA

	% Humedad	Humedad Base Seca (g/100g)
Muestra 1	7,22	7,78
Muestra 2	7,94	8,62
Muestra 3	8,71	9,55
Muestra 4	10,86	10,98

Fuente: Elaboración Propia

Una vez tabulados los datos se realizó un análisis de varianza de la muestra 1 versus las muestras 2, 3 y 4, con una variable (humedad) y repeticiones (jueces), considerando que la muestra 1 presenta muy buenas características sensoriales y tiene un valor de humedad por debajo de la monocapa.

Los resultados fueron obtenidos utilizando las fórmulas descritas en el capítulo 2 y son las siguientes:

TABLA 9

RESULTADOS DE ANÁLISIS DE VARIANZA DE MUESTRAS DE CAFÉ LIOFILIZADO

	Valor F experimental	Valor F teórico 5% significancia	Valor F teórico 1% significancia
Muestra 1 - 2	3,27	4,26	7,82
Muestra 1 - 3	7,93	4,26	7,82
Muestra 1 - 4	221,67	4,26	7,82

Fuente: Elaboración Propia

Si el valor F experimental es menor que el valor F teórico, entonces no hay efecto significativo de la fuente de variación considerada sobre los resultados.

Como podemos ver en la tabla 9 el análisis de varianza de las muestras 1 – 2 presenta un valor de F experimental menor que el F teórico, tanto para niveles de significancia del 5% y 1%. Por el contrario, los valores F experimentales de los análisis de varianza de las muestras 1 – 3 y 1 – 4 presentan valores mayores.

Esto significa que la humedad crítica o el contenido máximo de humedad permisible para el café liofilizado a 32 ºC es 8.62 gH_2O/gss o 7.94 % de humedad y actividad de agua de 0.496.

Una vez conocida la humedad crítica y la actividad de agua del café liofilizado a 32 ºC , se puede obtener la humedad crítica a 14 ºC con solo observar en la isoterma de adsorción a 14 ºC cuál es el contenido de humedad a la misma actividad de agua. La humedad crítica para el café liofilizado a 14 ºC es 10.1426 gH_2O/gss.

Para determinar el contenido de humedad crítico del café atomizado a 32 ºC se realiza un procedimiento similar al empleado para café liofilizado. En las tablas 10 y 11 se muestran los resultados obtenidos del análisis sensorial.

TABLA 10

CONTENIDOS DE HUMEDAD DE MUESTRAS DE CAFÉ ATOMIZADO PARA DETERMINACIÓN DE HUMEDAD CRÍTICA

	% Humedad	Humedad Base Seca (g/100g)
Muestra 1	6,69	7,1696
Muestra 2	7,23	7,8018
Muestra 3	7,82	8,4874
Muestra 4	8,45	9,2392

Fuente: Elaboración Propia

TABLA 11

RESULTADOS DE ANÁLISIS DE VARIANZA DE MUESTRAS DE CAFÉ ATOMIZADO

	Valor F experimental	Valor F teórico 5% significancia	Valor F teórico 1% significancia
Muestra 1 - 2	3,50	4,26	7,82
Muestra 1 - 3	19,24	4,26	7,82
Muestra 1 - 4	197,36	4,26	7,82

Fuente: Elaboración Propia

Por lo tanto el contenido de humedad crítico del café atomizado a 32 ºC es 7.8018 gH_2O/gss y actividad de agua de 0.4344.

La humedad crítica del café atomizado a 14 ºC es 8.0067 gH_2O/gss con la misma actividad de agua de 0.4344.

Como resultado en la tabla 12 se muestran los valores de las monocapas y las humedades críticas a 32 ºC y 14 ºC de café liofilizado y atomizado

TABLA 12

MONOCAPAS Y HUMEDADES CRÍTICAS DE CAFÉ LIOFILIZADO Y ATOMIZADO EN LAS DOS CONDICIONES DE ESTUDIO

	Monocapa 32 ºC gH_2O/gss	Humed Crítica 32 ºC gH_2O/gss	Monocapa 14 ºC gH_2O/gss	Humed Crítica 14 ºC gH_2O/gss
Café Liofilizado	7,51	8,62	8,31	10,14
Café Atomizado	5,70	7,80	6,58	8,00

Fuente: Elaboración Propia

Como podemos ver, los valores de monocapa y de humedad crítica a 32 ºC y a 14 ºC son mayores para el café liofilizado, lo cual haría suponer que el café liofilizado tiene un mayor tiempo de vida en percha, sin embargo, debemos analizar también los coeficientes de transferencia de masa, ya que este valor influirá en la velocidad con que se alcanza la monocapa y la humedad crítica de cada uno de los productos.

Analizando las humedades críticas del café liofilizado y atomizado, podemos notar que a actividades de agua distintas los dos tipos de café presentan comportamientos similares de apelmazamiento, por lo tanto,

tendrían la misma movilidad de agua. Esto indica que la actividad de agua no es un factor concluyente en análisis de estabilidad, ya que si fuera así, el apelmazamiento debería ocurrir a la misma actividad de agua. Por lo tanto, se debería realizar un estudio mucho más preciso para analizar la movilidad del agua en éstas dos estructuras con equipos como NMR (resonancia magnética nuclear) o DSC (análisis calorimétrico dinámico)

El análisis de la humedad crítica del café tostado y molida comúnmente llamado de pasar es distinto ya que este producto muestra una gran estabilidad a la aglomeración, por lo tanto, el problema que puede presentar este producto por la ganancia de humedad es microbiológico debido al crecimiento de mohos cuando las condiciones de humedad y temperatura son las adecuadas.

Se realizaron siembras del producto con distintas actividades de agua para registrar el crecimiento de mohos y determinar la humedad crítica de éste producto.

La tabla 13 muestra el contenido de humedad y de actividad de agua de las muestras analizadas.

TABLA 13

CONDICIONES DE MUESTRAS DE CAFÉ DE PASAR PARA LA DETERMINACIÓN DE LA HUMEDAD CRÍTICA

Número de Muestra	Porcentaje de Humedad	Actividad de Agua
1	5,6 %	0,50
2	7,6 %	0,61
3	10,5 %	0,71
4	14,7%	0,81

Fuente: Elaboración Propia

Como resultado de estas siembras no se encontró crecimiento de mohos en ninguna de las muestras. Esto puede ser explicado teóricamente ya que se conoce que los dos tipos de mohos que crecen principalmente en el café son: Aspergillus Ochraceus y Penicilium Versicum, los cuales son objeto de intensos estudios por ser los productores de una micotoxina que afecta la salud humana llamada Ocratoxina.

El Aspergillus Ochraceus y el Penicilium Versicum crecen en actividades de agua superiores a 0.85, por lo tanto es importante evitar su crecimiento manteniendo el producto en actividades de agua inferiores,

impidiéndose también que estos microorganismos produzcan su micotoxina.

Por el tanto, a valores de actividad de agua y humedad de 0.81 y 14.7% respectivamente el café de pasar estaría completamente protegido del riesgo del crecimiento de mohos y sus micotoxinas.

Podemos darnos cuenta entonces que la transmisión de vapor de agua no representa un factor crítico en la determinación del tiempo de vida útil de café de pasar, ya que éste se da a valores de actividad de agua muy altos.

Adicionalmente se han realizado estudios en éste tipo de café analizando el tiempo de vida útil por la influencia de otros factores, como la ganancia de oxígeno, actividad de agua y temperatura.

C. Cardelli y T.P. Labuza 2000 determinaron que el oxígeno tiene el efecto más importante en la disminución del tiempo de vida debido a la oxidación lipídica del café; encontrando que pequeños cambios en el nivel de oxígeno de 0.1% a 1.1% produjeron una aceleración en el deterioro del producto de 1000%. La actividad de agua es el segundo efecto más importante ya que cuando ésta se incrementa en 0.1, se produce una aceleración en el deterioro del producto del 60%. Finalmente un incremento de 10ºC produce 20% de aceleración en el deterioro del producto.

Por lo tanto, estos investigadores determinaron que el café de pasar empacado con actividad de agua de 0.1 y con 1% de oxígeno residual durará 55 semanas a 30 ºC versus sólo 5 semanas si el producto es almacenado al aire libre. Si la temperatura es reducida a 10 ºC, el café empacado con 1% de oxígeno extenderá su vida a 72 semanas versus sólo 7 semanas al aire libre.

Determinación de Coeficientes Globales de Transferencia de Masa

El coeficiente global de transferencia de masa es una medida de la facilidad con que los productos ganan agua hasta alcanzar la humedad crítica.

En el apéndice B se muestra la ganancia de humedad del café liofilizado, atomizado y de pasar.

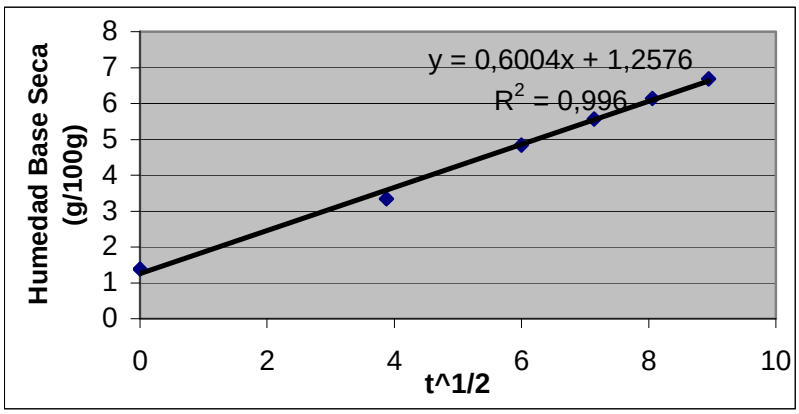


Fig 3.11 Determinación del Coeficiente Global de Transferencia de Masa de Café Liofilizado

El coeficiente global de transferencia de masa del café liofilizado es la pendiente de la recta, es decir, 0.6004

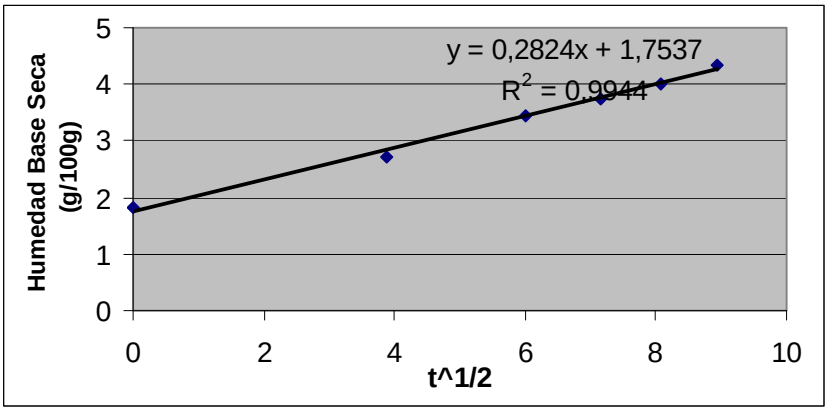


Fig 3.12 Determinación del Coeficiente Global de Transferencia de Masa de Café Atomizado

El coeficiente global de transferencia de masa del café atomizado es la pendiente de la recta, es decir, 0.2824

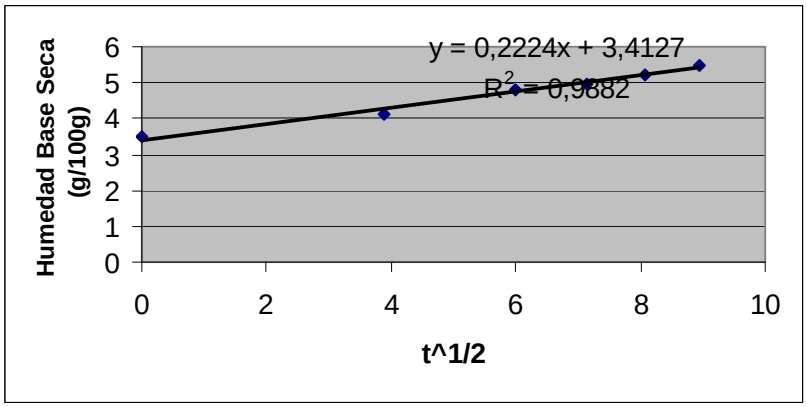


Fig 3.13 Determinación del Coeficiente Global de Transferencia de Masa de Café de Pasar

El coeficiente global de transferencia de masa del café de pasar es la pendiente de la recta, es decir, 0.2224

Las figuras 3.11, 3.12 y 3.13 muestran los coeficientes de transferencia de masa del café liofilizado, atomizado y de pasar respectivamente.

Cabe observar que el coeficiente global de transferencia de masa del café liofilizado es mayor que del atomizado y el de pasar, lo cual indica que el café liofilizado adsorbe con mayor facilidad el agua , tornándose más higroscópico que el café atomizado. Por lo tanto en la determinación del tiempo de vida útil, el contenido de humedad crítico y el coeficiente de transferencia de masa son elementos antagónicos.

Es importante recalcar que el café liofilizado tiene una humedad crítica mayor que el atomizado, sin embargo, tiene también un coeficiente global de transferencia de masa mayor, por lo tanto la rapidez con que el café liofilizado gana humedad es mayor que en el atomizado.

3.4 Análisis de la Permeabilidad Máxima de Vapor de Agua para Empaques de Café en condiciones de Quito y Guayaquil.

Una vez conocidas las isotermas de adsorción de los tres tipos de café en condiciones de Quito y Guayaquil y determinadas las humedades críticas

de los productos en las tales condiciones, se calculó las permeabilidades máximas requeridas por los productos para que mantenga condiciones óptimas durante un período de tiempo determinado, tal como indica la tabla 14

TABLA 14

PERMEABILIDADES REQUERIDAS PARA CAFÉ LIOFILIZADO, ATOMIZADO Y DE PASAR

Tipo de Café	k/x (gH_2O/m^2 día mmHg)	k/x (gH_2O/m^2 día mmHg)
	32 ºC y 83% HR	14 ºC y 75 %HR
Liofilizado	$4.3766x10^{-3}$	$18.5033x10^{-3}$
Atomizado	$2.7450x10^{-3}$	$9.8300x10^{-3}$
Pasar	$31.7946x10^{-3}$	

Fuente: Elaboración Propia

Al analizar la tabla 14 se puede observar que el café liofilizado tanto en las condiciones de Quito y Guayaquil requiere una permeabilidad de 1.8 y 1.5 veces mayor que el atomizado, es decir, una menor barrera de protección a la transmisión de vapor de agua. En conclusión, el método de producción produjo cambios en las características de los productos haciendo al café liofilizado más estable que el café atomizado.

Por otro lado, si comparamos el efecto de las condiciones de almacenamiento sobre el requerimiento de permeabilidad para el mismo producto, obtenemos que el café liofilizado almacenado a 32ºC y 83 %HR tiene un requerimiento de permeabilidad 4 veces menor que a 14 ºC y 75 %HR. El café atomizado a 32 ºC y 83 %HR tiene un requerimiento de permeabilidad 3.5 veces menor que a 14 ºC y 75% HR; notándose claramente el gran efecto que tienen las condiciones ambientales en el requerimiento de barrera a la transmisión de vapor de agua.

La permeabilidad máxima permisible obtenida para el café de pasar a 32 °C y 83% de humedad relativa es mucho mayor que las calculadas para el café liofilizado y atomizado, confirmando así que este tipo de café no presenta gran sensibilidad a la transmisión de vapor de agua. En condiciones menos adversas (14°C y 75%HR) no es posible hallar un valor de permeabilidad de vapor de agua, ya que en éstas condiciones ambientales no ocurriría el crecimiento de mohos debido a que estos se desarrollan en actividades de agua superiores a 0.85 y el ambiente proporciona sólo 75% de humedad.

Es importante recalcar que éste debe ser el procedimiento utilizado para seleccionar un empaque que provea una necesaria barrera a la transmisión de vapor de agua; es decir; se debe estudiar las características del producto como las isotermas de adsorción, las humedades críticas y luego determinar el requerimiento de permeabilidad

para que, en base a estos datos, la empresa productora de plástico fabrique un empaque que cubra las necesidades del producto estudiado.

Las características de los 4 tipos de plásticos utilizados para la predicción del tiempo de vida útil del café liofilizado, atomizado y de pasar se muestran en las tablas 15, 16, 17 y 18

TABLA 15

CARACTERÍSTICAS DEL POLIETILENO DE ALTA DENSIDAD

Espesor	Gramaje (g/m^2)
70 µ	90,5

TABLA 16

CARACTERÍSTICAS DEL LAMINADO 1

Estructura	Espesor	Gramaje (g/m^2)
Poliester	12 µ	16.80
Tinta		3.50
Adhesivo		3.50
Polipropileno	7 µ	15.50
Adhesivo		3.30
Polietileno	40 µ	36.88

TABLA 17

CARACTERÍSTICAS DEL LAMINADO 2

Estructura	Espesor	Gramaje (g/m^2)
Polietileno	40 µ	37
Adhesivo		3.3
Aluminio	6.35 µ	17.14
Adhesivo		3.3
Tinta		3
Polipropileno	20 µ	18

TABLA 18

CARACTERÍSTICAS DEL LAMINADO 3

Estructura	Espesor	Gramaje (g/m^2)
Polietileno-Aluminio- Polipropileno	95 µ	110

La ganancia de humedad del café liofilizado y atomizado a 32 ºC y 83% de humedad relativa, empacados en los plásticos anteriormente mencionados, se muestra en la tabla 19.

TABLA 19

GANANCIA DE HUMEDAD DEL CAFÉ LIOFILIZADO 32ºC Y 83% HR

Días	g/100g PEHD	g/100g Laminado 1	g/100g Laminado 2	g/100g Laminado 3
0	1,3890	1,3890	1,3890	1,3890
6,92	5,2018	2,6115	1,8446	2,8879
8,92	6,1730	3,0775	2,0878	3,1802
10,88	7,2199	3,6020	2,3813	3,4667
13,85	9,2651	5,0371	3,4584	4,3867
17,85	11,7047	6,5833	4,3117	4,7824
21,81	13,4333	8,1061	5,9680	5,4860
27,98	16,1856	10,1260	7,2729	6,9829

Fuente: Elaboración Propia

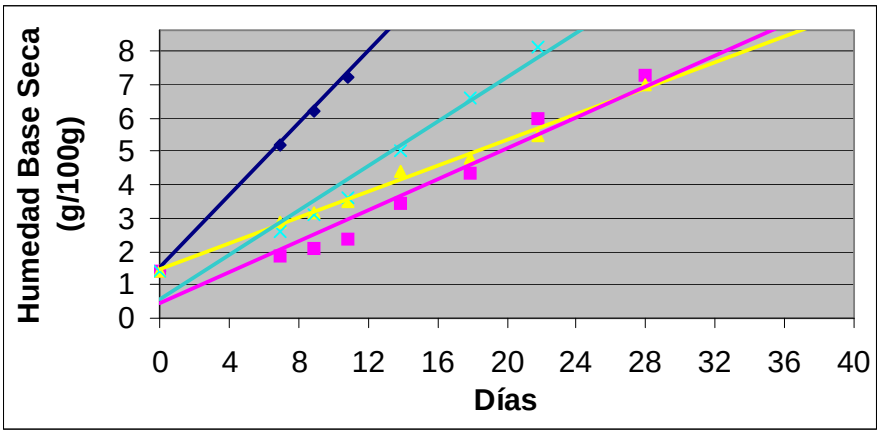
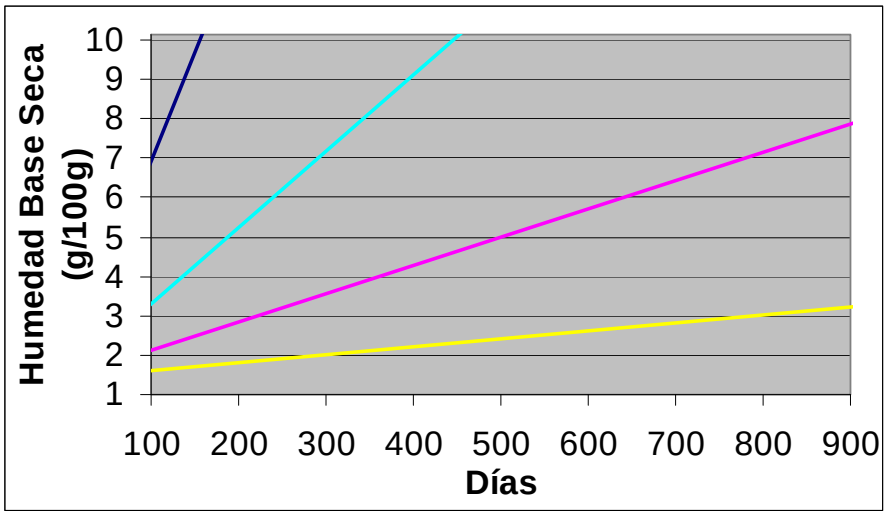


Fig. 3.14 Tiempo de Vida Útil del Café Liofilizado a 32 ºC y 83 % HR

El café liofilizado almacenado en condiciones menos adversas como son 14 ºC y 75 % de humedad relativa ambiental, presenta el siguiente comportamiento con respecto a la ganancia de humedad.

TABLA 20

GANANCIA DE HUMEDAD DEL CAFÉ LIOFILIZADO 14ºC Y 75% HR



Días	g/100g HDPE	g/100g Laminado 1	g/100g Laminado 2	g/100g Laminado 3
0	1,3890	1,3890	1,3890	1,3890
2,0545	1,5075	1,4276	1,4083	1,3968
4,0208	1,6142	1,4546	1,4122	1,4046
7	1,7683	1,5163	1,4353	1,4084
11	2,0251	1,5896	1,4623	1,4162
14,958	2,2384	1,6706	1,5008	1,4278
21,125	2,5386	1,7979	1,5393	1,4317

Fig. 3.15 Tiempo de Vida Útil del Café Liofilizado a 14 ºC y 75% HR

TABLA 21

RESULTADOS DEL CAFÉ LIOFILIZADO ALMACENADO A 32 ºC – 83 % HR Y 14 ºC – 75% HR

Tipo de Plástico	Tiempo de Vida Útil 32 ºC – 83 % HR	Tiempo de Vida Útil 14 ºC – 75 % HR
HDPE	16 días	160 días
Laminado 1	24 días	450 días
Laminado 2	34 días	1200 días
Laminado 3	59 días	4300 días

Fuente: Elaboración Propia

Como podemos observar en la tabla 21 el laminado 3 es el que proporciona mayor tiempo de vida en percha hasta llegar a la humedad crítica en cualquiera de las dos condiciones; a continuación se encuentra el laminado 2 y luego el 1. Es necesario señalar que lo laminados 2 y 3 poseen una capa de aluminio (P = 0 teórica) como barrera a la transmisión de vapor de agua; lo cual hace que proporcione una mayor estabilidad en las dos condiciones estudiadas. El laminado 1 contiene una capa de poliéster (P = 850 cc(STP)cm/m^2 día atm) como barrera, la cual tiene una

mayor permeabilidad que el aluminio, por lo tanto proporciona el menor tiempo de vida de los tres laminados.

Otro de los plástico utilizados es el polietileno de alta densidad (P = 220 cc(STP)cm/m^2 día atm), el cual a pesar de tener muy buena barrera a la transmisión de vapor de agua, es el que proporciona el menor tiempo de vida útil en comparación con los tres laminados.

También es importante destacar el cambio drástico en el tiempo de vida útil que sufre el café liofilizado en las dos condiciones estudiadas; ya que mientras el polietileno de alta densidad a 32 ºC y 83 % HR proporciona 16 días de vida útil; a 14 ºC y 75% HR obtenemos 160 días. Igual sucede con los tres laminados en donde los tiempos de vida se incrementan en gran forma.

Por esto, en función de la aceptación de los consumidores por uno u otro plástico, del costo y dependiendo del tiempo que se considera que el producto será consumido, se podría estudiar la forma de utilizar distintos plásticos para distintos lugares. Sabiendo que esto sería imposible para cada temperatura y humedad de las distintas ciudades; por lo menos se podría utilizar dos o tres plásticos distintos para la comercialización del producto.

Con el café atomizado sucede algo muy similar, presentando un comportamiento con respecto a la ganancia de humedad indicado en la tabla 22

TABLA 22

GANANCIA DE HUMEDAD DEL CAFÉ ATOMIZADO 32ºC Y 83% HR

Días	g/100g HDPE	g/100g Laminado 1	g/100g Laminado 3
0	1,8226	1,8226	1,8226
6,92	4,3159	3,2562	1,9907
8,92	5,0741	3,8069	2,0388
10,88	5,7692	4,2792	2,1108
13,85	7,5091	5,7128	2,3846
17,85	9,2345	6,7357	2,9369
21,81	10,9405	9,2042	3,3740
27,98	13,0061	11,6726	3,9551

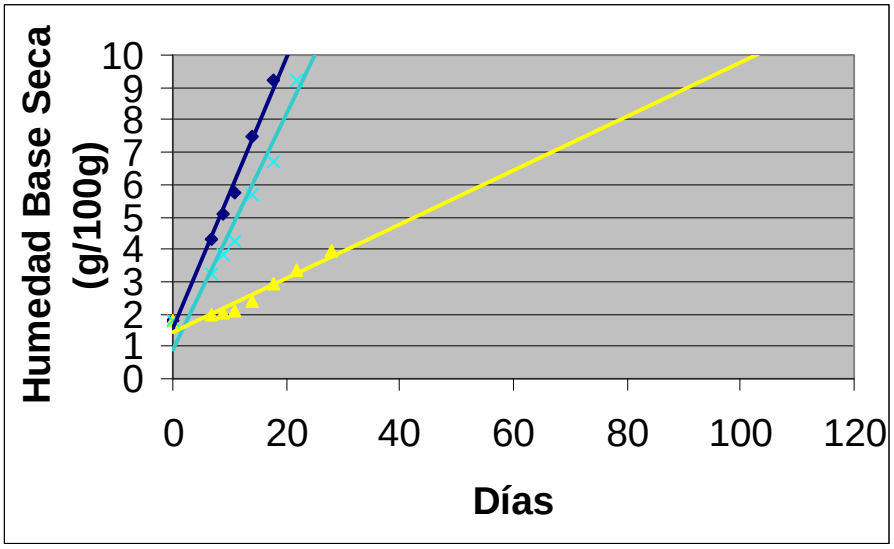


Fig. 3.16 Tiempo de Vida Útil del Café Atomizado a 32 ºC y 83% HR

En condiciones menos adversas el café atomizado presenta el siguiente comportamiento.

TABLA 23

GANANCIA DE HUMEDAD DEL CAFÉ ATOMIZADO 14ºC Y 75 % HR

Días	g/100g HDPE	g/100g Laminado 1	g/100g Laminado 3
0	1,8226	1,8226	1,8226
2,05	2,0142	1,9142	1,8275
4,02	2,1566	1,9588	1,8469
7	2,1910	1,9846	1,8639
11	2,5005	2,1278	1,8882
14,96	2,7068	2,2358	1,9174
21,13	2,9867	2,3790	1,9393

Fuente: Elaboración Propia

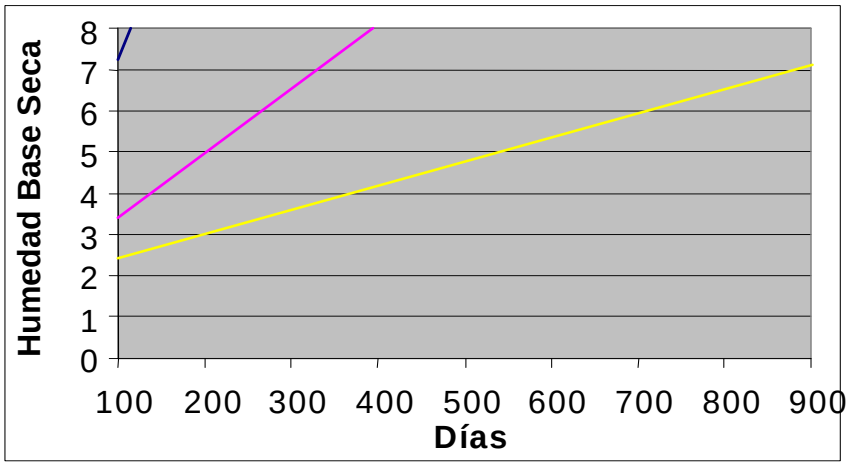


Fig. 3.17 Tiempo de Vida Útil del Café Atomizado a 14 ºC y 75% HR

TABLA 24

RESULTADOS DEL CAFÉ ATOMIZADO ALMACENADO A 32ºC – 83%HR Y 14 ºC – 75% HR

Tipo de Plástico	Tiempo de Vida Útil 32 ºC – 83 % HR	Tiempo de Vida Útil 14 ºC – 75 % HR
HDPE	15 días	114 días
Laminado 1	19 días	200 días
Laminado 3	51 días	1050 días

Fuente: Elaboración Propia

La tabla 24 nos muestra los resultados del tiempo de vida útil del café atomizado en las dos condiciones estudiadas. Podemos darnos cuenta que tiene un comportamiento muy similar al café liofilizado analizado anteriormente; en donde el laminado 2 conteniendo una capa de aluminio es el que proporciona un mayor tiempo de vida útil. Le siguen el laminado 1 y el polietileno de alta densidad.

Igualmente ocurre en alargamiento sustancial del tiempo de vida útil cuando el café es almacenado a 14 ºC y 75% HR.

El comportamiento con respecto a la ganancia de humedad del café de pasar se muestra a continuación en la tabla 25

TABLA 25

GANANCIA DE HUMEDAD DEL CAFÉ DE PASAR A 32ºC Y 83% HR

Meses	g/100g PEHD	g/100g Laminado 1	g/100g Laminado 2	g/100g Laminado 3
0	3,4875	3,4875	3,4875	3,4875
0,2305	4,1688	3,9736	3,6377	3,5409
0,2972	4,4575	4,2005	3,6473	3,5442
0,3625	4,7430	4,4725	3,6505	3,5539
0,4618	6,0001	5,1887	3,6601	3,6834
0,5951	6,7235	6,1206	3,6697	3,5976
0,7271	7,4681	7,0348	3,6825	3,6186
0,9326	8,7333	8,2917	3,7176	3,6591

Fuente: Elaboración Propia

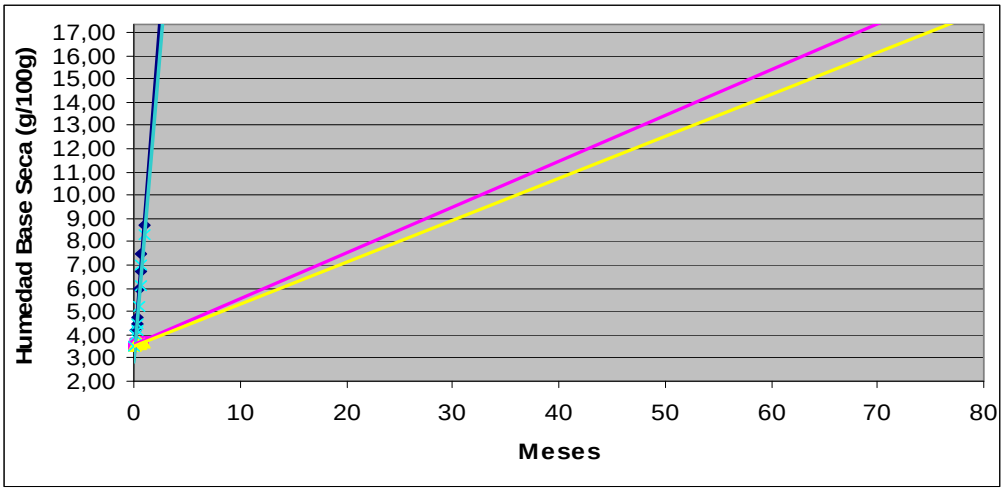


Fig. 3.18 Tiempo de Vida Útil del Café de Pasar a 32 ºC y 83% HR

En las condiciones simuladas de Quito (14ºC y 75% HR) el café de pasar presenta valores de humedad más bajos debido a la menor adversidad de las condiciones ambientales, tal como muestra la tabla 26

TABLA 26

GANANCIA DE HUMEDAD DEL CAFÉ DE PASAR A 14ºC Y 75% HR

Meses	g/100g PEHD	g/100g Laminado 1	g/100g Laminado 2	g/100g Laminado 3
0	3,4875	3,4875	3,4875	3,4875
0,0685	3,5882	3,5067	3,4971	3,5004
0,1340	3,6904	3,5148	3,5035	3,5133
0,2333	3,8365	3,5548	3,5147	3,5133
0,3667	4,1059	3,6012	3,5402	3,5294
0,4986	4,3250	3,6589	3,5561	3,5390
0,7042	4,5376	3,7261	3,5769	3,5551

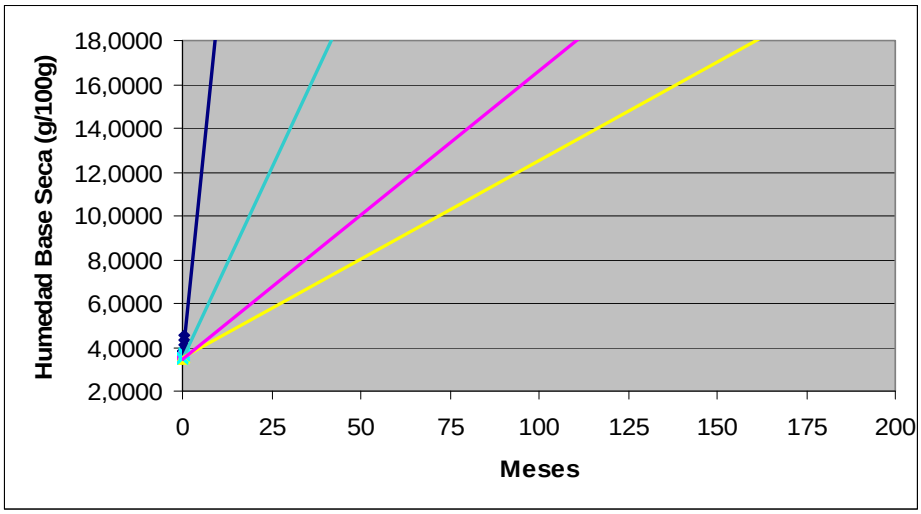


Fig. 3.19 Tiempo de Vida Útil del Café de Pasar a 14 ºC y 75% HR

El tiempo de vida útil del café de pasar en las dos condiciones estudiadas y considerando como único efecto negativo la transmisión de vapor de agua se muestra a continuación en la tabla 27

TABLA 27

RESULTADOS DEL CAFÉ DE PASAR ALMACENADO A 32ºC – 83%HR Y 14 ºC – 75% HR

Tipo de Plástico	Tiempo de Vida Útil 32 ºC – 85 % HR	Tiempo de Vida Útil 14 ºC – 75 % HR
HDPE	71 días	9 meses
Laminado 1	79 días	41.6 meses
Laminado 2	70 meses	110 meses
Laminado 3	77 meses	160 meses

Como podemos ver el tiempo de vida del café de pasar a 14 ºC y 75% HR es mucho mayor que a 32ºC y 83% de HR; siguiendo el comportamiento anteriormente descrito para el café liofilizado y atomizado.

3.5 Análisis de la Relación de Volumen de Producto versus Volumen de Empaque

Los tres tipos de café fueron empacados en una película de polietileno de baja densidad; con dimensiones de 6.5 cm x 13.5 cm, y se registró la ganancia de humedad de los productos.

Vale la pena destacar que aunque ya se haya seleccionado el empaque que brinde la mejor protección al producto, es también importante analizar la diferencia en el tiempo de vida de los tres tipos de café al emplear en el empacado de los mismos distintas relaciones de volumen de producto versus volumen de empaque.

En el presente estudio se utilizaron tres relaciones de volumen de producto versus volumen de empaque (25%, 50% y 75%), mostrados en la tabla 28.

TABLA 28

GANANCIA DE HUMEDAD DEL CAFÉ LIOFILIZADO

(25% - 50% - 75%)

Días	25% m (g/100g)	50% m (g/100g)	75% m (g/100g)
0	1,3890	1,3890	1,3890
2,77	4,4806	3,0758	3,3048
6,79	7,2191	4,8558	5,3138
8,82	8,4523	5,6596	6,2266

Fuente: Elaboración Propia

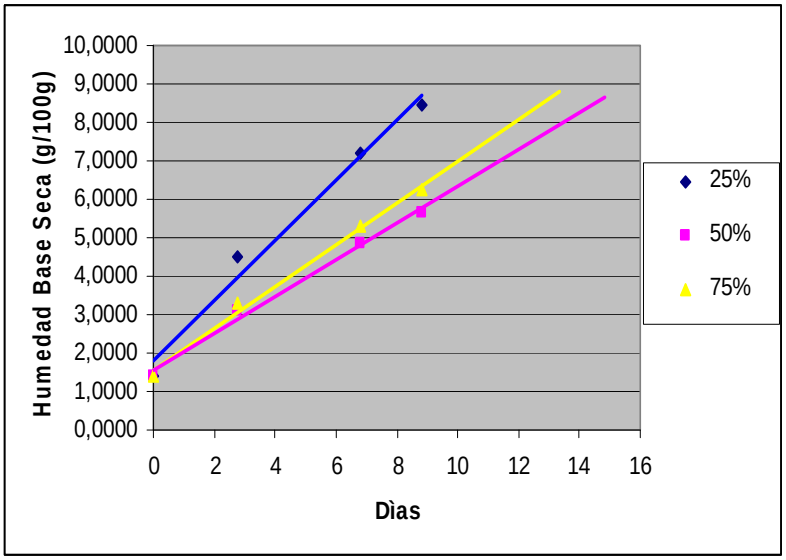


Fig. 3.20 Tiempo de Vida Útil del Café de Liofilizado a 32 ºC y 83% HR

TABLA 29

TIEMPO DE VIDA ÚTIL DEL CAFÉ LIOFILIZADO

	Volumen Producto versus Volumen Empaque		
	25%	50%	75%
Tiempo de Vida Util	9	14	13

Fuente: Elaboración Propia

Podemos darnos cuenta que si existe una diferencia en el tiempo de vida útil del café liofilizado cuando es empacado con distintas relaciones de

volumen de producto versus volumen de empaque con área de empaque constante.

A una relación del 25%, el café liofilizado presenta el menor tiempo de vida útil, ya que solo dura 9 días. Puede notarse que a 50% y 75% permanece estable 14 y 13 días respectivamente y que a estas dos relaciones no existe una diferencia grande en el tiempo de vida útil del café liofilizado; debido posiblemente a que el producto empacado al 50% y al 75% tiene una menor superficie de contacto expuesta al plástico.

El comportamiento del café atomizado empacado a las mismas condiciones anteriormente descritas es el siguiente:

TABLA 30

GANANCIA DE HUMEDAD DEL CAFÉ LIOFILIZADO

(25% - 50% - 75%)

Días	25% m (g/100g)	50% m (g/100g)	75% m (g/100g)
0	1,8226	1,8226	1,8226
2,77	5,0048	3,5756	2,9138
6,79	7,9641	5,4165	4,1583
8,82	9,2612	6,2490	4,7627

Fuente: Elaboración Propia

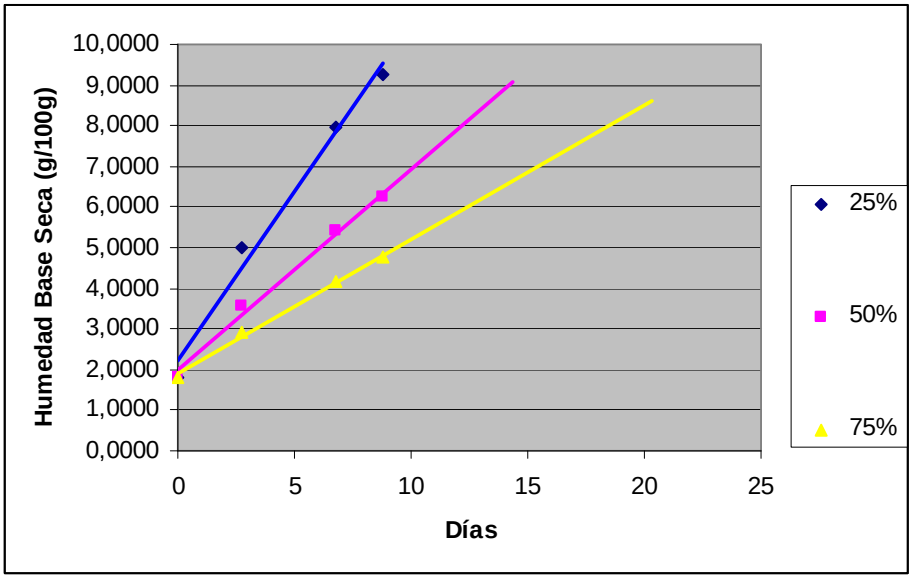


Fig. 3.21 Tiempo de Vida Útil del Café Atomizado a 32 ºC y 83% HR

TABLA 31

TIEMPO DE VIDA ÚTIL DEL CAFÉ ATOMIZADO

	Volumen Producto versus Volumen Empaque		
	25%	50%	75%
Tiempo de Vida Util	7	12	18

Fuente: Elaboración Propia

Las distintas relaciones del área de producto versus área de empaque también afectan el tiempo de vida útil del café atomizado incluso de forma más acentuada, ya que en éste caso si existe una tendencia marcada; existiendo una relación directamente proporcional entre el tiempo de vida y la relación de volumen de producto versus volumen de empaque.

La tabla 32 muestra el comportamiento del café de pasar a las tres relaciones de volumen de producto versus volumen de empaque.

TABLA 32

GANANCIA DE HUMEDAD DEL CAFÉ DE PASAR

(25% - 50% - 75%)

Días	25% m (g/100g)	50% m (g/100g)	75% m (g/100g)
0	3,4875	3,4875	3,4875
2,77	4,9340	4,2659	4,0701
6,79	6,3599	5,1045	4,7274
8,82	7,0069	5,5141	5,0532

Fuente: Elaboración Propia

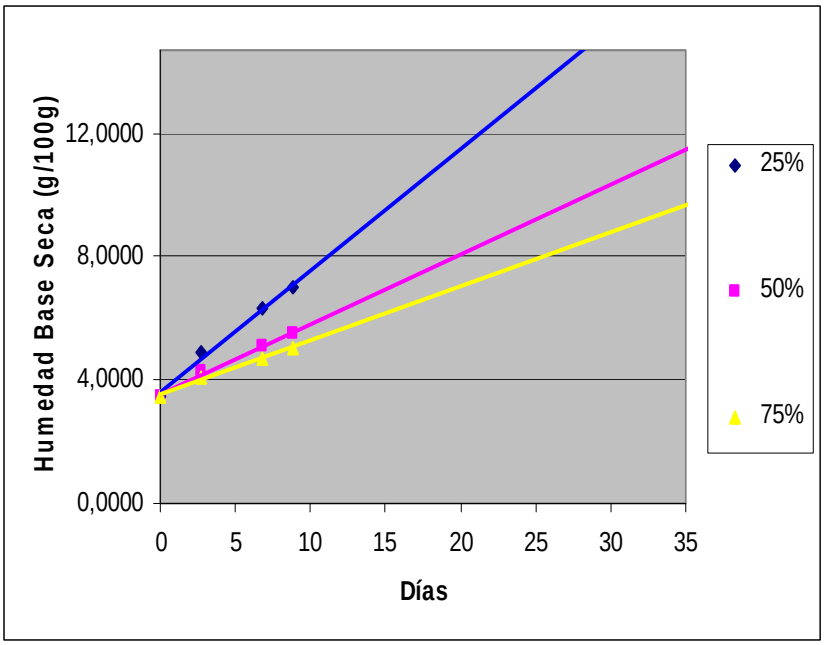


Fig. 3.22 Tiempo de Vida Útil del Café de Pasar a 32 ºC y 83% HR

TABLA 33

TIEMPO DE VIDA ÚTIL DEL CAFÉ DE PASAR

	Volumen Producto versus Volumen Empaque		
	25%	50%	75%
Tiempo de Vida Útil	28 días	49 días	64 días

Fuente: Elaboración Propia

CAPÍTULO 4

4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Conclusiones

1. El procedimiento descrito en esta tesis para la obtención de la permeabilidad de vapor de agua máxima permitida es una herramienta muy valiosa ya que permite realizar la selección del empaque que brinde la protección necesaria al producto para mantener sus características durante el almacenamiento. Además es un procedimiento sencillo, que no requiere de tecnología muy sofisticada y que se puede aplicar sin problemas a cualquier alimento que presente sensibilidad a la transmisión de vapor de agua.

2. El método de producción de los productos cambia la estructura de los mismos, produciendo que el agua interactúe con el alimento en forma distinta, incluso cuando la materia prima utilizada para su elaboración es

la misma. Esto ocasiona que los alimentos presenten distinta estabilidad a la transmisión de vapor de agua, y por lo tanto tienen diferentes requerimientos de barrera; haciendo indispensable que la selección del empaque sea realizada individualmente a cada producto.

3. Considerando los dos tipos de café soluble (liofilizado y atomizado) estudiados, el café liofilizado es el que presenta mayor estabilidad a la transmisión de vapor de agua, ya que presenta una permeabilidad máxima permitida de 1.8 y 1.5 veces mayor que el atomizado en las condiciones de Quito y Guayaquil respectivamente; es decir, requiere menor barrera de transmisión de vapor de agua.

4. El café de pasar no necesita una gran barrera a la transmisión de vapor de agua debido a que la humedad crítica de éste producto está sobre 0.81 de actividad de agua, valor muy alto para ser considerado crítico. Sin embargo estudios realizados por Labuza y Cardelli demuestran que el principal factor de deterioro es la transmisión de oxígeno, por lo tanto, la selección del empaque de este tipo de café deberá ser realizado tomando en cuenta los problemas relacionados con la ganancia de oxígeno.

5. Una vez realizada la selección del empaque se debe estudiar la relación de volumen de producto versus volumen de empaque, ya que esta tesis

demuestra que el tiempo de vida útil disminuye mientras menor es dicha relación. Así, los tres tipos de café muestran el menor tiempo de vida útil al 25% de volumen de producto versus volumen de empaque, y aumenta sucesivamente el tiempo de vida útil a 50% y 75%

Recomendaciones

- La determinación de la permeabilidad máxima permitida debe realizarse individuamente a cada producto aun cuando sean del mismo género, ya que todos los alimentos tienen distinto requerimiento de barrera a la transmisión de vapor de agua.

- Las empresas productoras de alimentos deben estudiar las características de sus productos con respecto a la ganancia de humedad, ya que son ellos los responsables de calcular la permeabilidad máxima permitida y proporcionar este dato a los industriales de plásticos; de esta forma ellos podrán elaborar plásticos que provean la protección que los alimentos necesitan.

- La correcta determinación de la humedad crítica es un factor de gran importancia para determinar la permeabilidad máxima permitida; ya que se debe seleccionar el principal factor de deterioro del alimento; ya sea sensorial, químico, enzimático o microbiológico; y el plástico seleccionado deberá proteger al producto de cualquiera de estos factores durante un tiempo determinado.

BIBLIOGRAFÍA

1. CHEFTEL, JEAN-CLAUDE Y CHEFTEL, HENRY, Introducción a la bioquímica y tecnología de los alimentos, Editorial Acribia. Zaragoza, España. Volumen 1.

2. Banco Central del Ecuador. Proyecto SICA – BIRF – MAG

3. BARBOSA, Deshidratación de alimentos, Editorial Acribia. México D.F, México. 1996

4. JAMIESON, MICHAEL Y JOBBER, PETER. Manejo de los alimentos. Editorial Pax-México. México D.F, México. Volumen1.

5. LABUZA, THEODORE P. Moisture sorption: practical aspects of isotherms measurement and use. Published by the association of Cereal Chemists St Paul, Minnesota.

6. VIDALES GIOVANNETTI, MA. DOLORES. El mundo del envase. Editorial Gustavo Gili, S.A México D.F, México.1995

7. V.P. STRAUSS, R.J. PORCJA, AND S.Y. CHEN. Volume Effects of Starch-Water Interactions Department of Chemistry, Rutgers, The State University of New yersey, New Brunswick, NJ 08903

8. STEPHEN BRUNAUER, P. H. EMMETT AND EDWARD TELLER. Adsorption of Gases in Multimolecular Layers Contribution from de bureau of Chemistry and Soils and George Washington University.

APÉNDICES

ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL
ESPOL
CIB-ESPOL

APÉNDICE A

ECUADOR: EVOLUCIÓN MENSUAL DE LAS EXPORTACIONES DE CAFÉ INDUSTRIALIZADO

Años	**2,000**	**2,001**	**2,002**	**2,003**	**2,004**	**Variación**
Meses	**Volumen tm**					**2003/04 %**
Enero	232.8	699.0	657.0	442.3	1,195.2	170.2
Febrero	100.6	719.3	557.8	369.9	1,148.5	210.5
Marzo	259.6	884.8	691.9	664.9	1,083.7	63.0
Abril	347.8	795.3	617.1	770.4	1,152.9	49.6
Mayo	677.0	746.8	814.5	671.0	1,534.1	128.6
Junio	674.4	543.0	405.0	754.2	1,217.4	61.4
Julio	506.5	547.2	637.1	680.5	1,661.9	144.2
Agosto	667.0	457.6	814.2	657.2	2,012.1	206.2
Septiembre	565.6	821.0	794.4	795.8	1,766.1	121.9
Octubre	861.4	656.6	578.5	839.7	959.4	14.3
Noviembre	531.4	694.4	878.8	876.1		
Diciembre	581.4	536.2	679.3	365.7		
Total tm	**6,005.4**	**8,101.0**	**8,125.6**	**7,887.7**	**13,731.3**	
US$ FOB (000)	**17,103.0**	**26,667.3**	**31,048.9**	**29,233.3**	**56,465.1**	

APÉNDICE B

Tiempo (min)	Humedad Base Seca Café Liofilizado (g/gss)	Humedad Base Seca Café Atomizado (g/gss)	Humedad Base Seca Café Pasar (g/gss)
0	1,38903	1,82262	3,48753
15	3,34913	2,72937	4,14063
36	4,83692	3,45944	4,77664
51	5,56564	3,74613	4,95786
65	6,14591	4,02283	5,20064
80	6,68570	4,34952	5,47761

ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL
ESPOL
CIB-ESPOL