

# UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN CRISTÓBAL DE HUAMANGA

FACULTAD DE INGENIERÍA QUÍMICA Y METALURGIA

ESCUELA DE FORMACIÓN PROFESIONAL DE  
INGENIERÍA EN INDUSTRIA ALIMENTARIAS



**“SIMULACIÓN DE TRANSPIRACIÓN Y  
RESPIRACIÓN POSTCOSECHA DEL TUMBO  
(*Passiflora mollissima* Bailey) BAJO CONDICIONES  
AMBIENTALES DE TEMPERATURA, HUMEDAD  
RELATIVA”**

Tesis para optar el Título Profesional de:

**INGENIERA EN INDUSTRIAS ALIMENTARIAS**

**PRESENTADO POR:**


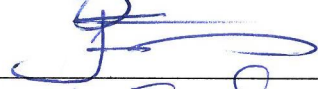
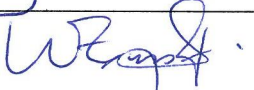
ALARCÓN MENDOZA, Isabel Angélica

**Ayacucho – Perú**

**2017**

## ACTA DE CONFORMIDAD

Los que suscribimos, miembros de Jurado designado para el acto público de sustentación de tesis cuyo título es "SIMULACIÓN DE TRANSPIRACIÓN Y RESPIRACIÓN POSTCOSECHA DEL TUMBO (*Passiflora mollissima* Bailey) BAJO CONDICIONES AMBIENTALES DE TEMPERATURA, HUMEDAD RELATIVA", presentado por la Bachiller en Ingeniería en Industrias Alimentarias Isabel Angélica, ALARCÓN MENDOZA, el cual fue expuesto el día 09 de febrero de 2017, en mérito a la Resolución Decanal N° 011-2017-FIQM-D, de fecha 07 de febrero de 2017, damos nuestra CONFORMIDAD a la tesis mencionada y declaramos al recurrente apto para que pueda iniciar las gestiones administrativas conducente a la expedición y entrega del Título Profesional de Ingeniero en Industrias Alimentarias.

MIEMBROS DEL JURADO	DNI	FIRMA
M. Sc. Julio Fernando PÉREZ SÁEZ	06591392	
Ing. Jesús Javier PANIAGUA SEGOVIA	28295100	
Mg. Sc. Wilfredo TRASMONTA PINDAY	07560082	

Ayacucho, 25 de Octubre de 2017

*Dedico esta tesis a mi familia, por haberme apoyado en todo momento, por sus consejos, sus valores, por la motivación constante que me ha permitido ser una persona de bien, pero más que nada, por su amor.*

*Por los ejemplos de perseverancia y constancia que los caracterizan y que me han conducido siempre, para salir adelante.*

*A mi esposo Claudio e hija Antonella por ser mi inspiración y motivo de seguir adelante en todos los proyectos que me trazo, y por el amor que me brindan cada día.*

*Isabel*

## **AGRADECIMIENTO**

En primer lugar a Dios y Nuestra Madre Auxiliadora, que están en todo momento conmigo guiándome a aprender de mis errores y a no cometerlos más.

A mis Padres Angélica Mendoza Altamirano y José Alarcón Jurado y mis hermanas por todo el apoyo que me brindaron día a día en el transcurso de cada año de mi carrera universitaria.

A mi esposo Claudio e hija Antonella por apoyarme y aconsejarme a que uno debe cumplir sus objetivos.

A la Universidad Nacional de San Cristóbal de Huamanga, que me ha dotado de conocimientos teóricos y experiencias necesarias para atender las demandas regionales y nacionales de desarrollo.

A la Facultad de Ingeniería Química y Metalurgia y la Escuela de Formación Profesional de Ingeniería de Industrias Alimentarias por ser el centro de mi profesionalización.

A los docentes de esta casa de estudios, que con su ardua labor imparten conocimientos y son guía para los estudiantes. Especialmente, al asesor de tesis Ing. Alberto Huamaní Huamaní, por su dedicación, comprensión, orientación y aporte de sus conocimientos, para que esta experiencia investigativa fuese una realidad.

## ÍNDICE GENERAL

Nº	CONTENIDO	Pág.
	<b>RESUMEN</b>	
	<b>INTRODUCCIÓN</b>	1
1.1	GENERALIDADES	1
1.2	DEFINICIÓN DEL PROBLEMA	2
1.3	ANTECEDENTES	3
1.4	FORMULACIÓN DEL PROBLEMA	7
1.5	OBJETIVOS	7
1.5.1	Objetivo General	7
1.5.2	Objetivos Específicos	7
1.6	VARIABLES	8
	<b>II. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA</b>	
2.1	MARCO TEÓRICO DE LAS VARIABLES INDEPENDIENTES	9
2.1.1	Tumbo serrano	9
2.1.2	FACTORES QUE AFECTAN A LA RESPIRACIÓN Y TRANSPIRACIÓN DE LAS FRUTAS	12
2.1.2.1	Temperatura	12
2.1.2.2	Humedad relativa	13
2.3	MARCO TEÓRICO DE LAS VARIABLES DEPENDIENTES	14
2.3.1	Marco conceptual de calidad de frutas	14
2.3.2	Calidad fisiológica	16
2.3.3	Respiración	17

2.3.4	Transpiración	24
2.3.5	Calidad organoléptica	33
2.3.6	Transferencia de masa durante el almacenamiento postcosecha de frutas y hortalizas	37
2.4	METODOLOGÍA DE FUNCIÓN DE CONVENIENCIA EN OPTIMIZACIÓN DE PROCESOS	41
2.5	VIDA ÚTIL	43
2.5.1	Estimación de vida útil	44

### **III. MATERIALES Y MÉTODOS**

3.1	LUGAR DE EJECUCIÓN	48
3.2	POBLACIÓN Y MUESTRA	48
3.2.1	Población	48
3.2.2	Muestra	48
3.3	MATERIALES, REACTIVOS Y EQUIPOS	49
3.3.1	Materiales	49
3.3.2	Reactivos	49
3.3.3	Equipos	49
3.4	METODOLOGÍA EXPERIMENTAL	50
3.4.1	Diseño experimental para la optimización de variables respuestas múltiples en función de la temperatura y Humedad relativa ambiental	51
3.4.2	Diseño experimental para la simulación de transpiración del fruto del tumbo	57
3.4.3	Procedimiento experimental para la medición de respiración	58
3.4.4	Procedimiento de cálculo de vida útil	63

## **IV. RESULTADOS Y DISCUSIONES**

4.1	Optimización de las variables de almacenamiento en función de respuestas múltiples.	66
4.2	Simulación de transpiración durante el tiempo de almacenamiento	76
4.3	Respiración como función de temperatura y humedad relativa de almacenamiento	78
4.4	Vida útil	84
	<b>CONCLUSIONES</b>	86
	<b>RECOMENDACIONES</b>	87
	<b>REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA</b>	88
	<b>ANEXO</b>	

## ÍNDICE DE FIGURAS

Nº	Título	Pág.
1	Fruto del tumbo serrano	12
2	Cambios de calidad en frutas y vegetales	15
3	Respiración de un fruto	18
4	Metabolismo general de la respiración	21
5	Comportamiento respiratorio de frutas climatéricas y no climatéricas	23
6	Ilustración del proceso de transpiración	27
7	Esquema de la transpiración de un fruto	31
8	Metodología experimental a seguir	50
9	Cabinas con diferentes humedades relativas (75, 85 y 95% respectivamente)	53
10	Muestras de fruto de tumbo serrano en diferentes humedades relativas (75, 85 y 95% respectivamente)	53
11	Cabinas con humedades relativas diferentes a temperatura constante de almacenamiento.	54
12	Control de peso, evaluación de la calidad y contenido de humedad del fruto	54
13	Diagrama de bloques del algoritmo completo de optimización desarrollado	55
14	Cabinas con diferentes humedades relativas (75, 85 y 95% respectivamente)	57
15	Toma de medidas del fruto de tumbo	57
16	Muestras de fruto de tumbo serrano en diferentes humedades relativas (75, 85 y 95% respectivamente)	57



17	Control de pesos en los tiempos indicados	58
18	Esquema del sistema para medir la respiración de frutas	59
19	Superficies predictivas para la pérdida de peso, calidad y humedad en función de temperatura y humedad relativa durante el almacenamiento postcosecha del tumbo.	68
20	Gráficos de superficie de la función de conveniencia individual y total y contornos de la optimización-DO de tumbo serrano. Izquierda: conveniencia individual para la pérdida de peso, calidad y humedad. Derecha: conveniencia total.	71
21	Pérdida de peso (g) del tumbo serrano durante el almacenamiento postcosecha a Temperatura de 20°C y Humedad Relativa de 85%.	76
22	Pérdida de peso (%) del tumbo serrano durante el almacenamiento postcosecha a Temperatura de 20°C y Humedad Relativa de 85%.	77
23	Difusividad de agua durante la transpiración del tumbo serrano en el almacenamiento postcosecha a Temperatura de 20°C y Humedad Relativa de 85%.	77
24	Variación de la respiración producción de CO <sub>2</sub> (mg) a la Temperatura de almacenamiento de 20°C y Humedades relativas de 75,0; 85,0 y 95,0 % respectivamente.	79
25	Variación de la respiración producción de CO <sub>2</sub> (mg) a la Temperatura de almacenamiento de 10°C y Humedades relativas de 75,0; 85,0 y 95,0 % respectivamente	80
26	Variación de la respiración producción de CO <sub>2</sub> (mg) a la Temperatura de almacenamiento de 2°C y Humedades relativas de 75,0; 85,0 y 95,0 % respectivamente.	80

27	Variación de consumo de O <sub>2</sub> (%) y Producción de CO <sub>2</sub> (%) durante la respiración del tumbo serrano	81
28	Velocidad de respiración de dO <sub>2</sub> /dt y de dCO <sub>2</sub> /dt durante la respiración del tumbo serrano.	81

## ÍNDICE DE TABLAS

<b>Nº</b>	<b>Título</b>	<b>Pág</b>
1	Valor nutritivo en g/100g de tumbo fresco.	12
2	Humedades relativas de diferentes sales saturadas a diferentes temperaturas.	13
3	Presión de vapor del agua a varias temperaturas.	28
4	Pérdida fisiológica de peso que afecta la calidad comercial en vegetales	33
5	Diseño escalonado para el muestreo del Diseño escalonado de Gacula	47
6	Variables independientes de evaluación y sus niveles mínimos y máximos.	51
7	Diseño experimental para la evaluación de transpiración del fruto del tumbo	52
8	Base de datos experimentales para Optimización de variables	66
9	Análisis de varianza para variable transpiración	69
10	Los valores óptimos de las variables independientes y variables dependientes en el almacenamiento del tumbo serrano	73
11	Tiempos de vida útil calculados a través de la función de Weibull	84

## RESUMEN

El propósito del trabajo fue estudiar el comportamiento de la transpiración postcosecha del fruto del tumbo serrano a través de metodología matemáticas capaces de describir las curvas típicas del proceso de transpiración usando la metodología del ajuste polinomial de la función de conveniencia de superficie respuesta de 2 variables y la metodología de Alvares y Legues modificada. Estas metodologías fueron producto de un análisis físico y matemático del proceso difusivo no lineal del agua durante la transpiración, y fueron transcritas a programas computacionales desarrollados por el asesor y el autor. Finalmente, estas metodologías fueron validadas en función a los datos experimentales de transpiración obtenidos a partir de tumbo serrano, en los diferentes experimentos.

La metodología usada fue desarrollar programas en Lenguaje Matlab correspondiente a cada método: método de regresión de función conveniencia y método de solución numérica de Newton Rapson. La parte experimental fue desarrollada acondicionando ambientes de Humedad relativa conocidas (75, 85 y 95%) y llevadas a temperaturas de 2, 10 y 20°C de almacenamiento, en los cuales se controlaron las variaciones de peso en cada tiempo de almacenamiento, la respiración se cuantificó a través del consumo de sustrato según Saltveit, 1999. La vida útil fue determinada a través del método probabilístico de Weibull, en el cual las muestras almacenadas fueron evaluados a través de la prueba sensorial cada intervalo de tiempo según el diseño escalonado de Gacula. Como resultado y conclusión fue: La transpiración (peso) del tumbo serrano en función de la temperatura, humedad relativa y tiempo es:

$$Peso = 120,32 - 1,13T - 0,0024T^2 - 0,79HR + 0,0043HR^2 + 0,014THR$$

La respiración (producción mL CO<sub>2</sub>) del tumbo serrano es función de la temperatura y humedad relativa representa una función matemática de segundo orden.

$$mgCO_2 = 15,93 - 0,387T + 0,00068T^2 - 0,1315HR + 0,0005HR^2 + 0,0046THR$$

El modelamiento de calidad (marchitez) por la metodología de superficie respuesta es:

$$Marchitez = 5,35 + 0,6040T + 0,0002T^2 - 0,1841HR + 0,0014HR^2 - 0,0072THR$$

La estimación de la vida útil del tumbo serrano por el método probabilístico de Weibull es: a 20°C a 75,6% (3,44 días), 85,1% (4,03 días), 97,6% (5,32 días); a 10°C a 75,7% (4,83 días), 86,8% (5,71 días), 98,2% (6,41 días); a 2°C a 75,7% (6,25 días), 87,7% (7,46 días), 98,5% (9,66 días).

# I. INTRODUCCIÓN

## 1.1 GENERALIDADES

El tumbo serrano (*Passiflora mollissima* B.) es una especie nativa de las zonas andinas, aunque también se cultiva de forma silvestre en la costa peruana y ceja de selva. En los últimos años, debido al crecimiento de la demanda internacional del maracuyá y granadilla, se ha perdido el interés por utilizar sosteniblemente este recurso. La potencialidad de la especie *Passiflora mollissima* B. radica en los beneficios que pueden generar sus frutos, como se señalan los antecedentes de investigaciones científicas que se exponen posteriormente.

En la gestión postcosecha es fundamental tener en cuenta, que los vegetales continúan activos fisiológicamente aún después de cosechadas. Asimismo, el producto cosechado está constantemente expuesto a la pérdida de agua debido a la transpiración y a otros fenómenos fisiológicos (Álvarez, 2012).

Los frutos del tumbo serrano *Passiflora*, en particular, presentan una serie de problemas tras su recolección, derivados de la falta de aporte hídrico y las condiciones ambientales de exposición, como es la marchites, pérdida de firmeza y arrugamiento que desmerecen su valor comercial, en la actualidad no existe estudio referente al comportamiento fisiológico de este fruto que es de mucha importancia para su conservación y comercialización. Frente a este problema para controlar el proceso de transpiración y respiración en postcosecha de frutas, se hace necesaria el estudio fisiológico del tumbo, la optimización de variables de almacenamiento como también la utilización de

ecuaciones matemáticas para la simulación de la cinética de transferencia de materia (agua) ocurrida durante postcosecha de vegetales, así predecir la pérdida de peso, calidad y vida útil del tumbo serrano.

El agua es el componente más abundante en las frutas y hortalizas, y el que más rápido se pierde por la transpiración durante la postcosecha. Basta una pérdida del 3 al 6 % para que se haga visibles efectos de marchitez, pérdida de firmeza y arrugamiento que desmerecen su valor comercial. Monserrat *et al.* (2011) considera el valor máximo de pérdida de peso comercialmente admisible es del 5%. Hasta el momento este tema aún no ha sido investigado en el caso del tumbo serrano.

## **1.2 DEFINICIÓN DEL PROBLEMA**

Una de las manifestaciones rápidas de la transpiración es la deshidratación del pericarpio que causa marchitamiento y hace que la fruta sea poco atractiva para los consumidores. En el tumbo serrano (*Passiflora mollissima Bailey*) este problema aun no es muy conocido. El desarrollo del estudio del comportamiento de la transpiración en postcosecha, es útil para su aplicación en las tecnologías de conservación, uso de empaques, transporte, estudio de vida útil y su explotación comercial. Todo ello de gran importancia para la economía de las familias campesinas, específicamente localizadas en la sierra peruana.

### 1.3 ANTECEDENTES

- Espinal-Ruiz *et al.* (2016) en la investigación: Impact of pectin properties on lipid digestion under simulated gastrointestinal conditions: Comparison of citrus and banana passion fruit (*Passiflora tripartita var. mollissima*) pectinas. Pectina metoxila- Medio (52% mol / mol, MMP) se aisló de fruta de la pasión de plátano (*Passiflora tripartita var. mollissima*) por extracción ácida caliente. El impacto de la MMP en la digestión de lípidos se comparó con la de las pectinas de cítricos comerciales con alto (71% mol / mol, HMP) y baja (30% mol / mol, LMP) grado metoxilación. La velocidad y extensión de la digestión de lípidos disminuyó con el aumento de forma simultánea tanto el peso molecular y metoxilación pectina, con los ácidos grasos libres liberados después de 120 min de la digestión intestinal. Estos resultados tienen importantes implicaciones para la comprensión de la influencia de la pectina en la digestión de los lípidos. El control de la digestibilidad de lípidos dentro del tracto gastrointestinal puede ser importante para el diseño y desarrollo de nuevos alimentos funcionales para controlar la liberación bioactivo o para modular la saciedad.
- Inocente (2015), en la investigación “Diseño e implementación de una cadena de valor viable y sostenible para productos alimenticios y cosméticos elaborados con extractos estabilizados de *Passiflora mollissima L.* (tumbo serrano)” en la cual las tres fases (cadena de valor como materia prima, producto desarrollado y comercialización) del proyecto hacen posible que la cadena de valor generada sea viable y sostenible.



- Conde-Martines *et al.* (2014) investigaron los volátiles de olor activo y sabor de tumbo (*Passiflora mollissima* (Kunth) LH Bailey) identificaron por evaporación asistida de solvente los siguientes compuestos: linalol, acetato de hexilo, 1,8-cineol, acetato de butilo y los compuestos aromáticos claves de esta fruta. Otros olores relevantes por su contribución al sabor global fueron: acetato de 2-metilpropilo, (Z) -3-hexen-1-ol y (Z) -3-hexenilo acetato. Compuestos de azufre, acetato de 3-sulfanylhexyl y metional, se informó aquí con el primer equipo volátiles de olor activo en Tumbo. Por HPLC-ESI-MS análisis de las mezclas glucosídico y GC-MS análisis de los compuestos volátiles liberados enzimáticamente con glucosidasa, (Z) -3-hexenilo  $\beta$ -D-glucopiranosido y linalilo  $\beta$ -D-glucopiranosido identificados fueron los precursores del aroma en *Passiflora mollissima*. El tratamiento térmico de la mezcla de glicosídico a un pH nativo de cis-casete y óxidos de linalol trans-furanoide, así como,  $\alpha$ -terpineol, los compuestos de que presentan notas de olor florales.
- Encina *et al.* (2011) determinaron la composición química y sus compuestos bioactivos en néctar de tumbo. Se alcanzó una retención de los compuestos bioactivos del néctar en comparación con la fruta para el ácido ascórbico, carotenos totales y compuestos fenólicos del 61,81; 72,68 y 64,22%, respectivamente; obteniéndose una capacidad antioxidante de 323,75  $\mu$ g eq trolox/g (DPPH, fase hidrofílica) y de 349,91 y 471,54  $\mu$ g eq trolox/g (ABTS $\bullet$ +, fase hidrofílica y lipofílica), respectivamente.

- Botero *et al.*, (2007) determinaron que la especie *Passiflora mollissima* B. posee mayor capacidad antioxidante comparada con 15 frutas colombianas, usando las técnicas FRAP y midiendo el potencial de ionización por voltametría cíclica.
- Contreras *et al.* (2010), han determinado mediante las técnicas de ABTS, DPPH y FRAP que existen diferencias significativas entre la capacidad antioxidante del tumbo y otras frutas colombianas.
- Rojano *et al.* (2012), han determinado que los extractos acuosos de curuba son ricos en polifenoles especialmente taninos, flavonoides y ácidos fenólicos. Además, poseen una alta capacidad para atrapar las diversas especies reactivas de oxígeno, especialmente el radical ROO., con un valor ORAC más alto que la mayoría de frutas y verduras estudiadas.
- Vasco *et al.* (2008) han evaluado la cantidad de ácido ascórbico, compuestos fenólicos y actividad antioxidante en los frutos de *Passiflora mollissima* cultivados en Ecuador, cuyos resultados son: 63-93 mg/100 g de ácido ascórbico/fruta fresca,  $1010 \pm 198$  mg/ 100 g de compuestos fenólicos expresados en ácido gálico/fruta fresca y una capacidad antioxidante de  $70 \pm 4$   $\mu$ mol Trolox/g fruta fresca.
- Goykovic *et al.* (1993), han determinado los parámetros de rendimiento en jugo del fruto de tumbo en dos tipos de extracciones: centrifugación y succión. Los resultados del rendimiento en jugo del fruto en la extracción por succión fueron mayores que la extracción por centrifugación.

- Edwin *et al.* (2007), han comprobado la actividad hipoglucemiante del extracto etanólico de *Passiflora mollissima* L. en ratas diabéticas inducidas por aloxano. Obtuvieron como resultado que una dosis de 100 mg/kg y 200 mg/kg redujeron el nivel de azúcar en las ratas.
- Nicolls (1970), ha comprobado la actividad antifúngica utilizando la planta entera de *Passiflora mollissima* L., a excepción de los frutos que presentaron nula actividad frente a hongos.
- Foehlich *et al.* (1989), han determinado la presencia de compuestos volátiles (30 alcanos, alkeno, compuestos aromáticos y terpenos); 4 aldehídos, 11 cetonas, 36 alcoholes; 4 lactonas, 5 ácidos grasos, 47 ésteres.
- Olafsdottir *et al.* (1997), han encontrado glicósidos cianogénicos como linamarina en *Passiflora mollissima* L.

## **1.4 FORMULACIÓN DEL PROBLEMA**

¿Cuál será el comportamiento matemático de la transpiración y respiración; condiciones óptimas de almacenamiento y vida útil en postcosecha del tumbo serrano (*Passiflora mollissima* B.) bajo las condiciones ambientales (Temperatura y Humedad relativa)?

## **1.5 OBJETIVOS**

### **1.1.1 Objetivo General**

Simular el comportamiento matemático de la transpiración y respiración; condiciones óptimas de almacenamiento y vida útil en postcosecha del tumbo serrano (*Passiflora mollissima* B.) bajo las condiciones ambientales (Temperatura y Humedad relativa).

### **1.1.2 Objetivos Específicos**

1. Optimizar las condiciones de almacenamiento (Temperatura y Humedad Relativa) para las restricciones de múltiples respuestas como: minimización de pérdida de peso, maximización de calidad y maximización de humedad del fruto del tumbo serrano (*Passiflora mollissima* B.).
2. Realizar la simulación matemática de la transpiración postcosecha del tumbo serrano (*Passiflora mollissima* B.) a través de los datos experimentales a las condiciones ambientales (Temperatura y Humedad relativa).

3. Realizar la simulación matemática de la respiración postcosecha del tumbo serrano (*Passiflora mollissima B.*) a través de los datos experimentales a las condiciones ambientales (Temperatura y Humedad relativa)
4. Correlacionar la influencia de las condiciones ambientales (Temperatura y Humedad relativa) en la vida útil del tumbo serrano (*Passiflora mollissima B.*).

## 1.6 VARIABLES

Las variables en estudio son:

- *Variables independientes:*

*Condiciones ambientales* (Temperatura y Humedad relativa de almacenamiento)

- **Variables dependientes:**

Transpiración (Pérdida de peso, Calidad, Humedad);

Respiración (Producción de CO<sub>2</sub>, O<sub>2</sub>);

Vida útil (días)

### **III. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA**

#### **2.1 MARCO TEÓRICO DE LAS VARIABLES INDEPENDIENTES**

El ambiente al que son expuestos los vegetales frescos recién cosechados tiene un efecto altamente significativo sobre la vida útil de estos productos (Paull, 1999). La temperatura (T) y la humedad relativa (HR) de la atmósfera que rodea al producto hortícola son los dos factores principales que están involucrados en su conservación post-cosecha y que afectan en gran medida su calidad organoléptica (Nunes *et al.*, 2009). En consecuencia, la aceptabilidad por parte del consumidor es afectada por las dos variables mencionadas.

La velocidad de deterioro depende del tipo de producto, condiciones de cultivo y otros factores pre-cosecha, pero principalmente de la manipulación durante el acondicionamiento, comercialización y procesamiento y de las condiciones ambientales a las que se expone el producto (Kader, 2002b). Los cambios que ocurren en la post-cosecha no pueden ser detenidos, pero sí pueden ser demorados, dentro de ciertos límites (Lopez-Camello, 2003).

##### **2.1.1 Tumbo Serrano**

El tumbo serrano (*Passiflora mollissima* B.), es una especie frutal nativa de América distribuida desde Colombia, Ecuador, Brasil, Perú y Bolivia. Es una planta trepadora, que crece muy bien a altitudes incluso cercanas a los 3500 m.s.n.m., produce frutos de forma elipsoidal, su cascara es suave y el interior está lleno de semillas redondeadas,

cubiertas de un mucilago anaranjado de pulpa jugosa, aromática y de sabor dulce-acido. Se propagan por semillas y suelen crecer sobre cercos y paredes de las viviendas. El nombre mollissima, que significa muy suave, muy blando, hace referencia a sus frutos blandos y al vello delicado que cubre todos los órganos vegetativos de la planta (Hoyos, 1989).

Las zonas de producción del tumbo serrano se ubican de 1000 a 3500 msnm, en las regiones de Ancash, Junín, Moquegua y Huancavelica. Crece en valles interandinos, con temperaturas que van de 18°C a 24°C, cultivándose mayormente bajo lluvia (Brack, 1999)

En relación a la curuba (llamada también tumbo serrano), Daga sostuvo que existe un mercado con un enorme potencial para este tipo de frutas (refiriéndose al europeo y asiático) del cual se benefician países como Bolivia, Ecuador, Colombia y Brasil, por ser una fruta oriunda de los andes (debido a que su habitad natural es entre 2000 y 3200 msnm). Asimismo, el especialista informó sobre el crecimiento de las exportaciones de granadilla y maracuyá –principalmente- en jugos y concentrados, que se han visto impulsadas por una mayor demanda de USA (220%), Holanda (125%), Chile (120%) y Sudáfrica (100%), pero que aún en volúmenes no es significativa, “existe un mercado interno insatisfecho que se debería aprovechar para incrementar el consumo de la fruta y luego pensar en potenciar las exportaciones” (Agencia Agraria de Noticias, 2014).

Por su forma en algunos frutos, similar al plátano, en muchos mercados se le identifica como “banano de la pasión”. Se consume la pulpa, semilla, incluso cáscara de los frutos

maduros, en forma cruda, en jugos, en mermeladas, tragos y otras formas; en algunas zonas se elabora un vino delicioso (Brack, 1999).

Desde las culturas pre-incas era el fruto ideal no solo para calmar la sed de forma agradable y contribuir a mantener la piel bien nutrida e hidratada, sino por sus nutrientes esenciales que revitalizan el organismo. Por esta razón, el tumbo serrano (*Passiflora mollisima*) como otras frutas que tienen alto contenido en vitamina C como maracuyá, naranjas y toronjas, son recomendables para consumirlos en la temporada veraniega, como parte de las dietas hipocalóricas (Brack, 1999).

El tumbo serrano "*Passiflora mollisima*" pertenece a la familia *Passifloraceae* y su taxonomía es la siguiente:

Reino:           Plantae  
Division:       Magnoliophyta  
Clase:           Magnoliopsida  
Orden:          Violales  
Familia:        Passifloraceae  
Genero.         Passiflora  
Especie:        *Passiflora mollisima*



Figura 1: Fruto del tumbo serrano



Se presenta el valor nutritivo en g/100g de tumbo fresco.

Tabla 1: Valor nutritivo en g/100g de tumbo fresco.

<b>Concepto</b>	<b>Contenido</b>
Humedad	92,00
Proteína	0,90
Grasos	0,10
Fibra	0,30
Carbohidratos	6,70

Fuente: Ayala, B.2000 (Programa de Investigación y Proyección Social en fruto; UNALM)

## **2.1.2 FACTORES QUE AFECTAN A LA RESPIRACIÓN Y TRANSPIRACIÓN DE LAS FRUTAS**

### **2.1.2.1 Temperatura**

El efecto de la temperatura sobre la transpiración, está muy relacionada con la humedad relativa; al aumentar la temperatura la presión de vapor de agua en el interior del producto aumenta produciendo una diferencia mayor con respecto a la presión de vapor del aire, resultando un incremento en la intensidad de transpiración. Las estomas se abren cada vez más hasta los 25-30°C (Téllez, 2007).

La temperatura también modifica la presión de vapor que ejerce el aire saturado, el déficit de presión de vapor se incrementa si la temperatura aumenta. Al elevarse la temperatura el agua tiene mayor capacidad para evaporarse. Una fruta que está a una temperatura ambiente de 15°C con una HR de 90% transpirará más que si está a 5°C

con la misma humedad relativa (90%). Se recomienda para el almacenamiento de productos vegetales una humedad relativa de 85-95%.

Las altas temperaturas favorecen la evaporación de agua y las bajas temperaturas reducen la transpiración. Se ha observado que la aplicación de cubiertas cerosas reduce en buena medida la pérdida de peso por transpiración.

### 2.1.2.2 Humedad relativa

La humedad relativa es el principal factor que afecta la transpiración. Si el aire que rodea el producto tiene una humedad relativa baja, esto significa, que la presión de vapor del aire esta baja con respecto a la máxima presión de vapor de agua que se pueda lograr a esta temperatura, este máximo valor siempre está muy cerca al de la presión de vapor del agua en la superficie del producto, lo que hace fluir el vapor de agua hacia el aire; entre más grande sea la diferencia entre las presiones del vapor, mayor será el flujo de agua.

Tabla 2: Humedades relativas de diferentes sales saturadas a diferentes temperaturas

t (°C)	% HR										
	Fluoruro de Cesio	Bromuro de Litio	Cloruro de Litio	Acetato de Potasio	Cloruro de Magnesio	Carbonato de Potasio	Bromuro de Sodio	Yoduro de Potasio	Cloruro de Sodio	Cloruro de Potasio	Sulfato de Potasio
5	-	7.4 ± 0.8	13	-	33.6 ± 0.3	43.1 ± 0.5	63.5 ± 0.8	73.3 ± 0.4	75.7 ± 0.3	87.7 ± 0.5	98.5 ± 1.0
10	-	7.1 ± 0.7	13	23.4 ± 0.6	33.5 ± 0.3	43.1 ± 0.4	62.2 ± 0.6	72.1 ± 0.4	75.7 ± 0.3	86.8 ± 0.4	98.2 ± 0.8
15	4.3 ± 1.4	6.9 ± 0.7	12	23.4 ± 0.4	33.3 ± 0.3	43.2 ± 0.4	60.7 ± 0.6	71.0 ± 0.3	75.6 ± 0.2	85.9 ± 0.4	97.9 ± 0.7
20	3.8 ± 1.1	6.6 ± 0.6	12	23.1 ± 0.3	33.1 ± 0.2	43.2 ± 0.4	59.1 ± 0.5	69.9 ± 0.3	75.5 ± 0.2	85.1 ± 0.3	97.6 ± 0.6
25	3.4 ± 1.0	6.4 ± 0.6	11.3 ± 0.3	22.5 ± 0.4	32.8 ± 0.2	43.2 ± 0.4	57.6 ± 0.4	68.9 ± 0.3	75.3 ± 0.2	84.2 ± 0.3	97.3 ± 0.5
30	3.0 ± 0.8	6.2 ± 0.5	11.3 ± 0.3	21.6 ± 0.6	32.4 ± 0.2	43.2 ± 0.5	56.0 ± 0.4	67.9 ± 0.3	75.1 ± 0.2	83.6 ± 0.3	97.0 ± 0.4
35	2.7 ± 0.7	6.0 ± 0.5	11.3 ± 0.3	-	32.1 ± 0.2	-	54.6 ± 0.4	67.0 ± 0.3	74.9 ± 0.2	83.0 ± 0.3	96.7 ± 0.4
40	2.4 ± 0.6	5.8 ± 0.4	11.2 ± 0.3	-	31.6 ± 0.2	-	53.2 ± 0.5	66.1 ± 0.3	74.7 ± 0.2	82.3 ± 0.3	96.4 ± 0.4
45	2.2 ± 0.5	5.7 ± 0.4	11.2 ± 0.3	-	31.1 ± 0.2	-	52.0 ± 0.5	65.3 ± 0.3	74.5 ± 0.2	81.7 ± 0.3	96.1 ± 0.4
50	2.1 ± 0.4	5.5 ± 0.4	11.1 ± 0.3	-	30.5 ± 0.2	-	50.9 ± 0.6	64.5 ± 0.3	74.5 ± 0.9	81.2 ± 0.4	95.8 ± 0.5
55	2.0 ± 0.4	5.4 ± 0.3	11.0 ± 0.3	-	29.9 ± 0.2	-	50.2 ± 0.7	63.8 ± 0.4	74.5 ± 0.9	80.7 ± 0.4	-
60	2.0 ± 0.4	5.3 ± 0.3	11.0 ± 0.3	-	29.3 ± 0.2	-	49.7 ± 0.8	63.1 ± 0.4	74.4 ± 0.9	80.3 ± 0.5	-
65	2.1 ± 0.5	5.3 ± 0.3	10.9 ± 0.3	-	28.5 ± 0.3	-	49.5 ± 1.0	62.5 ± 0.4	74.2 ± 0.9	79.9 ± 0.5	-
70	2.2 ± 0.6	5.2 ± 0.3	10.8 ± 0.4	-	27.8 ± 0.3	-	49.7 ± 1.1	61.9 ± 0.4	74.1 ± 0.9	79.5 ± 0.6	-
75	2.4 ± 0.7	5.2 ± 0.2	10.6 ± 0.4	-	26.9 ± 0.3	-	50.3 ± 1.3	61.4 ± 0.5	74.0 ± 0.9	79.2 ± 0.7	-
80	2.6 ± 0.8	5.2 ± 0.2	10.5 ± 0.5	-	26.1 ± 0.4	-	51.4 ± 1.5	61.0 ± 0.5	73.9 ± 0.9	78.9 ± 0.8	-

Fuentes: CENAM, 2012.

## **2.3 MARCO TEÓRICO DE LA VARIABLE DEPENDIENTE**

Las frutas después de la cosecha continúan activas fisiológicamente. De esta forma cada fruta continúa respirando, madurando e iniciando procesos de senescencia, lo cual implica en adelante una serie de cambios estructurales y bioquímicos que son específicos de cada especie. Asimismo, el producto cosechado está constantemente expuesto a la pérdida de agua debido a la transpiración y a otros fenómenos fisiológicos, derivados de la falta de aporte hídrico y de nutrientes desde la planta, quedando así a expensas de su propio metabolismo y adicional el factor ambiental. Dando lugar a una pérdida gradual de calidad de la fruta en sus características organolépticas de textura, sabor y aroma a medida que avanza su estado de senescencia, determinando finalmente la muerte fisiológica (Álvarez, 2012). Este tipo de metabolismo limitado a sus propias reservas coloca además al fruto en una situación de debilidad frente a la deshidratación y las agresiones físicas externas tales como: fricción, golpes o heridas y también frente a las infecciones, especialmente de tipo fúngico. Por tanto, son normalmente las alteraciones fisiológicas y patológicas las que hacen inviable su comercialización mucho antes de que cese su actividad metabólica (Cuquerella, 1990). El conocimiento de la transpiración y respiración del fruto durante la etapa postcosecha es importante para comprender el proceso de deterioro de la calidad para determinar el tiempo de vida útil.

### **2.3.1 Marco conceptual de calidad en frutas**

La calidad es un término usado con frecuencia por los investigadores, productores, manipuladores, vendedores y consumidores, pero su significado varía en función del usuario. Shewfelt (1999) distingue la "calidad orientada al producto" de la "calidad

orientada al consumidor." En la definición anterior, que corresponde a una serie de atributos que se pueden medir con precisión para evaluar el efecto de las gestiones culturales, las selecciones de cultivares, las técnicas de manipulación, o tratamientos post-cosecha. Esta última definición de la calidad está vinculada a las actitudes de los consumidores y la aceptabilidad del producto, que varían de acuerdo a las perspectivas culturales y demográficas. Por ejemplo, las peras pueden ser consumidas firmes o blandas, dependiendo de la preferencia del consumidor. Calidad abarca varios puntos indicados en la Figura 2.

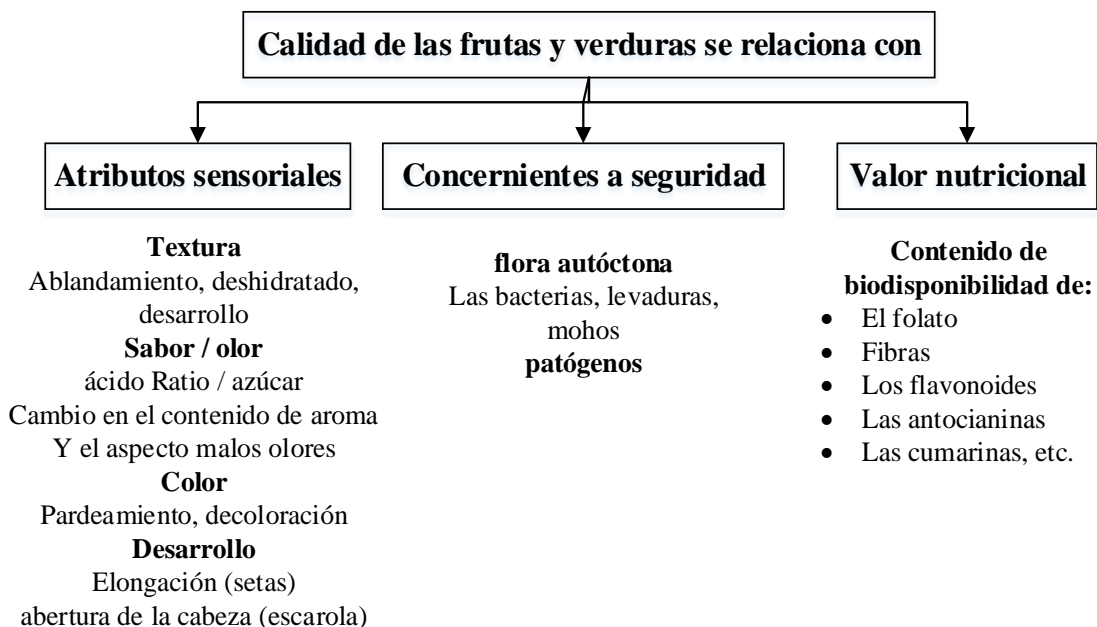


Figura 2: Cambios de calidad en frutas y vegetales

El término “*calidad*” es definido por la Norma ISO 9001:2010 como el conjunto de características del producto que le confieren la aptitud para satisfacer las necesidades del cliente tanto explícitas como implícitas (Müller y Steinhart, 2007).

La calidad de un alimento es una percepción compleja de muchos atributos que son evaluados simultáneamente en forma objetiva y subjetiva por el consumidor. El concepto de calidad involucra aspectos variados tales como propiedades físicas, componentes químicos, propiedades funcionales, valor nutritivo, propiedades sensoriales, propiedades microbiológicas, entre otros (Luning y Marcelis, 2007; Chiesa *et al.*, 2005; Abbott, 1999; Moinár, 1995) citados por Viccoria (2011).

La calidad de productos hortícolas es definida como la combinación de atributos, propiedades y características que determinan su valor para el consumidor (Kader, 2008; Kader, 2002b). De hecho, la calidad depende del cultivar, prácticas culturales pre-cosecha, condiciones climáticas, madurez o grado de desarrollo al momento de la cosecha, método de cosecha, entre otros.

### **2.3.2 Calidad fisiológica**

Los cambios post-cosecha de los productos hortícolas están asociados a cambios en su fisiología, tales como modificaciones en los patrones de respiración, de transpiración, de producción de etileno, entre otros. Uno de los aspectos fisiológicos más importantes a considerar es la madurez o grado de desarrollo del producto al momento de realizar la cosecha. Esta característica tiene un profundo impacto en la calidad y extensión de la vida útil del producto y afecta el modo en que los productos son manejados, transportados y comercializados (Reid, 2002).

### 2.3.3 Respiración

La respiración es un indicador de la actividad metabólica y juega un papel significativo en la fisiología postcosecha y en el deterioro de la calidad de los alimentos. Es un proceso que implica la degradación oxidativa de los productos más complejos, normalmente presentes en las células, como el almidón, los azúcares y los ácidos orgánicos, a moléculas más simples como el dióxido de carbono y el agua, con la consiguiente liberación de energía (Day, 1993; Kader, 1992).

La respiración se puede describir, de forma sencilla, como la degradación oxidativa de los productos más complejos normalmente presentes en las células, como el almidón, los azúcares y los ácidos orgánicos, a moléculas más simples, como el dióxido de carbono y el agua, con liberación de energía y otras moléculas que pueden ser utilizadas en las reacciones sintéticas que tienen lugar en las células (Wills *et al.*, 1999). Los frutos, en general, se pueden clasificar en climatéricos y no climatéricos basándose en sus tasas respiratorias durante la maduración organoléptica. Los frutos climatéricos presentan un aumento repentino (pico climatérico) de su actividad respiratoria durante la maduración, mientras que los frutos no climatéricos exhiben un descenso gradual de su respiración durante la maduración (Seymour *et al.*, 1993).

La respiración consiste en una oxidación de sustancias orgánicas ricas en energía. En presencia de oxígeno molecular la respiración es aeróbica y los productos finales de la combustión de la glucosa. Fundamentalmente, son, como es bien conocido, anhídrido carbónico, agua y calor.

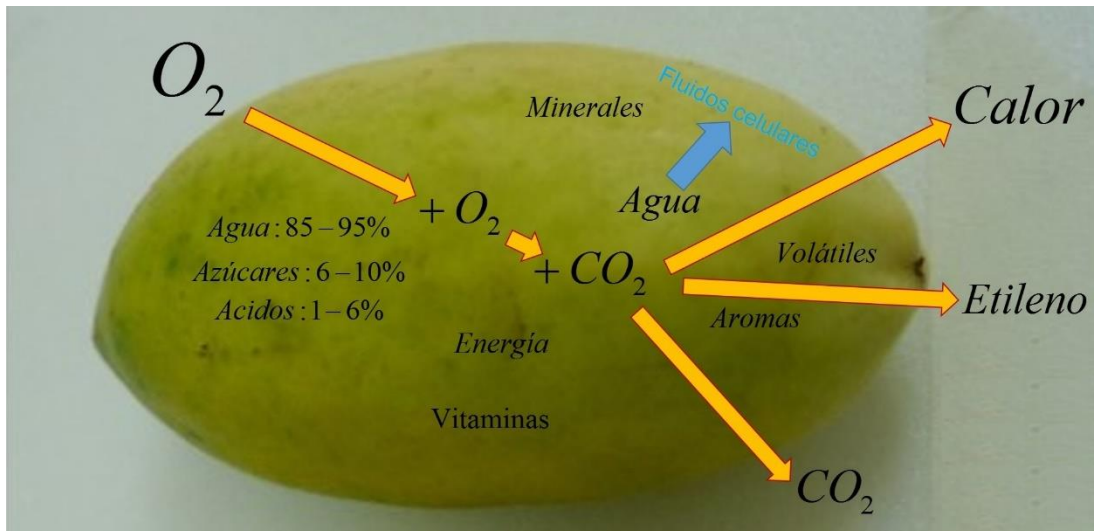
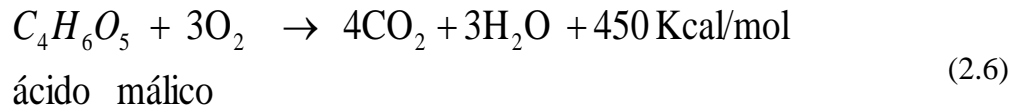
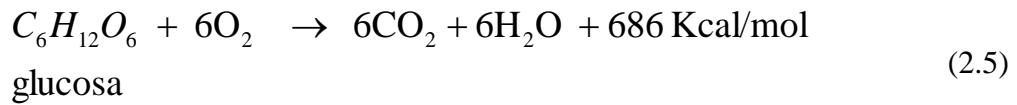


Figura 3: Respiración de un fruto

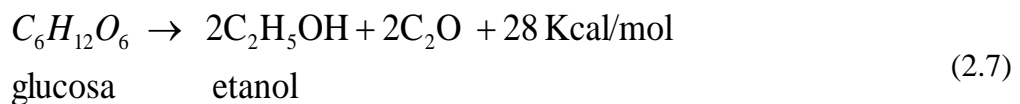
La reacción general de la respiración aeróbica se lleva a cabo gradualmente, en dos etapas glucolisis y respiración propiamente dicha (descarboxilación oxidante del ácido pirúvico, reacciones del ciclo de Krebs y sistema transporte electrónico que se acopla con la fosforilación oxidativa), en cada una de las cuales tienen lugar una serie de reacciones sucesivas catalizadas por los correspondientes enzimas.

En ausencia de oxígeno la respiración es anaeróbica, se puede transformar en un proceso fermentativo y es mucho menos eficiente como productora de energía. La respiración aeróbica es la que domina en los frutos y hortalizas recién recolectados, pero la respiración anaeróbica puede ser significativa en: frutos senescentes donde la permeabilidad a los gases de los tejidos se ve reducida; en especies conservadas en atmósferas con un contenido demasiado bajo en oxígeno o demasiado alto en anhídrido carbónico; en frutos que presenten alteraciones fisiológicas o en tejidos dañados o golpeados donde pueden producirse reacciones enzimáticas anormales.

## Respiración aeróbica



## Respiración aneróbica



Degradación oxidativa de materiales complejos normalmente presentes en la célula, tales como almidón, azúcares y ácidos orgánicos, en moléculas más simples hasta llegar a la emanación de bióxido de carbono y agua, con la producción concurrente de energía. Durante este proceso se forma una serie de intermediarios que mediante la energía (ATP) generada serán utilizados por la célula en reacciones de síntesis.

La respiración puede ser dividida en tres fases:

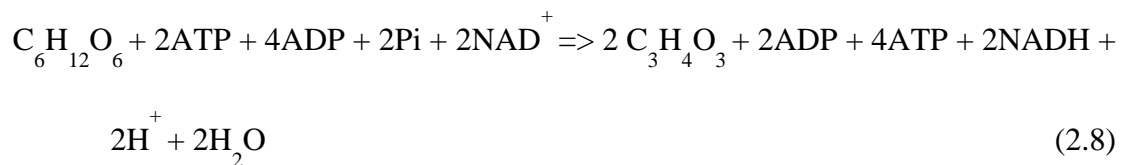
1. Hidrólisis de polisacáridos en azúcares simples. en esta fase las proteínas y los lípidos también pueden servir como sustrato.
2. Oxidación de azúcares en piruvato vía la glucólisis.



3. Transformación aeróbica de piruvato y otros ácidos orgánicos en CO<sub>2</sub> agua y energía mediante el ciclo de los ácidos tricarboxílicos y la fosforilación oxidativa.

La respiración es un proceso por el cual metabolitos (carbohidratos, proteínas y lípidos) son transformados en formas más simples para proveer las demandas energéticas que requiere la fruta para su actividad funcional vital, además para la síntesis de otros metabolitos secundarios importantes y que cumplen el papel nutracéutico en las frutas. Las tres etapas principales de este complejo proceso se muestran en la Figura 4 (Kader, 2002).

Para el glucólisis es necesaria la energía de los enlaces fosfato de dos moléculas de ATP. Posteriormente se producen dos moléculas de NADH a partir de dos de NAD<sup>+</sup> y cuatro de ATP a partir de cuatro de ADP, tal cómo se muestra en la ecuación siguiente.



De esta forma, una molécula de glucosa se convierte en dos moléculas de ácido pirúvico. La ganancia neta, son dos moléculas de ATP y dos moléculas de NADH por molécula de glucosa. Aproximadamente el 40% de la energía libre desprendida por la oxidación de la glucosa se conserva en la conversión de ADP a ATP. En presencia de oxígeno, el ácido pirúvico entra en el ciclo de Krebs, donde se sintetiza más ATP y se transfieren más electrones y protones a las coenzimas. Estas coenzimasceptoras de electrones transfieren su carga a la cadena transportadora de electrones a lo largo de la

cual, paso a paso, los electrones caen a niveles inferiores de energía. A medida que esto ocurre, se fabrica más ATP.

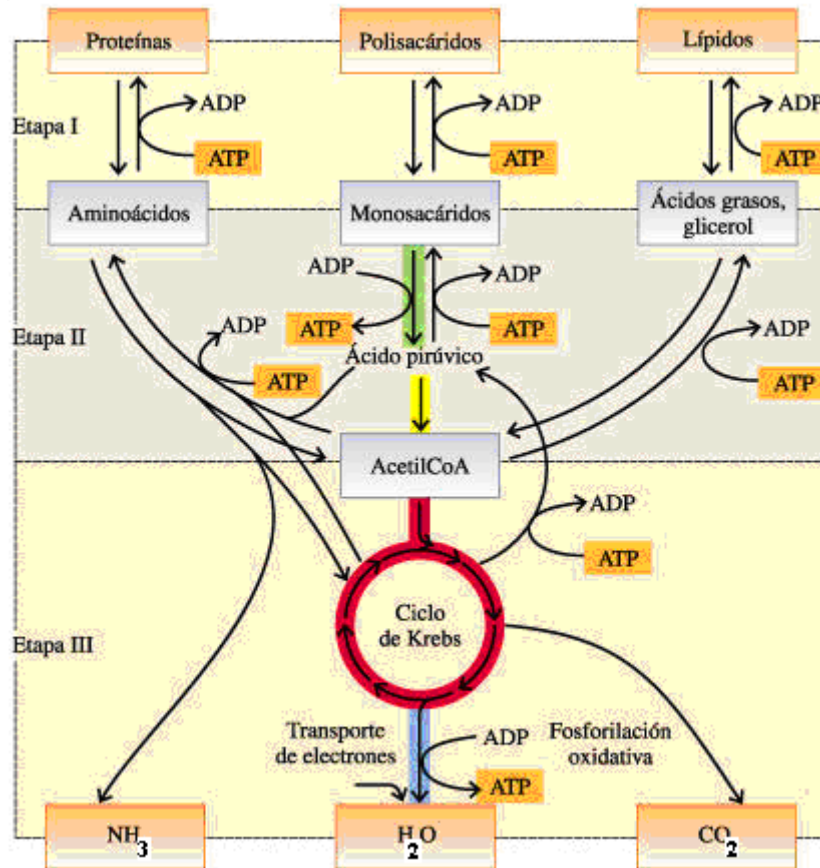
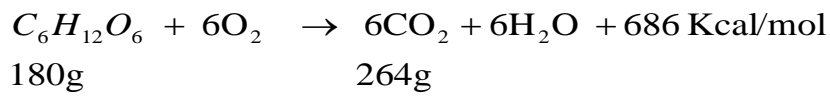


Figura 4: Metabolismo general de la respiración (*Fuente: Costa, 2008*)

De acuerdo al índice de respiración, definido como la tasa de producción de CO<sub>2</sub> por unidad de peso de fruta y por unidad de tiempo, y al comportamiento fisiológico en postcosecha, las frutas se pueden clasificar como climatéricas y no climatéricas (Kader, 2002); el CO<sub>2</sub> extra durante el periodo climatérico procede de la descarboxilación del ácido málico que transita directamente a ácido pirúvico para iniciar de nuevo el ciclo. Durante el período climatérico las frutas adquieren la madurez de consumo. La Figura 4 muestra el comportamiento típico de la respiración en frutas climatéricas y no climatéricas.

## Medida de la respiración a partir del consumo de sustrato

Considerando la glucosa como el sustrato consumido, se puede establecer que 180 g de este carbohidrato son necesarios para producir 264 g de CO<sub>2</sub>, estimando la siguiente relación para el cálculo de la respiración, según las ecuaciones 2.9 y 2.10 (Saltveit, 1999).



$$\text{Pérdida de peso} \left( \frac{g}{kg \ h} \right) = \frac{mgCO_2}{kg \ h} * 10^{-3} * 68 \quad (2.9)$$

$$\% \text{ pérdida peso} \left( \frac{g}{100g \ h} \right) = \frac{mgCO_2}{kg \ h} * 10^{-6} * 68 \quad (2.10)$$

Dónde: las constantes numéricas  $10^{-3} * 68$  y  $10^{-6} * 68$  valores para transformar los mg CO<sub>2</sub> producidos en g de glucosa consumidos como producto de la respiración por kg o 100 g de producto por hora (Salveit, 1999).

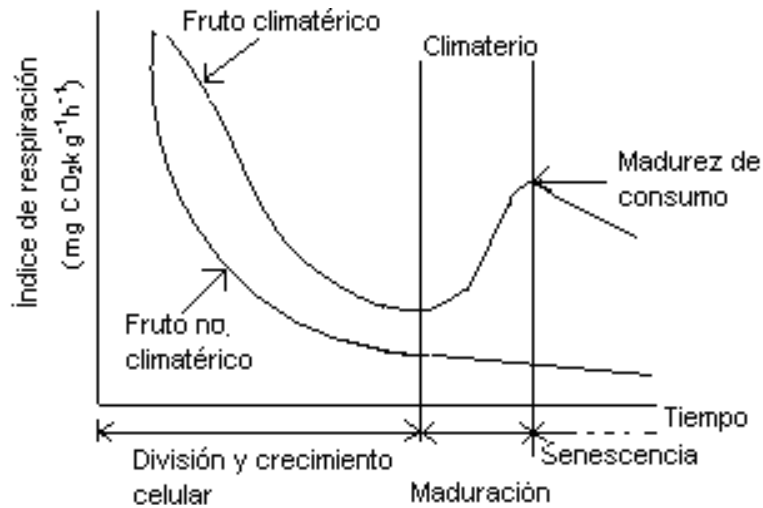


Figura 5: Comportamiento respiratorio de frutas climatéricas y no climatéricas  
(Fuente: Adaptado de Planella, 1987)

### Lectura de cambios de gases en sistemas cerrados

Hagger *et al.* (1992) propone un modelo de respiración basado en cinética enzimática tipo Michaelis – Menten y el método de sistema cerrado para generar curvas de respiración de frutas y hortalizas, Song *et al.* (1992) usa este mismo modelo para predecir el comportamiento de los productos dentro de empaques semipermeables. En ambos trabajos el ajuste del modelo resulta ser bueno para los productos probados.

Este planteamiento describe los cambios en concentración de  $O_2$  y  $CO_2$  en función del tiempo, con las siguientes ecuaciones (2.11 y 2.12) los  $O_2$  consumidos y  $CO_2$  producidos a partir de un análisis de regresión no lineal podemos determinar las constantes A, B y C,

$$O_2 = 21 - \frac{t}{(A_1 * t + B_1)^{C_1}} \quad (2.11)$$

$$CO_2 = \frac{t}{(A_2 * t + B_2)^{C_2}} \quad (2.12)$$

Donde

(O<sub>2</sub>), (CO<sub>2</sub>) = concentraciones de oxígeno y bióxido de carbono (%)

t = tiempo (h)

A,B,C = son valores constantes

### Velocidad de respiración en sistemas cerrados

Las velocidades de respiración (consumo de O<sub>2</sub> y producción de CO<sub>2</sub>) de acuerdo al tiempo se calculan en la derivada de las ecuaciones 2.11 y 2.12 y se obtiene:

$$\frac{dO_2}{dt} = A_1 * C_1 * t * (A_1 * t + B_1)^{(-1-C_1)} - (A_1 * t + B_1)^{(-C_1)} \quad (2.13)$$

$$\frac{dCO_2}{dt} = -A_2 * C_2 * t * (A_2 * t + B_2)^{(-1-C_2)} + (A_2 * t + B_2)^{(-C_2)} \quad (2.14)$$

### 2.3.4 Transpiración

La transpiración es un fenómeno fisiológico por el cual los productos hortofrutícolas eliminan vapor de agua a través de sus estructuras especializados como vacuolas, lenticelas y estomas propios en cada producto.

El mayor componente de las frutas y las hortalizas es el agua, siendo en realidad estos vegetales el empaque natural de este líquido, que con otras sustancias nos da un

producto con características sensoriales muy singulares. Este empaque tan especial en su conjunto forma un sistema que facilita la aproximación del equilibrio del vapor de agua interna con el vapor de agua del aire que rodea el vegetal, normalmente se produce un flujo de vapor de agua del vegetal hacia el medio ambiente ocasionando una pérdida de agua, que en postcosecha no tiene posibilidades de recuperación.

La turgencia de las células se pierde porque el agua del protoplasma se desplaza a través de sus membranas y por los espacios intracelulares, hasta la superficie del vegetal, para reponer la humedad que de allí ha sido retirada hacia el aire por la transpiración, al perder la turgencia el producto se vuelve flácido y blando, luego llega el marchitamiento.

Este proceso depende en especial énfasis de la humedad del aire que rodea al vegetal, esta es la humedad relativa (HR) la cual expresa el contenido de agua del aire. Se define como el cociente de la presión del vapor de agua en el aire y la presión máxima de vapor de agua a igual temperatura, expresada en porcentaje. El aire saturado tiene una humedad relativa del 100% es la máxima que se puede tener. A la humedad relativa al alcanzar el equilibrio se le denomina humedad relativa de equilibrio (HRE), el agua líquida tiene una HR igual al 100%.

La velocidad de transpiración depende principalmente de la magnitud del déficit de presión de vapor que exista. La transpiración ocurre durante el crecimiento y desarrollo de las frutas, sin embargo, la cantidad de agua perdida siempre se recupera y las frutas manifiestan una ganancia de agua que las hace aumentar de volumen.

Después de la cosecha la transpiración continúa, pero ahora el agua ya no es recuperada por la fruta (o cualquier otro órgano de la planta) → pérdida real de peso del fruto, denominada “**pérdida fisiológica de peso**”.

Pallardy, (2008), manifiesta que la medida de la pérdida de peso en plantas enteras sembradas en maceteros fue inicialmente realizada por Stephen Hales (1727) quien midió la pérdida de peso en árboles de manzana, limón y otras plantas herbáceas. Varios estudios fueron realizados durante la segunda mitad del siglo XIX, de los cuales los más conocidos son las de Von Höhnel, publicado en 1881 y 1884. La pérdida de peso está relacionada con la tasa de transpiración, que hace referencia a la difusión del agua y otras sustancias volátiles de las frutas, producto de la naturaleza de su metabolismo (respiración, transpiración), los gases se difunden en el aire que rodea el vegetal, debido al movimiento de moléculas de zonas de mayor concentración a zonas de menor concentración, hasta que se alcanza la condición de equilibrio, las estructuras a partir de las cuales ocurre este proceso son; los hidátodos, estomas, lenticelas y la cutícula (Kader, 2002).

La pérdida de agua en forma de vapor y otras sustancias volátiles en las frutas se produce a través de la epidermis, esta difusión metabólica de los gases la describe la primera ley de Fick, que establece que el flujo de un gas a través de una barrera de tejido es proporcional al gradiente de concentración (Lammertyn *et al.* 2003).

Durante el transporte y almacenamiento la pérdida de agua puede constituir un serio problema, ya que la fruta pierde peso, se arruga, se marchita, se deshidrata → deterioro

de la vida útil del producto. Es la pérdida de agua en forma de vapor desde los tejidos vivos hacia la atmósfera circundante.

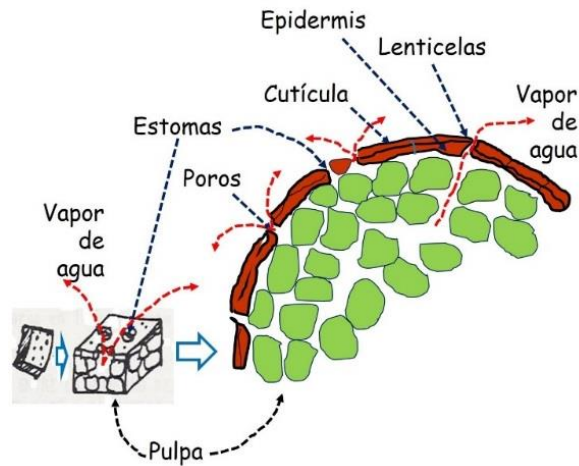


Figura 6: Ilustración del proceso de la transpiración

Pérdida de agua en forma de vapor debida a un déficit de presión de vapor. El agua se evapora y escapa al aire a través de los poros, lenticelas, estomas, o cualquier otra apertura en la epidermis del fruto. Esto sucede cuando existe una diferencia entre la presión de vapor del aire y la presión de vapor del producto estableciéndose una diferencia denominada “déficit de presión de vapor”.

El efecto de la transpiración es consecuencia de un déficit de presión de vapor (DPV), originada por una diferencia entre la presión del producto y la del aire que los rodea, la cual puede determinarse por la siguiente relación:

### Presión de vapor del agua pura (Pa)

$$P_{v(Pa)} = 100 * \exp\left(27,0214 - \frac{6887}{T(^{\circ}K)} - 5,31 \ln\left(\frac{T(^{\circ}K)}{273,15}\right)\right) \quad (2.15)$$



Tabla 3: Presión de vapor del agua a varias temperaturas (De Keenan and Keyes, 1965 y ASHRAE, 1971)

<b>T(°F)</b>	<b>T(°C)</b>	<b>Pv (mmHg)</b>	<b>Pv (mBar)</b>
32	0,00	4,579	6,105
34	1,11	4,953	6,603
36	2,22	5,385	7,179
38	3,33	5,817	7,755
40	4,44	6,299	8,398
45	7,22	7,62	10,159
50	10,00	9,204	12,271
55	12,78	11,074	14,764
60	15,56	13,248	17,662
70	21,11	18,771	25,026
80	26,67	26,213	34,948
90	32,22	36,119	48,155
100	37,78	49,098	65,458

### **Déficit de presión de vapor (DPV)**

El DPV viene definido por la temperatura de almacenamiento y la humedad relativa en el almacén frío. Para efectos prácticos se puede suponer que la presión de vapor del agua sobre el alimento es similar a la de saturación con 100% de humedad relativa (en la práctica es ligeramente inferior) y se puede calcular, para una temperatura dada, mediante la relación:

$$DPV = \frac{(100 - HR) * P_v}{100} \quad (2.16)$$

Dónde:

DPV: Déficit de presión de vapor

Pv: Presión de vapor

100: Humedad relativa dentro de la fruta 100%

La intensidad de transpiración está dado por la siguiente expresión:

$$Tasa \text{ de pérdida de peso} = \frac{Perdida(\%)}{DPV * tiempo} \quad (2.17)$$

Estimación del porcentaje para un tiempo de almacenamiento es:

$$\% \text{ Pérdida de peso} = Tasa \text{ de pérdida de peso} * DPV * tiempo \quad (2.18)$$

Monserrat *et al.* (2011) considera el valor máximo de pérdida de peso comercialmente admisible es del 5%. Otros manifiestan que basta una pérdida del 3 al 6% para que se hagan visibles efectos de marchitez, pérdida de firmeza y arrugamiento que desmerecen su valor comercial.

La velocidad y la intensidad de la pérdida de agua dependen del tipo de fruto (presencia de cutícula, lenticelas, apertura o cierre de estomas, etc.), posibles recubrimientos y las condiciones ambientales como temperatura o el gradiente de humedad a la que está

expuesta, siendo habitualmente mayor en los primeros días tras la separación de la planta.

La pérdida de agua libre es una de las causas principales de deterioro, porque esto da como resultado no solamente pérdidas cuantitativas directas (pérdida de peso vendible), sino también pérdida de calidad relacionada con el aspecto, por pérdida de brillo y turgencia, la textura (pérdida de jugosidad) y el valor nutricional (Kader, 1992).

La velocidad con la que ocurre la pérdida de calidad, posterior a la cosecha, está relacionada fundamentalmente con la temperatura de conservación, razón por la cual, un adecuado y cuidadoso manejo de la misma, desde la cosecha en adelante, contribuye notablemente al mantenimiento de la calidad de la fruta Yommi A., citados por Monserrat *et al.* (2011).

Los métodos que controlan la pérdida de agua del producto involucran: bajar la capacidad que tiene el aire para tomar la humedad del producto, lo cual puede lograrse bajando la temperatura o acondicionando vapor de agua al ambiente. Si se eleva la HR del aire que rodea al producto se reduce la deficiencia de presión de vapor entre el producto y el aire.

Es relativamente fácil incrementar la HR, se pueden utilizarse humidificadores o simplemente rociar agua en el suelo para que ésta se evapore e incremente la humedad del aire. Actualmente la literatura recomienda humedades relativas del 85% al 95% para almacenamiento, dependiendo del producto que se trate.

Efectos de la HR del ambiente de almacenamiento: Efectos físicos ( pérdida de agua); la pérdida de agua es proporcional a la diferencia de presiones de vapor de agua entre el tejido y la presión de vapor del ambiente, este genera la marchitez del fruto y en consecuencia la pérdida de calidad sensorial (apariencia).

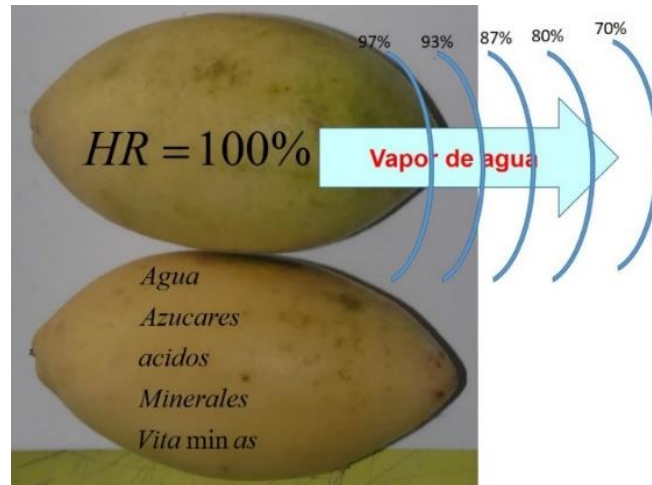


Figura 7: Esquema de la transpiración de un fruto

La pérdida de agua puede ser una de las principales causas de deterioro ya que da por resultado no solo pérdidas comerciales, sino también causa pérdidas en apariencia debido al arrugamiento por disminución en la turgencia de las estructuras celulares, la calidad textural se ve afectada por ablandamiento, flacidez y falta de firmeza de las frutas. El sistema dérmico juega un papel importante en la regulación de la pérdida de agua de los vegetales, presentando “barreras naturales” que permiten controlar o contrarrestar las pérdidas de agua, por ejemplo, la presencia de una gruesa cutícula cómo en frutas de patilla (*Citrullus lanatus Thunb*) y melón (*Cucumis melo L.*), pelos unicelulares o vellosidades epidérmicas (kiwi y durazno), falsas espinas o rudimentos estilares (guanábana) (Reina, 1998; García y Praderes, 2009).

La pérdida fisiológica de peso se puede medir cuantificando el índice de pérdida de peso tras los días postcosecha, por gravimetría utilizando una balanza analítica (Villamizar, 2001).

Algunos investigadores han evaluado la pérdida fisiológica de peso en diferentes vegetales durante su etapa de postcosecha. El efecto de la temperatura de almacenamiento sobre la pérdida de peso en frutos de maracuyá ha sido estudiado (Gómez, 2008). En ciruelas mexicanas (*Spondias purpurea L.*) se ha evaluado la pérdida fisiológica de peso en frutas almacenados durante 4 días a 20°C, encontrando un porcentaje de pérdida de 17,6% con respecto al peso inicial (Pérez *et al.*, 2004). En frutas de chicozapote almacenadas durante 8 días a 21°C y 65% de HR se perdió el 10% de su peso inicial (Bautista *et al.* 2005). En cidra (*Sechium edule (Jacq) Sw*), se ha encontrado que almacenada 9 días a 20°C luego de haber sido guardada durante 28 días en refrigeración, perdió el 11,4% de su peso inicial (Cadena-Iniguez *et al.*, 2006). Frutas de tomate de árbol (*Cyphomandra betacea S.*) almacenadas a 23°C y 65% de HR durante 14 días presentaron pérdidas del 12% de su peso inicial (Márquez *et al.* 2007).

La preferencia del consumidor por el producto alimenticio está determinada en gran medida por la percepción sensorial. La evaluación sensorial depende de tres consideraciones principales. En primer lugar, están las características relacionadas con la apariencia del producto incluyendo color, forma, tamaño, integridad, consistencia. En segundo lugar, aparecen las características texturales (sensación al paladar, mordida, masticabilidad, cuerpo, jugosidad, crocancia, rigidez, entre otros). La tercera consideración a realizar incluye el sabor y aroma (Singhal *et al.*, 1997).

La Tabla 4 muestra el porcentaje de pérdida fisiológica de peso que hace algunos vegetales inviabiles comercialmente (Thompson *et al.*, 1998).

Tabla 4. Pérdida fisiológica de peso que afecta la calidad comercial en vegetales

<b>Producto</b>	<b>Pérdida fisiológica de peso (% de peso fresco)</b>	<b>Razón de pérdida comercial</b>
Brócoli	4	Sabor, marchitamiento
Chile verde	8	Encogimiento
Col de bruselas	8	Marchitamiento, amarillamiento
Durazno	11	Encogimiento
Espinaca	3	Marchitamiento
Lechuga	4	Marchitamiento, deterioro
Manzana	7	Encogimiento
Nabo	4	Marchitamiento
Pera	6	Encogimiento
Repollo	6	Encogimiento
Uva	5	Encogimiento
Zanahoria	8	Marchitamiento

*Fuente:* Thompson *et al.* 1998

### **2.3.5 Calidad organoléptica**

Atributos sensoriales son dependientes del tiempo y se refieren principalmente a la textura, el sabor y el olor, el color y el desarrollo visual de los productos, todos los cuales evolucionan con la maduración y el envejecimiento de los productos. El ablandamiento de los productos frescos se debe a la solubilización y la despolimerización de pectinas por la acción de las enzimas pectolíticas, y la

deshidratación de los productos con la pérdida de turgencia puede conducir a una textura harinosa. La degradación del almidón y la descarboxilación de ácidos orgánicos inducen modificación de sabor, donde la relación entre el dulzor y la acidez es importante. Aromas se sintetizan a partir de alcohol y los ácidos con la actividad enzimática de acuerdo con el aumento de la etapa de madurez. El cambio de color se atribuye a la degradación (o formación de clorofila en el caso de la achicoria, por ejemplo) así como la síntesis de compuestos coloreados tales como antocianinas o del caroteno o pardeamiento enzimático. La importancia de estos cambios puede variar en función del producto particular (Viccoria, 2011).

La calidad organoléptica de las frutas está relacionada estrechamente con su composición. Así, el contenido de pigmentos, de compuestos azucarados, amargos y sulfurosos y de compuestos volátiles determinan el aroma, color y sabor, mientras que los contenidos de fibra, agua y almidón, contribuyen a la textura. La composición de la fruta se genera durante su crecimiento antes de la cosecha y va cambiando en la post-cosecha. Por consiguiente, los factores de pre- y postcosecha afectarán la formación y cambio, respectivamente, de las características sensoriales (Viccoria, 2011).

**Apariencia:** Incluye tamaño (dimensiones, peso y volumen), forma, color (uniformidad, intensidad), brillo, defectos externos e internos (morfológicos, fisiológicos, mecánicos o patológicos). Los defectos pueden originarse antes de la cosecha como resultado del daño por insectos, enfermedades (como la conocida con el nombre de “tipburn” que es un desorden fisiológico relacionado con la carencia de calcio) y situaciones de estrés. Durante la postcosecha pueden ocurrir marchitamientos, daño mecánico como puntos, cortes, grietas, magulladuras y rajaduras (Viccoria, 2011).

**La textura en vegetales:** En frutas y hortalizas la textura viene dada por la estructura de las células que lo constituyen. Las células de los organismos vegetales contienen citoplasma, núcleo y orgánulos, limitadas por una membrana semipermeable denominada plasmalema que a su vez está rodeada por la pared celular (compuesta de fibras de celulosa y hemicelulosas en una matriz de agua y pectinas).

Las pectinas son polímeros de ácido galacturónico y entrelazan las paredes celulares vecinas formando una red denominada lamela central. La pared celular proporciona rigidez manteniendo la forma de la planta y de los tejidos. Además, en el interior de cada célula existe una presión de turgencia necesaria para mantener los niveles adecuados de azúcar y sal de forma que, cuando la turgencia se pierde, la estructura se colapsa y la planta empieza a marchitarse por pérdida de agua.

Las diferentes plantas y órganos de la planta tienen diferentes grados de textura, dependiendo de la rigidez proporcionada por la pared celular, determinada a su vez por la fuerza de los enlaces de la lamela central y el grado de apoyo de sustancias en el interior de la célula como los gránulos de almidón y de otros tejidos como las fibras.

La mayoría de las frutas frescas son catalogadas como productos perecederos, por la tendencia inherente a sufrir deterioro fisiológico, presencia de infecciones o enfermedades o por el ataque de plagas; factores que inciden en las pérdidas desde el momento de cosecha, durante su acopio, distribución e incluso luego de adquiridas por el consumidor. La frecuencia de estas alteraciones se incrementa en la medida que el manejo de la fruta no es el adecuado (Alfárez, *et al.*, 2003).



**Color:** El color es uno de los atributos principales que caracteriza la frescura de la mayoría de las verduras. El color determina en gran medida la apariencia de un producto. Los consumidores consideran al color como criterio primario en la elección del producto para la compra (Rico *et al.*, 2007).

En general, el color observado por los seres humanos es la percepción de las longitudes de onda procedente de la superficie del objeto en la retina de los ojos. Los ojos humanos son sensibles a longitudes de onda entre 700 y 400 nm con una sensibilidad óptima para la luz con una longitud de onda de aproximadamente 550 nm (Tijssens *et al.*, 2001).

El color de un objeto puede ser descrito por varios sistemas de coordenadas de color. Algunos de los sistemas más populares son RGB (rojo, verde y azul), que se utiliza en los monitores, Hunter Lab, CIE (Comisión Internationale de l'Eclairage) L'a'b', CIEXYZ, entre otros. Estos difieren en la simetría del espacio de color y en el sistema de coordenadas utilizado para definir los puntos dentro de ese espacio.

**Calidad nutricional:** Los alimentos son necesarios para el mantenimiento de una salud normal de adultos y proveer un estándar de crecimiento en niños. Por lo tanto, la calidad nutritiva de los alimentos debe ser evaluada para caracterizar este aspecto de los mismos, y puede ser medida en términos del contenido de nutrientes, tales como proteínas, vitaminas, minerales, fibra.

Desde el punto de vista nutritivo, las hortalizas no son suficientes para satisfacer los requerimientos nutricionales diarios, esencialmente por su bajo contenido de materia seca. Poseen un alto contenido de agua y bajo de carbohidratos (exceptuando

batata, papa, yuca y otros órganos subterráneos), de proteínas (salvo las leguminosas y algunas crucíferas) y de lípidos (excepto palta), pero son, en general, una buena fuente de minerales y vitaminas. La vitamina más importante para la nutrición humana presente en hortalizas es la vitamina C (Lee y Kader, 2000). Más del 90 % de la vitamina C en la dieta humana es suministrada por las frutas y hortalizas. Los vegetales de hoja constituyen una fuente valorable de vitamina C, especialmente cuando son consumidos frescos (Konstantopoulou *et al.*, 2010). La vitamina C es utilizada frecuentemente para caracterizar la calidad nutritiva de hortalizas de hoja (Moreira *et al.*, 2003; Kader, 2002b).

### **2.3.6 Transferencia de masa durante el almacenamiento postcosecha de frutas y hortalizas**

#### **Difusión de agua durante la transpiración de frutas y hortalizas**

La pérdida de agua en forma de vapor y otras sustancias volátiles en las frutas se produce a través de la epidermis, esta difusión metabólica de los gases la describe la primera ley de Fick, que establece que el flujo de un gas a través de una barrera de tejido es proporcional al gradiente de concentración (Lammertyn *et al.* 2003).

La difusión másica del agua es un mecanismo básico bien aceptado para describir el movimiento de la humedad en alimentos y la ley de Fick ha sido usada para la descripción matemática del proceso. Se acepta que durante la transpiración ocurre la transpiración líquida. En forma cuantitativa es claro que cuando la humedad del sólido (fruto) es alta, el mecanismo controlante será el de difusión líquida (Alvarez *et al.*, 1986).

La velocidad a la cual una sustancia difunde a través de un área, depende no solamente del tamaño y forma de la molécula, sino también del gradiente de concentración de la humedad del producto y del medio ambiente. Lo cual quiere decir que a medida que aumenta la gradiente de presión de vapor de agua entre el producto y el medio ambiente, aumenta el déficit de presión de vapor y con ello aumenta la velocidad de difusión del agua, el gradiente de difusión se expresa cómo  $-dC/dx$ , donde C es la concentración (mol\*L) y x es la distancia (cm). Con  $dm/dt$  equivalente a la velocidad a la que m moles de soluto atraviesan la barrera o plano de referencia, para el caso de las frutas correspondiente al área superficial (A), en un tiempo t (s), se puede escribir la primera ley de Fick de acuerdo a la ecuación.

### **Modelo matemático en transpiración postcosecha de frutas y hortalizas**

La mayoría de los modelos existentes para el estudio de la cinética de deshidratación se basan en la segunda ley de Fick, que se basa en la ecuación de difusión, el flujo de masa es proporcional al gradiente de concentración entre el sólido y el medio ambiente. Crank (1975) presenta una serie de soluciones analíticas para la ley de la segunda Fick, teniendo en cuenta las diferentes condiciones iniciales y de frontera. En sistema de coordenadas rectangular (x, y, z), la ecuación de difusión se expresa como:

$$\frac{\partial X}{\partial t} = \frac{\partial X}{\partial x} \left( D_{ef} \frac{\partial X}{\partial x} \right) + \frac{\partial X}{\partial y} \left( D_{ef} \frac{\partial X}{\partial y} \right) + \frac{\partial X}{\partial z} \left( D_{ef} \frac{\partial X}{\partial z} \right) \quad (2.19)$$

Suponiendo que no hay forma constante y geométrica de una placa infinita con espesor  $2L$ , donde la transferencia de humedad durante la deshidratación por transpiración es predominantemente unidireccional y considerando  $D_{ef}$  constante, la ecuación 2.19 se reduce a:

$$\frac{\partial X}{\partial t} = D_{ef} \frac{\partial^2 X}{\partial y^2} \quad (2.20)$$

Para la situación de humedad inicial  $X_0$  uniforme, despreciando las resistencias externas a la transferencia de materia y considerando la contracción del producto durante la deshidratación por transpiración despreciable, las condiciones de contorno para la humedad  $X$  son:

$$X = X_0 \quad \text{en el } t = 0 \quad 0 < y < L \quad (2.20a)$$

$$X = X_e \quad \text{en el } y = L \quad t > 0 \quad (2.20b)$$

$$\frac{\partial X}{\partial y} = 0 \quad \text{en el } y = 0 \quad t > 0 \quad (2.20c)$$

Para la estimación de la difusividad efectiva por el método de las pendientes, se consideraron los siguientes modelos matemáticos, dado por Crank (1975) a partir de la ecuación 2 con las condiciones de contorno 2.20a, 2.20b y 2.20c que es:

$$\frac{X - X_e}{X_0 - X_e} = \frac{8}{\pi^2} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{1}{(2n+1)^2} \exp\left[ \frac{(2n+1)^2 \pi^2}{4L^2} D_{ef} \cdot t \right] \quad (2.21)$$

Dónde:

X = humedad de la muestra (g);

Defl = difusividad efectiva del agua (m<sup>2</sup>/día);

t = tiempo (día);

n = número de términos de la serie;

L = dimensión característica (m).

Así mismo, Karathamos *et al.* (1990), propusieron ecuaciones del tipo potencial y del tipo exponencial para la estimación de la difusividad efectiva.

$$D_{ef} = c(\bar{X}_{exp})^b \quad (2.22)$$

$$D_{ef} = c \exp^{b*\bar{X}_{exp}} \quad (2.23)$$

### **Simulación de transpiración en postcosecha**

La simulación del proceso de transpiración es una manera de representar matemáticamente, mediante modelos y generalmente con ayuda de programas computacionales, lo que ocurre en la realidad del producto a través del tiempo, en las condiciones de almacenamiento postcosecha de frutas y hortalizas. Así, la evaluación del proceso de transpiración adquiere una mayor profundidad, y esto sirve para poder establecer las condiciones óptimas de almacenamiento y del diseño de empaques para los productos hortofrutícolas.

Saguy *et al.* (1980), mencionan que la simulación requiere de una serie de ecuaciones (algebraicas, diferenciales y diferenciales parciales) que describan los aspectos del comportamiento dinámico del sistema a ser analizado.

Sing *et al.* (1984), señalan que para el desarrollo de una simulación computacional se requiere de la incorporación de modelos matemáticos que describan la cinética de los diversos cambios que se están evaluando.

Simular es asumir la apariencia de las características sin asumir la identidad o realidad. Significa ejercer el modelo matemático y obtener los resultados predecidos. La diferencia entre modelar y simular puede expresarse como sigue: modelar es el desarrollo de ecuaciones, sujeciones y reglas lógicas, mientras que simular es ejercer el modelo (Ingels, 1985).

## **2.4 METODOLOGÍA DE LA FUNCIÓN CONVENIENCIA EN OPTIMIZACIÓN DE PROCESOS**

El método de la función de conveniencia (Derringer & Suich, 1980) ha sido utilizado para optimizar las tres respuestas (Pérdida de agua, Ganancia de sólidos y Pérdida de peso) y para identificar las condiciones de procesamiento óptimas. Esta metodología consiste en la obtención de una función que convierte un problema de respuesta múltiple en un caso de respuesta única, esta herramienta es conocida como función de conveniencia simultánea (Martinez-Delfa y col., 2009). En este método cada valor de la respuesta, obtenido a partir de la utilización de las ecuaciones polinomiales, es

convertido en un valor adimensional de la función de conveniencia  $d_i$ . Estos valores varían entre 0 y 1, 0 correspondiendo a una respuesta inaceptable y 1 como óptimo, respectivamente.

Si la respuesta debe ser maximizada,  $d_i$  se define como:

$$d_i = 0 \quad y_i < L_i \quad : \quad d_i = 1 \quad y_i > T_i$$

$$d_i = \left[ \frac{y_i - L_i}{T_i - L_i} \right]^{\theta_1} \quad L_i \leq y_i \leq T_i \quad (2.24)$$

Y si la respuesta debe ser minimizada, la función de conveniencia individual ( $d_i$ ) se calcula de la siguiente manera:

$$d_i = 1 \quad y_i < L_i \quad y_i < T_i \quad : \quad d_i = 0 \quad y_i > U_i$$

$$d_i = \left[ \frac{U_i - y_i}{U_i - T_i} \right]^{\theta_2} \quad T_i \leq y_i \leq U_i \quad (2.25)$$

donde  $y_i$  es la respuesta predicha por el modelo polinomial,  $L_i$  y  $U_i$  representan los valores de  $y_i$  mínimos y máximos aceptables, respectivamente; y  $T_i$  es el valor objetivo correspondiente al valor máximo, mínimo o fijado dependiendo de las restricciones especificadas para cada respuesta. Los valores  $d_i$  son afectados por factores definidos por el usuario ( $\theta_1, \theta_2$ ) que ponderan la influencia del valor objetivo y de los límites

mínimos y máximos. Con el fin de alcanzar los valores que representen las condiciones óptimas de procesamiento solo una función de conveniencia global (DT) es obtenida, la cual es calculada utilizando la media geométrica de las respuestas convertidas o adimensionales ( $d_i$ ):

$$DT = \left( d_1^{v_1} \cdot d_2^{v_2} \cdot \dots \cdot d_n^{v_n} \right)^{\frac{1}{\sum_{i=1}^n v_i}} = \left( \prod_{i=1}^n d_i^{v_i} \right)^{\frac{1}{\sum_{i=1}^n v_i}} \quad (2.26)$$

donde  $v_i$  es la importancia relativa asignada a cada  $d_i$ . Además, puede ser observado que si alguna de las respuestas es inaceptable ( $d_i=0$ ), la función total se hace cero, lo cual da una mayor coherencia a la función de conveniencia obtenida. Un valor alto de DT indica las mejores combinaciones de factores, que es considerado como la solución óptima del sistema. Los valores óptimos para cada factor son determinados a partir de los valores de las funciones de conveniencia individual que maximizan la función global DT (Corzo y col, 2008).

## 2.5 VIDA ÚTIL

Por ser una fruta altamente perecedera, el tumbo después de ser desprendida de la planta sufre pérdidas de peso y deterioro significativos en la cadena de comercialización y reducción de su vida útil por efecto del acelerado proceso de maduración, desmejorando su apariencia y calidad. Las pérdidas aumentan debido al manejo inadecuado que recibe el producto (Martínez *et al.*, 2005) lo que conlleva la búsqueda de alternativas que permitan aumentar el tiempo de vida útil y la calidad de preservación de los frutos.



La importancia de los modelos para estimar la vida útil de las frutas radica en el hecho que proporcionan vías objetivas para medir la calidad y determinar los límites de uso del alimento siempre y cuando se fundamenten en el conocimiento de los mecanismos de deterioro, así como en un análisis sistemático de los resultados (Salinas *et al.*, 2007). Los métodos probabilísticos de estimación de la vida útil de los frutos se utilizan principalmente en estudios de evaluaciones sensoriales, consistentes en considerar la vida útil o ‘vida de anaquel’ como una variable aleatoria y describir su comportamiento mediante un modelo estadístico (Ocampo, 2003).

En función de la calidad del producto, el conocimiento de las características físicas y las propiedades mecánicas juegan un papel indispensable para lograr una buena presentación y conservación, que permite definir el manejo más adecuado del producto durante los periodos de precosecha, cosecha y postcosecha (Yirat *et al.*, 2009). De igual manera, el conocimiento del comportamiento de estas propiedades ante el almacenamiento del producto en diferentes condiciones y el uso de diversos materiales de empaque, permiten establecer las mejores condiciones de conservación y de reducción de pérdidas de calidad de los mismos.

## **2.5.1 Estimación de vida útil**

### **2.5.1.1 Muestreo (Diseño escalonado de Gacula)**

El uso de diseños convencionales en experimentos para la determinación de la vida útil requiere muchas veces de un gran número de muestras debido a la naturaleza destructiva del proceso con consecuentes costos y demandas de tiempo (Kilcast & Subramanian, 2000). Gacula (1975) desarrolló un diseño experimental que disminuye la

cantidad de muestras a usar, ya que utiliza la mayoría de las muestras en aquellos períodos experimentales donde es posible obtener una mayor cantidad de información útil. Este tiempo es el período en el cual las muestras tienden a fallar o se encuentran cercanas al límite de la calidad aceptable (Shewfelt. 1986 - citado por Valdez, 1999, Gacula, 1975).

El Diseño Escalonado reduce el costo de los experimentos a través de una suspensión en la evaluación y es adecuado para las categorías de experimentos 1 y 3 en las cuales el interés se centra en el tiempo de falla del producto. El tiempo y duración de dicha suspensión son decididos por el investigador, y en algunos casos extremos, no se realiza ninguna evaluación en las primeras etapas dado que las verdaderas fallas usualmente ocurren en las etapas finales del período de evaluación.

Una característica general de este tipo de diseño es que el número de unidades experimentales se incrementa en la fase de aceleración gracias a la constante  $c$ . Luego de esta fase, el número de unidades permanece igual dado que  $c = 0$  ó **decrece** debido a las unidades deterioradas irremplazables. La fase de aceleración comienza cuando se espera que el producto empiece a fallar. La ocurrencia de un 50% de fallas en cualquier período es suficiente indicativo de que se Inicia la fase de aceleración. El criterio de falla para el inicio de la fase de aceleración del diseño escalonado, es que el 50% del panel detecta diferencias en las muestras almacenadas debido al deterioro del producto.

Las muestras fueron extraídas del almacenamiento de **condiciones extremas**, para su evaluación sensorial, de acuerdo al Modelo Escalonado propuesto por Gacula (1984) y modificado por Cardelli & Labuza (2001). Los parámetros a tener en cuenta en este tipo de modelo fueron:

- **n<sub>0</sub>**: número de muestras iniciales a ser evaluados y/o número de panelistas iniciales.
- **C**: constante, determinada por el investigador
- **n<sub>i</sub>**: número de unidades a ser evaluados y/o número de panelistas a evaluar =  $n_{i-1} + C$ .  $i = 1, 2, \dots, p$

**La versión A del diseño:** empieza con  $n_0 = 0$  y  $C = 1$ , donde  $n_0$  es el número de muestras a ser evaluadas. El número de unidades a evaluar, luego del período inicial y en la fase de aceleración, se obtiene por la siguiente relación:

$$n_i = n_{i-1} + C \quad i = 1, 2, \dots, \text{Periodo } p$$

Tabla 5: Diseño escalonado para el muestreo del Diseño escalonado de Gacula

Período		Versión A $n_0 = 0$ ; $C = 1$						
		Unidad experimental						
0		x						
1		x	x					
2		x	x	x				
3		x	x	x	x			
4		x	x	x	x	x		
5		x	x	x	x	x	x	
		<b>Fase de aceleración <math>C = 0</math></b>						
6	6.0	x	x					
	6.1				x	x		
	6.2						x	x
.	.	.	.	.	.	.	.	.
P								$n_{0-1}$

Período		Versión B $n_0 = 1$ ; $C = 1$						
		Unidad experimental						
0								
1								
2								
		<b>Fase de aceleración <math>C = 0</math></b>						
3	3.0	x	x					
	3.1				x	x		
	3.2						x	x
		x						
			x					
				x				
.	.	.	.	.	.	.	.	.
P								$n_{0-1}$

Fuente: Gacula (1975)

**La versión B empieza** con  $n_0 = 1$  y  $C = 1$  y genera, para cada período de evaluación, un tamaño de muestra de:

$$n_1 = n_0 + C_2$$

$$n_2 = n_1 + C_3$$

$$n_3 = n_2 + C_4$$

Fase de aceleración,  $C = 0$

$$n = n_3 + 0 = 4$$

$$n_p = n_{p-1} + 0 = n_{p-1}$$

### III. MATERIALES Y MÉTODOS

#### 3.1 LUGAR DE EJECUCIÓN

El proyecto de investigación se realizó en los laboratorio de Análisis de Alimentos y Centro Experimental de Jugos y Conservas de la Facultad de Ingeniería Química y Metalurgia de la UNSCH, utilizando materiales y equipos adecuados para cumplir con los objetivos propuestos, por tal motivo, el proyecto se fundamenta en una investigación de tipo **experimental**, en donde a más de identificar las características que se estudian; se controlan, alteran y manipulan las variables, con el fin de observar los resultados al tiempo que se procura evitar que otros factores intervengan en la observación.

#### 3.2 POBLACIÓN Y MUESTRA

##### 3.2.1 Población

Para la presente investigación de trabajó con la población identificada que fue el tumbo serrano “*Passiflora mollisima*.”.

##### 3.2.2 Muestra

La muestra utilizada fue el tumbo serrano “*Passiflora mollisima B.*” en estado de maduración fisiológica, de tamaños uniformes medios, adquiridas en el mercado de Central de Vivanco de la Ciudad de Ayacucho.

### **3.3 MATERIALES, REACTIVOS Y EQUIPOS**

#### **3.3.1 Materiales**

Para el presente trabajo de investigación se usaron diversos materiales de vidrio como: desecadores de vidrio, pipetas, buretas, vasos, etc.

#### **3.3.2 Reactivos**

Los reactivos usados fueron las siguientes sales de saturación como:

- Cloruro de sodio (ClNa).
- Cloruro de potasio (KCl).
- Sulfato de potasio ( $K_2SO_4$ ).

#### **3.3.3 Equipos**

Los equipos usados fueron:

- Cámara de refrigeración de 10 pies<sup>3</sup> de capacidad, con sistema de regulador de temperatura interna automático digital.
- Balanza analítica marca OHAUS, de capacidad 1200 g, de sensibilidad 0,001 g.
- Refrigeradora doméstica marca NABEC
- Equipo de medición de Humedad Relativa de aire,
- Termómetro termo hidrómetro y termómetro de mercurio (0-100 °C).

### 3.4 METODOLOGÍA EXPERIMENTAL

La metodología a seguir para la investigación se muestra en la figura siguiente:

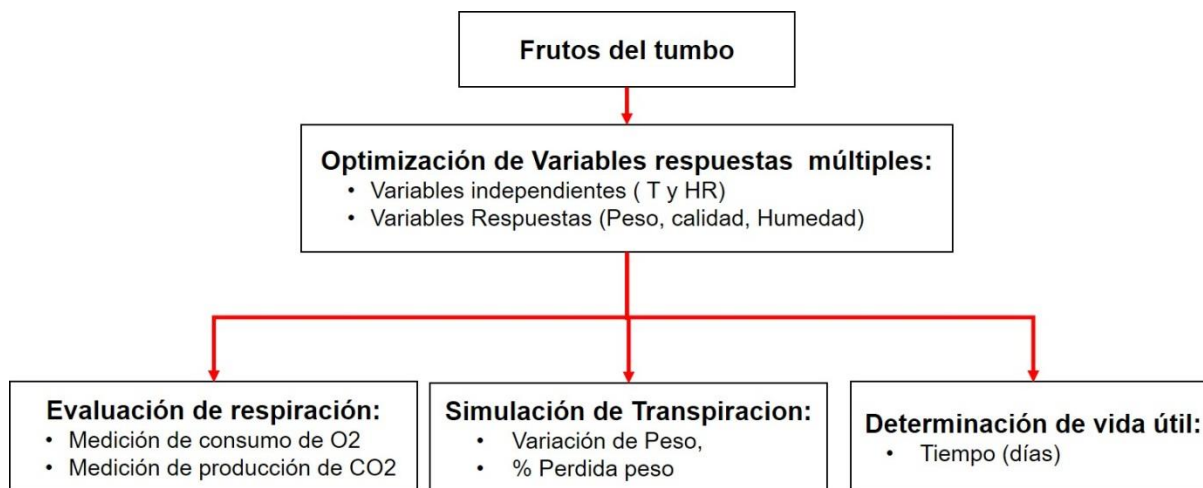


Figura 8: Metodología experimental

Las variables en estudio son:

- ***Variables independientes:***

Temperatura, Humedad relativa de almacenamiento y

Tiempo

**Indicadores:** °C, % y días.

- **Variables dependientes:**

Transpiración (Pérdida de peso, Calidad, Humedad);

Respiración (Producción de CO<sub>2</sub>, O<sub>2</sub>);

Vida útil

**Indicadores:** Transpiración (% Puntaje, %);

Respiración (mg CO<sub>2</sub> / kg peso, mg O<sub>2</sub> / kg peso);

Vida útil (días)

Tabla 6: Variables independientes de evaluación y sus niveles mínimos y máximos.

<i>Variables</i>	<i>Bajo</i>	<i>Alto</i>
Temperatura (°C)	2	20
Humedad relativa (%)	75	95
Tiempo (días)	-	16

### **3.4.1 Diseño experimental para la optimización de variables respuestas múltiples en función de la temperatura y Humedad relativa ambiental**

Este diseño experimental se basó en la Metodología de Superficie de Respuesta, con un Diseño factorial. El diseño a usar para recabar los datos es un planeamiento factorial completo  $3^k$ , lo que nos dará el número total de 27 ensayos a realizar, como se muestra en la Tabla 7, (Rodríguez y Lemma, 2005).



Tabla 7: Diseño experimental para la evaluación de transpiración del fruto del tumbo

<b>Experimento</b>	<b>Temperatura (°C)</b>	<b>Humedad relativa (%)</b>	<b>Tiempo(días)</b>
1	2	75,0	0
2	10	75,0	0
3	20	75,0	0
4	2	85,0	0
5	10	85,0	0
6	20	85,0	0
7	2	95,0	0
8	10	95,0	0
9	20	95,0	0
10	2	75,0	8,0
11	10	75,0	8,0
12	20	75,0	8,0
13	2	85,0	8,0
14	10	85,0	8,0
15	20	85,0	8,0
16	2	95,0	8,0
17	10	95,0	8,0
18	20	95,0	8,0
19	2	75,0	16,0
20	10	75,0	16,0
21	20	75,0	16,0
22	2	85,0	16,0
23	10	85,0	16,0
24	20	85,0	16,0
25	2	95,0	16,0
26	10	95,0	16,0
27	20	95,0	16,0

- 1) Acondicionamiento de ambientes con diferentes humedades relativas y temperaturas, haciendo uso de soluciones sobresaturadas de acuerdo a la Tabla 2.



Figura 9: Cabinas con diferentes humedades relativas (75, 85 y 95% respectivamente)

- 2) Colocación de muestras de frutas de tumbo serrano en cada uno de los ambientes.



Figura 10: Muestras de fruto de tumbo serrano en diferentes humedades relativas (75, 85 y 95% respectivamente)

- 3) Regulación de la temperatura cada uno de los ambientes como señala la Tabla 6.



Figura 11: Cabinas con humedades relativas diferentes a temperatura constante de almacenamiento.

- 4) Después de un intervalo de tiempo las muestras son evaluadas a través de las variables de: Pérdida de peso (%), calidad (evaluado por pruebas afectivas de escala hedónica de 0 a 5 puntos)\* y Humedad (por diferencia de pesos).



Figura 12: Control de peso, evaluación de la calidad y contenido de humedad del fruto.

- 5) Completado los ensayos de la Tabla 6, se procede al procesamiento de datos de acuerdo al siguiente algoritmo de optimización desarrollado.

### Algoritmo de optimización

Con el propósito de obtener las ecuaciones polinómicas predictivas para cada tratamiento, calcular la función de conveniencia y graficar las superficies cinéticas y de conveniencia, un algoritmo de solución completo fue codificado en Matlab® 7.2 (Mathworks, Natick, MA). El código empleó funciones matemáticas y gráficas de Matlab para obtener los coeficientes polinomiales, coeficientes de determinación ( $R^2$ ), *valor-p* y las superficies predictivas 3D. La Figura 13 muestra el diagrama de bloques completo del algoritmo de optimización desarrollado.

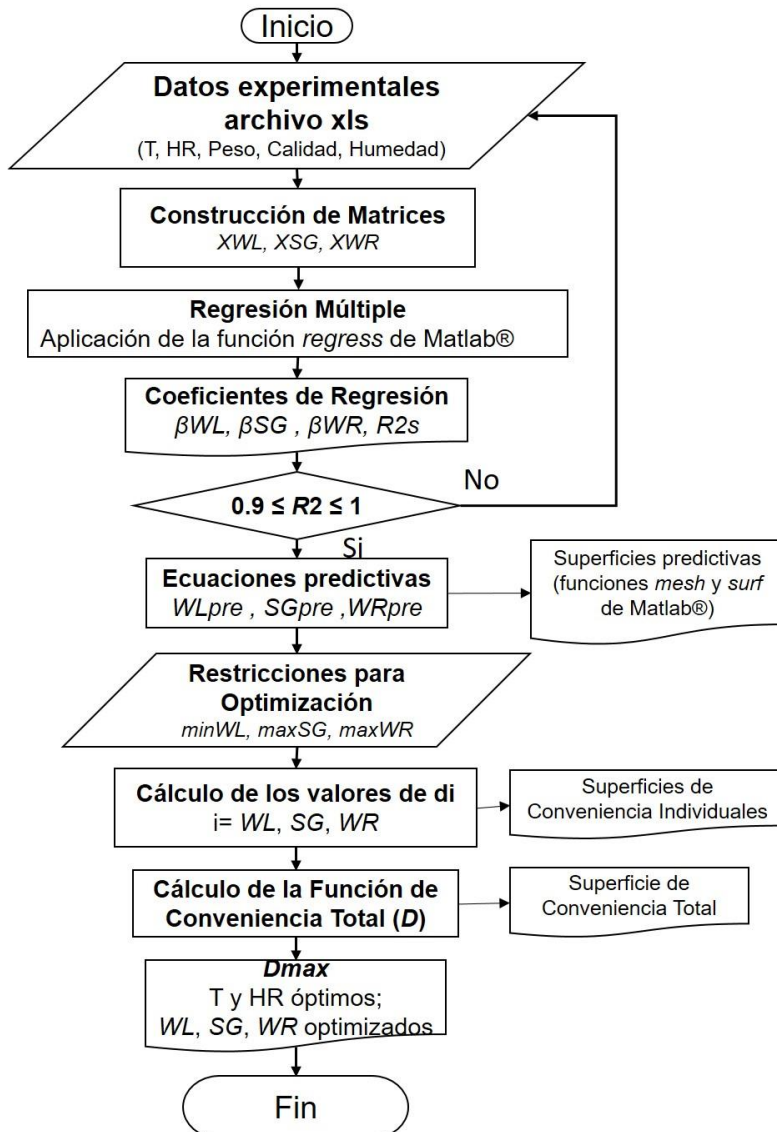


Figura 13: Diagrama de bloques del algoritmo completo de optimización desarrollado.

## Regresión polinomial

Con el propósito de predecir la evolución de la transpiración y evaluar la influencia de cada factor operativo (Temperatura y Humedad relativa) en las cinéticas de transferencia de masa fueron desarrollados modelos polinomiales de segundo orden para la pérdida de peso, marchitez y mg CO<sub>2</sub> generado, utilizando regresión lineal múltiple.

El modelo general propuesto para cada respuesta cinética se describe a continuación:

$$y = \beta_0 + \sum_{i=1}^n \beta_i x_i + \sum_{i=1}^n \beta_{ii} x_i^2 + \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=1}^n \beta_{ij} x_i x_j \quad (3.1)$$

donde  $y$  es la respuesta predicha (pérdida de peso, marchitez y mg CO<sub>2</sub> generado),  $\beta_0$  es el término independiente de la ecuación,  $\beta_i$  es el coeficiente lineal,  $\beta_{ii}$  es el término de los efectos cuadráticos,  $\beta_{ij}$  representa el término de los efectos de interacción entre las variables y  $\mathbf{x}_i$  y  $\mathbf{x}_j$  representan a las variables operativas. Los coeficientes fueron obtenidos por medio del ajuste de los datos experimentales aplicando regresión múltiple utilizando un código desarrollado en Matlab® 7.2 (Mathworks, Natick, MA).

El análisis de la varianza (ANVA) de los modelos polinómicos fue realizado con el propósito de evaluar la exactitud de los modelos predictivos y el efecto de cada factor sobre las respuestas cinéticas usando Statgraphics Centurion (StatPoint Technologies Inc., Warrenton, Virginia).

### 3.4.2 Diseño experimental para la simulación de transpiración del fruto del tumbo serrano

1. Acondicionamiento de ambientes con diferentes humedades relativas y temperaturas, haciendo uso de soluciones sobresaturadas de acuerdo a la Tabla 2.



Figura 14: Cabinas con diferentes humedades relativas (75, 85 y 95% respectivamente)

2. Medición de muestras de tamaño uniforme (medio).



Figura 15: Toma de medidas del fruto de tumbo

3. Colocación de muestras de frutas de tumbo serrano en cada una de los ambientes.



Figura 16: Muestras de fruto de tumbo serrano en diferentes humedades relativas (75, 85 y 95% respectivamente)

4. Control de peso y su registro en cada tiempo (día).



Figura 17: Control de pesos en los tiempos indicados

5. Repetición del experimento de acuerdo al diseño experimental de la Tabla 6
6. Proceso de datos experimentales a través de la confección que fue codificado en Matlab® 7.2 (Mathworks, Natick, MA) utilizando el interfaz GUIDE y archivo de datos en Excel para determinar la difusión de agua de la fruta al exterior (**ANEXO 1, 2 y 3**).
7. Simulación de la pérdida de peso en función de la Temperatura y Humedad relativa ambiental.
8. Determinación del tiempo de vida, para una Temperatura y Humedad relativa ambiental.

### 3.4.3 Procedimiento experimental de medición de respiración

1. Se preparó el siguiente equipo experimental, con las soluciones de reactivos de acuerdo al esquema mostrado en la Figura 18.

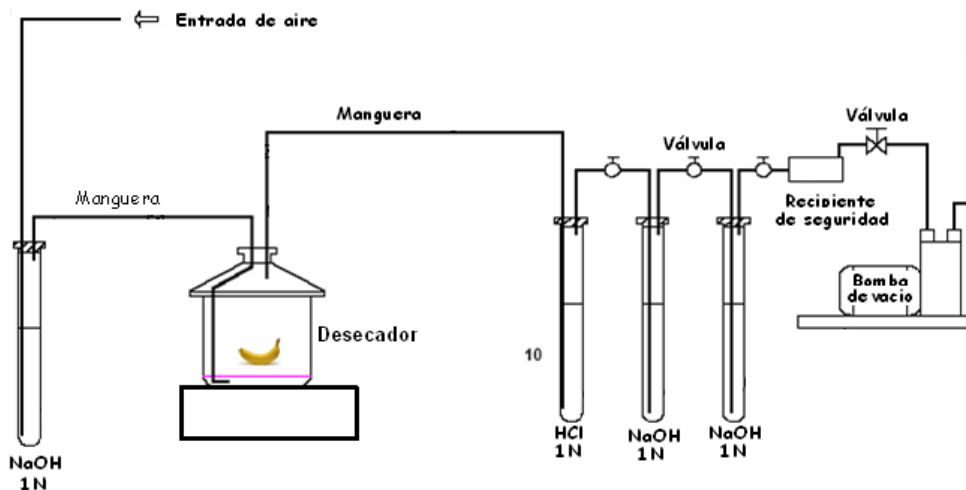


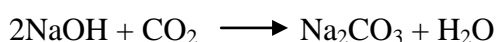
Figura 18: Esquema del sistema para medir la respiración de frutas

2. Se estandariza las soluciones de NaOH y adición los reactivos de NaOH y HCl 1N en un volumen de 150 ml en los tubos como se indica en la Figura 18.
3. Se procedió a pesar los frutos (peso 1) y se colocó dentro del desecador o cabina.
4. Realizar el vacío del sistema para la expulsión del aire que tiene  $\text{CO}_2$  el desecador.
5. Dejar reposar el sistema por 24 horas
6. Cerrar con una válvula la entrada de aire ambiental y conectar la bomba de vacío por el extremo previamente abrir la válvula antes de la bomba de vacío.
7. Realizar el vacío del sistema por un tiempo de 5 minutos a una presión moderada, luego trascurrido apagar la bomba, con mucho cuidado abrir las válvulas cerradas.
8. Pipetear en los frascos de erlenmeyer 15 mL de una solución de cloruro de bario al 3%, (por duplicado).

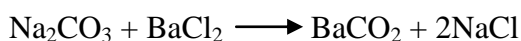


9. Retirar alícuotas de 2 mL de los tubos conteniendo soluciones de NaOH y agregar a los frascos de erlenmeyer que tiene cloruro de bario. Adicionar dos gotas de indicador de fenolftaleína. Como la reacción de CO<sub>2</sub> con NaOH es reversible, la función del cloruro de bario es formar carbonato de bario, que precipitará, evitando así la salida de CO<sub>2</sub>.
10. Titular cada erlenmeyer con una solución previamente valorada de HCl 0,1N hasta el punto de viraje.
11. Con el volumen gastado de HCl se determinó, a través de un cálculo estequiométrico, la masa de CO<sub>2</sub> liberada por el producto después de 24 horas.

- Recolección de CO<sub>2</sub> en solución NaOH



- Toma de alícuota de Cloruro de Bario



- Titulación de BaCO<sub>2</sub> con HCl



12. El resultado que se expresó en mg de CO<sub>2</sub> / kg de producto fue calculado de la siguiente forma:

$$M_{\text{CO}_2} = \frac{\text{Gasto}_{\text{HCl}} (N_{\text{HCl}}) 22 V_{\text{tubo}}}{V_{\text{alícuota}}}$$

$$M_{CO_2} = M_{CO_2 \text{ tubo1}} + M_{CO_2 \text{ Tubo2}}$$

$$Tasa \ de \ respiraci3n = \frac{M_{CO_2}}{t(M_{fruta})}$$

Donde:

$M_{CO_2}$  = Masa del gas carb3nico (mg  $CO_2$ )

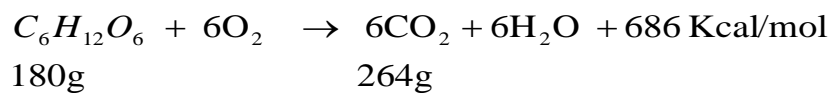
$N_{HCl}$  = Normalidad del HCl utilizado (0,1N) en la titulaci3n de la al3cuota

$V_{tubo}$  = Volumen del NaOH restante en el tubo de donde se retir3 la al3cuota (150 ml es el 1º d3a)

$G_{HCl}$  = Gasto de HCl en la titulaci3n de la al3cuota retirada en el tiempo (ml).

t = Tiempo entre la 3ltima retirada de al3cuota y la del d3a (h).

$M_{frutos}$  = Masa de los frutos colocados en el desecador (kg)



$$Perdida \ de \ peso \left( \frac{g}{kg \ h} \right) = \frac{mgCO_2}{kg \ h} * 10^{-3} * 68$$

$$\% \ perdida \ peso \left( \frac{g}{100g \ h} \right) = \frac{mgCO_2}{kg \ h} * 10^{-6} * 68$$

## Lectura de cambios de gases en sistemas cerrados

A partir de los datos experimentales de concentración de O<sub>2</sub> y CO<sub>2</sub> en función del tiempo, se determinaron las constantes de las ecuaciones (3.7 y 3.8) a través de un análisis de regresión no lineal (Hagger *et al.*)

$$O_2 = 21 - \frac{t}{(A_1 * t + B_1)^{C_1}}$$

$$CO_2 = \frac{t}{(A_2 * t + B_2)^{C_2}}$$

Donde

(O<sub>2</sub>), (CO<sub>2</sub>) = concentraciones de oxígeno y dióxido de carbono (%)

t = tiempo (h)

A, B, C = son valores constantes

## Velocidad de respiración en sistemas cerrados

Las velocidades de respiración (consumo de O<sub>2</sub> y producción de CO<sub>2</sub>) de acuerdo al tiempo se calcularon en la derivada de las ecuaciones 3.7 y 3.8 y se obtiene:

$$\frac{dO_2}{dt} = A_1 * C_1 * t * (A_1 * t + B_1)^{(-1-C_1)} - (A_1 * t + B_1)^{(-C_1)}$$

$$\frac{dCO_2}{dt} = -A_2 * C_2 * t * (A_2 * t + B_2)^{(-1-C_2)} + (A_2 * t + B_2)^{(-C_2)}$$

## **Análisis estadístico**

Los resultados de la Tabla 6 fueron procesados haciendo uso del programa STATGRAPHICS Centurión XV.II, para su evaluación de interacción de variables, se realizó el análisis de variancia, análisis de regresión múltiple y determinación del modelo matemático de respuesta en función de las variables intervinientes, se usó un  $\alpha=0,05$  para dicho proceso de análisis.

## **Validación del modelo matemático ajustado**

Se efectuaron experimentos adicionales para validar la superficie de respuesta del modelo matemático procedente de ésta, en los intervalos que van para Temperatura y Humedad Relativa respectivamente.

### **3.4.4 Procedimiento de cálculo de vida útil**

La estimación de vida útil o vida de anaquel del tumbo serrano, para cada condición de almacenamiento se proyectó utilizando la distribución probabilística de Weibull (Larsen, 2006). Estadísticamente se realizó la prueba de bondad de ajuste de Kolmogorov Smirnov con un nivel de confiabilidad de 95%. El criterio de censura (falla) en la prueba sensorial de aceptación, para el cual se utilizó la prueba de aceptabilidad que se realizaron con un grupo de 5 personas. A los sujetos se les solicitó que indicaran si aceptaban o rechazaba el fruto de acuerdo a la apariencia de fresca que presentaba, más no el grado de aceptabilidad ya que se busca el menor defecto del

fruto para ser no aceptado que correspondió a la apariencia (marchitez, presencia de manchas negras, ataque de hongos, u otro tipo de defectos).

**a) Construcción de la curva de función de riesgo de Weibull**

Para cada valor observado se toma el tiempo y se marcan aquellos valores para los cuales el producto falla. Se anota el orden del suceso en el que se suministra el tiempo, tanto para las muestras que fallan, como para las que no fallan. Este proceso genera una serie de observaciones ordenadas, luego se invierte el orden del suceso y se obtiene el rango inverso, denominado 'K'. Los valores de riesgo  $h(t)$  para las muestras que fallan se calculan mediante la ecuación:

$$h(t) = \frac{100}{k} \tag{3.11}$$

Para cada tiempo de falla se calcula el riesgo acumulado  $H(t)$  sumando al riesgo actual el valor precedente. Con estos datos y teniendo en cuenta que la función de probabilidad acumulada para la distribución de Weibull (Hough *et al.*, 1999) se expresa como:

$$F(t) = 1 - e^{-\left(\frac{t}{\alpha}\right)^\beta} \tag{3.12}$$

Donde,  $\alpha$  es el parámetro de escala y  $\beta$  es el parámetro de forma,  $F(t)$  es la función de probabilidad acumulada, y  $t$  es el tiempo de evaluación.

La ecuación anterior es substituida en la función de riesgo acumulado  $H(t)$  definida por la ecuación siguiente:

$$H(t) = \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{f(t)}{1-F(t)} dt = -Ln[1-F(t)] \quad (3.13)$$

Donde,  $f(t)$  es la función de densidad probabilística. De la anterior ecuación se obtiene la correspondencia de **Log(t)**:

$$Log(t) = \frac{1}{\beta} Log(\sum H) + Log(\alpha) \quad (3.14)$$

Se ajustó a un modelo de regresión lineal para determinar los parámetros de la distribución de Weibull, a partir de los cuales se establece el tiempo medio de almacenamiento en el cual el consumidor rechazaría el producto:

$$H(t) = \left(\frac{t}{\alpha}\right)^\beta \quad (3.15)$$

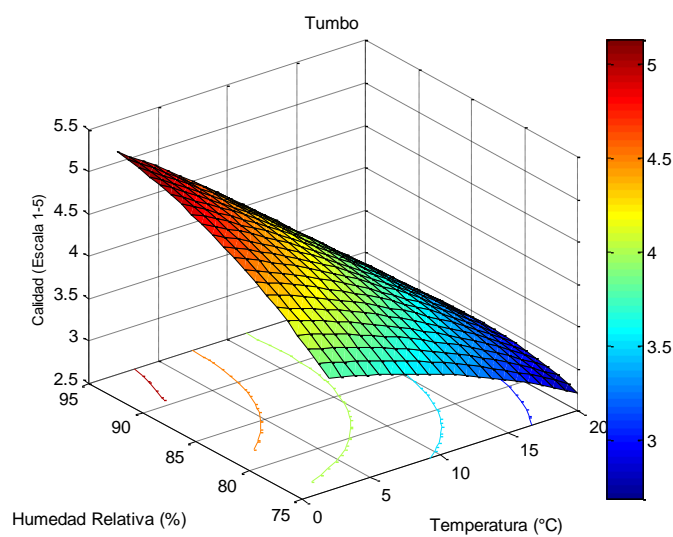
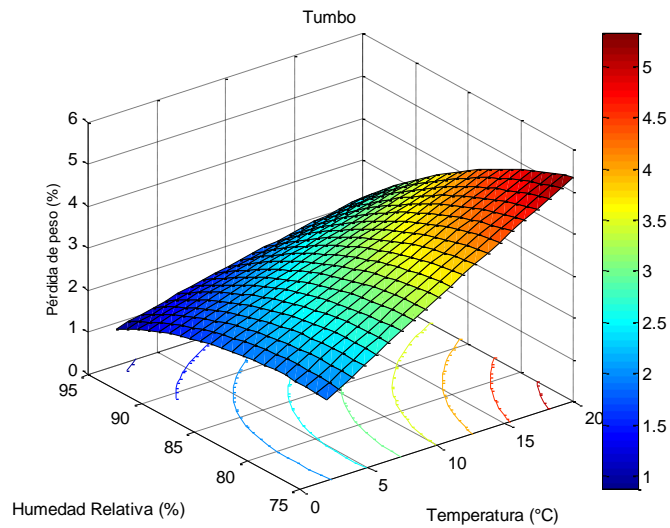
### III. RESULTADOS Y DISCUSIONES

#### 3.1 OPTIMIZACIÓN DE LAS VARIABLES DE ALMACENAMIENTO EN FUNCIÓN DE RESPUESTAS MÚLTIPLES.

Tabla 8. Base de datos experimentales para Optimización de variables

<b>Experimento</b>	<b>T (°C)</b>	<b>HR (%)</b>	<b>Tiempo (días)</b>	<b>Pérdida de Peso (%)</b>	<b>Calidad (Aceptabilidad)</b>	<b>Humedad (%)</b>
1	2	75	0	0	5	93,00
2	10	75	0	0	5	93,00
3	20	75	0	0	5	93,00
4	2	85	0	0	5	93,00
5	10	85	0	0	5	93,00
6	20	85	0	0	5	93,00
7	2	95	0	0	5	93,00
8	10	95	0	0	5	93,00
9	20	95	0	0	5	93,00
10	2	75	8	1,5	5	92,63
11	10	75	8	4,49	3	92,67
12	20	75	8	5	3	92,63
13	2	85	8	2	5	92,67
14	10	85	8	4,01	3	92,71
15	20	85	8	4,5	3	92,67
16	2	95	8	1,25	5	92,78
17	10	95	8	1,5	5	92,75
18	20	95	8	5,5	3	92,71
19	2	75	16	6	1	92,47
20	10	75	16	5	3	92,41
21	20	75	16	5,98	0	92,18
22	2	85	16	1,7	5	92,52
23	10	85	16	4,5	3	92,47
24	20	85	16	6,03	1	92,16
25	2	95	16	1,25	5	92,46
26	10	95	16	5	3	92,20
27	20	95	16	4,00	0	91,66

Tres modelos predictivos fueron obtenidos (para Pérdida de peso, Calidad y humedad) para el tumbo, usando el enfoque polinomial codificado en Matlab® 7.2 (Mathworks, Natick, MA), a partir de los resultados obtenidos en la tabla 8. Además, las superficies predictivas 3D para la pérdida de peso (%), calidad (aceptabilidad) y humedad (%) en función de la Temperatura y de la Humedad relativa para el tumbo (Figuras 19) fueron graficadas usando funciones gráficas de Matlab.





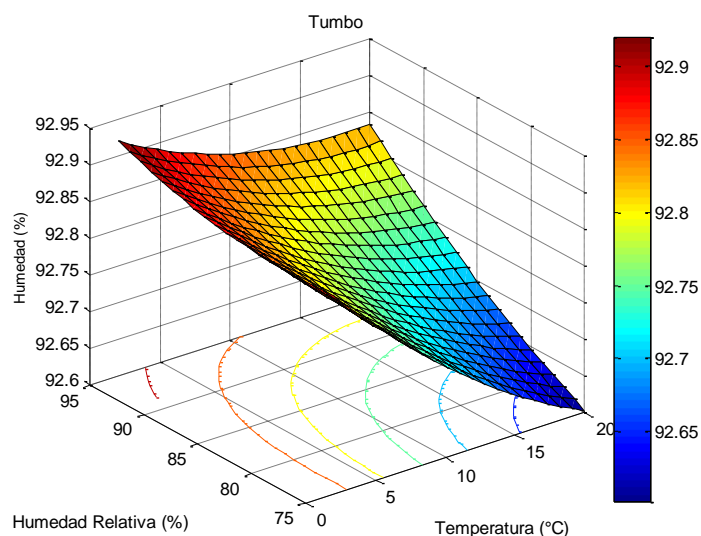


Figura 19: Superficies predictivas para la pérdida de peso, calidad y humedad en función de temperatura y humedad relativa durante el almacenamiento postcosecha del tumbo.

Las superficies de los valores de conveniencia individuales y totales para el fruto de tumbo, fueron obtenidas usando funciones gráficas de Matlab de acuerdo con los valores de la función de conveniencia calculados a partir de diferentes niveles de temperatura (2, 10 y 20°C) y Humedad relativa (75, 85 y 95%). Las regiones de los valores óptimos de la función conveniencia (DT) fueron identificados con **círculos grises**. A partir del gráfico de conveniencia total, puede ser observado que el gráfico, tiene forma diferente. La zona óptima puede observarse como una cuesta estrecha en el nivel máximo de la Humedad Relativa (95%), entre las temperaturas de 2 y 10°C. Adicionalmente es posible determinar una zona de baja conveniencia que se manifiesta como una caída abrupta en el valor de DT cercano a los valores máximos de Humedad Relativa y Temperatura, esto es debido a los valores de conveniencia individual para la marchitez que hacen máximos los valores de marchitez, cercanos al máximo de Humedad Relativa y temperatura, tienden a cero, teniendo en cuenta la restricción de minimización de marchitez.

Las ecuaciones predictivas obtenidas fueron evaluadas estadísticamente a través del análisis de la varianza (ANVA). Los resultados del ANVA para los modelos polinómicos desarrollados se muestran en la Tabla 9. A partir de los resultados se pueden observar diferentes comportamientos en la muestra analizada, estas diferencias pueden ser atribuidas a las diferencias en la estructura y composición del fruto del tumbo. Como puede observarse, el tumbo tiene un menor contenido de sólidos solubles que da como resultado una mayor fuerza impulsora para la transpiración lo cual facilita la difusión de las diferentes sustancias. En adición, el tumbo posee una pared celular menos rígida, debido al bajo contenido de lignina y celulosa (Kurz y col, 2008), que produce una mayor velocidad de plasmólisis.

Tabla 9. Análisis de la varianza de los modelos predictivos polinómicos para las respuestas durante la transpiración del tumbo.

Factores		<b>Pérdida de Peso</b>	<b>Calidad</b>	<b>Humedad</b>
		<b>Coefficientes</b>	<b>Coefficientes</b>	<b>Coefficientes</b>
Tumbo	<b><math>\beta_0</math></b>	-24,6012	-17,3936	94,1887
$x_1$ (Temperatura)	<b><math>\beta_1</math></b>	0,6619	0,2487	-0,0602
$x_2$ (HR)	<b><math>\beta_2</math></b>	0,6543	0,4505	-0,0316
$x_1^2$	<b><math>\beta_{11}</math></b>	-0,0008	-0,0015	0,0003
$x_2^2$	<b><math>\beta_{22}</math></b>	-0,0041	-0,0022	0,0002
$x_1x_2$	<b><math>\beta_{12}</math></b>	-0,0061	-0,0037	0,0005
Valor-p	--	0,2150	0,2524	0,2744

El resultado del análisis de la varianza muestra que el modelo predictivo polinómico fue estadísticamente significativo (nivel de confianza 99%). Además, el modelo ajustado presentó coeficiente de determinación ( $\beta$ ) cercano a la unidad ( $R^2 \geq 0,9$ ) lo cual indica que el modelo explica satisfactoriamente la variabilidad de las respuestas; en consecuencia, las ecuaciones polinómicas de segundo orden obtenidas pueden ser usadas para la predicción de las variables cinéticas (Pérdida de Peso, Calidad y Contenido de humedad) en el rango de las condiciones de operación estudiadas.

### **Ecuaciones predictivas**

$$\text{Pérdida de Peso}(\%) = -24,601 + 0,662T - 0,0008T^2 + 0,6543HR - 0,0041HR^2 - 0,0061THR$$

$$\text{Calidad(Aceptabilidad)} = -17,39 + 0,25T - 0,00015T^2 - 0,45HR - 0,0022HR^2 - 0,0037THR$$

$$\text{Humedad}(\%) = 94,1887 - 0,0602T + 0,0003T^2 - 0,0316HR + 0,0002HR^2 + 0,2744THR$$

## Optimización múltiple

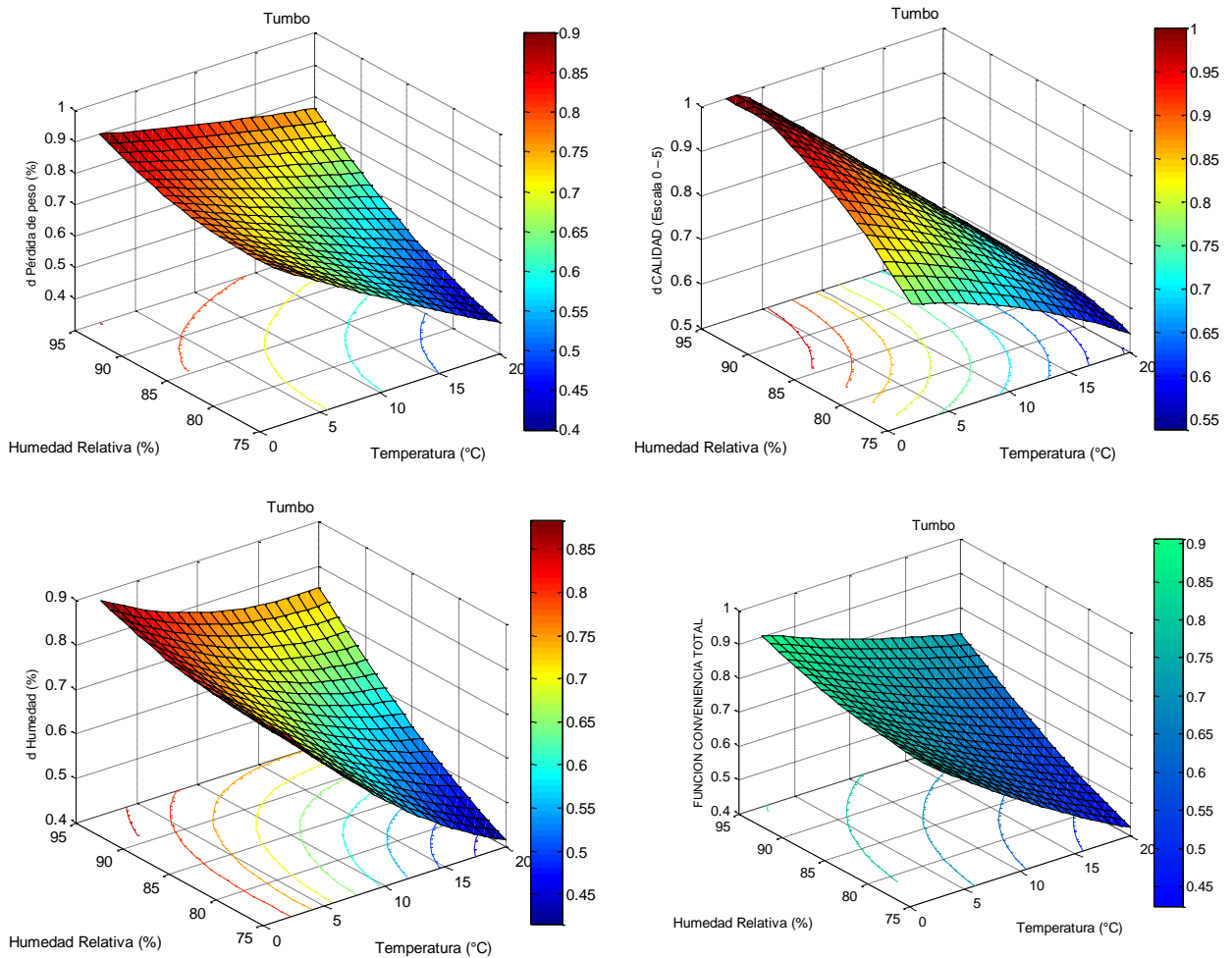


Figura 20: Gráficos de superficie de la función de conveniencia individual y total y contornos de la optimización-DO de tumbo serrano. Izquierda: conveniencia individual para la pérdida de peso, calidad y humedad. Derecha: conveniencia total.

En la Figura 20 observamos el comportamiento de la transpiración. Mishra & Gamage (2007) manifiestan que la transpiración es la principal causa de la pérdida de agua de las frutas y vegetales ocasionando pérdidas de peso, deterioro en la apariencia (marchitamiento y formación arrugas), disminución de firmeza (ablandamiento, pérdida de turgencia), cambios en la calidad nutricional, además de una mayor susceptibilidad a

determinadas alteraciones tanto fisiológicas y patológicas. La transpiración es un proceso por el cual los tejidos vegetales pierden agua en forma de vapor desde las células del interior hacia la atmósfera que los rodea. Las diferentes estructuras epidérmicas regulan el flujo de vapor de agua hacia el exterior de los frutos. El vapor de agua sale hacia el exterior desde los espacios intercelulares existentes entre las células del parénquima poroso, pasa a través de estomas y lenticelas, atraviesa la epidermis y la cutícula. Las aperturas epidérmicas representan la principal vía de pérdida de agua, mientras que la transpiración a través de la cutícula representa alrededor del 5-10 % de la pérdida total (Taiz & Zeiger, 1998). Otros autores proponen que la difusión de vapor de agua en los frutos se realiza tanto a través de las aperturas epidérmicas como a través de una fase acuosa líquida en la cutícula, contrariamente a los gases CO<sub>2</sub>, O<sub>2</sub> y C<sub>2</sub>H<sub>4</sub> cuya difusión se realiza esencialmente a través de estomas (Ben-Yehoshua, Burg & Young, 1985).

El método de la función de conveniencia puede ser aplicado a los alimentos y al sistema de procesamiento con el propósito de optimizar los diferentes factores. En el caso de la transpiración pueden ser usados, variación de pérdida de peso, Calidad, Humedad, textura, color, tiempo de proceso, costo, etc., solos o combinados. En la presente tesis, las condiciones óptimas para la transpiración del tumbo fueron encontradas usando el método de la función de conveniencia programada en Matlab® 7.2 (Mathworks, Natick, MA) de acuerdo con el siguiente criterio: minimizar la pérdida de peso, maximizar la calidad, maximizar la Humedad; este mismo criterio fue utilizado por Eren y Kaymak-Ertekin (2007), Manivannan y Rajasimman (2011) y Noshad y col. (2011).

El resultado de las variables óptimas se puede visualizar en la Tabla 10, tales así para las variables independientes óptimas se tiene: temperatura 2°C y Humedad relativa 95(%), obteniéndose también las respuestas múltiples óptimas se tiene: Pérdida de peso máximo de 0,88%, la máxima calidad aceptable en una escala de 0 a 5 se tiene 5,13 y la Máxima humedad retenida del 92,92%.

Tabla 10: Los valores óptimos de las variables independientes y variables dependientes en el almacenamiento del tumbo serrano

<b>Variables independientes</b>	<b>Óptimos</b>		
	<b>Temperatura (°C)</b>	<b>Humedad relativa (%)</b>	
	2	95	
<b>Variables dependientes</b>	<b>% Pérdida de peso</b>	<b>Calidad (aceptabilidad)</b>	<b>Humedad pdto(%)</b>
	0,8777	5,1345	92,9202

La intensidad de la pérdida de agua depende de factores intrínsecos del fruto y de factores ambientales. Entre las variables intrínsecas al fruto, las más relevantes son la relación superficie/volumen, la estructura de la epidermis y el grosor y composición de la cera epicuticular. Las pérdidas de agua son directamente proporcionales a la relación superficie/volumen, por lo que los frutos de mayor volumen y más esféricos son los que presentan menor pérdida de agua.

La pérdida de peso durante el almacenamiento es una consecuencia de la transpiración del fruto, proceso físico que sigue durante todo el periodo de almacenamiento. En este proceso están involucrados tres eventos importantes: (1) el movimiento del agua como líquido y vapor, desde los espacios intercelulares hasta la cutícula; (2) la disolución y

difusión de las moléculas de agua en y a través de la membrana cuticular; (3) la desorción del agua, en la superficie exterior (Veraverbeke, 2003).

Comparando la fruta fresca, contra el futo almacenado, todos los tratamientos alcanzaron pérdidas muy inferiores al 6%, tope permitido en un proceso completo de conservación y comercialización. La conservación a baja temperatura es la tecnología postcosecha más utilizada y eficaz para alargar el período de vida útil de frutas y hortalizas. Por ello, mantener las frutas dentro de sus rangos óptimos de temperatura y humedad relativa es el factor más importante en el mantenimiento de su calidad. La temperatura de almacenamiento debe ser siempre superior a la del punto de congelación, para los productos no sensibles al frío y a la temperatura mínima recomendada (Kader, 1992).

La pérdida de agua provocó pérdidas menores a 8% a las humedades relativas de 75 a 95% y entre temperaturas de 2 a 20°C, excepción a 20°C de temperatura y Humedad relativa de 58% tubo una pérdida de peso alrededor del 26% en el mismo periodo de tiempo de almacenamiento. Jiménez-Cuesta *et al.* (1983) manifiestan la pérdida de agua en el orden del 5% en la comercialización directa, del 7% en la frigoconservación y hasta el 16% en la simulación del proceso de conservación frigorífica y posterior comercialización.

Además, en el almacenamiento y transporte, es importante una adecuada ventilación y velocidad del aire, puesto que incide sobre la capa de aire húmedo que rodea al fruto (Waks *et al.*, 1985; Thompson, 2002). Por tanto, las frutas y vegetales suelen ser almacenados en un ambiente húmedo (90-98% HR), especialmente a bajas temperaturas y con una velocidad del aire adecuada para minimizar la pérdida de agua (Woods,

1990). En los cítricos, la transpiración es la principal causa de deterioro durante la postcosecha. Distintos estudios indican que se pueden disminuir pérdidas de peso superiores a un 5% durante la comercialización, un 7% en la conservación frigorífica y un 16% en el almacenamiento en refrigeración durante periodos de tres meses (Jiménez-Cuesta, 1983).

La temperatura y el tiempo de almacenamiento tienen influencia sobre la pérdida de peso de los frutos de pomelo “Rio Red”, verificando que los frutos almacenados a las temperaturas más elevadas y durante el período de tiempo más largo, presentaron las mayores pérdidas de peso (Shellie, 2002). Otros autores (Oufedjikh *et al.*, 1998), observaron también, que las bajas temperaturas, reducen la transpiración. Según Hagenmaier & Baker, (1994), la pérdida de peso puede medir el efecto del estrés en la fisiología de los frutos.

El ablandamiento o pérdida de firmeza de las frutas, se debe a la degradación de las pectinas y de las hemicelulosas de las paredes celulares y, en ella, intervienen procesos de hidrólisis enzimática y procesos no enzimáticos, como los cambios en el pH o fuerza iónica del medio que envuelve la pared celular. Una refrigeración adecuada y el uso de atmósferas modificadas o controladas, ralentiza los procesos de senescencia del fruto en general, y el ablandamiento de la pulpa en particular (Pérez-Gago & Krochta, 2002).

Algunos estudios realizados en cítricos muestran una relación entre la firmeza del fruto y la pérdida de peso del mismo, siendo la deshidratación, la responsable de la pérdida de turgencia del fruto y, por tanto, de la pérdida de firmeza.



### 3.2 SIMULACIÓN DE TRANSPIRACIÓN DURANTE EL TIEMPO DE ALMACENAMIENTO

En la Figura 21, 22 y 23 se puede observar la simulación de la pérdida de peso, porcentaje de pérdida de peso y la difusividad del vapor de agua, como consecuencia de la transpiración del fruto a las condiciones estudiadas. Como se puede observar el comportamiento de la pérdida de peso (g) muestra descendiente respecto al tiempo es descendiente a las condiciones de temperatura de 20°C y Humedad relativa del 85%.

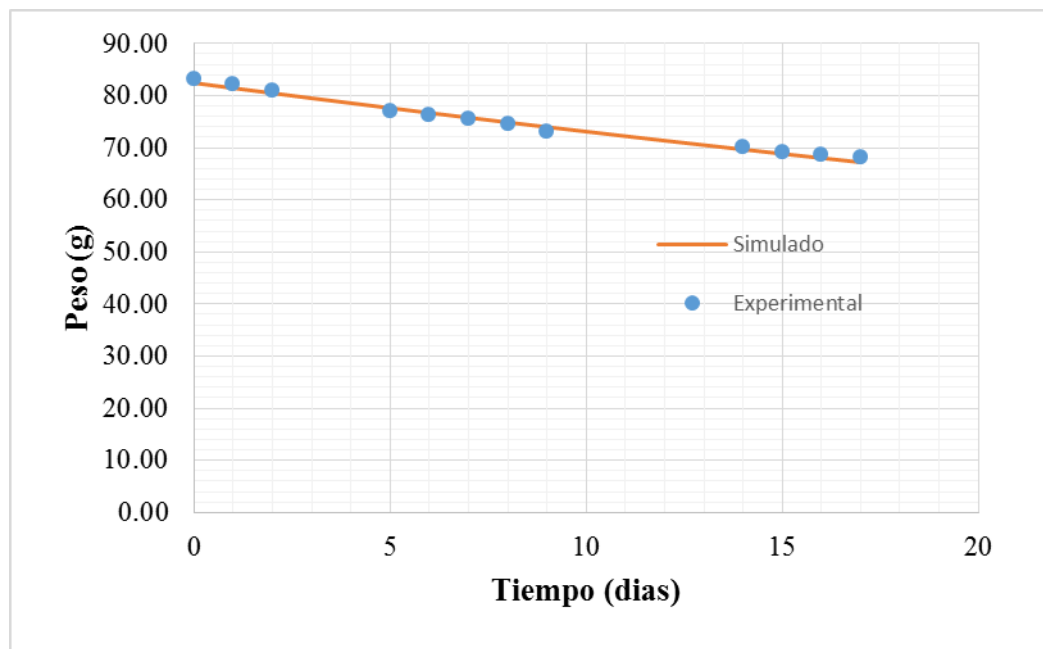


Figura 21: Pérdida de peso (g) del tumbo serrano durante el almacenamiento postcosecha a Temperatura de 20°C y Humedad Relativa de 85%.

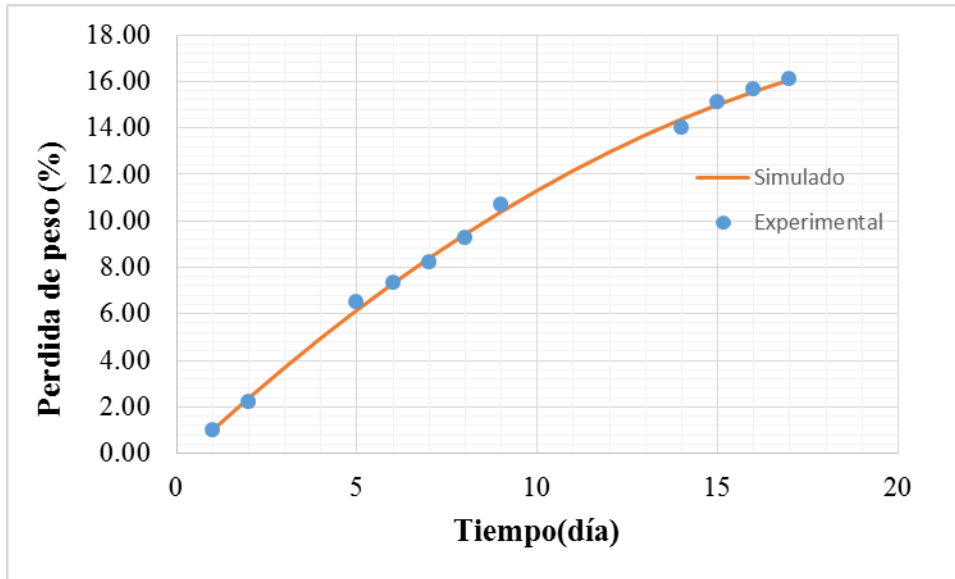


Figura 22: Pérdida de peso (%) del tumbo serrano durante el almacenamiento postcosecha a Temperatura de 20°C y Humedad Relativa de 85%.

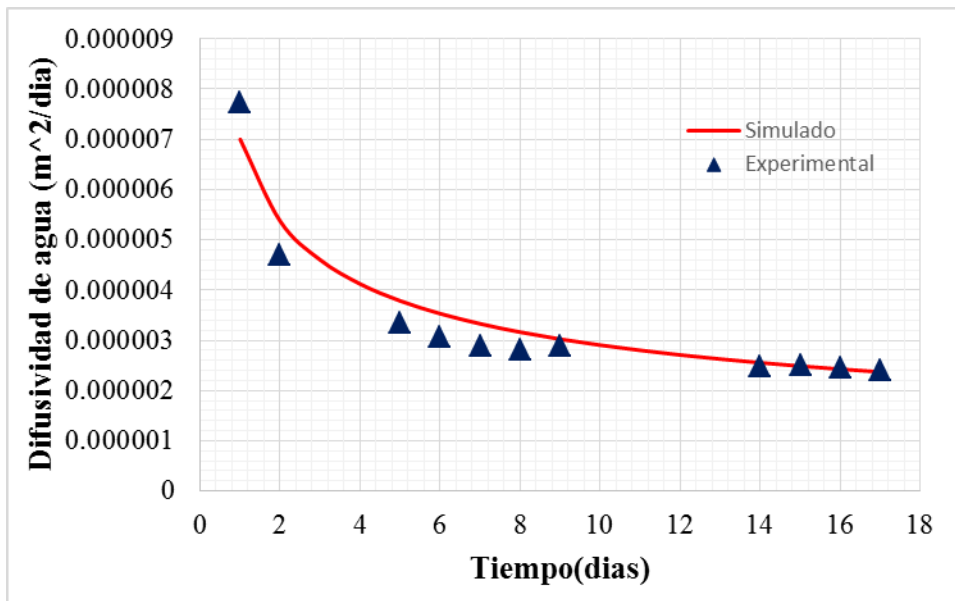


Figura 23: Difusividad de agua durante la transpiración del tumbo serrano en el almacenamiento postcosecha a Temperatura de 20°C y Humedad Relativa de 85%.

Se observa la transpiración en variación de peso como función del tiempo de almacenamiento, la razón de humedad y la difusividad del agua del fruto como consecuencia de transpiración, según el modelo de difusión de agua, obtenido aplicando los métodos numéricos de Runge Kutta de cuarto orden de la ecuación de Crank (1975). Martínez-Jávega, *et al.* (1999) manifiestan los factores ambientales que más influyen en la pérdida de peso son la temperatura, la humedad relativa (HR) y la velocidad de circulación del aire que rodea al fruto. En el almacenamiento a bajas temperaturas y altas HR se reduce el gradiente de presión del vapor de agua entre el fruto y la atmósfera de almacenamiento, con lo que disminuye la velocidad de pérdida de agua por transpiración.

Es notorio que las curvas que describen el comportamiento de la humedad con respecto al tiempo de almacenamiento postcosecha, son curvas típicas similares a las de secado, y se aprecia además una correlación perfectamente lógica entre los parámetros en estudio: Temperatura y Humedad Relativa.

### **3.3 RESPIRACIÓN COMO FUNCIÓN DE TEMPERATURA Y HUMEDAD RELATIVA DE ALMACENAMIENTO**

En la Figura 24, 25, 26, 27 y 28 respectivamente, observamos el comportamiento de la respiración a diferentes humedades relativas, almacenadas a la temperatura de 20°C de almacenamiento. A la temperatura constante, a medida que la humedad relativa disminuye la respiración disminuye. Todos los procesos fisiológicos catalizados por enzimas están fuertemente influidos por la temperatura, presentando todos ellos una temperatura mínima, óptima y máxima (temperatura cardinal). Independientemente de

la tasa absoluta de respiración, incrementos en la temperatura generan incrementos exponenciales de la respiración. El efecto de la temperatura sobre la respiración se puede cuantificar también a través del coeficiente de temperatura, o factor  $Q_{10}$ , el cual refleja los cambios en la tasa de respiración por cada 10 °C de cambio en la temperatura.

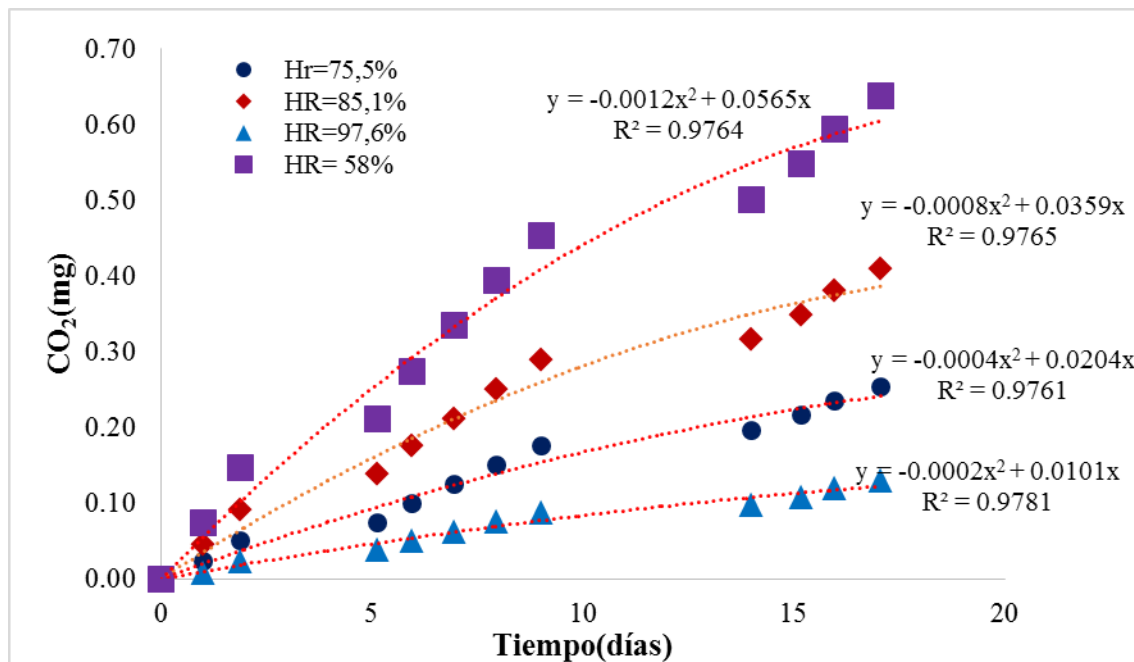


Figura 24: Variación de la respiración producción de CO<sub>2</sub> (mg) a la Temperatura de almacenamiento de 20°C y Humedades relativas de 75,0; 85,0 y 95,0 % respectivamente.

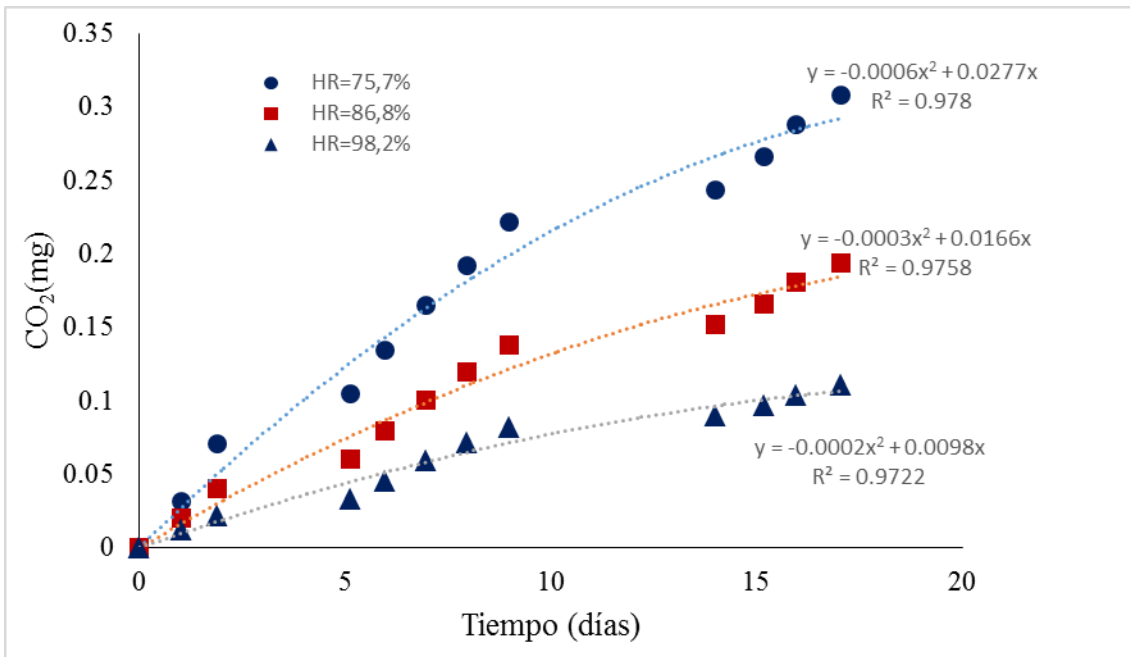


Figura 25: Variación de la respiración producción de CO<sub>2</sub> (mg) a la Temperatura de almacenamiento de 10°C y Humedades relativas de 75,0; 85,0 y 95,0 % respectivamente.

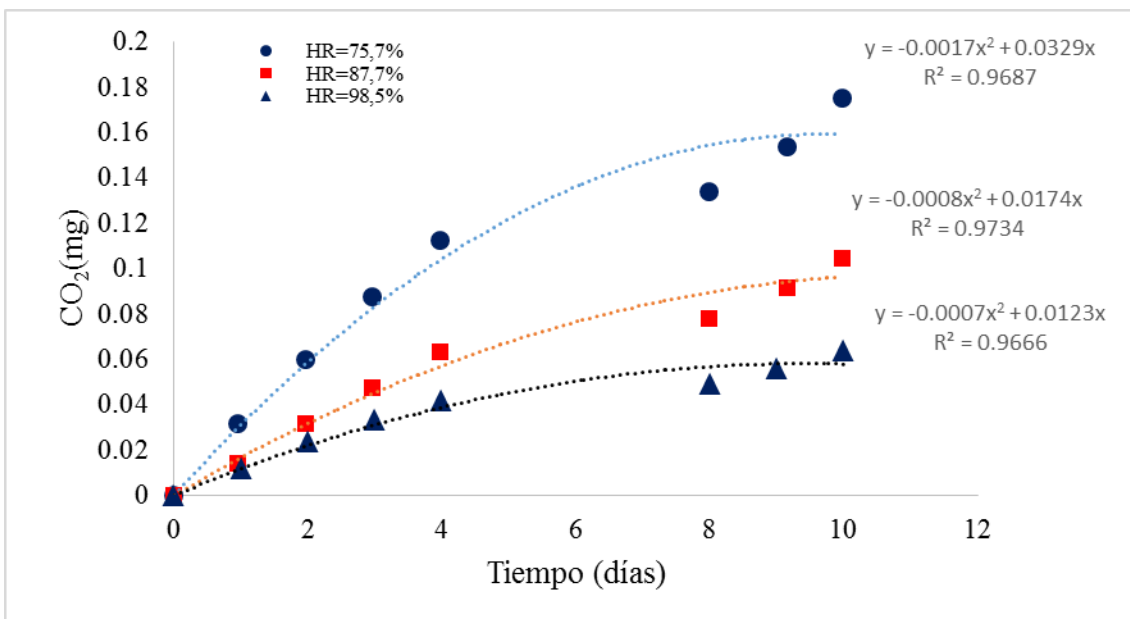


Figura 26: Variación de la respiración producción de CO<sub>2</sub> (mg) a la Temperatura de almacenamiento de 2°C y Humedades relativas de 75,0; 85,0 y 95,0% respectivamente.

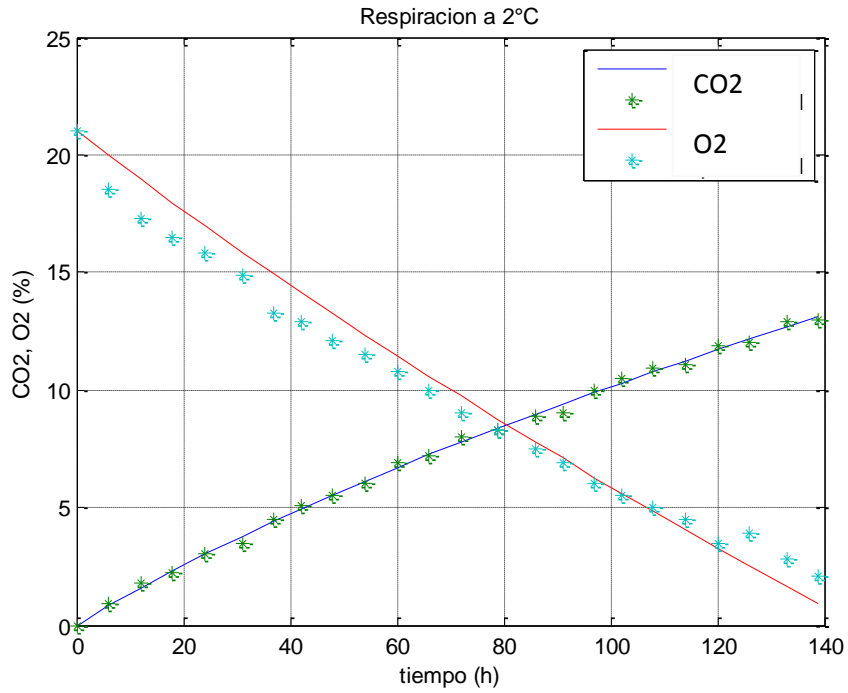


Figura 27: Variación de consumo de O<sub>2</sub> (%) y Producción de CO<sub>2</sub> (%) durante la respiración del tumbo serrano.

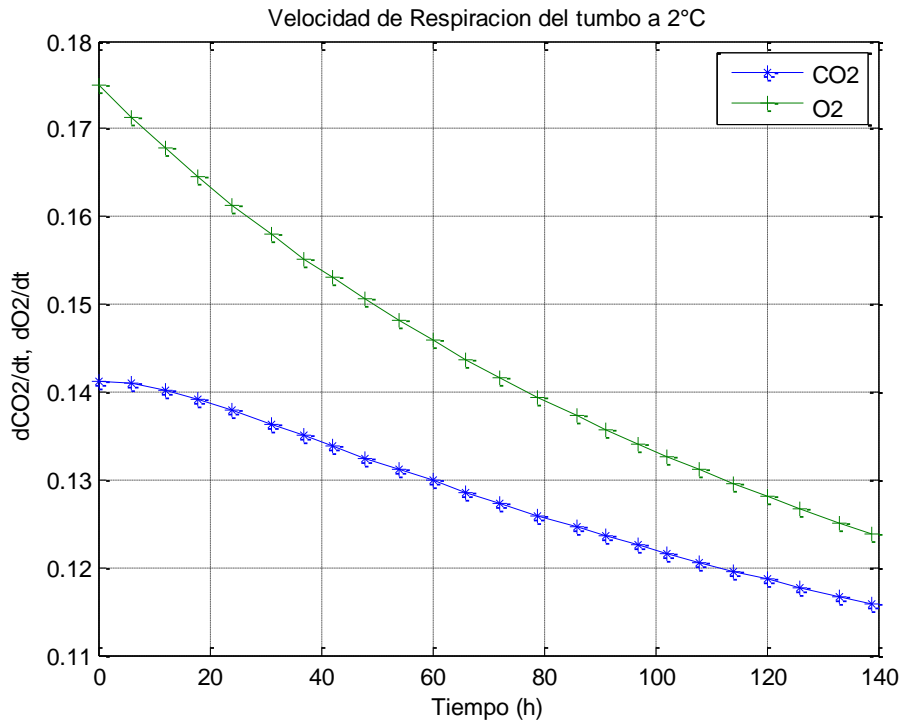


Figura 28: Velocidad de respiración de  $dO_2/dt$  y de  $dCO_2/dt$  durante la respiración del tumbo serrano.

La respiración es un indicador de la actividad metabólica y juega un papel significativo en la fisiología postcosecha y en el deterioro de la calidad de los alimentos. Es un proceso que implica la degradación oxidativa de los productos más complejos, normalmente presentes en las células, como el almidón, los azúcares y los ácidos orgánicos, a moléculas más simples como el dióxido de carbono y el agua, con la consiguiente liberación de energía (Day,1993), (Kader,1993).

La respiración, por tanto, involucra reacciones complejas que en condiciones normales requiere de la presencia de  $O_2$  para la degradación de los compuestos (respiración aeróbica). Sin embargo, cuando los niveles de oxígeno son muy bajos, la respiración se desplaza hacia rutas anaerobias, generándose compuestos volátiles, como el acetaldehído y etanol, que pueden dar origen a mal sabor y aroma (Hagenmaier, 2000),

Durante la respiración, la pérdida de moléculas almacenadas que representan reservas de energía en el fruto significa el aceleramiento de la senescencia conforme las reservas que proporcionan energía para mantener el estatus viviente del producto se agotan (Kader, 2002). Por ello, la velocidad de deterioro de las frutas generalmente es proporcional a su velocidad de respiración. Adicionalmente, basados en sus patrones de respiración y producción de etileno ( $C_2H_4$ ) durante la maduración organoléptica, los frutos se clasifican en climatéricos y no climatéricos. Los frutos climatéricos muestran un pico respiratorio durante la maduración organoléptica con un incremento en la producción de  $CO_2$  y de  $C_2H_4$ , mientras que los frutos no climatéricos no muestran cambios en sus velocidades de producción de  $CO_2$  y de  $C_2H_4$  y estas son generalmente bajas.

El consumo de azúcares y ácidos orgánicos, durante la respiración del fruto, la conversión de ácidos orgánicos en azúcares y la pérdida de agua por deshidratación, así como la hidrólisis de polisacáridos con la liberación de azúcares solubles, propia del metabolismo del fruto (Togrul & Arslan, 2003), dan como resultado, un balance negativo de ácidos orgánicos y una regulación del contenido en azúcares, que se traduce en una estabilización de los sólidos solubles totales.

En general, los estudios de las tasas respiratorias se han centrado en la influencia de la temperatura o en el análisis del efecto de la concentración de gases, pero no siempre considerando ambos factores simultáneamente. Otra de las limitaciones de los modelos de tasas de respiración es que la mayoría de datos disponibles están expresados como consumo de  $O_2$  o como producción de  $CO_2$  únicamente, asumiendo que el CR es la unidad. Si el CR fuera realmente mayor que la unidad, el modelo estaría subestimando la producción de  $CO_2$  y si el CR fuera más pequeño lo estaría sobrestimando. La no uniformidad en las unidades de los modelos de respiración supone una dificultad importante a la hora de poder comparar los resultados (Fonseca *et al.*, 2002a).

Se han desarrollado varios modelos matemáticos para correlacionar la tasa de respiración con diferentes parámetros de almacenamiento, como la concentración de gases de la atmósfera ( $CO_2$  y  $O_2$ ) y la temperatura, pero no siempre considerando ambos factores simultáneamente. Fonseca *et al.*, (2002a), muestran en su revisión los distintos modelos matemáticos encontrados en la literatura, así como los factores de correlación a aplicar para poder comparar los resultados obtenidos.



### 3.4 VIDA ÚTIL

#### 3.4.1 Modelamiento de la vida útil sensorial través de la función de Weibull

En la Tabla 11 se reporta los resultados de la simulación del modelamiento de vida útil a través de la función de Weibull, evaluados al fruto del tumbo serrano almacenados a las condiciones de temperaturas de 20°C, 10°C y 2°C respectivamente para diferentes condiciones de humedad relativa que va desde 75,0 hasta 95,0% respectivamente. El tiempo de vida útil a través de la distribución de Weibull considera una probabilidad de 50% de encontrar una falla en el producto (Tabla 9). La prueba de bondad de ajuste de Kolmogorov-Smirnov ( $P < 0,05$ ) permitió establecer que los datos de tiempo de fallo se ajustan a la distribución de Weibull.

Tabla 11. Tiempos de vida útil calculados a través de la función de Weibull

Temperatura de almacenamiento (°C)	Humedad Relativa (HR) de almacenamiento (%)	Tiempo de conservación(días)	Parámetros	
			$\beta$	A
20	75,0	3,44	8,65	2,11
	85,0	4,03	2,85	1,13
	95,0	5,32	3,98	1,84
10	75,0	4,83	3,52	1,45
	85,0	5,71	3,13	1,47
	95,0	6,41	3,53	1,93
2	75,0	6,25	3,88	2,10
	85,0	7,46	2,95	1,78
	95,0	9,66	2,26	1,48

Los tiempos de fallo y el riesgo acumulado para cada temperatura y humedad relativa se ajustaron satisfactoriamente al modelo de regresión lineal ( $R^2 > 0,89$ ); además los valores del factor de forma  $\beta$  estuvieron dentro del rango inasequible de  $2 < \beta < 4$  lo cual asegura predicciones del tiempo de vida de anaquel más precisas (Cardelli y Labuza, 2001).

El análisis de supervivencia aplicado a la vida útil sensorial del tumbo serrano fresco estimó los tiempos de censura a la izquierda cuando el consumidor rechazó el producto a entre 3 a 5 días a 20°C de temperatura, entre 4,8 a 6,4 días a 10°C de temperatura; entre 6,4 a 9,7 días a 2°C de temperatura de almacenamiento respectivamente, en condiciones ambientales y de refrigeración. Estos resultados coinciden con los de Hough *et al.* (2003) que definen valores de rechazo del consumidor a la izquierda, a la derecha y en un intervalo del estudio.

Salinas *et al.* (2007) encontraron diferencias significativas entre los valores de vida útil observados de endibia fresca cortada y los calculados con el modelo, debido a la falta de exactitud de la valoración visual de los atributos de calidad del producto por parte de los consumidores en la evaluación, lo que concuerda con lo indicado por Gil *et al.* (2006) para frutos y vegetales frescos cosechados, en los que los aspectos cualitativos de calidad son más importantes que los cuantitativos, debido a que la calidad sensorial es el aspecto que más directamente incide en la decisión de compra.

Los cambios fisiológicos que ocurren en los frutos durante la postcosecha ocasionan pérdidas de calidad que afectan la apariencia, el sabor, la textura, la pérdida de peso, y el valor estético para los consumidores, traducándose en pérdidas económicas del producto (Aular, 2006; Chitarra y Chitarra, 2005).

## CONCLUSIONES

1. Las condiciones óptimas de conservación del producto (Tumbo serano) son: 2°C de temperatura y 95% de humedad relativa.
2. Se observó la pérdida de peso en el producto estudiado, la pérdida de la apariencia se sabe que depende de factores internos y externos, por lo tanto a partir de las condiciones óptimas de conservación del producto se minimizó la pérdida de peso en 0,8777%, se maximizó la calidad en 5,1345 (como bueno) y minimizó el contenido de humedad en 92,92 %.
3. Como resultado óptimo de consumo de CO<sub>2</sub>, para la respiración, se obtuvo el valor de 0,9781, a partir de la siguiente ecuación:

$$Y = -0,0007x^2 + 0,0123x$$

Dónde: **Y** es mg CO<sub>2</sub> consumido y **X** es el tiempo (días) de evaluación

4. El tiempo máximo de vida útil del tumbo fresco, por el método probabilístico de Weibull, fue de 9,66 días en las condiciones óptimas de temperatura de 2°C y una humedad relativa de 95%.

## RECOMENDACIONES

1. De acuerdo a la investigación trabajada “Simulación de transpiración y respiración postcosecha del tumbo (*passiflora mollissima bailey*) bajo condiciones ambientales de temperatura, humedad relativa”, se obtuvo resultados óptimos de Temperatura y Humedad relativa; a los cual se debería recomendar diseño e implementación de equipos de ensayos, para la evaluación respectiva y tener resultados más fiables.
2. Los productos frutícolas, tienen agua entre el 80 y 95%, y por lo tanto están expuesto a pérdida de agua en sus tejidos. por transpiración implica la pérdida de peso vendible, apariencia y textura. para controlar la humedad ambiental se requiere utilizar recubrimientos y envolturas plásticas, controlar la humedad en cámaras de almacenamiento y controlar la velocidad de aire, el movimiento excesivo de aire favorece la deshidratación.
3. Evaluar envases y embalajes adecuados para prolongar la vida útil del y permitir la explotación del tumbo con fines de exportación.
4. Se recomienda continuar con los estudios científicos de la especie *Passiflora mollissima* B., acerca de su calidad y sus propiedades potenciales a nivel alimenticio.

#### IV. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

1. Agencia Agraria de Noticias (2014). Agraria.pe
2. Akpınar E.K.. “Determination of suitable thin layer drying curve model for some vegetables and fruits”. Journal of Food Engineering. Vol. 73 N° 1, pp. 75-84. 2005.
3. Alférez, F., M. A. y Zacarías, L. 2003. Post harvest rind staining in Navel oranges is aggravated by changes in storage relative humidity: effect on respiration, ethylene production and water potential. Post harvest Biol. Techn. 28:143 – 152.
4. Alvarez, P.I.; Legues, P. 2003. Deshidratación de agroproductos: “Desarrollo de un modelo matemático para la interpretación de curvas experimentales de secado”. Departamento de Ingeniería Química. Universidad de Santiago de Chile.
5. Alvarez Quintero Rafael M. 2012. Formulación de un recubrimiento comestible para frutas cítricas, estudio de su impacto mediante aproximación metabolómica y evaluación de la calidad postcosecha . Universidad De Antioquia. Colombia
6. Aular, U. 2006. Jornada sobre manejo Postcosecha de frutas. Universidad Centroccidental. Venezuela, Barquisimeto. p. 13-18.
7. Ben-Yehoshua, S.; Burg S.P.; Young R. 1985. Resistance of citrus fruit to mass transport of water vapour and other gases. Plant Physiol. 79, 1048.
8. Brack, A. (1999). Diccionario Enciclopédico de Plantas Útiles del Perú. Centro de Estudios Regionales Andinos “Bartolomé de Las Casas”.
9. Botero, M., Ricaurte, S., Monsalve, C., y Rojano, B. (2007). Capacidad reductora de 15 frutas tropicales. Scientia Technology, 33(13), pp. 295-6
10. Castelló Gómez Marisa. 2007. Efecto de las condiciones de operación en los cambios fisicoquímicos y fisiológicos de frutas mínimamente procesadas por

deshidratación osmótica. Tesis doctoral. Universidad Politécnica De Valencia-España.

11. CENAM. CENTRO NACIONAL DE METROLOGÍA. 2012. Guía Técnica de Trazabilidad Metrológica e Incertidumbre de Medida en la Calibración de Higrómetros de Humedad Relativa. MEXICO.
12. Cardelli Y Labuza 2001: Pillsbury Technology Center, 330 University Ave. SE, Minneapolis, MN 55414 (U.S.A.). T. P. Labuza: Department of Food Science and Nutrition, University of Minnesota, 1334 Eckles Ave., St. Paul, MN 55108 (U.S.A.). (Received January 19, 1999; accepted April 28, 2000).
13. Chitarra, M. I. F.; Chitarra, A. B. Pós-colheita de Frutas e Hortaliças: fisiologia e manuseio. 2. ed. Lavras: UFLA, 2005. 783 p. [ [Links](#) ]
14. Conde-Martínez Natalia, Cristina Sinuco Diana, Osorio Coralia. (2014). Chemical studies on curuba (*Passiflora mollissima* (Kunth) L. H. Bailey) fruit flavour. Food Chemistry. Volume 157, 15 August 2014, Pages 356-363
15. Contreras, J., Calderón, L., Guerra, E., y García, B. (2010). Antioxidant capacity, phenolic content and vitamin C in pulp, peel and seed from 24 exotic fruits from Colombia. Food Research International, 44(7), pp. 2047-53.
16. Cuquerella, J. 1990. Efectos de distintos recubrimientos céreos y plásticos en la fisiología postrecolección y en la calidad de frutos cítricos. Tesis doctoral. Universidad Politécnica de Valencia.
17. Daga, W. (14 de marzo del 2013). Frutales Promisorios Andinos en el Perú. Instituto Nacional de Investigación Agraria. Dirección de Investigación Agraria. Recuperado de: [www.todafruta.com.br/todafruta/arquivos/2213.ppt](http://www.todafruta.com.br/todafruta/arquivos/2213.ppt)
18. Day, B.P. (1993). Frutas y hortalizas. En Envasado de los alimentos en atmósfera modificada. A. Madrid Vicente (ed.). Madrid.

19. Edwin, E., Sheeja, E., Dhanabal, S., y Suresh, B. (2007). Antihyperglycemic activity of *Passiflora mollissima* Bailey. *Indian Journal of Pharmaceutical Sciences*, 69(4), pp. 570-1
20. Encina Zelada, Christian Rene; Carpio Rivadeneira, Laura Julissa. (2011) Máxima retención de ácido ascórbico, compuestos bioactivos y capacidad antioxidante en el néctar de tumbo. *Ingeniería Industrial*, núm. 29, 2011, pp. 225-245. Universidad de Lima. Lima, Perú.
21. Foehlich, O., Duque, C., y Schreier, P. (1989). Volatile constituents of *Curuba* (*Passiflora mollissima*) fruit. *Journal of Agriculture and Food Chemistry*, 37, pp. 421-5
22. Fonseca, S.C.; Oliveira, F.R.A.; Brecht, J.K. (2002a). Modelling Respiration Rate of Fresh Fruits and Vegetables for Modified Atmosphere Packages. A Review. *Journal of Food Engineering*, 52, 99-119.
23. Gacula, M.V Y Kubala, J.J. 1975. Statistical Models for Shelf life Failures. *J. Food Sci. USA*. 40: 404-409
24. García-González, J.M. et al. "La simulación de procesos en ingeniería química", *Revista Investigación Científica*, Vol. 4, No. 2, Nueva época. Mayo - Agosto 2008.
25. Gil, M.; Aguayo, E.; y Kader, A. 2006. Quality changes and nutrient retention in fresh-cut versus whole fruits during storage. *J. Agric. Food Chem.* 54:4284 - 4296.
26. Goykovic, V. (1993). Parámetros de rendimiento en jugo del fruto de Tumbo (*Passiflora mollissima* Bailey). *IDESIA (Chile)*, 12, pp. 57-62.
27. Hagenmaier, R.D., Baker, R.A., 1994. Wax microemulsions and emulsions as citrus coatings. En: *Journal of Agricultural and Food Chemistry*. 42. p. 899-902. Artés, F. 1987. Refrigeración y comercialización hortofrutícolas en la Región de Murcia. 2 ed. Murcia: CEBAS-CSIC. 1987. p. 150.

28. Hough, G., Langohr, K., Gomez, G., & Curia, A. (1999). Survival analysis applied to sensory shelf life of foods. *Journal of Food Science*, 68, 359–362.
29. Hough, G. L. 2003. Survival analysis applied to sensory shelf life of foods. *J. Food Sci.* 68(1):359 - 362.
30. Hoyos, J. 1989. *Frutales en Venezuela*. Sociedad de Ciencias Naturales La Salle. Monografía No. 36. Caracas. pp. 210-211.
31. Inocente Camones Miguel Angel. 2015. “Diseño e implementación de una cadena de valor viable y sostenible para productos alimenticios y cosméticos elaborados con extractos estabilizados de *Passiflora mollissima* L. (tumbo serrano)”. Tesis de maestría. Universidad Nacional Mayor De San Marcos. Perú.
32. Ingels. D.M. 1985.” *Computer Modeling and Simulation*”. Marcel Decker inc.USA
33. Jiménez-Cuesta, M., J., Cuquerella, and J.M., Martínez-Jávega., 1983. Teoría y práctica de la desverdización de los cítricos. *Comunicación I.N.I.A, Hoja Técnica* n46. p. 16–21.
34. Kaymak-Ertekin F.. “Drying and rehydration kinetics of green and red peppers. *Journal of Food Science*. Vol. 67 N° 1, pp. 168-175. 2002.
35. Kader, A.A. 2002. Postharvest biology and technology: an overview. En: *Postharvest Technology of Horticultural Crops*. Ed. A.A. Kader, Division of Agricultural and Natural Resources. pp 39-48.
36. Kader A.A. 2002b. Quality and safety factors: Definition and Evaluation for Fresh Horticultural Crops. (Pp.279–286). En: *Postharvest Technology of Horticultural Crops*. Kader A.A. (Ed.) University of California, Division of Agriculture and Natural Resources, California.
37. Kader A.A. 2008. Perspective flavor quality of fruits and vegetables. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 88: 1863 – 1868.



38. Kader, A.A. 1992. Modified atmospheres during transport and storage. En Postharvest Technology of Horticultural Crops. Ed. A.A. Kader, Division of Agriculture Natural Resources, University of California 3311, 85-92.
39. Kader A. A. Postharvest technology of horticultural crops. Univ. Calif. Publ. 1992. pp. 311.
40. Karathamos, V.T.; Villalobos, G.; Saravacos, G.D. 1990. "Comparacion of two Methods of Estimation of the Effective Moisture Diffusivity from Drying Data" Journal of Food Science. Vol 55: 218.
41. Kilcast, D. Y Subramanian, P. 2000. The stability and Shelf Life of Food. Woodhead Publishing Limited. England
42. Konstantopoulou E., Kapotis G., Salachas G, Petropoulos S.A., Karapanos I.C., Passam H.C. 2010. Nutritional quality of greenhouse lettuce at harvest and after storage in relation to N application and cultivation season. Scientia Horticulturae, 125: 93.e1 – 93.e5.
43. Larsen, R. 2006. Food shelf life: estimation and experimental design. Tesis de Magister. Brigham Young University, Brigham. E.U.
44. Lee S.K., Kader A.A. 2000. Preharvest and postharvest factors influencing vitamin C content of horticultural crops. Postharvest Biology and Technology, 20: 207 – 220.
45. López Camello A. 2003. Manual Para la Preparación y Venta de Frutas y Hortalizas, Del campo al mercado. Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación, Roma. (185 p.).
46. Maguire K.M., Sabarez H.T., Tanner D.J. 2006. Postharvest preservation and storage. In: Handbook of Vegetable Preservation and Processing. Hui Y.H.,

- Ghazala S., Graham D., Murell K.D., Nip W.K. (Eds). New York: Marcel Dekker, pp. 39–65.
47. Martínez, G. J.; Ramírez, A.; Loera, M. A.; y Pozo, O. 2005. Efectos genéticos y heterosis en la vida de anaquel del chile serrano. Rev. Fitotec. Méx. 28(4):327 - 332.
48. Martínez-Jávega, J.M., Navarro, P., Cuquerella, J., del Río, M.A. 1999. Aplicaciones del frío en postcosecha de cítricos: panorama actual. Rev. Levante Agrícola, nº348, Especial postcosecha, pp. 253-262.
49. Mishra, V.K., Gamage, T.V. 2007. Postharvest physiology and of fruits and vegetables. 19-43. En: Handbook of Food Preservation Autor M. Shafiur Rahman. Published by CRC press.
50. Moreira M., Roura S., del Valle C. 2003. Quality of Swiss chard produced by conventional y organic methods. Lebensmittel Wissenschaft und-Technologie, 36: 135 – 141.
51. Monserrat, S. del V.; 1 Fernández, M. C.;1 Orlando, C. A.; 1 Sluka E. 2 Gianfrancisco,S. 2011. EVALUACIÓN DE LA PÉRDIDA DE PESO FRESCO DE ARÁNDANOS (*Vaccinium corymbosum* (L) var. MISTY, DE CULTIVO ORGÁNICO Y DE PRODUCCIÓN CONVENCIONAL. AVANCES EN LA PRODUCCIÓN VEGETAL Y ANIMAL DEL NOA. 2009-2011. UNT - CIUNT
52. Müller A., Steinhart H. 2007. Recent developments in instrumental analysis for food quality. Food Chemistry, 101: 1136 – 1144.
53. Nicolls, J. (1970). Antifungal activity in Passiflora species. Annals of Botany, 34, pp. 229-37

54. Nunes M.C.N, Emond J.P., Rauth M., Dea S., Chau, K.V. 2009. Environmental conditions encountered during typical consumer retail display affect fruit and vegetable quality and waste, *Postharvest Biology and Technology*, 51: 232 – 241.
55. Ocampo, J. 2003. Determinación de la vida de anaquel del café soluble elaborado por la empresa de Café S.A. y evaluación del tipo de empaque en la conservación del producto. Tesis de Grado, Universidad Nacional de Colombia, Manizales.
56. Oufedjikh, H.; Mahrouz, M.; Lacroix, M.; Amiot; M.J.; Taccini M. 1998. The influence of gamma irradiation on flavonoids content during storage of irradiated clementina. *Radiat. Phys. Chem.* 52, 107-112.
57. Olafsdottir, E., Thorgeirsdottir, E., y Jaroszewski, J. (1997). Isolation and identification of cyclopentene cyanohydrin bis-glycosides from three *Passiflora* species. *European Journal of Pharmaceutical Science*, 5, pp. S46.
58. Paull R.E. 1999. Effects of temperature and relative humidity on fresh commodity quality. *Postharvest Biology and Technology*, 15: 263 – 277.
59. Pérez-Gago, M., Krochta, J., 2002. Drying temperature effect on water vapour permeability and mechanical properties of whey protein-lipid emulsion films. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*. 49. p. 2308-2312.
60. Reid M.S. 2002. Maturation and maturity indices (pp: 55 – 63). En Kader, A.A. (Ed.), *Postharvest technology of horticultural crops*. University of California, Agriculture and Natural Resources, Davis.
61. Rico D., Martín-Diana A.B., Barry-Ryan C., Frías J.M., Henehan G.T.M., Barat J.M. 2008. Optimisation of steamer jet-injection to extend the shelf life of fresh-cur lettuce. *Postharvest Biology and Technology*, 48: 431 – 442.

62. Rojano, B., Zapata, K., y Cortes, F. (2012). Free radical trapping capacity of *Passiflora mollissima* (Kunth) L.H. Bailey (curuba). *Revista Cubana de Plantas Medicinales*, 17(4), pp. 408-419.
63. Saguy, I.; Karel, M. 1980. "Modeling of Quality Deterioration During Food Processing and Storage" *Food Technology*. February, 1980:78
64. Salinas, R.; González, G.; Pirovani, M.; y Uñ, F. 2007. Modelación del deterioro de productos frescos cortados. *Redalyc*. 23(2):183 - 196.
65. Saltveit, M.E. (1999). Effect of ethylene on quality of fresh fruits and vegetables. *Postharvest Biology and Technology* 15, 279-292.
66. Seymour, G.B., Taylor, J.E. y Tucker, G.A. (1993). *Biochemistry of fruit ripening*. Chapman & Hall. Cambridge.
67. Shellie, K.C. Ultra-low oxygen refrigerated storage of "Rio red" grapefruit: fungistatic activity and fruit quality. En: *Postharvest Biology and Technology*. 25. 2002. p. 73-85.
68. Shewfelt R.L. 1999. What is quality? *Postharvest Biology and Technology* 15: 197-200.
69. Singhal R.S., Kulkarni P.R., Rege D.V. 1997. *Handbook of indices of food quality and authenticity*. University of Bombay, India. (560 p.).
70. Sing, R.K.; Lund, D.B.; Buelow, F.H. 1984. "Computer Simulation of Storage Stability in Intermediate Moisture Apples" *Journal of Food Science*. Vol49:759
71. Taiz, L.; Zeiger, E. 1998. *Plant Physiology*. The Benjamin/Cummings Publ. Co, Inc.
72. Téllez, C., Fischer, G., y Quintero, O. (2007). Comportamiento fisiológico y fisicoquímico de frutos de curuba (*Passiflora mollissima* Bailey) encerados y

- almacenados a dos temperaturas. *Revista Colombiana de Ciencias Hortícolas*, 1(1), pp. 67-80
73. Tijssens L.M.M., Polderdijk J.J. 1996. A generic model for keeping quality of vegetable produce during storage and distribution. *Agricultural Systems*, 51(4): 431 – 452.
74. Thompson, J.F. 1998. Storage systems, in: Kader, A.A. (Ed.), *Postharvest Technology of Horticultural Crops*. Regents of the University of California, Division of Agricultural and natural Resources, Oakland, CA, pp. 113-128.
75. Thompson, J.F. 2002. Storage systems, in: Kader, A.A. (Ed.), *Postharvest Technology of Horticultural Crops*. Regents of the University of California, Division of Agricultural and natural Resources, Oakland, CA, pp. 113-128.
76. Togrul, H., Arslan, N., 2003. Carboxymethyl cellulose from sugar beet pulp cellulose as hydrophilic polymer in coating mandarin. *J. Food Eng.* 62. p. 271-279.
77. Valdez, J. 1999. Determinación de la calidad sensorial de palitos de maíz con sabor a queso mediante el método de perfil de textura del consumidor. Tesis para obtener el título de Magister Scientiae en Tecnología de alimentos. UNALM. Perú.
78. Vasco, C., Ruales, J., y Kamal, A. (2008). Total phenolic compounds and antioxidant capacities of major fruits from Ecuador. *Food Chemistry*, 111, pp. 816-23.
79. Veraverbeke, E.A., 2003. Prediction of moisture loss across the cuticle of apple (*Malus sylvestris* Subs. *mitis* (Wallr.)) during storage. Part 1. Model development and determination of diffusion coefficients. En: *Postharvest Biology and Technology*. 30. p. 75-88.

80. Viccoria Agüero Maria. 2011. “Modelado de la evolución de índices de calidad integral de lechuga mantecosa desde la precosecha hasta el consumidor”. Tesis Doctoral. Universidad Nacional de la Plata. Argentina.
81. Waks, J.; Chalutz, E.; Schiffmann-Nadel, M.; Lumenic, E. 1985. Relationship among ventilation of citrus storage room, internal fruit atmosphere, and fruit quality. *J. Am. Soc. Hort. Sci.* 110, 398-402.
82. Wills R., McGlasson, B., Graham, D. y Joyce, D. (1999). Introducción a la fisiología postcosecha de frutas, hortalizas y plantas ornamentales. (2ª ed). Acribia (ed.). Zaragoza.
83. Woods, J.L. 1990. Moisture loss from fruits and vegetables. *Postharvest news and information* 1(3), 195-199.
84. Yirat, M.; García, A.; Hernández, A.; Calderón, A.; y Camacho, N. 2009. Evaluación de la calidad de la guayaba, variedad enana roja EEA-1-23, durante el almacenamiento a temperatura ambiente. *Rev. Cien. Téc. Agrop.* 18(2):70 - 73.

# **ANEXO**

## ANEXO 1: CÓDIGO DE LA HERRAMIENTA COMPUTACIONAL IMPLEMENTADA.

### Programa en Matlab para optimización de T y HR

```
% -----  
% AJUSTE POLINOMIAL Y METODOLOGICA DE LA FUNCIÓN DE  
% CONVENIENCIA DE  
% SUPERFICIE RESPUESTA DE 2 VARIABLES: Temperatura (t)y HR(Az)ó Tiempo  
% OPTIMIZACIÓN EN POSTCOSECHA  
% -----  
% Factores de evaluación: HR AMBIENTAL Y TIEMPO DE ALMACENAMIENTO  
% Respuestas: TRANSPIRACION (Perdida de peso(5)); CALIDAD (Apariencia  
% general) (grado de  
% marchitez); HUMEDAD (%)  
% -----  
clear all  
clc,  
close all  
A=xlsread('FACTORES_RESPUESTA','Hojal');% datos en Excel  
t=A(:,2);% columna 1 de Temperatura  
Az=A(:,3);% columna 2 de HR  
%Az=A(:,4);% columna 2 de tiempo  
WL=A(:,5);% columna 3 TRANSPIRACION : pérdida de peso (%)  
Q=A(:,6);% columna 4 CALIDAD : Apariencia general(grado de marchitez)  
M=A(:,7);% columna 5 HUMEDAD (%)  
n=length(t);  
%MODELO POLINOMIAL PARA LA PÉRDIDA DE PESO (%) (WL)  
%WL=b1+b2.t+b3.Az+b4.t^2+b5.Az^2+b6.t.Az  
X11=ones(n,1);  
X12=(t);  
X13=(Az);  
X14=(t.^2);  
X15=(Az.^2);  
X16=(Az.*t);  
X1=[X11,X12,X13,X14,X15,X16];  
[b1,bint1,R1,Rint1,stat1]=regress((WL),X1,0.05);  
%MODELO POLINOMIAL PARA CALIDAD  
%WL=b1+b2.t+b3.Az+b4.t^2+b5.Az^2+b6.t.Az  
X21=ones(n,1);  
X22=(t);  
X23=(Az);  
X24=(t.^2);  
X25=(Az.^2);  
X26=(Az.*t);  
X2=[X21,X22,X23,X24,X25,X26];  
[b2,bint2,R2,Rint2,stat2]=regress((Q),X2,0.05);  
%MODELO POLINOMIAL PARA CONTENIDO DE HUMEDAD  
%WL=b1+b2.t+b3.Az+b4.t^2+b5.Az^2+b6.t.Az
```



```

X31=ones(n,1);
X32=(t);
X33=(Az);
X34=(t.^2);
X35=(Az.^2);
X36=(Az.*t);
X3=[X31,X32,X33,X34,X35,X36];
[b3,bint3,R3,Rint3,stat3]=regress((M),X3,0.05);

```

### %RESULTADOS REGRESION

b1%Coeficientes Modelo para PERDIDA DE PESO (%)

R2\_WL=stat1(1)%Coeficiente de Correlacion

p\_value=stat1(3)

b2%Coeficientes Modelo para CALIDAD (Aceptabilidad

R2\_Q=stat2(1)%Coeficiente de Correlacion

p\_value=stat2(3)

b3%Coeficientes Modelo para HUMEDAD (%)

R2\_M =stat3(1)%Coeficiente de Correlacion

p\_value=stat3(3)

### %Superficies de Respuesta factores: HR-tiempo; T-tiempo; T-HR

```

[t1,Az1]=meshgrid(min(t):(max(t)-min(t))/20:max(t),min(Az):(max(Az)-
min(Az))/20:max(Az));

```

```

WLpre=b1(1)+b1(2)*t1+b1(3)*Az1+b1(4)*t1.^2+b1(5)*Az1.^2+b1(6)*Az1.*t1;

```

```

Qpre=b2(1)+b2(2)*t1+b2(3)*Az1+b2(4)*t1.^2+b2(5)*Az1.^2+b2(6)*Az1.*t1;

```

```

Mpre=b3(1)+b3(2)*t1+b3(3)*Az1+b3(4)*t1.^2+b3(5)*Az1.^2+b3(6)*Az1.*t1;

```

```

figure(1)

```

```

surfc(t1,Az1,WLpre)

```

```

title('Tumbo')

```

```

% shading interp

```

```

colorbar

```

```

xlabel('Temperatura (°C)','fontsize',10)

```

```

ylabel('Humedad Relativa (%)','fontsize',10)

```

```

zlabel('Pérdida de peso (%)','fontsize',8)

```

```

figure(2)

```

```

surfc(t1,Az1,Qpre)

```

```

title('Tumbo')

```

```

% shading interp

```

```

colorbar

```

```

xlabel('Temperatura (°C)','fontsize',10)

```

```

ylabel('Humedad Relativa (%)','fontsize',10)

```

```

zlabel('Calidad (Escala 1-5) ','fontsize',8)

```

```

figure(3)

```

```

surfc(t1,Az1,Mpre)

```

```

title('Tumbo')

```

```

% shading interp

```

```

colorbar

```

```
xlabel('Temperatura (°C)', 'fontsize', 10)
ylabel('Humedad Relativa (%)', 'fontsize', 10)
zlabel('Humedad (%)', 'fontsize', 8)
```

```
%DESIRABILITY FUNCTION METHOD
```

```
%-----
```

```
% CAMBIAR CADA CONDICION DEACUERDO AL CASO MAXIMIZACION O
% MINIMIZACION
```

```
% (1)PARA MINIMIZAR PERDIDAD DE PESO (%)
```

```
TWL=min(WL);% perdida de peso(%)
```

```
UWL=max(WL);% perdida de peso(%)
```

```
LWL=min(WL);% perdida de peso(%)
```

```
% (2)PARA MAXIMIZAR CALIDAD (Apariencia)
```

```
TQ=max(Q);% Calidad (Apariencia por escala hedónica )
```

```
UQ=max(Q);% Calidad (Apariencia por escala hedónica )
```

```
LQ=min(Q);% Calidad (Apariencia por escala hedónica )
```

```
% (3)PARA MAXIMIZAR CONTENIDO DE HUMEDAD (%)
```

```
TM=max(M);% Humedad (%)
```

```
UM=max(M);% Humedad (%)
```

```
LM=min(M);% Humedad (%)
```

```
r=1;%factor de peso
```

```
% CAMBIAR ACORDE A (1)
```

```
for i=1:length(Az1)% PARA MINIMIZAR TRANSPIRACION (PERDIDAD DE
PESO)
```

```
for j=1:length(t1)
```

```
if WLpre(i,j)<TWL
```

```
d1(i,j)=1;
```

```
elseif WLpre(i,j)>UWL
```

```
d1(i,j)=0;
```

```
else
```

```
d1(i,j)=((UWL-WLpre(i,j))/(UWL-TWL))^r;
```

```
end
```

```
end
```

```
end
```

```
figure(4)
```

```
surfc(t1,Az1,d1)
```

```
title('Tumbo')
```

```
% shading interp
```

```
colorbar
```

```
xlabel('Temperatura (°C)', 'fontsize', 10)
```

```
ylabel('Humedad Relativa (%)', 'fontsize', 10)
```

```
zlabel('d Pérdida de peso (%) ', 'fontsize', 8)
```

```

% CAMBIAR ACORDE A (2)
for i=1:length(Az1)% PARA MAXIMIZAR CALIDAD (APARIENCIA)
for j=1:length(t1)
if Qpre(i,j)<LQ
d2(i,j)=0;
elseif Qpre(i,j)>TQ
d2(i,j)=1;
else
d2(i,j)=(( Qpre(i,j)-LQ)/(TQ-LQ))^r;
end
end
end

```

```

figure(5)
surf(t1,Az1,d2)
title('Tumbo')
% interpretacion del sombreado
colorbar
xlabel('Temperatura (°C)', 'fontsize',10)
ylabel('Humedad Relativa (%)', 'fontsize',10)
zlabel('d CALIDAD (Escala 0 – 5) ', 'fontsize',8)

```

```

% CAMBIAR ACORDE A (3)
for i=1:length(Az1)% PARA MAXIMIZAR HUMEDAD
for j=1:length(t1)
if Mpre(i,j)<LM
d3(i,j)=0;
elseif Mpre(i,j)>TM
d3(i,j)=1;
else
d3(i,j)=((Mpre(i,j) -LM)/(TM-LM))^r;
end
end
end

```

```

figure(6)
surf(t1,Az1,d3)
title('Tumbo')
% interpretacion del sombreado
colorbar
xlabel('Temperatura (°C)', 'fontsize',10)
ylabel('Humedad Relativa (%)', 'fontsize',10)
zlabel('d Humedad (%) ', 'fontsize',8)
('Factor de Importancia')
v=[3 1 3]% factor de importancia

```

```

for i=1:length(Az1)% TODA CONVENIENCIA
for j=1:length(t1)
D(i,j)=(d1(i,j)^v(1)*d2(i,j)^v(2)*d3(i,j)^v(3))^(1/sum(v));
end
end
figure(7)
surf(t1,Az1,D)
title('Tumbo')
% interpretacion del sombreado
colorbar
xlabel(' Temperatura (°C) ','fontsize',10)
ylabel(' Humedad Relativa (%) ','fontsize',10)
zlabel(' FUNCION CONVENIENCIA TOTAL ','fontsize',8)
colormap winter

% Valor máximo de función Conviencia
[Valuemax,II]=max(D);
[Dmax,J]=max(Valuemax);
I=II(J);
% Muestra los resultados en pantalla (Workspace)
display( ' D maxima Tumbo'),Dmax
display( ' Posicion FILA I - COLUMNA J'),[I,J]
display( ' Temperatura Optimo (°C)'),t1(1,J)
display( ' HR (%) óptimo'),Az1(I,1)
display( ' Perdida de peso (%) Optimo'),WLpre(I,J)
display( ' Calidad Optimo'), Qpre(I,J)
display( ' Humedad (%) Optimo'),Mpre(I,J)
% FIN DEL PROGRAMA

```

## ANEXO 2: PROGRAMA DE SIMULACIÓN

### Formulario

**SIMULACION DE TRANSPIRACION**  
Base de datos de humedad y tiempo en Excel en carpeta de SIMULACION

**DATOS DEL PRODUCTO**

Humedad inicial(%)

Humedad equilibrio(%)

Espesor del alimento(m)

Error

Difusividad promedio:

**CALCULAR**

**Salir**

Tabla: Resultados experimentales y simulados

Tiempo(min)	Humedad	MR	Difusividad
1			
2			
3			
4			

axes3

axes2

axes1

### Programa

```
W=xlsread('TUMBO_T20_HR75','Hojal');% importación de datos de tabla libro1 de excel
t=W(:,1);
M=W(:,5);
M0=str2double(get(handles.edit1,'string'));% Humedad inicial
Meq=str2double(get(handles.edit2,'string'));% Humedad de equilibrio
L=str2double(get(handles.edit3,'string')); % Espesor del alimento a secar
tol=str2double(get(handles.edit4,'string')); % Error
n=length(t);
%Limpiar tabla antes de mostrar resultado
set(handles.tabla,'Data',{ })
%Limpiar tabla, grafico en caso de que antes se haya graficado
hold on
%Lectura de datos de tiempo t
for k=1:n
    MR = (M(k) - Meq) / (M0 - Meq);
    tiempo=t(k);
% METODOS NUMERICOS DE NEWTON RAPSON
    x1 = 0.0000001;
    it=0;
    fxp=1;
    while abs(fxp)>tol
        fx1 = 0.810566 * exp(-9.869651 * x1 / L ^ 2) + 0.090063 * exp(-88.826855 * x1 / L ^ 2) + 0.032423 * exp(-246.741264 * x1 / L ^ 2) + 0.016542 * exp(-483.612877 * x1 / L ^ 2) + 0.010007 * exp(-799.441695 * x1 / L ^ 2) + 0.006699 * exp(-1194.227718 * x1 / L ^ 2) + 0.004796 * exp(-1667.970945 * x1 / L ^ 2) + 0.003603 * exp(-2220.671376 * x1 / L ^ 2) + 0.002805 * exp(-2852.329012 * x1 / L ^ 2) + 0.002245 * exp(-3562.943852 * x1 / L ^ 2)-MR;
        gx1 = -(8 * exp(-9.869651 * x1 / L ^ 2)) / L ^ 2 - (8 * exp(-88.826855 * x1 / L ^ 2)) / L ^ 2 - (8 * exp(-246.741264 * x1 / L ^ 2)) / L ^ 2 - (8 * exp(-483.612877 * x1 / L ^ 2)) /
```

```

/L ^ 2 - (8 * exp(-799.441695 * x1 / L ^ 2)) / L ^ 2 - (8 * exp(-1194.227718 * x1 / L ^
2)) / L ^ 2 - (8 * exp(-1667.970945 * x1 / L ^ 2)) / L ^ 2 - (8 * exp(-2220.671376 * x1 /
L ^ 2)) / L ^ 2 - (8 * exp(-2852.329012 * x1 / L ^ 2)) / L ^ 2 - (8 * exp(-3562.943852 *
x1 / L ^ 2)) / L ^ 2;
xp = x1 -(fx1/gx1);% Algoritmo de Newton Rapson
fxp = 0.810566 * exp(-9.869651 * xp / L ^ 2) + 0.090063 * exp(-88.826855 * xp / L
^ 2) + 0.032423 * exp(-246.741264 * xp / L ^ 2) + 0.016542 * exp(-483.612877 * xp /
L ^ 2) + 0.010007 * exp(-799.441695 * xp / L ^ 2) + 0.006699 * exp(-1194.227718 *
xp / L ^ 2) + 0.004796 * exp(-1667.970945 * xp / L ^ 2) + 0.003603 * exp(-
2220.671376 * xp / L ^ 2) + 0.002805 * exp(-2852.329012 * xp / L ^ 2) + 0.002245 *
exp(-3562.943852 * xp / L ^ 2)-MR;
x1 = xp;
it= it+1;
end
% CALCULOS
X(k) = xp;
Dt=X(k);
FF=(Dt);
% CALCULO DE DIFUSIVIDAD
Dif = Dt/tiempo;
%DIFUSIVIDAD EFECTIVA PROMEDIO
SUMA=0;
SUMA = (SUMA + Dif)/(n-1);
% MOSTRAR DATOS EN TABLA
valores ={ tiempo M(k) MR Dif};
temp=get(handles.tabla,'data');
valoresNuevos=[valores;temp];
set(handles.tabla,'Data',valoresNuevos)
hold on
%Mostrando respuesta en textbox con formato coma flotante a 6 cifras decimales
respuesta=sprintf('%0.16f',SUMA);
set(handles.edit5,'string',respuesta);
% Grafico de Difusividad en funcion del tiempo
axes(handles.axes3)
plot(tiempo,Dif,'r*','markersize',5,'markerfacecolor','k')
title('DIFUSIVIDAD ');
xlabel('Tiempo (Días)');
ylabel('Difusividad (m2/s)');
grid on;
end
for k=1:n
RR(k)=X(k);
R=RR(k);
tt=t(k);
x=log(tt*60);
y=log(R);
%REGRESION POR MINIMOS CUADRADOS PARA HUMEDAD
a=(n*sum(x.*y)-sum(x)*sum(y))/(n*sum(x.^2)-sum(x)*sum(x));%pendiente de la
recta de regresión, a
b=(sum(y)-a(1)*sum(x))/n;%ordenada en el origen, b

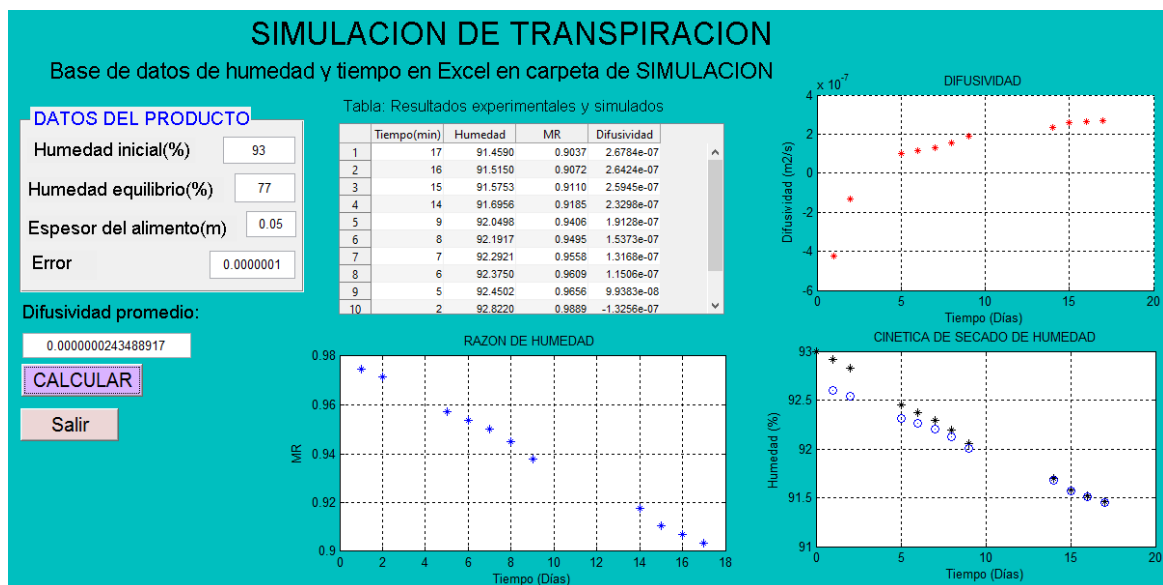
```

```

tiempo1=t(k);
func=10^(b)*(tiempo1*60)^(a);% Ajuste de humedad
G=func;
% SIMULACION DE RAZON DE HUMEDAD
MRP =0.810566*exp(-9.869651*G/L^2)+ 0.090063*exp(-88.826855*G/L^2)+
0.032423*exp(-246.741264*G/L^2)+ 0.016542*exp(-483.612877*G/L^2)+
0.010007*exp(-799.441695*G/L^2)+ 0.006699*exp(-1194.227718*G/L^2);
% Grafico de razon de humedad
axes(handles.axes2)
plot(tiempo1,MRP,'*b')
title('RAZON DE HUMEDAD ');
xlabel('Tiempo (Días)');
ylabel('MR')
grid on;
hold on
% SIMULACION DE HUMEDAD
M_PRED(k+1)=(M0-Meq)*MRP + Meq;
MP=M_PRED(k+1);
% GRAFICO DE HUMEDAD
axes(handles.axes1)
%plot(tiempo1,M(k),'k*')
%plot(tiempo1,MP,'bo:')
plot(tiempo1,M(k),'k*',tiempo1,MP,'bo:')
title('CINETICA DE SECADO DE HUMEDAD');
xlabel('Tiempo (Días)');
ylabel('Humedad (%)');
% legend ('Experimental','Simulado' );
grid on;
hold on
end

```

## Compilación



**T= 2°C HR = 75,0%**

Tiempo(dia)	Peso Medio	d peso(g)	mg CO2	% perdida	%H	ms
0.00	84.35	0.00	0.00	0.00	93.00	5.90
0.94	83.46	0.89	0.06	1.06	92.93	5.90
1.96	82.68	1.67	0.11	1.98	92.86	5.90
2.95	82.05	2.30	0.16	2.73	92.80	5.90
3.97	81.78	2.57	0.17	3.05	92.78	5.90
7.98	79.94	4.41	0.30	5.23	92.61	5.90
9.16	79.47	4.88	0.33	5.79	92.57	5.90
9.97	79.39	4.96	0.34	5.88	92.56	5.90
16.00	78.11	6.24	0.42	7.40	92.44	5.90

**T= 2°C HR = 85,0%**

Tiempo(dia)	peso medio	Perdida peso	mg CO2	% perdida	%H	ms
0	83.71	0.00	0.00	0.00	93.00	5.86
1	83.32	0.39	0.03	0.47	92.97	5.86
2	82.70	1.01	0.07	1.21	92.91	5.86
3	82.33	1.38	0.09	1.65	92.88	5.86
4	81.88	1.83	0.12	2.19	92.84	5.86
8	80.61	3.10	0.21	3.70	92.73	5.86
9	80.25	3.46	0.24	4.13	92.70	5.86
10	79.96	3.75	0.26	4.48	92.67	5.86
16	78.74	4.97	0.34	5.94	92.56	5.86

**T= 2°C HR = 95,0%**

Tiempo(dia)	peso medio	Perdida peso	mg CO2	% perdida	%H	ms
0	83.75	0.00	0	0	93.00	5.86
1	83.62	0.13	0.009	0.16	92.99	5.86
2	83.14	0.61	0.041	0.73	92.95	5.86
3	82.93	0.82	0.056	0.98	92.93	5.86
4	82.55	1.20	0.082	1.43	92.90	5.86
8	81.61	2.14	0.146	2.56	92.82	5.86
9	81.37	2.38	0.162	2.84	92.80	5.86
10	81.07	2.68	0.182	3.20	92.77	5.86
16	80.03	3.72	0.253	4.44	92.68	5.86



**T= 10°C HR = 75,7%**

Tiempo(dia)	Peso medio	Perdida peso	mg CO2	% perdida	%H	ms
0	83.22	0.00	0	0	93.00	5.83
1	82.27	0.47	0.032	1.14	92.92	5.83
2	81.06	1.04	0.071	2.60	92.81	5.83
5	79.06	1.45	0.098	5.00	92.63	5.83
6	78.23	1.87	0.127	6.00	92.55	5.83
7	77.72	2.26	0.154	6.61	92.50	5.83
8	76.99	2.65	0.181	7.49	92.43	5.83
9	76.68	3.02	0.205	7.86	92.40	5.83
14	73.86	3.35	0.228	11.25	92.11	5.83
15	73.42	3.68	0.250	11.78	92.07	5.83
16	73.12	3.99	0.272	12.14	92.03	5.83
17	73.01	4.29	0.292	12.27	92.02	5.83

**T= 10°C HR = 85,0%**

Tiempo(dia)	Peso medio	Perdida peso	mg CO2	% perdida	%H	ms
0	83.88	0.00	0	0	92.95	5.87
1	83.26	0.62	0.042	0.74	92.95	5.87
2	82.8	1.08	0.073	1.29	92.91	5.87
5	80.86	3.02	0.205	3.60	92.74	5.87
6	80.5	3.38	0.230	4.03	92.71	5.87
7	79.65	4.23	0.288	5.04	92.63	5.87
8	79.42	4.46	0.303	5.32	92.61	5.87
9	79	4.88	0.332	5.82	92.57	5.87
14	76.48	7.40	0.503	8.82	92.32	5.87
15	76.12	7.76	0.528	9.25	92.29	5.87
16	75.89	7.99	0.543	9.53	92.26	5.87
17	75.27	8.61	0.585	10.26	92.20	5.87

**T= 10°C HR = 95,2%**

Tiempo(dia)	Peso medio	Perdida peso	mg CO2	% perdida	%H	ms
0	85.31	0.00	0	0	93.00	5.97
1	84.94	0.18	0.012	0.43	92.97	5.97
2	84.75	0.32	0.022	0.66	92.95	5.97
5	83.28	0.52	0.035	2.38	92.83	5.97
6	82.89	0.71	0.049	2.84	92.80	5.97
7	82.28	0.93	0.063	3.55	92.74	5.97
8	82.09	1.12	0.076	3.77	92.73	5.97
9	81.79	1.32	0.089	4.13	92.70	5.97
14	80.07	1.50	0.102	6.14	92.54	5.97
15	79.06	1.70	0.116	7.33	92.45	5.97
16	78.68	1.90	0.129	7.77	92.41	5.97
17	78.48	2.10	0.14	8.01	92.39	5.97

**T= 20°C HR = 75,5%**

Dias	Peso medio	Perdida peso	mg CO2	Perdida (%)	%H	ms
0	83.08	0.00	0	0	93.00	5.82
1	82.14	0.94	0.064	1.13	92.92	5.82
2	81.02	2.06	0.140	2.48	92.82	5.82
5	77.03	6.05	0.411	7.28	92.45	5.82
6	76.27	6.81	0.463	8.20	92.37	5.82
7	75.45	7.63	0.519	9.18	92.29	5.82
8	74.48	8.60	0.585	10.35	92.19	5.82
9	73.15	9.93	0.675	11.95	92.05	5.82
14	70.03	13.05	0.887	15.71	91.70	5.82
15	69.03	14.05	0.955	16.91	91.58	5.82
16	68.54	14.54	0.989	17.50	91.52	5.82
17	68.09	14.99	1.019	18.04	91.46	5.82

**T= 20°C HR = 85,1%**

Dias	Peso medio	Perdida peso	mg CO2	Perdida (%)	%H	ms
0	83.28	0.00	0	0	93.00	5.83
1	82.97	0.31	0.021	0.37	92.99	5.83
2	82.34	0.94	0.064	1.13	92.94	5.83
5	79.62	3.66	0.249	4.39	92.70	5.83
6	78.88	4.40	0.299	5.28	92.63	5.83
7	77.98	5.30	0.360	6.36	92.54	5.83
8	77.28	6.00	0.408	7.20	92.47	5.83
9	76.08	7.20	0.490	8.65	92.36	5.83
14	74.02	9.26	0.630	11.12	92.14	5.83
15	73.16	10.12	0.688	12.15	92.05	5.83
16	71.96	11.32	0.770	13.59	91.92	5.83
17	71.73	11.55	0.785	13.87	91.89	5.83

**T= 20°C HR = 95,1%**

Dias	Peso medio	Perdida peso	mg CO2	Perdida (%)	%H	ms
0	85.64	0.00	0	0	93.00	5.99
1	85.44	0.20	0.014	0.00	92.98	5.99
2	84.81	0.83	0.056	0.74	92.93	5.99
5	82.92	2.72	0.185	2.95	92.77	5.99
6	82.43	3.21	0.218	3.52	92.73	5.99
7	81.88	3.76	0.256	4.17	92.68	5.99
8	81.14	4.50	0.306	5.03	92.61	5.99
9	80.44	5.20	0.354	5.85	92.55	5.99
14	78.48	7.16	0.487	8.15	92.36	5.99
15	78.17	7.47	0.508	8.51	92.33	5.99
16	77.38	8.26	0.562	9.43	92.25	5.99
17	76.86	8.78	0.597	10.04	92.20	5.99

### ANEXO 3: PROGRAMA DE RESPIRACIÓN

Tiempo (h)	CO2(%)	O2(%)
0	0	21
6	0,9	18,5
12	1,8	17,3
18	2,2	16,5
24	3	15,8
31	3,5	14,9
37	4,5	13,3
42	5,1	12,9
48	5,5	12,1
54	6	11,5
60	6,9	10,8
66	7,2	10
72	8	9
79	8,3	8,3
86	8,9	7,5
91	9	6,9
97	10	6
102	10,5	5,5
108	10,9	5
114	11,1	4,5
120	11,9	3,5
126	12	3,9
133	12,9	2,8
139	13	2,1

Programa en **archivo.m** de Matlab

```

clc
clear
close all
%experimentales
datos=xlsread('RESPIRACION_TUMBO','Hoja1');% importación de datos de tabla
libro1 de excel
[npuntos,nvar]=size(datos);
tiempo=datos(:,1);% Tiempo en minutos
t=tiempo;
mol_CO2=datos(:,2);% CO2(%)
mol_O2=datos(:,3);% O2(%)
% CALCULO DE CONSTANTES DE LA FUNCION USANDO lsqcurvefit
%calcula constantes A,B y C para CO2 como (1), x(2) y x(3)
[x,resnorm]=lsqcurvefit(@(x,t) t./(x(1)*t+x(2)).^x(3),[0,1,1],t,mol_CO2);% Calcula
x(1), x(2) y x(3)
% constantes
A1=x(1);
B1=x(2);
C1=x(3);

```

```

% Calcula produccion de CO2 para cada tiempo
CO2=t./(x(1)*t+x(2)).^x(3);% Ec, ajustada
%calcula constantes A,B y C para O2
[x1,resnorm]=lsqcurvefit(@(x1,t) 21-
t./(x1(1)*t+x1(2)).^x1(3),[0,0.9,1],t,mol_O2);%Calcula x1(1), x1(2) y x1(3)
%Constantes
A2=x1(1);
B2=x1(2);
C2=x1(3);
% Calcula consumo de O2 para cada tiempo
O2=21-t./(x1(1)*t+x1(2)).^x1(3);% Ec, ajustada

% GRAFICOS DE VALORES EXPERIMENTALES Y AJUSTADOS
figure (1)
plot(t,CO2,t,mol_CO2,'*',t,O2,t,mol_O2,'*')
xlabel('tiempo (h)')
ylabel('CO2, O2 (%)')
title('Respiracion a 5°C')
legend('Simulado','Experimental','Simulado','Experimental')
grid on
hold off
% VELOCIDAD DE RESPIRACION
% Para CO2
syms xx; hold on
f=-A1*C1*xx*(A1*xx+B1)^(-1-C1)-(A1*xx+B1)^(-C1);% Derivada de las ecuaciones
anteriores
xx=tiempo;
dCO2=abs([eval(f)]);
% para O2
syms xx; hold on
g=A2*C2*xx*(A2*xx+B2)^(-1-C2)-(A2*xx+B2)^(-C2);%
xx=tiempo;
dO2=abs([eval(g)]);

figure (2)
plot(tiempo,dCO2,'*-',tiempo,dO2,'+-')
xlabel('Tiempo (h)')
ylabel('dCO2/dt, dO2/dt ')
title('Velocidad de Respiracion del tumbo a 5°C')
legend('CO2','O2')
grid on
hold off

```

## ANEXO 4: VIDA ÚTIL

### 1. ALMACENAMIENTO A T=2°C, HR=75,0%



Figura 1. Almacenamiento del tumbo a una T=2°C y HR=75%

Tabla 1. Resultados de respuesta sensorial para el atributo marchitez del tumbo serrano almacenado a T= 2°C y HR= 75,0%

Periodo	Tiempo (día)	Evaluaciones							
		1	2	3	4	5	6	7	8
6	0	+	+						
7	2	+	+	+					
8	4	+	+	(-13)	(-14)				
9	6	(-11)	+	+	(-12)	+			
10	8	+	(-6)	(-7)	(-8)	+	(-10)		
11	10	+	(-1)	(-2)	(-3)	(-4)	(-5)	(-6)	+

Tabla 2. Resultados de riesgos acumulados de Weibull para el atributo sensorial marchitez del tumbo serrano almacenado a T= 2°C y HR= 75,0%

Rank=fallas	Tiempo de falla	H=100/Rank	ΣH	log(ΣH)	log(t)
10	7	10,0	10,0	1,000	0,845
9	8	11,1	21,1	1,325	0,903
8	8	12,5	33,6	1,526	0,903
7	9	14,3	47,9	1,680	0,954
6	9	16,7	64,6	1,810	0,954
5	10	20,0	84,6	1,927	1,000
4	10	25,0	109,6	2,040	1,000
3	10	33,3	142,9	2,155	1,000
2	10	50,0	192,9	2,285	1,000
1	10	100,0	292,9	2,467	1,000

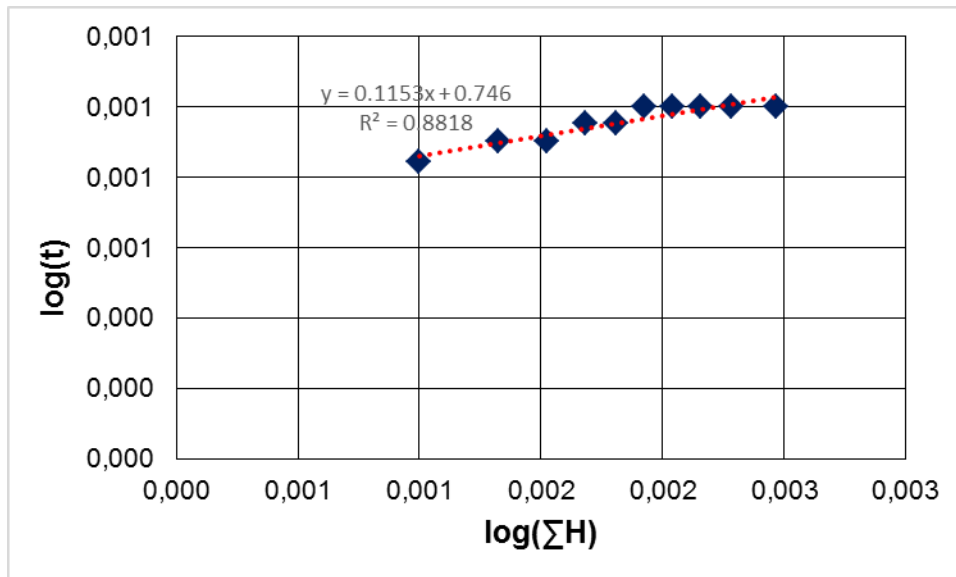


Figura 2. Log(t) en función de Log(ΣH) para la determinación del tiempo de vida útil del tumbo serrano.

Se tiene del gráfico

$$\beta = 1/0,1153 = 8,67$$

$$\text{Log}(\alpha) = 0,746 \quad \alpha = 2,11$$

Reemplazando los valores en la ecuación determinamos la función

$$\text{Log}(t) = \frac{1}{\beta} \text{Log}(\Sigma H) + \text{Log}(\alpha)$$

$$\text{Ln}(t) = 0,1153 \text{Ln}(\Sigma H) + 0,746$$

Reemplazando los valores en la ecuación para un % de riesgo acumulado de 69,3 igual al 50% de probabilidad de deterioro reemplazando en la ecuación siguiente se tiene:

$$H(t) = \left(\frac{t}{\alpha}\right)^\beta \quad 69,3 = \left(\frac{t}{2,11}\right)^{8,67}$$

$$t = 3,44 \text{ dias}$$

El resultado es 3,44 días de vida útil

## 2. ALMACENAMIENTO A T=2°C, HR=85,1%



Figura 1. Almacenamiento del tumbo a una T=2°C y HR=85,1%

Tabla 1. Resultados de respuesta sensorial para el atributo marchitez del tumbo serrano almacenado a T= 2°C y HR= 85,1%

Periodo	Tiempo (día)	Evaluaciones								
		1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	0	+	+							
2	1	+	+	+						
3	2	+	+	+	+					
4	3	+	+	(-11)	(-12)	+				
5	4	+	(-9)	(-10)	+	+	+			
6	6	+	+	(-7)	(-8)	+	+	+		
7	8	+	(-1)	(-2)	(-3)	(-4)	(-5)	(-6)	+	

Tabla 2. Resultados de riesgos acumulados de Weibull para el atributo sensorial **marchitez** del tumbo serrano almacenado a T= 2°C y HR= 85,1%

Rank=fallas	Tiempo de falla	H=100/Rank	ΣH
12	3	8,3	8,3
11	3	9,1	17,4
10	4	10,0	27,4
9	4	11,1	38,5
8	6	12,5	51,0
7	6	14,3	65,3
6	8	16,7	82,0
5	8	20,0	102,0
4	8	25,0	127,0
3	8	33,3	160,3
2	8	50,0	210,3
1	8	100,0	310,3



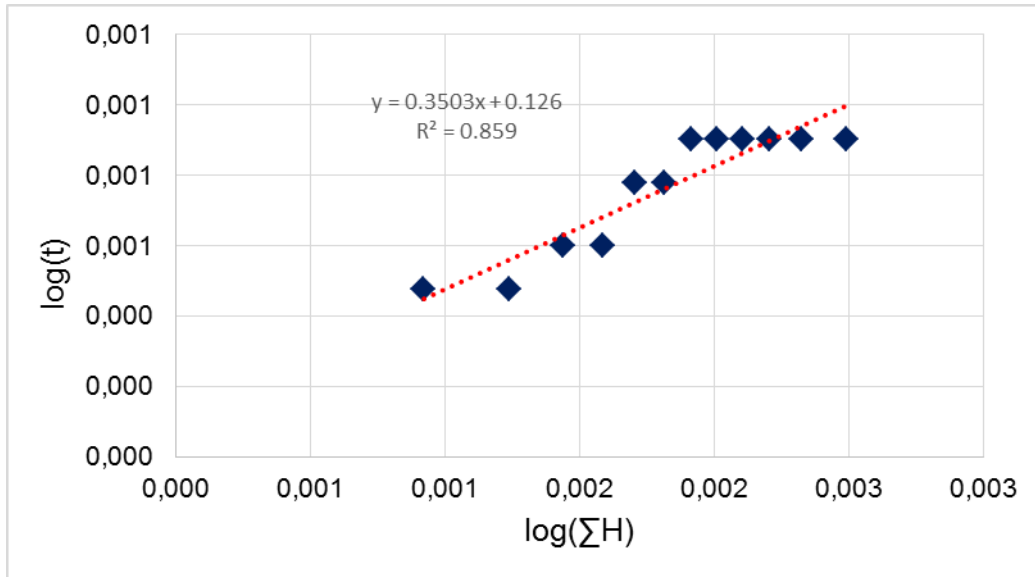


Figura 2. Log(t) en función de Log(ΣH) para la determinación del tiempo de vida útil del tumbo serrano.

Se tiene del gráfico

$$\beta = 1/0,3503 = 2,85$$

$$\text{Log}(\alpha) = 0,126 \quad \alpha = 1,134$$

Reemplazando los valores en la ecuación determinamos la función

$$\text{Log}(t) = \frac{1}{\beta} \text{Log}(\Sigma H) + \text{Log}(\alpha)$$

$$\text{Ln}(t) = 0,3503 \text{Ln}(\Sigma H) + 0,126$$

Reemplazando los valores en la ecuación para un % de riesgo acumulado de 69,3 igual al 50% de probabilidad de deterioro reemplazando en la ecuación siguiente se tiene:

$$H(t) = \left(\frac{t}{\alpha}\right)^\beta \quad 69,3 = \left(\frac{t}{1,134}\right)^{2,85}$$

$$t = 5,007 \text{ dias}$$

El resultado es 5,007 días de vida útil

### 3. ALMACENAMIENTO A T=2°C, HR=95,0%



Figura 1. Almacenamiento del tumbo a una T=2°C y HR=95%

Tabla 1. Resultados de respuesta sensorial para el atributo marchitez del tumbo serrano almacenado a T= 2°C y HR= 95,0%

Periodo	Tiempo (día)	Panelistas/Evaluaciones								
		1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	0	+	+							
2	2	+	+	+						
3	4	+	+	+	+					
4	6	+	+	(-11)	(-12)	+				
5	8	+	+	+	+	+	+			
6	10	+	+	+	+	+	+	+		
7	12	+	+	+	(-7)	+	(-8)	(-9)	(-10)	
8	14	+	(-1)	(-2)	(-3)	(-4)	(-5)	(-6)	+	+

Tabla 2. Resultados de riesgos acumulados de Weibull para el atributo sensorial marchitez del tumbo serrano almacenado a T= 2°C y HR= 95,0%

Rank=falla	Tiempo de falla	H=100/Rank	ΣH
12	6	8,3	8,3
11	6	9,1	17,4
10	12	10,0	27,4
9	12	11,1	38,5
8	12	12,5	51,0
7	12	14,3	65,3
6	14	16,7	82,0
5	14	20,0	102,0
4	14	25,0	127,0
3	14	33,3	160,3
2	14	50,0	210,3
1	14	100,0	310,3

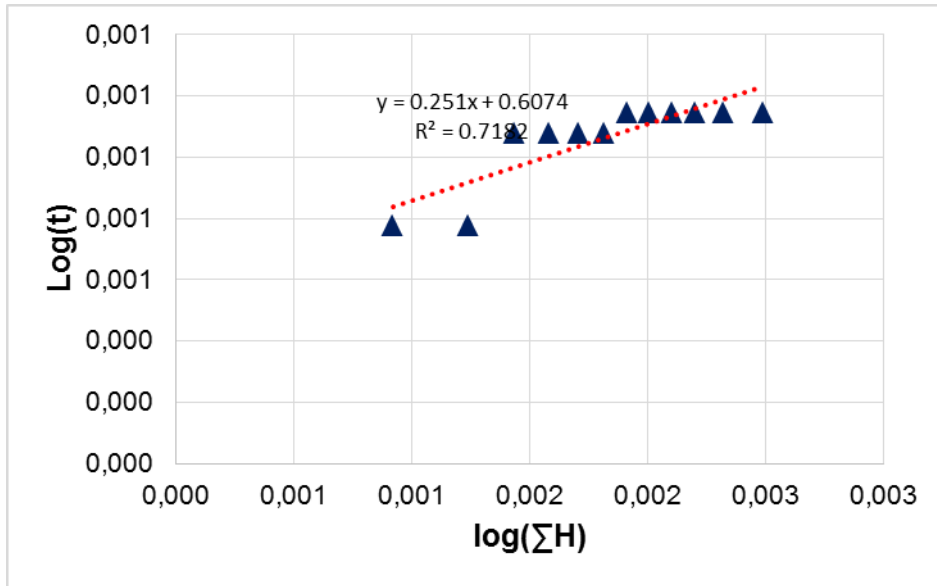


Figura 2: Log(t) en función de Log(ΣH) para la determinación del tiempo de vida útil del tumbo serrano.

Se tiene del gráfico

$$\beta = 1/0,251 = 3,98$$

$$\text{Log}(\alpha) = 0,6074 \quad \alpha = 1,84$$

Reemplazando los valores en la ecuación determinamos la función

$$\text{Log}(t) = \frac{1}{\beta} \text{Log}(\Sigma H) + \text{Log}(\alpha)$$

$$\text{Ln}(t) = 0,251 \text{Ln}(\Sigma H) + 0,6074$$

Reemplazando los valores en la ecuación para un % de riesgo acumulado de 69,3 igual al 50% de probabilidad de deterioro reemplazando en la ecuación siguiente se tiene:

$$H(t) = \left(\frac{t}{\alpha}\right)^\beta \quad 69,3 = \left(\frac{t}{1,84}\right)^{3,98}$$

$$t = 5,32 \text{ dias}$$

El resultado es 5,32 días de vida útil

#### 4. ALMACENAMIENTO A T=10°C, HR=75,0%



Figura 1. Almacenamiento del tumbo a una T=10°C y HR=75%

Tabla 1. Resultados de respuesta sensorial para el atributo marchitez del tumbo serrano almacenado a T= 10°C y HR= 75,0%

Periodo	Tiempo (día)	Evaluaciones							
		1	2	3	4	5	6	7	8
1	0	+	+						
2	2	+	+	+					
3	4	+	+	(-13)	(-14)				
4	6	(-11)	+	+	(-12)	+			
5	8	+	(-7)	(-8)	(-9)	+	(-10)		
6	10	+	(-1)	(-2)	(-3)	(-4)	(-5)	(-6)	+

Tabla 2. Resultados de riesgos acumulados de Weibull para el atributo sensorial **marchitez** del tumbo serrano almacenado a T= 10°C y HR= 75,0%

Rank=fallas	Tiempo de falla	H=100/Rank	ΣH
14	4	7,1	7,1
13	4	7,7	14,8
12	6	8,3	23,2
11	6	9,1	32,3
10	8	10,0	42,3
9	8	11,1	53,4
8	8	12,5	65,9
7	8	14,3	80,2
6	10	16,7	96,8
5	10	20,0	116,8
4	10	25,0	141,8
3	10	33,3	175,2
2	10	50,0	225,2
1	10	100,0	325,2

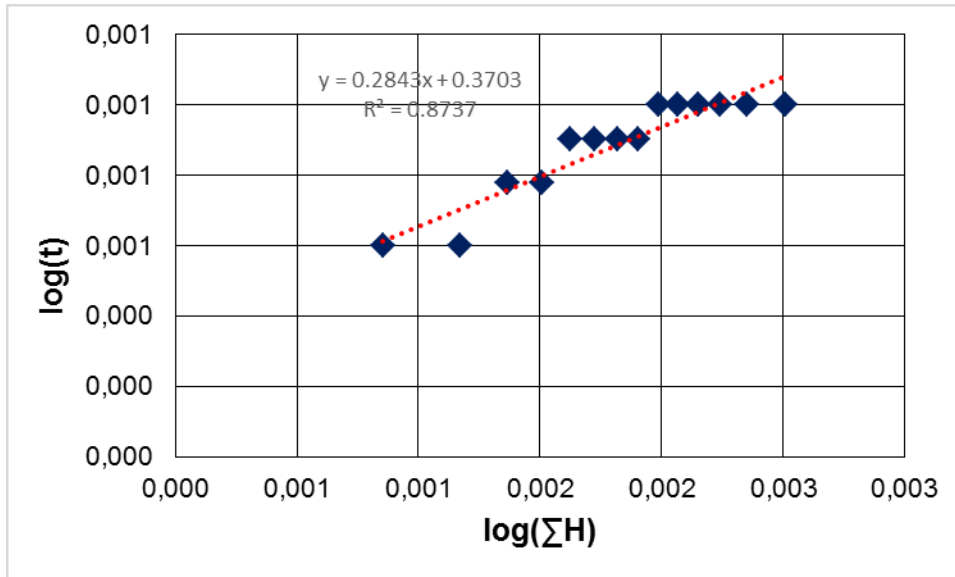


Figura 2. Log(t) en función de Log(ΣH) para la determinación del tiempo de vida útil del tumbo serrano.

Se tiene del gráfico

$$\beta = 1/0,284 = 3,52$$

$$\text{Log}(\alpha) = 0,3703 \quad \alpha = 1,45$$

Reemplazando los valores en la ecuación determinamos la función

$$\text{Log}(t) = \frac{1}{\beta} \text{Log}(\Sigma H) + \text{Log}(\alpha)$$

$$\text{Ln}(t) = 0,284 \text{Ln}(\Sigma H) + 0,3703$$

Reemplazando los valores en la ecuación para un % de riesgo acumulado de 69,3 igual al 50% de probabilidad de deterioro reemplazando en la ecuación siguiente se tiene:

$$H(t) = \left(\frac{t}{\alpha}\right)^\beta \quad 69,3 = \left(\frac{t}{1,45}\right)^{3,52}$$

$$t = 4,83 \text{ dias}$$

El resultado es 4,83 días de vida útil

**5. ALMACENAMIENTO A T=10°C, HR=85,0%**



Figura 1. Almacenamiento del tumbo a una T=10°C y HR=85%

Tabla 1: Resultados de respuesta sensorial para el atributo marchitez del tumbo serrano almacenado a T= 10°C y HR= 85,0%

Periodo	Tiempo (día)	Evaluaciones								
		1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	0	+	+							
2	2	+	+	+						
3	4	+	(-11)	(-12)	+					
4	6	+	+	+	+	+				
5	10	+	(-6)	(-7)	(-8)	(-9)	(-10)			
6	12	+	(-1)	(-2)	(-3)	(-4)	(-5)	+		

Tabla 2. Resultados de riesgos acumulados de Weibull para el atributo sensorial marchitez del tumbo serrano almacenado a T= 10°C y HR= 85,0%

Rank=fallas	Tiempo de falla	H=100/Rank	∑H
12	4	8,3	8,3
11	4	9,1	17,4
10	10	10,0	27,4
9	10	11,1	38,5
8	10	12,5	51,0
7	10	14,3	65,3
6	10	16,7	82,0
5	12	20,0	102,0
4	12	25,0	127,0
3	12	33,3	160,3
2	12	50,0	210,3
1	12	100,0	310,3

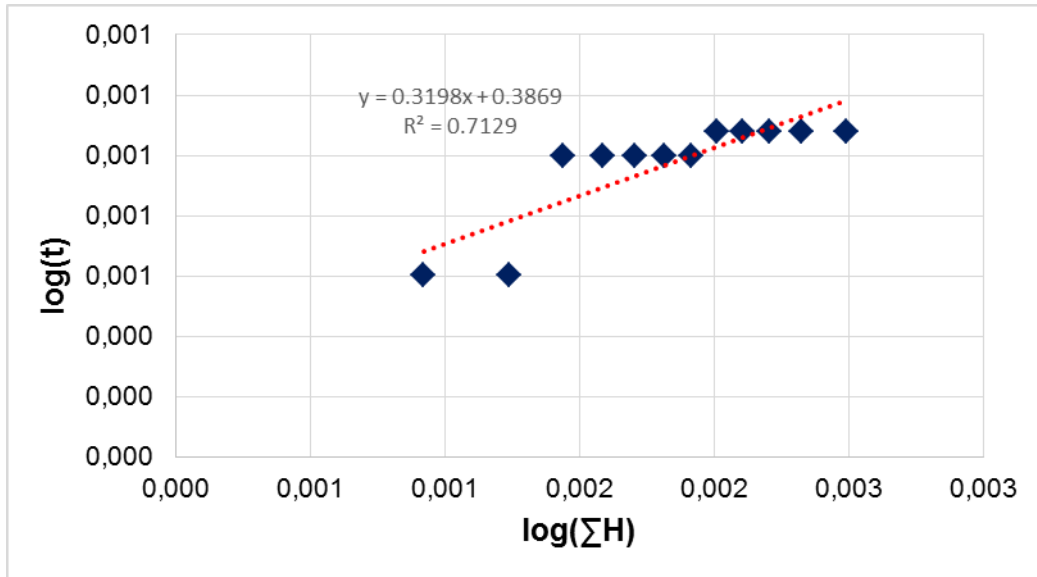


Figura 2. Log(t) en función de Log(ΣH) para la determinación del tiempo de vida útil del tumbo serrano.

Se tiene del gráfico

$$\beta = 1/0,3198 = 3,127$$

$$\text{Log}(\alpha) = 0,387 \quad \alpha = 1,47$$

Reemplazando los valores en la ecuación determinamos la función

$$\text{Log}(t) = \frac{1}{\beta} \text{Log}(\Sigma H) + \text{Log}(\alpha)$$

$$\text{Ln}(t) = 0,3198 \text{Ln}(\Sigma H) + 0,387$$

Reemplazando los valores en la ecuación para un % de riesgo acumulado de 69,3 igual al 50% de probabilidad de deterioro reemplazando en la ecuación siguiente se tiene:

$$H(t) = \left(\frac{t}{\alpha}\right)^\beta \quad 69,3 = \left(\frac{t}{1,47}\right)^{3,127}$$

$$t = 5,71 \text{ dias}$$

## 6. ALMACENAMIENTO A T=10°C, HR=95,2%



Figura 1. Almacenamiento del tumbo a una T=10°C y HR=95,2%

Tabla 1. Resultados de respuesta sensorial para el atributo marchitez del tumbo serrano almacenado a T= 10°C y HR= 95,2%

Periodo	Tiempo (día)	Evaluaciones									
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	0	+	+								
2	2	+	+	+							
3	4	+	+	+	+						
4	6	+	(-13)	+	(-14)	+					
5	8	+	+	+	+	+	+				
6	10	+	+	+	+	+	+	+			
7	12	+	+	+	+	+	+	+	+		
8	14	+	+	+	+	+	+	+	+	+	
9	16	+	+	(-8)	(-9)	+	(-10)	(-11)	(-12)	+	+
10	18	+	(-1)	(-2)	(-3)	+	(-4)	(-5)	(-6)	(-7)	+



Tabla 2. Resultados de riesgos acumulados de Weibull para el atributo sensorial marchitez del tumbo serrano almacenado a T= 10°C y HR= 95,2%

Rank=fallas	Tiempo de falla	H=100/Rank	$\Sigma H$
14	6	7,1	7,1
13	6	7,7	14,8
12	16	8,3	23,2
11	16	9,1	32,3
10	16	10,0	42,3
9	16	11,1	53,4
8	16	12,5	65,9
7	18	14,3	80,2
6	18	16,7	96,8
5	18	20,0	116,8
4	18	25,0	141,8
3	18	33,3	175,2
2	18	50,0	225,2
1	18	100,0	325,2

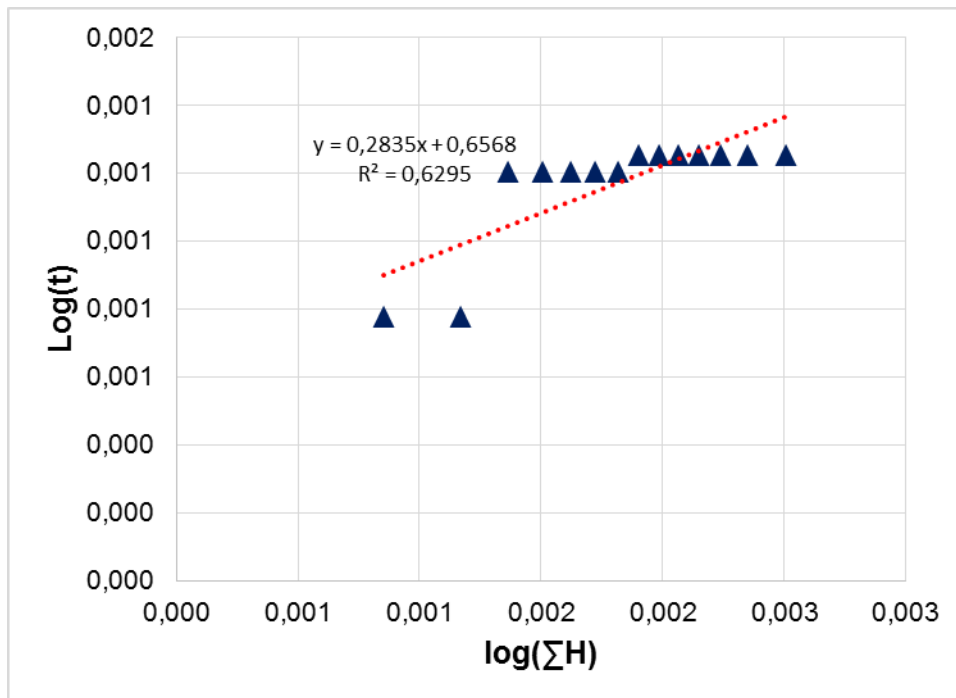


Figura 2.  $\text{Log}(t)$  en función de  $\text{Log}(\Sigma H)$  para la determinación del tiempo de vida útil del tumbo serrano.

Se tiene del gráfico

$$\beta = 1/0,2835 = 3,53$$

$$\text{Log}(\alpha) = 0,657 \quad \alpha = 1,93$$

Reemplazando los valores en la ecuación determinamos la función

$$\text{Log}(t) = \frac{1}{\beta} \text{Log}(\Sigma H) + \text{Log}(\alpha)$$

$$\text{Ln}(t) = 0,2835 \text{Ln}(\Sigma H) + 0,657$$

Reemplazando los valores en la ecuación para un % de riesgo acumulado de 69,3 igual al 50% de probabilidad de deterioro reemplazando en la ecuación siguiente se tiene:

$$H(t) = \left(\frac{t}{\alpha}\right)^\beta \quad 69,3 = \left(\frac{t}{1,93}\right)^{3,53}$$

$$t = 6,41 \text{ dias}$$

## 7. ALMACENAMIENTO A T=2°C, HR=75,0%



Figura 1. Almacenamiento del tumbo a una T=2°C y HR=75%

Tabla 1. Resultados de respuesta sensorial para el atributo marchitez del tumbo serrano almacenado a T= 2°C y HR= 75,0%

Periodo	Tiempo (día)	Evaluaciones											
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1	0	+	+										
2	2	+	+	+									
3	4	+	+	+	+								
4	6	+	+	+	+	+							
5	8	+	(-14)	+	+	(-5)							
6	10	+	+	+	+	+	+	+					
7	12	+	+	+	+	+	+	+	+				
8	14	(-12)	+	+	+	(-13)	+	+	+	+			
9	16	+	+	(-10)	(-11)	+	+	+	+	+	+		
10	18	(-7)	+	(-8)	+	(-9)	+	+	+	+	+	+	
11	20	+	(-1)	(-2)	(-3)	(-4)	+	+	(-5)	+	(-6)	+	+

Tabla 2. Resultados de riesgos acumulados de Weibull para el atributo sensorial marchitez del tumbo serrano almacenado a T= 2°C y HR= 75,0%

Rank=fallas	Tiempo de falla	H=100/Rank	$\Sigma H$
15	8	6,7	6,7
14	8	7,1	13,8
13	14	7,7	21,5
12	14	8,3	29,8
11	16	9,1	38,9
10	16	10,0	48,9
9	18	11,1	60,0
8	18	12,5	72,5
7	18	14,3	86,8
6	20	16,7	103,5
5	20	20,0	123,5
4	20	25,0	148,5
3	20	33,3	181,8
2	20	50,0	231,8
1	20	100,0	331,8

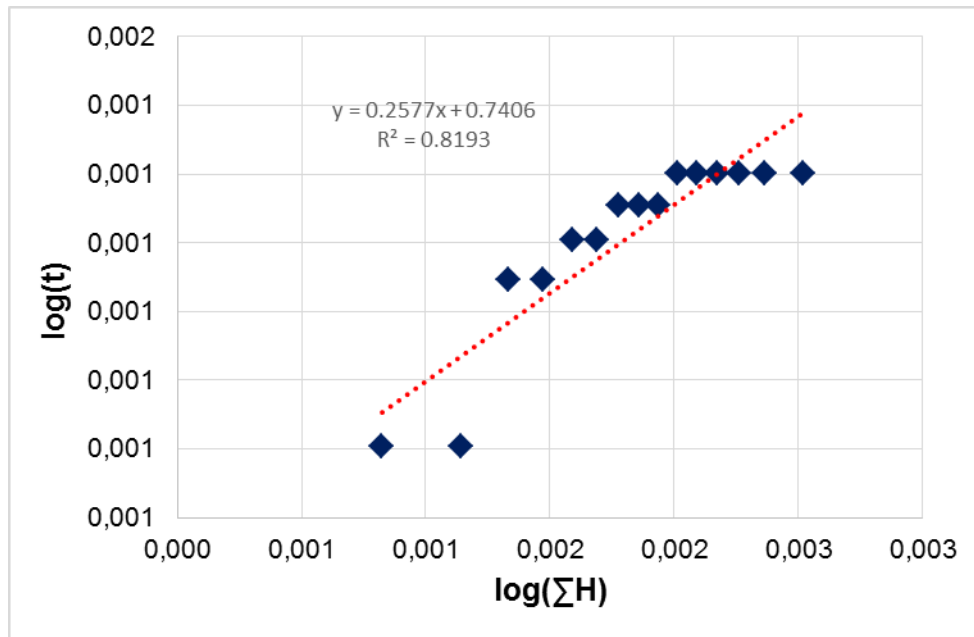


Figura 2.  $\log(t)$  en función de  $\log(\Sigma H)$  para la determinación del tiempo de vida útil del tumbo serrano.

Se tiene del gráfico

$$\beta = 1/0,258 = 3,88$$

$$\text{Log}(\alpha) = 0,7406 \quad \alpha = 2,097$$

Reemplazando los valores en la ecuación determinamos la función

$$\text{Log}(t) = \frac{1}{\beta} \text{Log}(\Sigma H) + \text{Log}(\alpha)$$

$$\text{Ln}(t) = 0,258 \text{Ln}(\Sigma H) + 0,7406$$

Reemplazando los valores en la ecuación para un % de riesgo acumulado de 69,3 igual al 50% de probabilidad de deterioro reemplazando en la ecuación siguiente se tiene:

$$H(t) = \left(\frac{t}{\alpha}\right)^\beta \quad 69,3 = \left(\frac{t}{2,097}\right)^{3,88}$$

$$t = 6,25 \text{ dias}$$

El resultado es 6,25 días de vida útil

## 8. ALMACENAMIENTO A T=2°C, HR=85,0%



Figura 1. Almacenamiento del tumbo a una T=2°C y HR=85%

Tabla 1. Resultados de respuesta sensorial para el atributo marchitez del tumbo serrano almacenado a T= 2°C y HR= 85,0%

Periodo	Tiempo (día)	Evaluaciones												
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
1	0	+	+											
2	2	+	+	+										
3	4	+	+	+	+									
4	6	+	+	(-23)	+	+								
5	8	+	(-21)	+	(-22)	+	+							
6	10	+	(-18)	(-19)	(-20)	+	+	+						
7	12	+	+	+	+	+	+	+	+					
8	14	+	+	+	(-15)	+	(-16)	+	+	(-17)				
9	16	+	(-12)	(-13)	+	(-14)	+	+	+	+	+			
10	18	+	(-9)	(-10)	(-11)	+	+	+	+	+	+	+		
11	20	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	
12	22	+	(-1)	(-2)	(-3)	(-4)	(-5)	+	(-6)	+	(-7)	+	(-8)	+

Tabla 2. Resultados de riesgos acumulados de Weibull para el atributo sensorial marchitez del tumbo serrano almacenado a T= 2°C y HR= 85,0%

<b>Rank=fallas</b>	<b>Tiempo de falla</b>	<b>H=100/Rank</b>	<b>∑H</b>
23	6	4,35	4,35
22	8	4,55	8,89
21	8	4,76	13,66
20	10	5,00	18,66
19	10	5,26	23,92
18	10	5,56	29,47
17	14	5,88	35,36
16	14	6,25	41,61
15	14	6,67	48,27
14	16	7,14	55,42
13	16	7,69	63,11
12	16	8,33	71,44
11	18	9,09	80,53
10	18	10,00	90,53
9	18	11,11	101,64
8	22	12,50	114,14
7	22	14,29	128,43
6	22	16,67	145,10
5	22	20,00	165,10
4	22	25,00	190,10
3	22	33,33	223,4
2	22	50,00	273,4
1	22	100,00	373,4

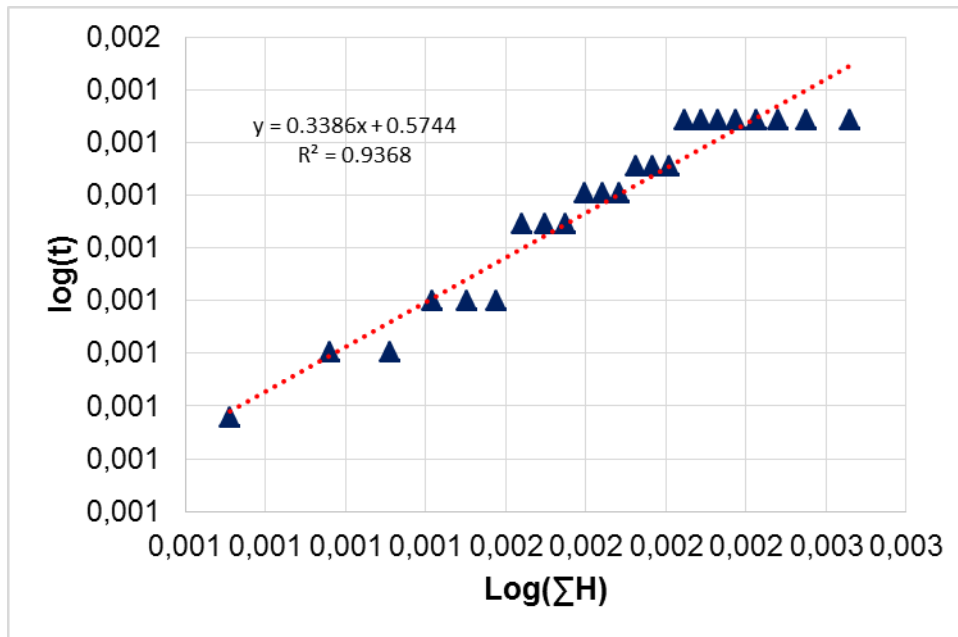


Figura 2. Log(t) en función de Log( $\Sigma H$ ) para la determinación del tiempo de vida útil del tumbo serrano.

Se tiene del gráfico

$$\beta = 1/0,3386 = 2,95$$

$$\text{Log}(\alpha) = 0,5744 \quad \alpha = 1,78$$

Reemplazando los valores en la ecuación determinamos la función

$$\text{Log}(t) = \frac{1}{\beta} \text{Log}(\Sigma H) + \text{Log}(\alpha)$$

$$\text{Ln}(t) = 0,3386 \text{Ln}(\Sigma H) + 0,5744$$

Reemplazando los valores en la ecuación para un % de riesgo acumulado de 69,3 igual al 50% de probabilidad de deterioro reemplazando en la ecuación siguiente se tiene:

$$H(t) = \left(\frac{t}{\alpha}\right)^\beta \quad 69,3 = \left(\frac{t}{1,78}\right)^{2,95}$$

$$t = 7,46 \text{ dias}$$

## 9. ALMACENAMIENTO A T=2°C, HR=95,0%



Figura 1. Almacenamiento del tumbo a una T=2°C y HR=95%

Tabla 1. Resultados de respuesta sensorial para el atributo marchitez del tumbo serrano almacenado a T= 2°C y HR= 95,0%

Periodo	Tiempo (día)	Evaluaciones														
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
1	0	+	+	+	+	+										
2	2	+	+	+	+	+	+									
3	4	+	+	(-15)	+	+	+	+								
4	6	+	+	(-14)	+	+	+	+	+							
5	8	+	+	+	+	+	+	+	+	+						
6	10	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+					
7	12	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+				
8	14	(-9)	+	(-10)	(-11)	+	+	+	(-12)	+	(-13)	+	+			
9	16	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+		
10	18	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	
11	20	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
12	22	+	(-1)	(-2)	(-3)	(-4)	(-5)	+	(-6)	+	(-7)	+	(-8)	+	+	+



Tabla 2. Resultados de riesgos acumulados de Weibull para el atributo sensorial marchitez del tumbo serrano almacenado a T= 2°C y HR= 95,0%

Rank=fallas	Tiempo de falla	H=100/Rank	ΣH
14	4	7,1	7,1
13	6	7,7	14,8
12	14	8,3	23,2
11	14	9,1	32,3
10	14	10,0	42,3
9	14	11,1	53,4
8	22	12,5	65,9
7	22	14,3	80,2
6	22	16,7	96,8
5	22	20,0	116,8
4	22	25,0	141,8
3	22	33,3	175,2
2	22	50,0	225,2
1	22	100,0	325,2

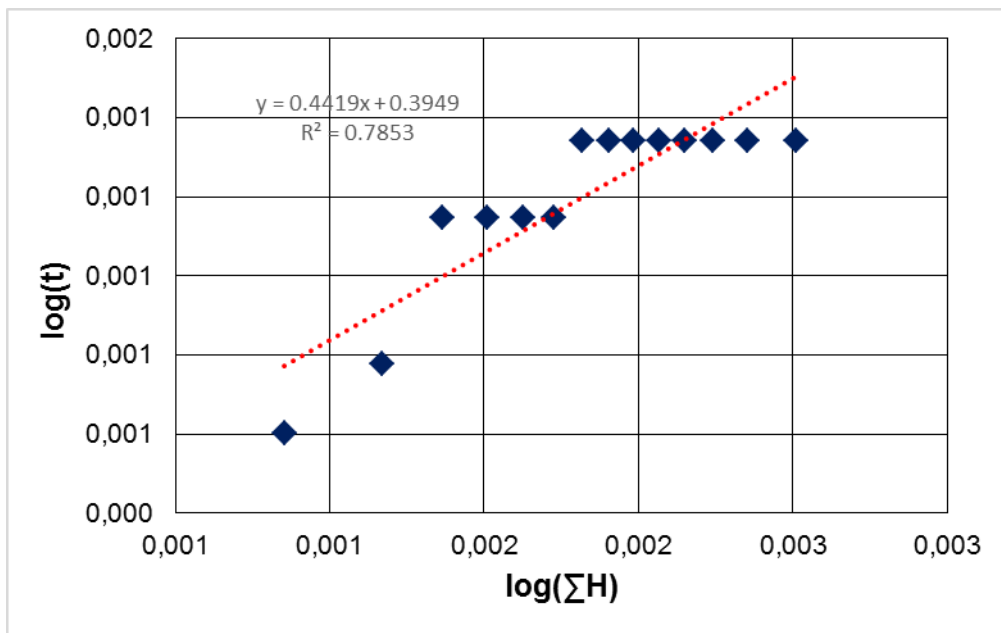


Figura 2. Log(t) en función de Log(ΣH) para la determinación del tiempo de vida útil del tumbo serrano.

Se tiene del gráfico

$$\beta = 1/0,4419 = 2,26$$

$$\text{Log}(\alpha) = 0,3949 \quad \alpha = 1,48$$

Reemplazando los valores en la ecuación determinamos la función

$$\text{Log}(t) = \frac{1}{\beta} \text{Log}(\sum H) + \text{Log}(\alpha)$$

$$\text{Ln}(t) = 0,4419 \text{Ln}(\sum H) + 0,3949$$

Reemplazando los valores en la ecuación para un % de riesgo acumulado de 69,3 igual al 50% de probabilidad de deterioro reemplazando en la ecuación siguiente se tiene:

$$H(t) = \left(\frac{t}{\alpha}\right)^\beta \qquad 69,3 = \left(\frac{t}{1,48}\right)^{2,26}$$

$$t = 9,66 \text{ días}$$

El resultado es 9,66 días de vida útil

## ANEXO 4: FIGURAS



Figura 1. Cámaras de soluciones saturadas



Figura 2. Almacenamiento en cámara de refrigeración a 2°C



Figura 3. Verificación de Humedad relativa de cámaras

Día 0



TEMPERATURA 10°C DIA 1 18/02



TEMPERATURA 10°C DIA 12

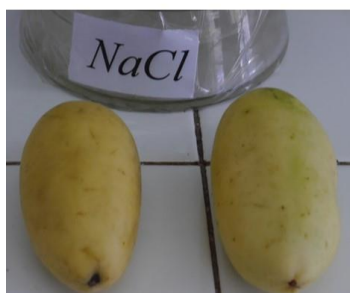


Figura 4. Características del tumbo



(a)



(b)

Figura 5. Monitoreo de pruebas de análisis



Figura 6. Evaluación de pérdida e peso



Figura 7. Evaluación de Temperatura y Humedad



(a)



(b)



Figura 8. Evaluación morfológica (a: Evaluación externa; b: Evaluación interna)