

Centro de Investigación en Alimentación y  
Desarrollo, A.C

**Modelos de superficie de respuesta para estimar  
calidad en frutos de chile bell durante el  
almacenamiento**

Por

**Raquel Pérez Carrillo**

---

Tesis aprobada por la

**UNIDAD CULIACÁN EN CIENCIA Y TECNOLOGÍA DE  
PRODUCTOS AGRICOLAS PARA ZONAS TROPICALES  
Y SUBTROPICALES.**

Como requisito parcial para obtener el grado de:

**MAESTRO EN CIENCIAS**

Culiacán, Sinaloa.

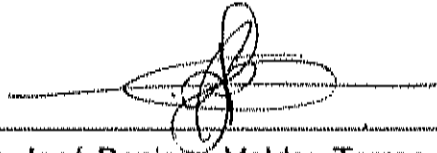
Febrero de 2005.

## APROBACIÓN

Los miembros del comité designados para revisar la tesis de la I.B.Q. Raquel Pérez Carrillo, la han encontrado satisfactoria y recomiendan sea aceptada como requisito parcial para obtener el grado de Maestro en Ciencias.



Dra. María Dolores Muy Rangel  
Director de Tesis



Dr. José Benigno Valdez Torres  
Asesor



Dr. Jorge Humberto Siller Cepeda  
Asesor



Dr. Tomás Osuna Enciso  
Asesor

## DECLARACIÓN INSTITUCIONAL

Se permite y agradecen las citas breves del material contenido en esta tesis sin permiso especial del autor, siempre y cuando se dé el crédito correspondiente. Para la reproducción parcial o total de las tesis con fines académicos, se debe contar con la autorización escrita del director del Centro de Investigación en Alimentación y Desarrollo, A.C. (CIAD, A.C.).

Las publicaciones científicas o de divulgación popular de los datos contenidos en esta tesis, deberá dar los créditos a CIAD, previa autorización escrita del manuscrito en cuestión, del director de tesis.

---

Dr. Alfonso Gardea Bejar

Director General

## DEDICATORIAS

Con todo mi amor y respeto para mis padres:

**Manuel Pérez Sánchez y Adelaida Carrillo Carrillo**, por ser unos padres excelentes y ejemplares, quienes me han apoyado incondicionalmente tanto económicamente como espiritualmente, que han estado conmigo en los buenos y malos momentos, y porque gracias a su ayuda he logrado cumplir mis metas, gracias por sus enseñanzas y el amor que me han dado. Especialmente a mi madre quien me ayudó en esos momentos difíciles y estuvo ahí cuando más la necesité.

A mi hijo:

**Luis Manuel Ibarra Pérez** que es un regalo de Dios, quien me ha acompañado en esta experiencia y a quien quiero con todo mi corazón.

A mi esposo:

**Juan Luis Ibarra Flores** con todo mi amor y cariño, porque ha estado conmigo en todo momento.

A mi hermana:

**Esther Pérez Carrillo** por ser una amiga en todo momento, por su consejos y porque esta ahí cuando la necesito.

## AGRADECIMIENTOS

A Dios por la bendición de la vida y la bendición de haberme permitido alcanzar esta meta.

Al Centro de Investigación en Alimentación y Desarrollo, A.C. Unidad Culiacán por permitirme realizar mis estudios de posgrado, obteniendo así el grado de Maestro en Ciencias.

Al Consejo Nacional de Ciencias y Tecnología por el apoyo económico otorgado.

A la Fundación Produce Sinaloa, zona centro por apoyar el proyecto "Predicción de la vida de anaquel en hortalizas en función a las condiciones de almacenamiento" del cual formó parte este proyecto.

A mi director de tesis, Dra. María Dolores Muy Rangel, por su ayuda, consejos, comprensión y sobre todo por la confianza que tuvo en mí. Gracias por todo.

Al Dr. Beningo Valdez Torres, quien ha sido un excelente consejero y apoyo en mi desarrollo profesional. A quien respeto y aprecio en gran manera. Gracias porque siempre ha tenido confianza en mí.

A mis asesores de tesis Dr. Jorge H. Siller Cepeda, Dr. Benigno Valdez Torres y Dr. Tomás Osuna Enciso, por sus observaciones y sugerencias para un mejor desarrollo del trabajo. A todos mis maestros, con cariño y respeto, por los conocimientos y experiencias adquiridos de ellos.

Agradezco a todo el personal del CIAD Unidad Culiacán, en especial a las personas que me ayudaron de alguna manera en la realización de este trabajo: Eduardo Sánchez, Laura Contreras, Manuel Báez, Rosalba Contreras, Vania Padilla y a Víctor Arana.

## ÍNDICE

	Página
ÍNDICE DE CUADROS	
ÍNDICE DE FIGURAS	
RESUMEN .....	i
INTRODUCCIÓN .....	1
OBJETIVOS GENERAL .....	5
Objetivos Específicos .....	5
META .....	6
HIPÓTESIS .....	7
REVISIÓN DE LA LITERATURA .....	8
Generalidades del Cultivo de Chile Bell .....	8
Producción .....	8
Composición Química del Fruto de Chile Bell .....	12
Almacenamiento .....	15
Fisiología del Fruto .....	16
Respiración .....	16
Transpiración .....	18
Etileno .....	20
Pérdida de agua .....	22
Calidad Poscosecha .....	25
Factores que Afectan la Transpiración y la Pérdida de Agua .....	26
Internos .....	27
Relación superficie:volumen .....	27
Naturaleza y estructura de la superficie del fruto .....	27
Externos .....	28
Daño mecánico .....	28
Condiciones de almacenamiento .....	28
Déficit de presión de vapor .....	29
Movimiento y presión del aire .....	29

VARIABLES HIDRICAS ASOCIADAS CON LA CALIDAD DEL FRUTO .....	32
Contenido relativa de agua (CRA) .....	32
Estatus hídrico .....	33
Potencial hídrico .....	35
Potencial osmótico .....	37
Potencial de presión .....	38
Modelos Matemáticos que Estiman Variables de Calidad en Frutas y Hortalizas .....	39
<b>MATERIALES Y MÉTODOS .....</b>	<b>43</b>
Material Vegetal y Tratamiento .....	43
Análisis Físico .....	44
Pérdida de peso .....	44
Firmeza .....	44
Análisis Químico .....	44
Sólidos solubles totales (°Brix) .....	44
Análisis Fisicoquímico .....	45
Potencial hídrico .....	45
Potencial osmótico .....	45
Potencial de presión .....	46
Contenido relativo de agua (CRA) .....	46
Análisis Histológico .....	47
Métodos Estadísticos .....	49
Diseño de Experimento .....	49
Optimización .....	51
<b>RESULTADOS Y DISCUSIÓN .....</b>	<b>53</b>
Pérdida de peso .....	53
Firmeza .....	58
Potencial hídrico .....	64
Potencial osmótico .....	69



Potencial de presión .....	74
Contenido relativo de agua (CRA) .....	80
Sólidos solubles totales (°Brix) .....	85
Optimización .....	89
Variables Físicas .....	89
Variables Hídricas .....	90
Análisis Histológico .....	92
CONCLUSIONES .....	96
BIBLIOGRAFÍA CITADA .....	97

## ÍNDICE DE CUADROS

	Página
Cuadro 1. Área cultivada y producción de chile bell a nivel mundial por continentes y principales países .....	9
Cuadro 2. Composición química y valor nutritivo del fruto de chile bell por 100g de producto comestible .....	13
Cuadro 3. Clasificación de los productos hortícolas de acuerdo a sus rangos de respiración .....	18
Cuadro 4. Coeficiente de transpiración de algunos vegetales .....	20
Cuadro 5. Clasificación de productos hortícolas de acuerdo a sus rangos de producción de etileno (C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> ) .....	21
Cuadro 6. Porcentaje de pérdida de agua en algunas hortalizas en poscosecha .....	23
Cuadro 7. Niveles de variación de las variables independientes estudiadas en las condiciones de almacenamiento .....	49
Cuadro 8. Matriz sustituida de los niveles estudiados en las condiciones de almacenamiento .....	50
Cuadro 9. Arreglo codificado de un diseño central, compuesto rotatable para dos variables .....	51
Cuadro 10. Análisis de regresión para la variable pérdida de peso en frutos de chile bell .....	53
Cuadro 11. Análisis de varianza de la regresión de pérdida de peso en frutos de chile bell .....	54
Cuadro 12. Coeficientes del modelo en términos reales de la regresión para la variable pérdida de peso en frutos de chile bell .....	54

Cuadro 13. Análisis de regresión para la variable firmeza en frutos de chile bell .....	58
Cuadro 14. Análisis de varianza de la regresión de firmeza en frutos de chile bell .....	59
Cuadro 15. Coeficientes del modelo en términos reales de la regresión de la variable firmeza para frutos de chile bell .....	59
Cuadro 16. Análisis de regresión para la variable potencial hídrico en frutos de chile bell .....	64
Cuadro 17. Análisis de varianza de la regresión de potencial hídrico en frutos de chile bell .....	65
Cuadro 18. Coeficientes del modelo en términos reales de la regresión de la variable potencial hídrico para frutos de chile bell .....	65
Cuadro 19. Análisis de regresión para la variable potencial osmótico en frutos de chile bell .....	70
Cuadro 20. Análisis de varianza de la regresión de potencial osmótico en frutos de chile bell .....	70
Cuadro 21. Coeficientes del modelo en términos reales de la regresión de la variable potencial osmótico para frutos de chile bell .....	71
Cuadro 22. Análisis de regresión para la variable potencial de presión en frutos de chile bell .....	75
Cuadro 23. Análisis de varianza de la regresión de potencial de presión en frutos de chile bell .....	75
Cuadro 24. Coeficientes del modelo en términos reales de la regresión de la variable potencial de presión para frutos de chile bell .....	76
Cuadro 25. Análisis de regresión para la variable contenido relativo de agua en frutos de chile bell .....	80
Cuadro 26. Análisis de varianza de la regresión de contenido relativo de agua en frutos de chile bell .....	81
Cuadro 27. Coeficientes del modelo en términos reales de la regresión de la variable contenido relativo de agua para frutos de chile bell .....	81

Cuadro 28. Análisis de regresión para la variable sólidos solubles totales en frutos de chile bell .....	85
Cuadro 29. Análisis de varianza de la regresión de sólidos solubles totales en frutos de chile bell .....	86
Cuadro 30. Coeficientes del modelo en términos reales de la regresión de la variable sólidos solubles totales para frutos de chile bell .....	86
Cuadro 31. Optimización de las variables físicas en frutos de chile bell por el método de deseabilidad .....	89
Cuadro 32. Optimización de las variables hídricas en frutos de chile bell por el método de deseabilidad .....	91

## ÍNDICE DE FIGURAS

	Página
Figura 1. Estados de la República Mexicana que tienen participación en la producción de chile bell .....	10
Figura 2. Ganancias en millones de dólares de las principales hortalizas temporada 2002-2003 .....	11
Figura 3. Gráfica representativa del muestreo y código de datos de un diseño central compuesto $2^k$ .....	52
Figura 4. Superficie de respuesta para la pérdida de peso en chile bell , en función del tiempo y déficit de presión de vapor (DPV en kPa) .....	55
Figura 5. Grafica de contornos bidimensional para la pérdida de peso en chile bell, en función al tiempo (días) y déficit de presión de vapor (DPV en kPa).....	56
Figura 6. Porcentaje de pérdida de peso en chile bell almacenados bajo diferentes condiciones de DPV.....	57
Figura 7. Superficie de respuesta para la firmeza en chile bell, en función del tiempo y déficit de presión de vapor (DPV en kPa) .....	61
Figura 8. Grafica de contornos bidimensional para la firmeza en chile bell, en función al tiempo y déficit de presión de vapor (DPV en kPa) .....	62
Figura 9. Milímetros de deflexión en chile bell almacenados bajo diferentes condiciones de DPV.....	63
Figura 10. Superficie de respuesta para potencial hídrico en chile bell, en función del tiempo y déficit de presión de vapor (DPV en kPa).....	66
Figura 11. Grafica de contornos bidimensional para potencial hídrico (MPa) en chile bell en función al tiempo (días) y déficit de presión de vapor (DPV en kPa) .....	67
Figura 12. Superficie de respuesta para potencial osmótico en chile bell, en función del tiempo (días) y déficit de presión de vapor (DPV en kPa) .....	72

Figura 13. Grafica de contornos bidimensional para potencial osmótico en chile bell en función al tiempo (días) y déficit de presión de vapor (DPV en kPa) .....	73
Figura 14. Superficie de respuesta para potencial de presión en chile bell, en función del tiempo (días) y déficit de presión de vapor (DPV en kPa) .....	77
Figura 15. Grafica de contornos bidimensional para el potencial de presión en chile bell, en función al tiempo (días) y déficit de presión de vapor (DPV en kPa) .....	78
Figura 16. Superficie de respuesta para contenido relativo de agua en chile bell, en función del tiempo y déficit de presión de vapor (DPV en kPa) .....	82
Figura 17. Grafica de contornos bidimensional para contenido relativo de agua en chile bell, en función al tiempo (días) y déficit de presión de vapor (DPV en kPa) .....	83
Figura 18. Superficie de respuesta para sólidos solubles totales en chile bell, en función del tiempo (días) y déficit de presión de vapor (DPV en kPa) .....	87
Figura 19. Grafica de contornos bidimensional para sólidos solubles totales en chile bell en función al tiempo (días) y déficit de presión de vapor (DPV en kPa) .....	88
Figura 20. Sobreposición de curvas de nivel para las variables físicas (pérdida de peso = %, Firmeza = mm de deflexión y CRA = %) en frutos de chile bell .....	90
Figura 21. Sobreposición de curvas de nivel para las variables hídricas (potencial hídrico, osmótico y de presión = MPa) en frutos de chile bell .....	91
Figura 22. Cortes anatómicos de tejido de pericarpio de fruto de chile bell almacenados durante 5 días expuestos a condiciones de diferentes DPV (kPa) .....	94
Figura 23. Cortes anatómicos de tejido de pericarpio de fruto de chile bell almacenados durante 11 días expuestos a condiciones de diferentes DPV (kPa) .....	95

## RESUMEN

El chile bell es uno de los cultivos más importantes del estado de Sinaloa, y esto se debe en gran parte, a que un volumen significativo de su producción se exporta y genera divisas para el estado y México. Para ello, se requiere principalmente fruto de buena calidad y resistencia al manejo poscosecha. Sin embargo, uno de los principales problemas que presenta este fruto durante su comercialización es la pérdida de peso, que tiene un gran efecto en su apariencia. Pérdidas de peso superior al 7% tiene un impacto negativo en su comercialización, la cual se debe principalmente a la pérdida de agua del fruto por efecto de la transpiración. El chile bell se caracteriza por tener un alto contenido de agua y la pérdida de la misma está relacionada con las condiciones de almacenamiento, principalmente si se expone a una alta temperatura y baja humedad relativa. Por lo tanto, el objetivo de este trabajo, fue estudiar el efecto que tienen las condiciones de almacenamiento sobre el estatus hídrico y la calidad poscosecha de chile bell, para generar modelos matemáticos de segundo orden que ayuden a explicar el comportamiento de las variables de calidad poscosecha. Se estudiaron frutos de chile bell cv. Comandante en un estado de madurez hortícola, los cuales se almacenaron bajo cinco condiciones de déficit de presión de vapor (DPV de 0.026, 0.103, 0.351, 0.678 y 1.186 kPa), Se evaluaron las variables de pérdida de peso, firmeza, estatus hídrico (potencial hídrico, osmótico y de presión), contenido relativo de agua (CRA) y sólidos solubles totales ( $^{\circ}$ Brix), durante 0, 1, 5, 9 y 11 días. Los frutos almacenados por 11 días a bajos DPV (0.026 y 0.103 kPa), desarrollaron una pérdida de peso del 4%, mientras que los almacenados a un alto DPV ( 1.186 kPa), presentaron una pérdida del 6% en tan sólo 2 días, perdiendo totalmente su calidad.

De igual manera, en la firmeza los frutos a bajos DPV (0.026 y 0.103 kPa), para el día 11 alcanzaron una pérdida de

firmeza del 35%, con valores de deflexión de 5 a 6 mm, de manera contrastante los frutos a alto DPV (1,186 kPa), con un 199% para este mismo día con 12 a 13 mm de deflexión. Durante el almacenamiento de los frutos los valores del potencial hídrico y osmótico, disminuyeron, a valores más negativos, principalmente en los almacenados a altos DPV, con valores de -1,169 y -0,814 MPa, respectivamente a los 11 días del estudio, mientras que en bajos DPV fueron de -0.531 y -0.661 MPa. También, se observó un cambio en el potencial de presión de valores positivos a negativos cuando los frutos presentaron un CRA entre 87-86% asociado a la plasmólisis. En los sólidos solubles totales no se encontró un cambio considerable en los frutos durante todo el almacenamiento, con valores de 4.5 a 5.5 °Brix. De manera general, fue factible la elaboración de modelos de superficie de respuesta donde las variables de pérdida de peso, firmeza, potencial hídrico y de presión arrojaron los mejores modelos matemáticos de segundo orden con un valor de  $R^2$  superior al 85%. Así mismo, en las variables físicas como pérdida de peso, firmeza y contenido relativo de agua, se realizó una optimización donde los mejores resultados fueron de 0.026 kPa para DPV a un tiempo de 11 días, con una deseabilidad global de 1. También, en las variables hídricas (potencial hídrico, osmótico y de presión), las mejores condiciones se lograron a las mismas condiciones, con una deseabilidad global de 0.92.

Finalmente, las condiciones de DPV afectaron la integridad del tejido del pericarpio, observándose ruptura celular en los frutos almacenados a altos DPV



## INTRODUCCIÓN

El chile bell (*Capsicum annuum* L.) es originario de la zona de Bolivia y Perú, donde se cultivaban al menos otras cuatro especies (INFOAGRO, 2003). En el estado de Sinaloa en términos de bultos empacados y comercializados al exterior, se destaca que durante la temporada 2002-2003, la exportación se realizó en 58.6 millones de bultos. De tomate se transportaron a la frontera poco más de 28 millones de bultos; 3 millones de calabazas; más de 9 millones de pepinos y más de 8 millones de chiles. Estos cuatro productos representaron el 83% de la exportación total. La superficie sembrada de Chile bell en el ciclo 2002-2003 fue de 14,747 ha de un total de 68,712 ha de siembra de hortalizas, obteniéndose 89 mil ton de frutos de chile bell, representando el 12.33% de la producción total de hortalizas (CIDH, 2003).

Respiración, transpiración, maduración, senescencia y los cambios en las características de calidad externas e internas son las actividades principales que ocurren en los productos vivos durante el periodo poscosecha (Böttcher *et al.*, 1999). La flacilidad, encogimiento, marchitamiento y la pudrición son los principales problemas, que reducen la comercialización y la aceptabilidad al consumidor de los frutos de chile bell después de ser cosechados (Lerdthanangkul y Krochta, 1996). Para conocer la calidad y vida poscosecha de una fruta u hortaliza es necesario conocer cual es el máximo rango permitido de deterioro, por ejemplo para chile bell se reporta que una pérdida de peso del 6 y 8% ya no hay calidad comercial (Cantwell, 1996).

El principal componente de las hortalizas es el agua. En general, pérdidas de peso de sólo un 5% en general marchitan numerosos productos hortícolas tales como chile bell, berenjena, tomate, entre otros (Wills *et al.*,

1998). La flacidez del tejido está directamente correlacionado con la pérdida de agua del fruto durante el almacenamiento (Lerdthanangkul y Krochta, 1996). Un buen manejo de la temperatura es una de las operaciones más importantes para prolongar la vida de los frutos cosechados. Los frutos de chile bell son susceptibles al daño por frío, para evitar esto es necesario mantener los frutos almacenados entre 8 y 9°C, ya que a estas condiciones el daño por frío y la maduración son mínimos (Ryall y Lipton, 1983).

Una vez que los frutos se han cosechado, es de vital importancia la conservación del contenido de humedad de los mismos, para equilibrar las pérdidas que se producen con la transpiración. Se sabe que la senescencia del chile bell se correlaciona con la pérdida de peso del fruto, por lo que aquellas condiciones que disminuyen esta pérdida, también pueden detener el deterioro de los frutos. Aumentar la humedad en el ambiente y bajar la temperatura, son condiciones que se realizan para disminuir las pérdidas de peso. Posiblemente, el estrés hídrico en el chile bell es un desencadenante de su senescencia. En la práctica comercial suele utilizarse para la conservación de los frutos, una humedad relativa del 90%, que vienen a ser una solución de compromiso entre una humedad lo suficientemente alta para evitar el marchitamiento de los frutos y lo bastante moderada para reducir el desarrollo de patógenos (Nuez *et al.*, 1996). El incremento de la humedad relativa del aire reduce el déficit de presión de vapor (DPV) entre el producto y el aire de su entorno (Wills *et al.*, 1998).

Ben-Yehoshua (1987) señala que en frutos de chile bell almacenados a una temperatura de 10°C y una humedad relativa del 60-75% (DPV entre 0.368 y 0.49 kPa, según Pearcy *et al.*, 1991) se presenta una pérdida de peso diaria de 0.6% en relación con su peso fresco inicial.

También, la textura es un parámetro de calidad importante de las frutas y hortalizas, ya que conforme madura el fruto proporciona el gusto al paladar, sin embargo, si el ablandamiento no es controlado de manera efectiva en poscosecha, se hace desagradable al gusto, se incrementa la susceptibilidad al daño mecánico y al ataque de microorganismos (De Belie *et al.*, 2000; Shackel *et al.*, 1991). Los frutos blandos, no son aptos para la comercialización, esto debido a que conforme avanza el tiempo, los frutos pierden firmeza al igual que la pérdida de agua, los cuales para chile bell se encuentran estrechamente asociadas (Lurie *et al.*, 1986).

Lownds *et al.* (1993), reportó que en nueve cultivares de chile bell el contenido relativo de agua se encontraba en un rango del 92-90% al momento de ser cosechados, de los cuales generó modelos de regresión para calcular la pérdida de peso para cada cultivar, a una temperatura dada en función al tiempo. Esto también es similar a lo reportado por Lurie *et al.* (1986), encontrando un contenido relativo de agua inicial del 90%.

Muy *et al.* (2004a), realizaron estudios en pepino almacenados bajo seis diferentes condiciones de almacenamiento (DPV de 0.2 – 1.26 kPa), evaluándolos con cera y sin cera, encontrando que los frutos de pepino (con y sin cera) almacenados a DPV de 0.2 kPa no presentaron pérdida de peso significativa, mientras que los almacenados (con y sin cera) a DPV de 1.26 kPa para el día 6 alcanzaron 6% de pérdida de peso. Con esta información se generaron modelos de primer orden para predecir la pérdida de peso en frutos de pepinos (con cera y sin cera), en función a las condiciones de almacenamiento (DPV). EL modelo obtenido para los frutos sin cera fue el siguiente:  $y = 0.6747x + 0.1829$  y para frutos con cera  $y = 0.5762x + 0.0204$ , donde  $y =$  pérdida de peso% y  $x =$  Déficit de presión de vapor (kPa).

Estos mismo autores, realizaron estudios en mango con cera y sin cera, almacenados en tres diferentes condiciones de déficit de presión de vapor (0.22, 1.152 y 1.14 kPa), encontrando de forma similar el mismo comportamiento en la pérdida de peso, con los valores obtenidos generaron modelos de primer orden para predecir la pérdida de peso en frutos de mango (con y sin cera) en función a su condiciones de almacenamiento (DPV). EL modelo obtenido para los frutos sin cera fue el siguiente:  $y = 0.6033x + 0.1261$  y par frutos con cera  $y = 0.4273x + 0.0833$ , donde  $y =$  pérdida de peso% y  $x =$  Déficit de presión de vapor (kPa) (Muy *et al.*, 2004b).

El contenido de agua, y la forma en la que esta se pierde ha sido ampliamente estudiado, sin embargo, no existen modelos matemáticos que puedan ser útiles para predecir la vida de anaquel y calidad del fruto de chile bell, en función del estatus hídrico y algunos parámetros de calidad (pérdida de peso y firmeza) y sus condiciones de almacenamiento (DPV).

En base a lo revisado, se buscó generar modelos matemáticos de segundo orden para encontrar relación entre las variables pérdida de peso, firmeza, contenido relativo de agua, potencial hídrico, potencial osmótico, potencial de presión y sólidos solubles totales. Todas ellas en función de las condiciones de almacenamiento (DPV), el tiempo y la calidad poscosecha de los frutos. Estos modelos serán herramientas útiles para predecir vida de anaquel y calidad de los frutos de chile bell durante su almacenamiento.

## OBJETIVO GENERAL

Determinar las mejores condiciones de almacenamiento en términos de déficit de presión de vapor (DPV), que alarguen la vida de anaquel en chile bell; mediante modelos de superficie de respuesta que relacionen DPV y tiempo, para cada una de las variables de respuestas asociadas con la calidad del producto.

### Objetivos Específicos

- Estudiar la transpiración y el estatus hídrico (contenido relativo de agua y potencial hídrico) en chile bell durante el almacenamiento bajo distintas condiciones de DPV.
- Evaluar la pérdida de peso, firmeza, color y sólidos solubles totales en frutos de chile bell bajo diferentes condiciones de DPV durante su almacenamiento.
- Conocer mediante el estudio histológico la integridad del pericarpio en frutos de chile bell expuestos a distintos DPV durante el almacenamiento.
- Generar modelos de superficie de respuesta para estimar la vida de anaquel de chile bell en función a las condiciones de almacenamiento (DPV) y las variables que mejor definen la calidad del fruto.

## META

Predecir la calidad poscosecha de frutos, de chile bell durante el almacenamiento a través de modelos matemáticos.

## HIPÓTESIS

La utilización de condiciones de almacenamiento adecuadas (déficit de presión de vapor) incrementa 30% la vida de anaquel de los frutos de chile bell.

Condiciones de almacenamiento con DPV bajos (cercaos a cero), disminuyen la pérdida de peso, pérdida de firmeza y el contenido relativo de agua.

Condiciones de almacenamiento con DPV bajos (cercaos a cero), mantienen por mayor tiempo valores altos de potencial hídrico, potencial osmótico y potencial de presión.

Condiciones de almacenamiento con DPV bajos, mantiene la integridad del tejido del pericarpio en los frutos de chile bell por mayor tiempo.

## REVISIÓN DE LA LITERATURA

### Generalidades del Cultivo de Chile Bell

El chile bell (*Capsicum annuum* L.) es originario de la zona de Bolivia y Perú, donde se cultivaban al menos otras cuatro especies. Fue traído al viejo Mundo por Colón en su primer viaje (1493) (INFOAGRO, 2003). El chile bell es una hortaliza perenne con ciclo de cultivo anual. Todas las formas de pimiento utilizadas por el hombre pertenecen al género *Capsicum*. El nombre científico del género se deriva del griego: según unos autores de *kapsó* (picar), según otros de *kapsakes* (cápsula) y pertenece a la familia de las Solanáceas. El fruto de esta hortaliza se define botánicamente como una baya de estructura hueca, llena de aire, con forma de cápsula, constituida por un pericarpio grueso y jugoso y un tejido placentario al que se unen las semillas. Este pericarpio está formado por tres capas: el epicarpio o capa externa, el mesocarpio o zona carnosa intermedia y el endocarpio o capa membranosa interna. El cuerpo del fruto presenta una superficie suave, frecuentemente asurcada y con depresiones o rugosidad transversal (Nuez *et al.*, 1996).

### **Producción**

El mercado de consumo de frutas y hortalizas en las últimas tres décadas se ha caracterizado por una mayor búsqueda de productos frescos durante todas las épocas del año, lo que ha dado como resultado un crecimiento en las exportaciones e importaciones y un mayor interés en un buen manejo poscosecha de los mismos para extender su tiempo de vida útil.



El cultivo de chile bell se ha hecho universal, donde Asia es el continente con una mayor extensión de terreno dedicada a este cultivo, destacando Indonesia, China, República de Corea, Pakistán y Turquía. El segundo continente en importancia en cuanto superficie cultivada es África, seguida muy cerca por Europa. En África destacan principalmente Nigeria, Ghana, Argelia, Túnez y Egipto. En Europa ex-Yugoslavia, España, Italia, Rumania, Hungría y Bulgaria. En América los países con una mayor superficie de este cultivo son México y Estados Unidos de América (Cuadro 1) (FAO, 2004).

Cuadro1. Área cultivada y producción de chile bell a nivel mundial por continentes y principales países.		
Continentes y países	Área cultivada (ha)	Producción (ton)
<b>Mundial</b>	1,654,487	23,247,662
<b>África</b>	269,959	2,030,816
Nigeria	91,000	720,000
<b>Norte y Centro América</b>	198,080	2,877,766
México	140,693	1,853,610
EUA	31,890	845,310
<b>Sudamérica</b>	29,185	382,810
<b>Asia</b>	1,006,066	14,983,158
China	603,000	11,534,871
Indonesia	155,495	552,679
Turquía	88,000	1,760,000
<b>Europa</b>	145,553	2,922,191
España	22,000	994,200
<b>Oceanía</b>	2,820	50,921

Fuente: Anuario FAO (2003).

En la producción nacional destacan cinco estados como los principales productores de chile bell (Figura 1), ocupando Sinaloa el primer lugar con una aportación del 60.6%, en segundo lugar Nuevo León con un 21.5% del total de la producción (SAGARPA, 2003).

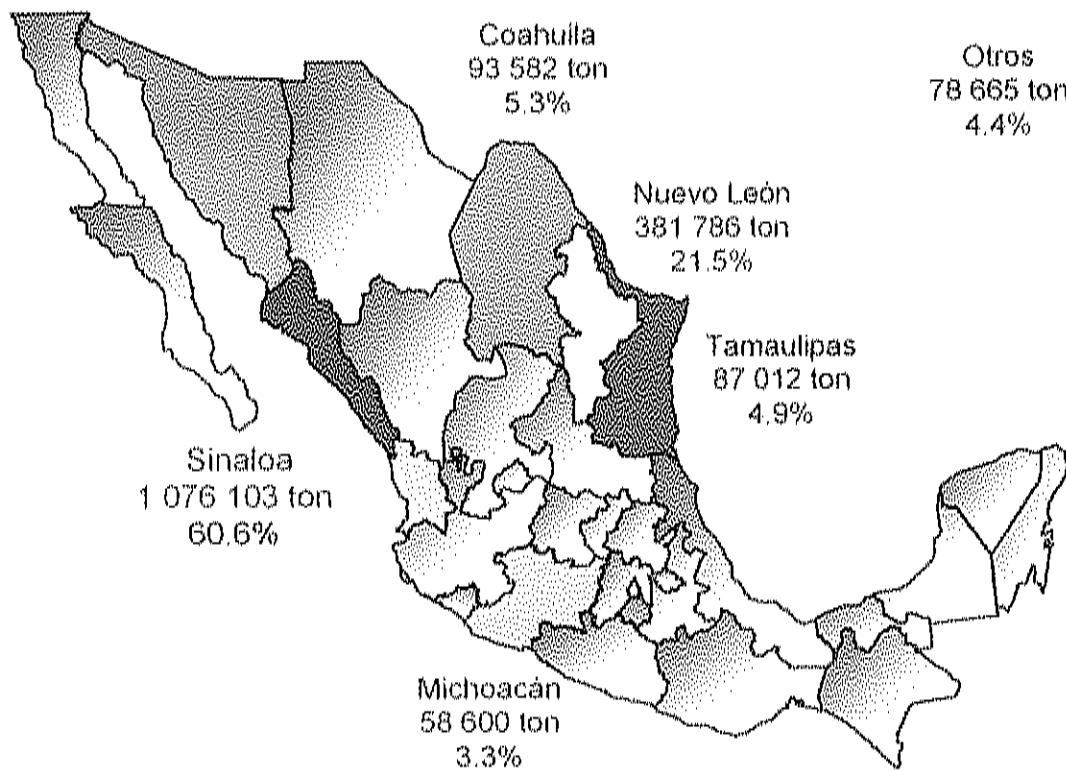


Figura1. Estados de la República Mexicana que tienen participación en la producción de chile bell.

En Sinaloa en el ciclo 2003-2004 la superficie sembrada de hortalizas fue de 72,968 ha de las cuales 14,076 ha corresponden al cultivo de chile bell, y la exportación de las mismas fue de 722,760 ton, la cual estuvo influenciada en parte por chile bell en un 20.4%. El estado de Sinaloa es el principal productor y exportador de chile bell de México, y por lo tanto es importante buscar las condiciones de almacenamiento que extiendan la vida de anaquel de este fruto y que permita la llegada del fruto a su destino final en excelentes condiciones. El chile bell es el segundo cultivo a nivel nacional que genera mayor ganancia (Figura 2), con 102 millones de dólares (CIDH, 2003).

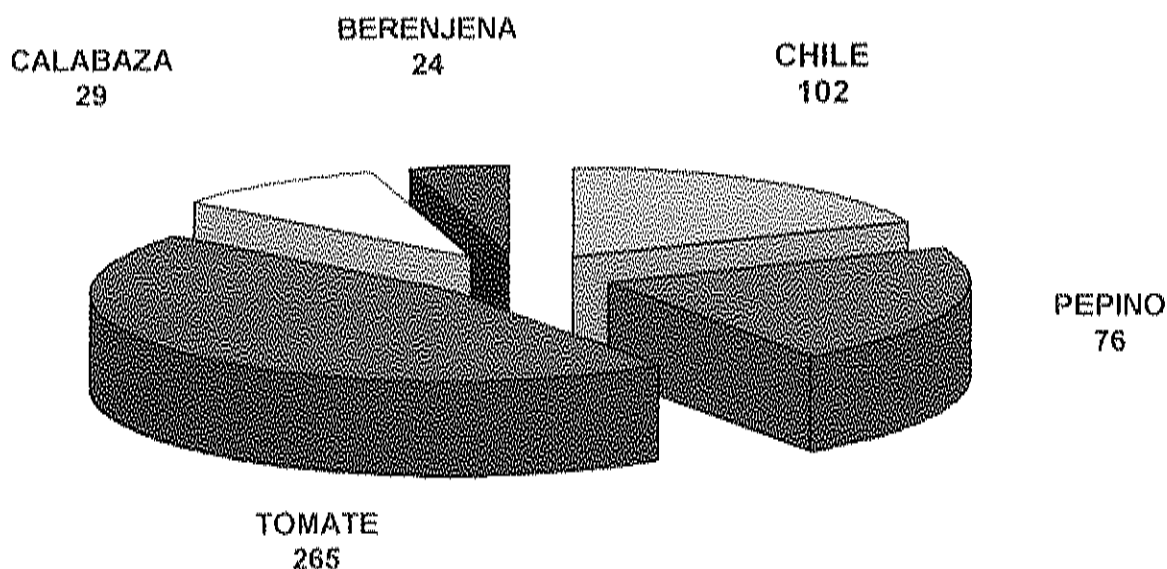


Figura 2. Ganancias en millones de dólares de las principales hortalizas temporada 2002-2003 (CIDH, 2003).

### Composición Química del Fruto de Chile Bell

El chile bell es una importante fuente de vitaminas A, C, B<sub>1</sub>, B<sub>2</sub> (Howard *et al.*, 1994) donde su contenido depende del estado de madurez del fruto, observándose un aumento en el contenido en vitamina C y ácido nicotínico después de la recolección (Nuez *et al.*, 1996, Cuadro 2). El fruto de chile bell, de acuerdo a su contenido de vitamina C, ocupa el 4to lugar y el 16º lugar en el contenido de riboflavina y tiamina, en una clasificación entre 42 frutas y vegetales (Hudson *et al.*, 1985). En los frutos rojos el contenido de ácido ascórbico es de 150 mg/100g tejido fresco (Chaves *et al.*, 2000). Estudios realizados en frutos de chile bell recién cosechados, evaluaron el contenido inicial de ácido ascórbico, riboflavina y tiamina, encontrando valores de 117 mg, 48 µg y 65 µg, respectivamente (Hudson *et al.*, 1985).

En el chile bell la vitamina A no se encuentra disponible en forma directa, sino que esta como provitaminas, las cuales son transformadas en vitamina A en el hígado de los humanos y de los animales. Estas provitaminas son el  $\alpha$  y  $\beta$  caroteno y la criptoxantina. Siendo las más importante el  $\beta$ -caroteno, porque se encuentra en mayor proporción y de cada molécula se obtienen dos de vitamina A, mientras que el  $\alpha$  caroteno y la criptoxantina solo proporcionan una molécula de vitamina A por molécula de provitamina (Nuez *et al.*, 1996). Los contenidos de carotenoides totales en pimientos rojos presentan un incremento muy importante, más de 5 veces al valor inicial en los frutos 100% rojos con 45µg  $\beta$ -caroteno/g tejido fresco, y los amarillos con 18µg  $\beta$ -caroteno/g tejido fresco (Chaves *et al.*, 2000). Así mismo, Howard *et al.* (1994), realizaron un estudio en diferentes cultivares de chile, encontrando que en frutos de chile bell verdes, presentaron de 22.2 – 29.6 µg/100g de  $\alpha$ -caroteno, de 401.8 – 460.1 µg/100g de  $\beta$ -caroteno y de 69.4 – 78.56 µg/100g de proretinol.

Esta hortaliza, también destaca por su alto contenido en vitamina C entre 70 – 300 mg/100g de peso fresco, aunque hay diferencia entre variedades, donde los frutos de color verde generalmente contienen más vitamina C que las de color amarillo (Nuez *et al.*, 1996). Así mismo, Howard *et al.* (1994), cuantificaron el contenido de ácido dehidroascórbico, ácido L-ascórbico y ácido ascórbico encontrando valores de 3.36-7.96, 146.8-137.8 y 141.2-154.5 mg/100g, respectivamente.

Cuadro 2. Composición química y valor nutritivo del fruto de chile bell por 100g de producto comestible.			
Composición	Chile bell verde	Chile bell rojo	Chile bell amarillo
Agua (g)	92.19	92.19	92.02
Energía (kcal)	27	27	27
Proteína (g)	0.89	0.89	1.00
Fibra (g)	1.8	2.0	0.9
Lípidos (g)	0.19	0.19	0.21
Calcio (mg)	9.0	9.0	11.0
Hierro (mg)	0.46	0.46	0.46
Vitamina C (mg)	89.3	190.0	183.5
Tiamina (mg)	0.066	0.066	0.028
Riboflavina (mg)	0.030	0.030	0.025
Niacina (mg)	0.509	0.509	0.809
Carbohidratos (g)	6.43	6.43	6.32
Vitamina A (IU)	632	5700	238
Vitamina E (mg)	0.690	0.690	--

Fuente: USDA, 2005.

La presencia de fitoquímicos, al igual que las vitaminas y provitaminas, en frutas y vegetales han sido recientemente considerados cruciales en la nutrición para la prevención de enfermedades crónicas, tales como el cáncer, enfermedades cardiovasculares y diabetes. Muchos de estos componentes se ha encontrado que proveen una fuerte actividad antioxidante como la vitamina C y E y el  $\beta$ -caroteno presentes en muchos alimentos, encontrando que los frutos de chile bell rojos tienen un contenido de vitamina C de 1.9 mg/g y una actividad antioxidante de 10.8  $\mu$ mol/g (Chu *et al.*, 2002).

En estudios realizados en pimientos morrones (*Capsicum annum* L.), se observó que en los pimientos rojos, el poder antioxidante se ve incrementado al avanzar la maduración de los frutos. En la variedad amarilla, este es superior al rojo en los primeros estadios de desarrollo, pero, prácticamente no tiene cambios al progresar la maduración, llegando a la maduración total con un poder antioxidante inferior al del pimiento rojo (Chaves *et al.*, 2000).

En el chile bell la mayor parte de los azúcares sencillos están representados por la glucosa (90-98%), el resto es sacarosa. La pectina también es un carbohidrato importante y está presente en un 3-7% (Nuez *et al.*, 1996). Así mismo, se han encontrado valores de sólidos solubles totales, en frutos de chile bell cosechados de 5.3-5.6°Brix (Toivonen y Stan, 2004).

Sargent (1998), menciona que los frutos de chile bell color rojo contiene 50% más azúcar que de color verde, así como también 10 veces más vitamina A. De la misma manera, el contenido de vitamina C o ácido ascórbico en frutos de color rojo y amarillo es hasta tres veces mayor en comparación con los chiles de color verde con valores hasta de 190 mg/100g de porción comestible (Mencarelli *et al.*, 1989).

### Almacenamiento

La temperatura y la humedad relativa son conocidos como los factores principales para el control del deterioro fisiológico de los productos hortícolas (Lurie *et al.*, 1986). Los frutos de chile bell son susceptibles al daño por frío, condiciones de almacenamiento mínimas de 7°C (Toivonen y Stan, 2004) para evitar este desorden es necesario mantener los frutos almacenados a temperaturas entre 7 y 10°C, siendo el almacenamiento óptimo los 8 o 9°C, con mínimos síntomas de daño por frío (Ryall y Lipton, 1983).

El daño por frío puede presentarse entre 2 a 4 días cuando se almacenan a 0°C, a los 7 días si se almacenan a 1.1°C, a los 9 días a 4.4°C y en 14 ó 15 días a 5.6 –7.2°C (Salunke y Desai, 1984). La máxima vida de anaquel para los frutos de chile bell almacenados se suponen que es en las condiciones de 50°F y 95% HR, estimando un tiempo de 3 semanas (Sargent, 1998). Sin embargo, se ha reportado que los frutos de chile bell pueden ser almacenados a 4.4°C alrededor de 4 semanas y a 10°C se mantiene en buenas condiciones durante a 16 días mínimo con 98% HR (Salunke y Desai, 1984).

Los frutos de chile bell se deben enfriar lo más rápido posible para reducir pérdidas de agua. Los pimientos almacenados a temperaturas mayores a 7.5°C, pierden más agua y se marchitan. Para una vida de anaquel más prolongada (3-5 semanas), lo mejor es almacenar los frutos a 7.5°C. También, se pueden almacenar por dos semanas a 5°C, lo que reduce pérdidas de agua pero conlleva a la manifestación de daño por frío tras ese período. Entre los síntomas de daño por frío se encuentran picado, pudrición, coloración anormal de la cavidad interna y ablandamiento sin pérdida de agua. Los pimientos maduros o que ya lograron su color son menos sensibles al daño por frío que los pimientos verdes (Cantwell, 2002).

La temperatura óptima para el almacenamiento de frutos de chile bell son de 7.7 a 8.9°C, mientras que frutos a temperaturas entre 11.1 y 12.8°C da como resultado una rápida maduración (Salunke y Desai, 1984).

### Fisiología del Fruto

Los frutos de chile bell usualmente son cosechados en el estado hortícola verde-maduro (Villavicencio *et al.*, 1999), y en poscosecha el proceso de maduración continúa. La maduración se define como el conjunto de cambios producidos en el color, sabor y textura de los frutos, que los convierten en adecuados para el consumo humano. Los fenómenos asociados a la maduración incluyen: cambios en el color, con pérdida de clorofila y aparición de nuevos pigmentos, alteraciones en el sabor, con cambios en la acidez y en el contenido de azúcares y cambios en la textura del fruto. Tanto la maduración como la senescencia de los frutos en las plantas superiores, son procesos claramente programados, es decir, el inicio, forma y duración están marcados genéticamente (Nuez *et al.*, 1996).

La mayor parte de los productos hortícolas al ser cosechados se interrumpe su suministro de agua necesario para su desarrollo físico. El cual en parte es posible, debido al impulso de la expansión celular ejercido por la turgencia (Wills *et al.*, 1998).

### **Respiración**

Los frutos de chile bell son clasificados como no climatéricos, ya que el incremento en la respiración y la producción de etileno durante la maduración es ausente (Villavicencio *et al.*, 1999).



Los frutos del pimiento experimentan un serie de procesos esenciales para el mantenimiento de su actividad vital. La energía necesaria para estos procesos proviene de las sustancias de reserva, que se han ido acumulando antes de su recolección. La respiración es el mecanismo por el cual estas sustancias de reserva se convierten en energía. El oxígeno es utilizado en este proceso y el dióxido de carbono es producido por el fruto. Como resultado de la respiración se presenta (Nuez *et al.*, 1996):

1. Aceleración de la senescencia. Las sustancias de reserva que proporcionan energía se van agotando.
2. La energía liberada en el proceso se utiliza para generar cambios metabólicos.
3. La calidad organoléptica del fruto se ve modificada.
4. La pérdida de materia seca que se transforma en agua o volátiles.

Villavicencio *et al.* (1999), señalan para 13 cultivares de chile bell almacenados a 27°C un rango de respiración de 31 mgCO<sub>2</sub>/kg•h para el cv. Surc Fice hasta 234 mgCO<sub>2</sub>/kg•h para el cv. Tabasco en estado verde maduro, con un comportamiento muy diferente cuando el fruto se encontraba en color rojo maduro con 52.6 y 61.3 mgCO<sub>2</sub>/kg•h, respectivamente.

Considerando la actividad metabólica, los frutos de chile bell se han clasificado como productos de tasas de respiración moderada (Carmona, 2001) al igual que lo reporta Kader (2002) (Cuadro 3). La tasa de respiración de los frutos de chile bell depende de la temperatura y es de 18-20 mL CO<sub>2</sub>/kg•h a 20°C; 5-8 mL CO<sub>2</sub>/kg•h a 10°C; 3-4 mL CO<sub>2</sub>/kg•h a 5°C por lo que la condición de almacenamiento favorece o afecta la vida poscosecha de los frutos. La tasa de respiración de los frutos rojos y verdes es parecida (Cantwell, 2002).

Cuadro 3. Clasificación de los productos hortícolas de acuerdo a sus rangos de respiración		
Clase	Rango a 5°C (mg CO <sub>2</sub> /kg·hr)	Producto
Muy baja	< 5	Frutas, nueces y vegetales secos
Baja	5 – 10	Manzana, naranja, cereza, papaya, piña, apio, repollo, sandía, ajo.
Moderada	10 – 20	Plátano, pepino, mango, nectarina, pera, chile bell, calabaza, tomate.
Alta	20 – 40	Aguacate, fresa, frambuesa, lima, coliflor.
Muy alta	40 – 60	Brócoli, chirimoya, flores cortadas, fruta de la pasión, hoja de lechuga, frijolillo, cebolla verde.
Extremadamente alta	> 60	Espárragos, hongos, maíz dulce, espinacas.

Kader, 2002

### Transpiración

Se le llama transpiración al proceso de evaporación del agua en las plantas, mientras que en los vegetales hace referencia al agua interna que se pierde a través de los estomas, la cutícula o las lenticelas (Salisbury y Ross, 1991), este proceso se considera como el uno de los principales factores mediante el cual se pierde peso en la mayoría de los productos hortícolas (Díaz-Pérez, 1998).

La transpiración es uno de los muchos procesos que afectan de manera comercial y fisiológica el deterioro de las frutas y los vegetales. La desecación resulta de la pérdida de humedad, reduce la apariencia, textura, sabor, peso del fruto, que en conjunto determinan la calidad del fruto y el precio (Ben-Yehoshua, 1987). Se han reportado en la literatura los coeficientes de transpiración para algunos vegetales, sin embargo no aparece el chile bell como uno de los principales (Cuadro 4).

En frutos con una tasa de respiración relativamente baja, el floema puede aportar la mayoría de agua necesaria para el crecimiento y la transpiración, mientras que en frutos que transpiran abundantemente, gran parte del agua debe importarse por el fruto vía xilema. En general, los frutos presentan tasas de transpiración bajas, poseen un número reducido de estomas, cutículas relativamente impermeables y una razón superficie / volumen baja. Los frutos pierden proporcionalmente más agua cuando son pequeños o inmaduros (Azcon-Bieto y Talon, 1993).

Tras la recolección, el fruto pierde agua a través de la transpiración (Lurie *et al.*, 1986). Inicialmente se presenta una disminución de volumen y marchitamiento, cuando la presión de turgencia desciende hasta un valor cero (Wills *et al.*, 1998). Según Kader (1992), cada producto hortícola requiere una condición óptima particular de HR y temperatura de almacenamiento, las cuales en conjunto permitirán prolongar la vida poscosecha.

Lownds *et al.* (1993), observaron que los frutos de chile bell cv. Keystone almacenados a 8°C y HR 75%, la tasa de transpiración registrada fue de 10.86%/día·kPa, mientras que los almacenados a 20°C y HR 75% se registró un valor de 51.82%/día·kPa.

Cuadro 4. Coeficiente de transpiración de algunos vegetales		
Producto	Coeficiente de transpiración (mg/kg-s-Mpa)	Rango de coeficientes reportados en la literatura
Calabaza	223	40-667
Zanahoria	1207	106-3250
Apio	1760	104-3313
Tomate	140	71-365
Papa	25	15-40
Limón	186	139-229
Lechuga	7400	680-8750

Ben-Yehoshua, 1987

## Etileno

El etileno es uno de los componentes orgánicos más sencillos que tienen influencia sobre los procesos fisiológicos de las plantas. El etileno está considerado como la hormona del envejecimiento natural y de la maduración, siendo fisiológicamente activo en mínimas cantidades (menos de 0.1 ppm). De acuerdo con la producción de etileno en frutos de chile bell, este es considerado como de bajo nivel (Cuadro 5) (Kader, 2002).

Generalmente, los niveles de producción de etileno aumentan con la maduración, daños mecánicos sobre el fruto, incidencia de enfermedades, aumento de la temperatura hasta 30°C y estrés hídrico. Por otra parte, los niveles de producción de etileno en los productos hortícolas frescos, se reducen con un almacenamiento a bajas temperaturas y con niveles reducidos de oxígeno (menos del 18%) y/o elevados de dióxido de carbono (más del 2%) alrededor del producto (Nuez *et al.*, 1996).

Aunque no se han demostrado relaciones consistentes entre la capacidad de producción de etileno de un determinado producto y su deterioro, la exposición de la mayor parte de los frutos al etileno acelera su senescencia. La aplicación de etileno en algunos frutos de chile bell es con el fin de incrementar el desarrollo de color del fruto (Villavicencio *et al.*, 1999).

Cuadro 5. Clasificación de productos hortícolas de acuerdo a sus rangos de producción de etileno (C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> )		
Nivel	Rango a 20°C ( $\mu\text{L C}_2\text{H}_4/\text{kg}\cdot\text{hr}$ )	Productos
Muy baja	Menos de 0.1	Espárragos, coliflor, vegetales de raíz, vegetales de hoja, papas.
Baja	0.1-1.0	Pepino, berenjena, chile bell, calabaza, olivo.
Moderada	1.0 – 10.0	Plátano, guayaba, mango, tomate.
Alta	10.0 – 100.0	Manzana, aguacate, nectarina, kiwi, pera, durazno, papaya.
Muy alta	Mas de 100.0	Chirimoya, fruta de la pasión, zapote.

Kader, 2002.

Villavicencio *et al.* (1999), midieron la producción de etileno de frutos de chile bell en dos estados de maduración, encontrando que en el estado verde maduro la producción de etileno fue de  $0.389 \mu\text{L}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{h}^{-1}$ , mientras que en el estado rojo maduro la producción de  $0.092 \mu\text{L}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{h}^{-1}$ , estos datos fueron registrados para la cv. Camelot. En la cv. King Arthur se observó que en el estado verde maduro la producción de etileno fue de  $0.108 \mu\text{L}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{h}^{-1}$ , presentándose un mayor contenido de etileno de  $0.926 \mu\text{L}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{h}^{-1}$  en el estado rojo maduro.

## **Pérdida de Agua**

La calidad poscosecha de los frutos disminuye debido a la pérdida de agua, ya que es la principal causa de deterioro de un producto en almacenamiento (Lownds *et al.*, 1993).

La mayoría de los productos frescos presentan contenidos de agua superiores al 85% y esta se pierde principalmente en estado de vapor, a través de rutas primarias tales como heridas, estomas y cutícula. La tasa de pérdida de agua se encuentra gobernada o modulada, por la presencia de ceras y tricomas en la superficie del producto, su composición química y la relación de área superficial, de tal manera que el crecimiento de estos factores modulantes representa oposición a la pérdida de agua (Carmona, 2001).

Todos los vegetales continúan perdiendo agua después de ser cosechados. Si esta pérdida de agua no es reducida, el producto se marchita, se endurece o se ablandan, lo cual con el tiempo llegar a ser no apto para el consumo (Ryall y Lipton, 1983). Pérdidas de agua significativa se presenta en los tejidos en pocas horas, si predominana una temperatura relativamente alta y una HR baja (Cuadro 6). Sin embargo, aún cuando no se manifiesta el marchitamiento, las pérdidas de agua disminuyen la tendencia de los productos a crujir al ser masticados y aceleran la maduración de algunas frutas. También, producen cambios indeseables en el color, la sensación bucal y la calidad nutritiva de algunas hortalizas (Wills *et al.*, 1998).

La reducción de temperatura tiene efecto sobre todos los factores que regulan el déficit de presión de vapor, mientras que los de resistencia al movimiento de agua son propios y particulares del producto (Carmona, 2001).

La estructura y las condiciones del almacenamiento del fruto tiene una fuerte influencia en la pérdida de agua, pero también hay otras condiciones que afectan esta pérdida, tales como: el contenido de humedad y la temperatura del aire que esta en contacto con el fruto, el movimiento del aire y la presión atmosférica (Ryall y Lypton, 1983).

Cuadro 6. Porcentaje de pérdida de agua en algunas hortalizas en poscosecha			
Cultivo	Temperatura (°C)	Humedad Relativa (%)	Pérdida de peso (% $\text{día}^{-1}\text{mbarwvpd}^{-1}$ )
Lechuga	15	45-65	7.5
Pepino	15	45-65	0.04
Tomate	10	60-75	0.1
Chile bell, verde	10	60-75	0.06
Apio	15	45-65	2.8
Coliflor	0-2	85	1.2
Espárrago	10	60-75	3.6

Ben-Yehoshua, 1987.

La pérdida de agua en un tejido vegetal tiene los siguientes efectos que pueden influir en el metabolismo de la planta (Azcon-Bieto y Talon, 1993):

1. Reducción del potencial hídrico o actividad del agua celular.
2. Disminución de la presión turgente.
3. Concentración de moléculas, a medida que disminuye el volumen celular con la reducción de moléculas.
4. Alteración de las relaciones espaciales en el plasmalema, tonoplasto y membranas de orgánulos, debido a los cambios de volumen.

5. Cambio en la estructura o configuración de las macromoléculas como consecuencia de la eliminación del agua de hidratación o modificación de la estructura de esa agua.

El porcentaje de pérdida de peso permitido para frutos de chile bell es del 7%, es decir, los frutos que se encuentran por arriba de este porcentaje no son considerados como frutos de buena calidad (Ben-Yehoshua, 1987).

La tasa de pérdida de agua depende de varios factores que tienen que ver con el déficit de presión de vapor y que establecen la resistencia a perder agua; es la combinación e interacción entre estos; lo que nos permite entender la dinámica de la pérdida de agua en un producto. El aumento de cada uno de ellos, propicia la pérdida de agua en forma de vapor (Carmona, 2001).

La pérdida de agua en frutos de chile bell es mayor cuando son almacenados a 20°C, llegando a perder hasta un 11% de agua diario, mientras que frutos almacenados a 8°C tienen una pérdida del 2-4% (Lownds *et al.*, 1994). La pérdida de peso en frutos de chile bell va acompañada por la disminución en la firmeza, en el potencial hídrico, en pectina insoluble y un incremento en el contenido de pectina soluble en la pared celular. La pérdida de peso es retardada si se mantiene los frutos de chile bell en una atmósfera saturada de agua (Lurie *et al.*, 1986).

Por otro lado, Díaz-Pérez (1998), encontró que la principal ruta para la pérdida de agua en los frutos de berenjena es el cáliz, así como la relación superficie / volumen. Par chile bell la principal vía es a través de la cutícula.



### Calidad Poscosecha

Los frutos de chile bell están listos para cosecharse si cumplen algunas características como: la medida del fruto, color y firmeza. Los chiles inmaduros tienen más delgadas y blandas las paredes. Los chiles verdes maduro tienen paredes firmes, color verde oscuro brillante (Sargent, 1998).

Los frutos de chile bell de alta calidad son los de color verde oscuro, brillantes y firmes. Su cáliz y tallos deben ser verdes y turgentes. El color con el que comercializan estos frutos depende del estado de madurez, del cultivar y de las preferencias del consumidor. Los principales colores son: verde, rojo, naranja, amarillo, marfil y chocolate-marrón. El color es un buen indicador del estado de madurez del fruto. Existe una gran variabilidad de formas en los frutos de chile bell, pudiendo ser alargados, esféricos, acorazonados, prismáticos, cúbicos, etc. (Ryall y Lipton, 1983).

Los estándares de Estados Unidos específicamente para los frutos de chile bell verdes maduros se clasifican en tres grados: U.S. Fancy, U.S. No. 1, y U.S. No. 2. Los chiles Fancy deben tener mínimamente un diámetro de 3 in y un largo de 3½ in mínimamente. Los chiles clasificados como U.S. No. 1. deben tener un diámetro y un largo de 2½ in como mínimo. U.S. No. 2. no tiene un requerimiento en medidas (Sargent, 1998).

La mayoría de los frutos de chile bell, cambian de verde a amarillo, naranja, rojo o púrpura cuando están completamente maduros. Los frutos de chile bell verdes son cosechados antes de su maduración y usualmente estos son más baratos porque pueden durar más tiempo durante el transporte y tienen mayor vida de anaquel (Harris, 1998).

La mayor parte de las clasificaciones del chile bell, se han hecho precisamente atendiendo la forma del fruto, o a parámetros tales como la relación entre la longitud y el diámetro o la forma de su sección. Entre los defectos originados antes de la recolección se puede destacar: la podredumbre apical, el agrietado apical, concéntrico y radial, las punteaduras, maduración irregular, quemadura solar o asolanado, daños por insectos y pájaros, ablandamientos, etc. (Nuez *et al.*, 1996).

Durante la recolección y manejo en la poscosecha también se pueden producir daños en el fruto, tales como: heridas, pinchazos, abrasiones y contusiones internas debidas a impactos, vibraciones o compresiones. La firmeza esta asociada fundamentalmente con el estado de madurez, donde los frutos que han alcanzado se desarrollo definitivo, pero aún verdes, son los que parecen más firmes y por lo tanto menos sensibles a los daños por manipulación. Como índice de calidad los frutos de chile bell deben tener un color típico de la variedad y con un buen desarrollo de cutícula y que se encuentren libres de defectos, tales como grietas, pudriciones y quemaduras de sol (Cantwell, 2002).

#### Factores que Afectan la Transpiración y la Pérdida de Agua de los Frutos

Para reducir las pérdidas de agua, se pueden recubrir las lenticelas con cera o recolectar los frutos en un estadio de madurez más avanzado. Sin embargo, las posibilidades de reducir las pérdidas de agua por estos métodos son limitadas. Las prácticas más apropiadas para que disminuya la velocidad de pérdida de agua exigen disminuir la capacidad de aire del entorno de retener más agua, este objetivo se logra bajando la temperatura y/o elevando la HR durante el almacenamiento (es decir, reduciendo el DPV entre le producto y el aire circundante) (Wills *et al.*, 1998).

La permanencia del vapor de agua dentro del tejido del fruto es un factor importante para determinar el rango de pérdida de agua del mismo (Maguire *et al.*, 1999). Las propiedades físicas del fruto, tales como: contenido inicial de agua, área superficial, la relación superficie/volumen y la morfología del fruto, pueden afectar la pérdida de peso en frutos de chile bell (Lownds *et al.*, 1993).

### **Internos**

Relación superficie:volumen. Uno de los factores fundamentales en la determinación de las pérdidas de agua es el cociente superficie/volumen. Desde un punto de vista exclusivamente físico, las pérdidas por evaporación son tanto más elevadas cuanto mayor sea la relación superficie/volumen (Wills *et al.*, 1998). Estudios realizados en berenjena, demostraron que la pérdida de agua de estos frutos tiene relación con el tamaño del cáliz. Para ello, Díaz-Pérez (1998), propuso un modelo para calcular la pérdida de agua en frutos de berenjena, en relación con el tamaño del cáliz, con una  $R^2=0.8916$ , donde  $y$ = pérdida de agua,  $x$ = área del cáliz del fruto:  $y = 6.757x + 0.1772$

Naturaleza y estructura de la superficie del fruto. La naturaleza de las superficies y los tejidos inmediatamente subyacentes de las frutas y hortalizas afectan acusadamente a la velocidad de pérdida de agua. Numerosos productos poseen una cubierta cerosa, la cutícula, que ofrece notable resistencia al paso de agua o del vapor de agua (Wills *et al.*, 1998). Se ha encontrado que la cera cuticular de las hojas sirve para inhibir la pérdida de agua y esto conlleva a la disminución de la deshidratación de las células. Esta pérdida de agua incrementa dependiendo de las propiedades que tenga la cutícula (Boyer *et al.*, 1997).

La cutícula sirve como la principal barrera para la pérdida de humedad de los frutos (Lownds *et al.*, 1993). La cutícula es la capa más externa de la epidermis y cumple con las funciones de protección al órgano vegetal del que forma parte. Regula el intercambio de gases, la pérdida de agua por evaporación, la absorción y desorción de sustancias químicas, actúa como barrera física contra microorganismos patógenos, radiaciones ultravioleta y contaminantes (Mendoza y Báez, 1997). Durante la senescencia o la maduración de los frutos incrementa la permeabilidad de la membrana (Lurie y Ben-Yehoshua, 1986). Las cubiertas cerasas con una estructura compleja y ordenada de capas imbricadas ofrecen mayor resistencia a la permeación del agua que las más gruesas, planas y carentes de estructura. En las primeras el vapor de agua se ve obligado a seguir una ruta más difícil para alcanzar la atmósfera. Esta ruta tortuosa y grosor de la capa límite no agrietada, situada sobre la superficie del órgano, puede verse prolongada por los tricomas (vellosidades). Los vegetales de hoja que son frondosos, pierden agua principalmente a través de los estomas. Otros vegetales la pierden a través de las cicatrices de los tallos, lenticelas o a través de las superficies cerasas (Ryall y Lipton, 1983).

Los tricomas ofrecen conformaciones y estructuras muy variadas (en forma de porras, ramificados: mono o multicelulares). Estas "vellosidades" se derivan de la epidermis, situada bajo la cutícula cerasa. Las células epidérmicas están formando estructuras compactas, dejando espacios mínimos entre ellas. La inmensa mayor parte del intercambio de vapor de agua y otros gases (oxígeno, dióxido de carbono) con la atmósfera está controlado, en las hojas, por minúsculos poros denominados estomas. Estos poros están regularmente espaciados en la epidermis. Debajo de los estomas se encuentran las cavidades subestomáticas, que conectan con la red intracelular de aire (Wills *et al.*, 1998).

La cutícula sirve como la principal barrera para la pérdida de humedad de los frutos (Lownds *et al.*, 1993). La cutícula es la capa más externa de la epidermis y cumple con las funciones de protección al órgano vegetal del que forma parte. Regula el intercambio de gases, la pérdida de agua por evaporación, la absorción y desorción de sustancias químicas, actúa como barrera física contra microorganismos patógenos, radiaciones ultravioleta y contaminantes (Mendoza y Báez, 1997). Durante la senescencia o la maduración de los frutos incrementa la permeabilidad de la membrana (Lurie y Ben-Yehoshua, 1986). Las cubiertas cerasas con una estructura compleja y ordenada de capas imbricadas ofrecen mayor resistencia a la permeación del agua que las más gruesas, planas y carentes de estructura. En las primeras el vapor de agua se ve obligado a seguir una ruta más difícil para alcanzar la atmósfera. Esta ruta tortuosa y grosor de la capa límite no agrietada, situada sobre la superficie del órgano, puede verse prolongada por los tricomas (vellosidades). Los vegetales de hoja que son frondosos, pierden agua principalmente a través de los estomas. Otros vegetales la pierden a través de las cicatrices de los tallos, lenticelas o a través de las superficies cerasas (Ryall y Lipton, 1983).

Los tricomas ofrecen conformaciones y estructuras muy variadas (en forma de porras, ramificados: mono o multicelulares). Estas "vellosidades" se derivan de la epidermis, situada bajo la cutícula cerasa. Las células epidérmicas están formando estructuras compactas, dejando espacios mínimos entre ellas. La inmensa mayor parte del intercambio de vapor de agua y otros gases (oxígeno, dióxido de carbono) con la atmósfera está controlado, en las hojas, por minúsculos poros denominados estomas. Estos poros están regularmente espaciados en la epidermis. Debajo de los estomas se encuentran las cavidades subestomáticas, que conectan con la red intracelular de aire (Wills *et al.*, 1998).

La membrana de los frutos de chile bell rojos es más permeable que la de los verdes, ya que la permeabilidad de la membrana del pericarpio incrementa con la senescencia, facilitando así la salida del vapor de agua del fruto (Lurie y Ben-Yehoshua, 1986).

## **Externos**

Daño mecánico. Las lesiones mecánicas pueden acelerar considerablemente las pérdidas de agua sufridas por los tejidos. La abrasión y el magullamiento dañan la organización de la superficie de los tejidos y permiten un flujo gaseoso mucho más rápido a través del área dañada. Los cortes ofrecen aún mayor importancia, puesto que rompen por completo la capa superficial protectora y exponen directamente a la atmósfera el tejido subyacente (Wills *et al.*, 1998). El daño mecánico induce pérdidas de agua a través de heridas en la superficie del producto. Éste se origina básicamente en la compresión o fuerza de una masa de producto sobre los productos que se encuentran en la base, el impacto, que puede darse por choque fruta contra fruta, la vibración que ocurre cuando se transporta fruta o bien cuando la fruta choca contra las paredes del recipiente que lo contenga (Carmona, 2001).

Condiciones de almacenamiento. La temperatura de almacenamiento de frutas y hortalizas es uno de los principales factores que afectan la actividad respiratoria, la maduración y senescencia de los frutos, por lo que se debe procurar mantener la temperatura lo más baja posible sin inducir daños por frío en los tejidos. En términos generales y para la mayoría de los productos hortícolas, por cada 10°C de descenso de la temperatura disminuye la actividad respiratoria de 2 a 4 veces. Un buen manejo de la temperatura es una de las herramientas más importantes para prolongar la vida de los frutos cosechados. Un adecuado manejo puede comenzar con una disminución rápida de la

temperatura de los frutos cosechados en el campo, hasta alcanzar temperaturas comprendidas entre 8 y 10°C, lo que se conoce como preenfriamiento o prerrefrigeración (Nuez *et al.*, 1996). Temperaturas alrededor de los 10°C fomenta la maduración de los frutos de chile bell, mientras que a temperaturas menores de 7.5°C, los frutos son susceptibles al daño por frío. En algunas ocasiones también se puede inducir el daño por frío mediante un almacenamiento muy prolongado a temperatura de 10°C (Wang, 1977). El daño por frío es un desorden fisiológico de mucha importancia económica. La susceptibilidad de los frutos de chile bell de invernadero al daño por frío, depende de su estado de madurez, debido a que los frutos cosechados en el estado verde maduro son menos susceptibles que los cosechados en estado maduro, se ha encontrado que los frutos no presentan estos síntomas cuando son almacenados a DPV de 0.013 y 0.075 kPa durante 3 semanas (Lin *et al.*, 1993).

Aumentar la humedad ambiente y bajar la temperatura de almacenamiento son mecanismos que se utilizan para disminuir la pérdida de peso en los frutos. Posiblemente el estrés hídrico es para los pimientos un desencadenante de su senescencia. En la práctica comercial suele utilizarse para la conservación de los frutos, una humedad relativa del 90% (Nuez *et al.*, 1996). El incremento de la humedad relativa del aire reduce el DPV entre el producto y el aire y, por lo tanto, la cantidad de agua evaporada del producto antes de que se sature el aire de su entorno. Sin embargo, las humedades relativas muy altas (>95%) tienen el inconveniente de favorecer el crecimiento de los hongos. Los frutos maduran mejor a humedades relativas mayores al 90%; ofreciendo un mejor aspecto, turgencia del tejido y una calidad interna (Wills *et al.*, 1998). Frutos de chile bell almacenados en condiciones de 17°C y 85%HR, presentaron una pérdida de peso del alrededor el 4% diario (Lurie *et al.*, 1986).

Déficit de presión de vapor. El aire húmedo es una mezcla de aire seco y vapor de agua. Con el término humedad hacemos referencia al vapor de agua que contiene el aire. La humedad relativa (HR), es el término más conocido para expresar el contenido en agua del aire húmedo y se define como el cociente de la presión de vapor de agua en el aire/presión de vapor de agua a saturación, a la misma temperatura, expresado en %. El aire saturado tiene una humedad relativa del 100%. La diferencia entre la presión de vapor del producto, que es en función de la temperatura y la HRE, y la del aire de su entorno, que es en función de la temperatura y la HR, se denomina déficit de presión de vapor (DPV) (Wills *et al.*, 1998).

La temperatura al igual que la humedad relativa, se consideran como los factores físicos de mayor importancia en la vida poscosecha de las frutas y hortalizas. Actualmente, con la relación entre la temperatura y la HR se puede estimar el déficit de presión de vapor de agua de un sistema (Shibairo *et al.*, 1997), la cual se podrá calcular usando como referencia la saturación de la presión de vapor al 100% y las tablas de saturación que reportan Pearcy *et al.* (1991).

Los cálculos del DPV sirven para comparar las velocidades potenciales relativas de pérdida de agua de un producto en diferentes condiciones de almacenamiento (Wills *et al.*, 1998). Un buen control del DPV, reduce la velocidad de transpiración y mantiene por mayor tiempo el agua en las células y la turgencia en los tejidos (Leonardi *et al.*, 2000).

Movimiento y presión del aire. El movimiento del aire sobre la superficie del producto constituye un factor importante en la determinación de la cuantía de las pérdidas de agua. Para arrastrar el calor almacenado en el producto, se



necesita que el aire circule; pero hay que tener también en cuenta los efectos del movimiento del aire sobre las pérdidas de agua. Siempre existe una capa de aire, de un grosor microscópico, inmóvil, adyacente a la superficie del producto, en la que la presión de vapor de agua se halla aproximadamente en equilibrio con la del producto. Aumentando la velocidad del aire, se reduce el espesor de esa capa límite y aumenta la diferencia de presión de agua en la vecindad de la superficie, incrementando, por tanto, la velocidad de pérdida de agua. Así pues, en una cámara frigorífica, la disminución del movimiento del aire en torno al producto reduce eficazmente la velocidad de pérdida de agua. Por otro lado, una presión de aire reducida, como la que se da durante el enfriamiento al vacío de productos hortícolas o en el transporte aéreo con presurización parcial, aumenta la velocidad de pérdida de agua. El tiempo que el producto permanece bajo condiciones de presión reducida debe, por tanto, minimizarse, a menos que se tomen las medidas oportunas para impedir las pérdidas de agua (Wills *et al.*, 1998). Si el movimiento del aire es muy rápido y la HR del mismo es baja, al momento de pasar por la superficie del fruto, la pérdida de humedad será más rápida, ya que el aire tiende a saturarse al momento de tocar al fruto. Esto es debido al incremento del DPV entre el aire y el fruto (Ryal y Lipton, 1983).

### Variables Hídricas Asociadas con la Calidad del Fruto

#### **Contenido Relativo de Agua (CRA)**

Es la cantidad de agua que los tejidos tienen, en relación con la máxima cantidad que pueden almacenar (Larqué y Trejo, 1990). También, se define como la cantidad de agua en la muestra original como un porcentaje del agua en el tejido completamente hidratado (Salisbury y Ross, 1994), es decir, el CRA esta en función de la relación entre el peso fresco, hidratado y seco de una muestra (Hsiao, 1990).

El contenido de agua, esta determinado por las características de capacitancia de los tejidos y el balance entre el movimiento de agua dentro y fuera del vegetal. Este parámetro esta interrelacionado con el potencial hídrico, generalmente, ambos varían simultáneamente, es decir, si el contenido de agua de un tejido disminuye debido a una tasa alta de transpiración, el potencial hídrico del tejido también disminuye (Larqué y Trejo, 1990)

### **Estatus hídrico**

El estado hídrico de un tejido representa las condiciones que guarda el agua en función de sus requerimientos fisiológicos, y se expresa como contenido de agua y potencial hídrico (Hsiao, 1990). Los niveles elevados de contenido hídrico y alto potencial hídrico, denotan frutos firmes y turgentes (Herppich *et al.*, 2000). La presión hidrostática interna dentro de las células (turgor) puede ser considerado como un componente mecánico del potencial hídrico total y contribuye a la textura (De Belie *et al.*, 2000). El estatus hídrico de los frutos u órganos de plantas puede ser caracterizado por el potencial hídrico, el cual representa la suma del potencial de turgencia y el potencial de solutos (Pomper y Breen, 1997).

Uno de los procesos fisiológicos más sensibles al déficit de agua es el crecimiento celular, de manera que la sequía reduce la expansión y el área foliar. Cuando el déficit es severo, se acelera la senescencia de las hojas maduras, además la fotosíntesis y la transpiración se abaten debido a la reducción de la turgencia, al cierre estomático y al bloqueo a la difusión de CO<sub>2</sub> hacia el mesófilo (Parra *et al.*, 1999).

Se ha señalado que el término estrés hídrico denota una situación en la cual una deficiencia de agua es lo suficientemente grande como para ser medible por sus efectos ya sea sobre el árbol, la planta o sus partes (Lugo *et al.*, 1996).

Durante poscosecha el potencial de agua de los frutos va decreciendo. Las pérdidas de agua producidas en frutos de chile bell verdes o rojos, en una semana bajo condiciones de 17°C y 85% de humedad relativa, pueden cifrarse en un 4% con respecto al peso inicial. También, se produce en dichas condiciones un progresivo ablandamiento de los frutos, aunque la firmeza inicial en el momento de la recolección, es mayor en los chile bell verdes que en los rojos debido al estado de madurez (Nuez *et al.*, 1996).

El potencial de turgencia es uno de los componentes principales del potencial de agua. El otro es el potencial osmótico, que es negativo con respecto al agua pura, esto debido a que los productos disueltos, sean orgánicos o inorgánicos disminuyen la energía libre del agua, debido a la formación de puentes de hidrógeno (Wills *et al.*, 1998).

Estudios realizados en pepino almacenado a diferentes DPV mostraron durante los primeros cuatro días de almacenamiento, una clara diferencia entre los frutos testigo y los encerados, en los potenciales hídrico, osmótico y de presión. Así mismo, los frutos encerados y almacenados a valores bajos de DPV presentaron potenciales hídrico, osmótico y de presión más altos indicando frutos con mayor contenido de agua y mayor turgencia (Muy *et al.*, 2004b).

Potencial hídrico. El potencial hídrico ( $\Psi_w$ ) es la actividad física o disponibilidad fisicoquímica que tiene el agua para participar el agua en las funciones de las plantas y determinar la tenencia o potencial de transferencia del agua neta entro de un sistema (Spomer, 1985). Por lo tanto un valor del  $\Psi_w$  cercano al cero indica frescura y turgencia en el tejido, mientras que su reducción denota un efecto nocivo en la calidad de los productos frescos (Herppich *et al.*, 2000).

La cantidad de agua presente en un sistema es, para algunos fines, una medida del estado hídrico de la planta. El potencial hídrico de la planta, se utiliza también para expresar el estado energético del agua en células y tejidos vegetales. El potencial hídrico consta de tres componentes (Azcon-Bieto y Talon, 1993):

$$\Psi_w = \psi_p + \psi_s + \psi_m$$

Donde:

$\psi_p$  = potencial de presión

$\psi_s$  = potencial osmótico o de solutos

$\psi_m$  = potencial mátrico

Para entender la naturaleza y contribución de los diferentes componentes del potencial hídrico se considera que una célula adulta consta de tres fases distintas: una pared elástica, el citoplasma con el núcleo y los orgánulos y, por último una vacuola central que contiene una solución diluida de azúcares, iones, ácidos orgánicos, etc. La vacuola llega a ocupar en la célula entre el 80 y 90% del volumen total de la célula, la cual se encuentra rodeada por el tonoplasto, que es también un membrana semipermeable. Por lo tanto, bajo estas circunstancias se considera que los intercambios de agua celular están controlados por la vacuola y, que además la célula parenquimática madura se

comporta como un osmómetro. En tal situación se desprecia la contribución de la matriz, es decir, se considera que el potencial mátrico es igual a cero por lo tanto el potencial hídrico queda de la siguiente forma (Azcon-Bieto y Talon, 1993):

$$\Psi_w = \psi_p + \psi_s$$

El potencial hídrico en frutos de chile bell almacenados a 17°C y 85%HR disminuyó en el transcurso de 3 semanas, ya que su potencial hídrico inicial fue de -0.5 MPa y al final del experimento mostró un potencial de -0.9 MPa (Lurie *et al.*, 1986).

Estudios realizados en zarzamora cv. Cheyenne se observó que la suspensión del riego ocasionó un descenso rápido del potencial hídrico del suelo a -0.85 MPa en contraste al tratamiento con riego, en donde el potencial se mantuvo alto, la marchitez foliar se observó cuando el potencial hídrico bajo (Parra *et al.*, 1999).

Muy *et al.*, (2004a) observaron que los frutos de mango testigos almacenados por 9 días en condiciones extremas de baja humedad relativa (DPV= 1.52 kPa), alcanzaron valores de  $\Psi_w$  de -2.8 MPa, mientras que los frutos almacenados en DPV's de 1.14 y 0.22 kPa, los valores de  $\Psi_w$  fueron de -2.5 y -2.0 MPa, respectivamente.

En hojas de frijol con un contenido de humedad cercano al 100% se reportó un potencial de agua igual a -0.6MPa, mientras que en la misma hoja, el potencial de agua disminuye hasta -1.2MPa cuando fueron expuestos a un 20% de agua (Costa *et al.*, 2000).

Potencial osmótico. Este potencial está determinado por la concentración de sustancias osmóticamente activas en la vacuola. En la célula vegetal, el potencial osmótico posee valores negativos, que varían con el volumen celular, siendo más próximo a cero en células totalmente hidratadas que en las deshidratadas (Azcon-Bieto y Talon, 1993).

Este potencial se basa en el cambio de las propiedades físicas y químicas del agua. La presencia de solutos en la célula vegetal tiene como consecuencias que se ejerza un potencial osmótico. El incremento en la concentración de los solutos eleva el potencial osmótico (Larqué y Trejo, 1990).

Algunos autores, mencionan que el ajuste osmótico se puede definir como la disminución pronunciada en el potencial osmótico, explicando esta que esta disminución se debe por la concentración de solutos que se presenta en la planta o fruto debido a una deshidratación (Mills *et al.*, 1996).

Un mecanismo que contribuye a la resistencia a la sequía es el ajuste osmótico, el cual algunos autores definen como habilidad de las plantas para acumular solutos activamente ante un déficit hídrico. Este mecanismo permite mantener un potencial de turgencia alto, a pesar del descenso en el potencial hídrico, lo que puede traer como consecuencia que la apertura del estoma, la expansión foliar, la transpiración y la fotosíntesis se mantengan funcionando por más tiempo (Parra *et al.*, 1999). El ajuste osmótico para mantener el turgor de la célula positivo se atribuye a la síntesis y absorción de sustancias osmóticamente activas, tales como cationes inorgánicos, ácidos orgánicos, aminoácidos, sales y azúcares (Pomper y Breen, 1997).

Estudios realizados en zanahoria demostraron que los niveles de sacarosa y hexosas son los que determinan en su mayoría el potencial osmótico en este fruto, reportando cambios considerables durante su almacenamiento, con un valor de  $-1.3\text{MPa}$  a  $-1.7\text{MPa}$ , cuando estas se encontraban almacenadas por 21 días a  $13^{\circ}\text{C}$  (Shibairo *et al.*, 1997).

Potencial de presión. Cuando el agua entra en la célula, aumenta el volumen vacuolar y se ejerce una presión, denominada presión de turgencia, sobre las paredes celulares. Al mismo tiempo, se desarrolla en dirección opuesta una presión igual a la de turgencia, es decir, desde las paredes al interior celular. Esta última presión, denominada presión de pared, actúa como una presión hidrostática, aumenta el estado energético del agua en la célula y representa el potencial de presión celular (Azcon-Bieto y Talon, 1993). El incremento de la elasticidad en las paredes celulares es un mecanismo pasivo, el cual permite la disminución del volumen celular mediante la deshidratación, bajando así el potencial de presión y por lo tanto hay una disminución del potencial hídrico (Pomper y Breen, 1997).

El potencial de presión adquiere valores positivos siempre que la vacuola ejerza una presión sobre las paredes circundantes. A medida que se pierde el agua de la célula, la vacuola se contrae progresivamente, con una caída en la turgencia celular y por lo tanto el potencial de presión se hace cero en una etapa denominada plásmolisis incipiente, en la cual la vacuola cesa de presionar sobre las paredes (Azcon-Bieto y Talon, 1993). La turgencia celular es indispensable para el crecimiento de la planta. El potencial de presión es igual al potencial hídrico menos el potencial osmótico, la acumulación de solutos en las células y bajos valores de potencial osmótico, mantienen el potencial de presión (Pomper y Breen, 1997).

Para frutos de tomate en dos estados de madurez fisiológica y comercial, se han reportado valores de potencial de presión de 0.14MPa y 0.03MPa, respectivamente, los cuales se encuentran asociados a la presencia de solutos en el tejido. En las células del pericarpio de estos mismos frutos, se registraron valores de  $\psi_p = 0$  cuando los frutos fueron almacenados por 12 días a 20°C, relacionando este valor con la pérdida de firmeza en el fruto (Shackel *et al.*, 1991).

En el caso de champiñones se han reportado cambios considerables en el  $\psi_p$ , en donde factores como la temperatura (25°C) aceleraron la pérdida de turgencia en los tejidos, observándose reducciones hasta de -0.5MPa, sin haber presentado plasmólisis en el tejido (Breecher *et al.*, 2001).

### Modelos Matemáticos que Estiman Variables de Calidad en Frutas y Hortalizas

Los modelos matemáticos son herramientas muy útiles que nos permiten calcular o predecir una variable en función de una o más variables fáciles de medir. En relación a parámetros de calidad en frutas y hortalizas se han encontrado algunos modelos que nos ayudan a predecir el comportamiento de una variable, pero son pocos los modelos que relacionan las condiciones de almacenamiento como son DPV y el tiempo para conocer o predecir la calidad del fruto.



Cook y Papendick (1978), obtuvieron un modelo que ayuda a calcular el potencial de agua en frutillas (cereza, fresa y frambuesa) en base al contenido de sólidos solubles totales (°Brix), con un excelente coeficiente de regresión de  $r^2 = 0.98$ , con la siguiente ecuación:  $\Psi_w = 7.79 - 2.14^\circ\text{Brix}$

Lownds *et al.* (1993), mediante un regresión lineal, obtuvieron ecuaciones para calcular la pérdida de peso de frutos de chile bell cv. Keystone almacenados a 8, 14 y 20°C, con HR 75%: %pp =  $0.43 + 1.49^*(\text{día})$ ;  $4.13 + 7.91^*(\text{día})$  y  $5.48 + 6.62^*(\text{día})$ , respectivamente con una  $r^2 = 0.999$ .

Behboudian *et al.* (1994), relacionó mediante una regresión lineal el potencial hídrico del xilema ( $\Psi_x = \text{MPa}$ ) y el potencial hídrico de la hoja ( $\Psi_l = \text{MPa}$ ), existentes en las plantas de peras asiáticas con una  $r^2 = 0.81$ :  $\Psi_x = 1.05 + 1.14^*\Psi_l$ .

Landrigan *et al.* (1996), obtuvieron un modelo matemático, en el cual mediante una regresión lineal relacionaron el  $\Psi_w$  (MPa) y el CRA (%), los cuales fueron medidos en frutos de rambutan almacenados a un DPV de (20°C y HR 60%), con una  $r^2 = 0.455$ :  $\Psi_w = 0.397 \text{ CRA} - 45.42$ .

Díaz-Pérez (1998) propuso un modelo para calcular la pérdida de agua en frutos de berenjena, en relación con el tamaño del calix, con la ecuación :  $y = 6.757x + 0.1772$ , con una  $R^2=0.8916$ , donde  $y$ = pérdida de agua,  $x$ = área del cáliz del fruto.

Varoquaux *et al.*, (1999) propusieron un modelo para calcular la respiración (RR) del hongo *Agaricus bisporus* L. en base a la temperatura a la que se encuentre con una  $R^2=0.998$ :  $\log(\text{RR}) = 0.046 T (^{\circ}\text{C}) - 0.471$ .

Schouten *et al.* (2002), estimó los parámetros de ecuaciones establecidas para predecir la calidad de fresas y la calidad de pepino basado en su mecanismo fisiológico y el cambio de color de estos frutos.

Lui y Kushalappa (2003), propusieron un modelo para predecir la infección en papa por *Pythium ultimum* con una  $R^2=99\%$ :  $PVD = -0.00398 + 0.02934S - 0.01172TS - 0.00035453S^2 + 0.00013513TS^2 + 0.00114T^2S - 0.00000958T^2S^2 - 2.78347E-18T^2S^3 - 0.0000233T^3S + 2.639336E-9T^3S^3$

Muy *et al.* (2004a), obtuvieron dos modelos de regresión para estimar la pérdida de peso (%pp) frutos de mango cv Keitt, en función de sus condiciones de almacenamiento (DPV), donde mangos sin encerar:  $\%pp = 0.6033*(DPV) + 0.1261$  con una  $R^2=0.914$ , y para frutos encerados:  $\%pp = 0.42730*(DPV) + 0.0833$  con una  $R^2=0.901$ , donde el uso de ceras permitió una ecuación con un menor valor en la pendiente, que indica menor pérdida de peso durante el almacenamiento de los frutos.

Modelos similares para pérdida de peso se obtuvieron también para frutos de pepino en función de sus condiciones de almacenamiento (DPV, MPa) mediante una regresión lineal, siendo para los frutos sin encerar la ecuación:  $\%pp = 0.6747(DPV) + 0.1829$  con una  $R^2=0.8334$  y para frutos encerados:  $\%pp = 0.5762(DPV) + 0.0204$  con una  $R^2=0.8304$  (Muy *et al.*, 2004b).

Con el fin de optimizar procesos industriales para el procesamiento de alimentos se ha aplicado la metodología de superficie de respuesta, tal es el caso de la búsqueda de las mejores condiciones de pelado químico y termofísico de espárragos. Para este estudio se evaluó el efecto que las variables concentración del baño de NaOH, temperatura del baño y tiempo de pelado tienen sobre el rendimiento de la operación y calidad del pelado. En este

estudio se utilizó un modelo experimental de Box y Behnken, mediante este modelo y la superposición de las gráficas de contornos generadas encontraron que la mejor calidad de pelado y más alto rendimiento se registró en condiciones de proceso de baja condición de NaOH (20.56 – 21.6 g/kg ), corto tiempo (34.5 –39 s) y alta temperatura (83.91-84.75°C), así mismo llegaron a la conclusión que los modelos estadísticos de superficie de respuesta obtenidos para el pelado químico fueron apropiados (Garrote *et al.*, 1998)

Gómez *et al.* (2003), obtuvieron mediante la metodología de superficie de respuesta un modelo ajustados para predecir la pérdida de peso en la deshidratación osmótica en cilindros de melón, con un  $R^2 = 87.6\%$ : Pérdida de peso (g) =  $0.15 + 0.21A + 0.006*B + 0.42C + 0.024C^2 - 0.25AB + 0.23AC$ . Donde: A = temperatura, °C, B = Concentración, °Brix, C = Tiempo de deshidratación, min. Así mismo, calcularon las condiciones de optimización del proceso con los siguientes valores: Temperatura = 39.35 – 40.8 °C, concentración = 41.6 °Brix, tiempo de deshidratación = 122.7 – 126.6 min.

## MATERIALES Y MÉTODOS

### Material Vegetal y Tratamiento

Sesenta frutos de chile bell color verde variedad Comandante, fueron proporcionados por el empaque el Chaparral, los cuales se almacenaron en cinco diferentes condiciones de DPV 0.026, 0.103, 0.351, 0.678 y 1.186 kPa, en períodos de 11 días, después de ser cosechados.

Las condiciones de almacenamiento (DPV) se generaron en contenedores de acero inoxidable sellados herméticamente, utilizando agua para generar los DPV de 0.026 y 0.103 kPa a 5 y 10°C, respectivamente, para el DPV 0.351 kPa se dejaron los frutos a temperatura ambiente, y para los DPV altos, se utilizó contenedores de acero inoxidable sellados herméticamente con cama de cal de 15cm de ancho, a temperatura de 20 y 25°C, respectivamente.

El muestreo se realizó en frutos ya marcados y se evaluaron cada 0, 1, 5, 9 y 11 días. En todos los experimentos se realizó el muestreo en los mismos tiempos.

## Análisis Físicos

### **Pérdida de Peso**

Los frutos fueron pesados individualmente en un Balanza digital AND GF-2000. Las lecturas se hicieron cada 72 horas (Díaz-Pérez, 1998). La pérdida de peso se expresó en porcentaje diario y acumulativo, utilizando la siguiente fórmula:

$$\% \text{Pérdida de peso} = \frac{P_{\text{inicial}} - P_{\text{final}}}{P_{\text{inicial}}} \times 100$$

### **Firmeza**

La firmeza se determinó por compresión aplicando una fuerza de 2 Kg-f en la parte ecuatorial del fruto, mediante una placa de 50mm de diámetro colocada en un penetrómetro Chatillon Digital (DFS-50) adaptado a una base Chatillon TCD 200. Los resultados se expresaron como milímetros de deformación alcanzados en cada fruto al aplicar la fuerza (Bourne, 1980).

## Análisis Químico

### **Sólidos Solubles Totales (°Brix)**

Se evaluó de acuerdo a las metodologías propuestas por la AOAC (1998). Los sólidos solubles se midieron del extracto utilizado para el potencial osmótico, utilizando el equipo Mettler Toledo RE Refractometer con temperatura de 25°C. Los resultados del contenido de sólidos solubles totales se expresaron como °Brix.

## Análisis Fisicoquímico

### **Potencial Hídrico**

Se utilizó el método de volumen constante (Shibairo *et al.*, 1997). Se pesaron tiras de tejido de chile bell de 5 mm de ancho y 4 cm de longitud, estos fueron pesados previamente y colocados en soluciones de sacarosa de distintas molalidades (0.05, 0.15, 0.3 y 0.8). A estas soluciones se les determinó el valor de su potencial osmótico mediante la ecuación  $\psi_s = -C_iRT$ ; donde  $C_i$  es la concentración molal de la sacarosa,  $R$  es la constante de los gases y  $T$  la temperatura (K) en la cual no hubo ganancia ni pérdida de peso. En estas soluciones, el potencial de presión es igual a cero, y por lo tanto el  $\Psi_w = \psi_s$ . Las muestras se dejaron en reposo en las soluciones durante 3 horas, después fueron retiradas, secando el excedente de solución de la superficie y se registró el peso. Posteriormente se graficó el valor de  $\psi_s$  vs el peso ganado o perdido. La muestra en donde no se ganó o perdió peso a una concentración de sacarosa conocida, correspondió a su potencial hídrico (Salisbury y Ross, 1994).

### **Potencial Osmótico**

Para determinar este valor se utilizó un osmómetro de presión de vapor Wescor modelo 5520 de acuerdo a la metodología propuesta por Turner (1981). Se colocaron 10  $\mu$ ml de savia del fruto en un disco de papel filtro de 0.32m<sup>2</sup>, instalados previamente en la cámara de muestra del equipo. La savia se obtuvo de trozos de fruto de chile bell congelados a -20°C y posteriormente descongelados a temperatura ambiente, para romper las membranas celulares

y llevar el potencial de turgencia a cero. El equipo fue calibrado previamente con soluciones de potencial osmótico estándar de 290, 1000 y 100 mmol/kg de NaCl (de acuerdo al orden de calibración).

Los resultados obtenidos fueron en mmol/kg. La conversión de molalidad a potencial osmótico se llevó considerando la ecuación de Van't Hoff:  $\psi_s = -CiRT$  (Salisbury y Ross, 1994).

### **Potencial de Presión**

Esta variable se calculó utilizando la ecuación  $\Psi_w = \psi_s + \psi_p$  (Turner, 1981), despejando se obtiene este valor por la diferencia del potencial hídrico y el osmótico ( $\psi_p = \Psi_w - \psi_s$ ).

### **Contenido Relativo de Agua (CRA)**

Se determinó de acuerdo a la metodología de Pomper y Breen (1997), con algunas modificaciones. Se cortaron con un sacabocados discos de tejido vegetal con un diámetro de 20mm. Posteriormente se pesaron en una balanza digital, registrándose como peso fresco (**pf**). Después los discos fueron colocados en vasos de precipitado con agua destilada a temperatura ambiente y se dejarán saturar por un período de 3 horas (para el caso de frutos de chile bell, en este tiempo logra absorber la mayor cantidad de agua), transcurrido el tiempo, los discos se sacaron del vaso eliminando el exceso de agua de la superficie con papel secante y se pesaron de nuevo registrando este valor como peso turgente (**pt**). Por último, los discos se dejaron secar en una estufa a 75°C durante 48h y fueron pesados registrándose el valor como peso seco (**ps**).

El contenido relativo de agua se expresó en porcentaje y de se determinó mediante la siguiente ecuación:

$$\% \text{ CRA} = \frac{\text{pf} - \text{ps}}{\text{pt} - \text{ps}} \times 100$$

### Análisis Histológico

#### **Microtécnia**

Fijación. Se colocaron cuadros pequeños del pericarpio del frutos de chile bell, en frascos con la solución fijadora FAA (formaldehído, alcohol y agua) la cual se forma mezclando 50% etanol + 5% ácido acético glacial + 10% formaldehído + 35% agua, cubriendo completamente el tejido. Las muestras se mantuvieron en esas condiciones por un tiempo aproximado de 5 meses.

Deshidratación. Se lavaron con agua potable las muestras contenidas en fijador FAA, después se deshidrataron los tejidos mediante cambios de alcoholes graduados, xileno y parafina. Los cambios de solventes se realizaron cada 6 horas y la parafina cada 12 horas.

Inclusión en parafina. Los tejidos se colocaron en bandejitas de aluminio (5x10cm) con parafina fundida y orientaron en el plano deseado. Una vez solidificada la parafina, se cortaron bloques, conteniendo las muestras y se conservaron en un lugar fresco.



Corte y montaje. Los bloques de parafina con las muestras de tejido se montaron sobre bases de madera para realizar los cortes anatómicos a 10µm de grosor, usando para ello un micrótopo rotatorio ERMA Optical Works Tokio 422. Una vez obtenido los cortes, se seleccionaron y se montaron sobre portaobjetos con adhesivo de Haupt (1% de gelatina + 13% de glicerol + 2% de fenol en agua) y unas gotas de formalina al 10%. El tejido se extendió en una plancha Slide Warmer C.S.Y.E a 45°C. Los portaobjetos se dejaron escurriendo aproximadamente 30 minutos y después se colocaron en una plancha a 45°C durante 24 horas.

Remoción de parafina y tinción. La parafina se removió del tejido colocando los cortes en tres cambios de xileno al 100% (cuatro minutos en cada cambio). Posteriormente se hidrataron parcialmente, pasando los cortes a etanol al 100%, 96%, 70% y 50%, con una duración de cuatro minutos en cada concentración. Los cortes sin parafina y parcialmente hidratados se colocaron en safranina saturada (0.05% en agua) durante 30 minutos a 45°C. Después, los cortes se lavaron en agua y se deshidrataron, pasándolos a etanol al 50%, 70%, 96% y 100% cuatro minutos en cada concentración. Enseguida se hizo la tinción con verde fijo (0.12% en etano al 96%), para ellos se sumergieron las muestras en dicha solución durante 5 segundos. Después, los tejidos se colocaron en una mezcla de xileno 100% + alcohol 100% 1:1 V/V y luego se pasaron a xileno 100% (dos cambios de cuatro minutos cada uno). Finalmente, los tejidos se montaron en bálsamo de Canadá colocando un cubreobjeto de manera permanente.

## Métodos Estadísticos

### Diseño de experimentos

Se utilizó un diseño central compuesto rotable y ortogonal bajo la metodología de superficie de respuesta (MSR). Para lo cual, se siguió un proceso en diferentes combinaciones de los niveles de los factores controlables (diseño experimental), analizando matemáticamente el comportamiento de la respuesta predicha, por medio del modelo seleccionado. Con los modelos obtenidos para cada variable de respuesta se localizaron las mejores condiciones de operación del proceso (optimización).

La MSR proporcionó un modelo de regresión y al mismo tiempo estableció los niveles óptimos de las variables para obtener la mejor condición de almacenamiento. Los niveles de las variables se definieron de acuerdo a la información bibliográfica y ensayos preliminares que se realizaron como se indica en el Cuadro 7, utilizando un valor de alfa de 1.4142 (Myers, 1971; Gutiérrez y de la Vara, 2003 ).

Cuadro 7. Niveles reales de variación de las variables independientes y sus valores codificados estudiadas en las condiciones de almacenamiento					
Variables	Codificación				
	-1.4142	-1	0	+1	+1.4142
Tiempo (días)	0	1	5	9	11
DPV (KPa)	0.026	0.103	0.351	0.678	1.186

El número de experimentos fue establecido de acuerdo a las especificaciones de un diseño central, compuesto, de segundo orden con dos variables, con arreglo genérico y matriz sustituida (Cuadros 8 y 9). El diseño de experimentos planteado está compuesto por 13 corridas, de los cuales 4 son factoriales  $2^k$ , cuatro axiales y cinco centrales (Figura 3). Para el análisis de los resultados se utilizaron el programa estadístico Minitab 14.1 (2004).

Cuadro 8. Matriz sustituida de los niveles estudiados en las condiciones de almacenamiento.		
Tratamiento	Tiempo (Días)	DPV (KPa)
1	1	0.103
2	9	0.103
3	1	0.678
4	9	0.678
5	0	0.351
6	11	0.351
7	0	0.026
8	0	1.186
9	0	0.351
10	0	0.351
11	0	0.351
12	0	0.351
13	0	0.351

Cuadro 9. Arreglo codificado de un diseño central, compuesto rotable para dos variables.

Tratamiento	X <sub>1</sub>	X <sub>2</sub>
1	-1	-1
2	+1	-1
3	-1	+1
4	+1	+1
5	-1.4142	0
6	1.4142	0
7	5	-1.4142
8	5	1.4142
9	5	0
10	5	0
11	5	0
12	5	0
13	5	0

### Optimización

De los resultados obtenidos se seleccionaron las repuestas que se consideraron como limitantes de la calidad del fruto, estas se agruparon en variables físicas (pérdida de peso, firmeza y contenido relativo de agua) e hídricas (potencial hídrico, potencial osmótico y potencial de presión). Se optimizaron las condiciones de almacenamiento mediante la metodología de sobreposición de superficies y por el método de deseabilidad (Meuser y Van Lenguerich, 1983).

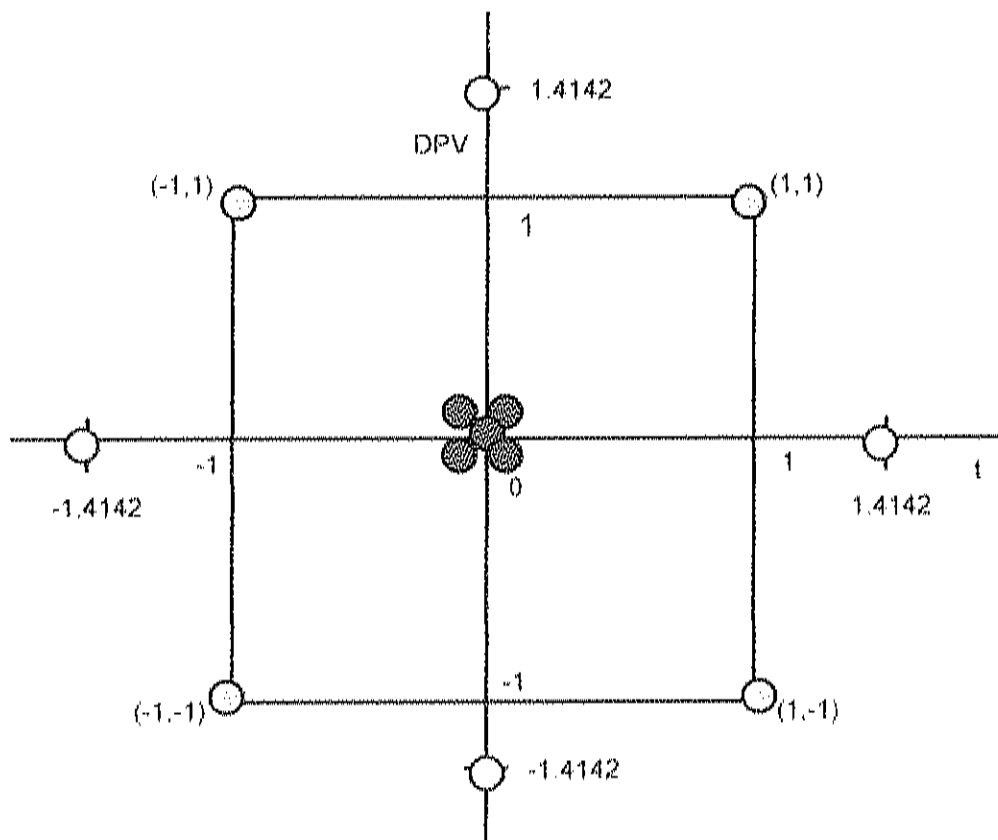


Figura 3. Gráfica representativa del muestreo y código de datos de un diseño central compuesto  $2^k$ .

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### Pérdida de Peso

En los frutos de chile bell almacenados a distintas condiciones de déficit de presión de vapor (DPV), el análisis estadístico para estas variables mostró que todos los coeficientes estimados de la regresión fueron significativos, con un coeficiente de determinación múltiple igual a  $R^2=92.9$  y con ajuste de  $R^2=91.1\%$  (Cuadro 10), lo que corresponde a un buen modelo de regresión.

Cuadro 10. Análisis de regresión para la variable pérdida de peso en frutos de chile bell.				
Términos	Coficiente	SE coeficiente	T	P
Constante	2.4126	0.1799	13.414	0.000
Tiempo	1.2814	0.1422	9.012	0.000
DPV	1.6840	0.1422	11.843	0.000
Tiempo*Tiempo	-0.3349	0.1525	-2.196	0.040
DPV*DPV	0.3495	0.1525	2.292	0.033
Tiempo*DPV	1.0650	0.2011	5.296	0.000
$s = 0.5688$ $R^2 = 92.9\%$ $R^2$ (ajustada) = 91.1%				

$s$  = desviación estándar, SE = error estándar, T = estadístico T de Student, P = valor P,  $R^2$  = coeficiente de determinación múltiple.

El análisis de varianza se refiere a los componentes lineales, cuadráticos y de interacción en el modelo de regresión. Así mismo, se proporciona la prueba de ajuste del modelo (Cuadro 11). En este se encontró diferencia significativa en todos los términos que componen a la regresión, no así para la falta de ajuste ( $P=0.127$ ), lo que indica esto último, que el modelo de segundo orden es una aproximación adecuada a la superficie de respuesta real. Así mismo, se obtuvieron los coeficientes del modelo en términos reales de la regresión (Cuadro 12).

Cuadro 11. Análisis de varianza de la regresión de pérdida de peso en frutos de chile bell.

Efectos	GL	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
Regresión	5	84.467	84.467	16.8934	52.22	0.000
Lineal	2	71.645	71.645	35.8224	110.73	0.000
Cuadrático	2	3.748	3.748	1.8741	5.79	0.010
Interacción	1	9.074	9.074	9.0738	28.05	0.000
Error residual	20	6.470	6.470	0.3235		
Falta de ajuste	3	1.800	1.800	0.6001	2.18	0.127
Error puro	17	4.670	4.670	0.2747		
Total	25	90.937				

GL= grados de libertad, SS= suma de cuadrados, MS= Cuadrado medio, F= estadístico F, P= valor P

Cuadro 12. Coeficientes del modelo en términos reales de la regresión para frutos de chile bell.

Términos	Coeficientes
Constante	2.4126
Tiempo	1.2814
DPV	1.6840
Tiempo*Tiempo	-0.3349
DPV*DPV	0.3495
Tiempo*DPV	1.0650

A partir del Cuadro 12 y basados en las significancias que aparecen en el Cuadro 11, expresado en las siguientes unidades: Pp (pérdida de peso) = %, t (tiempo) = días y DPV (déficit de presión de vapor) = kPa; se construyó el modelo de regresión estimado:

$$Pp = 2.4126 + 1.2814t + 1.684DPV - 0.3349t^2 + 0.3495DPV^2 + 1.065 t^*DPV$$

Con el modelo antes señalado, es posible determinar de forma matemática la pérdida de peso del chile bell, dado el tiempo y la condición de almacenamiento (DPV) a partir del manejo poscosecha que ese utilice para el fruto.

La gráfica de la superficie de respuesta para la pérdida de peso en función a DPV y tiempo, presenta un comportamiento tipo silla, (Figura 4), la pérdida de peso esta asociada al DPV del almacenamiento y el punto de inflexión se debe al efecto marcado del tiempo sobre la pérdida de peso cuando los frutos se encuentran almacenados a elevados valores de DPV, no así para las condiciones de almacenamientos con bajos DPV. Así mismo, en la Figura 5, se muestran los contornos de nivel a partir de la Figura 4, que permiten definir rangos de pérdida de peso en función a DPV y tiempo. Con ello, se puede seleccionar variables de respuesta que manifiesten la generación de valores menores de 6% de pérdida de peso seleccionado según literatura (Cantwell, 1996), donde el uso de condiciones de DPV elevadas tendrán que acompañada de periodos corto de tiempo de almacenamiento o viceversa.

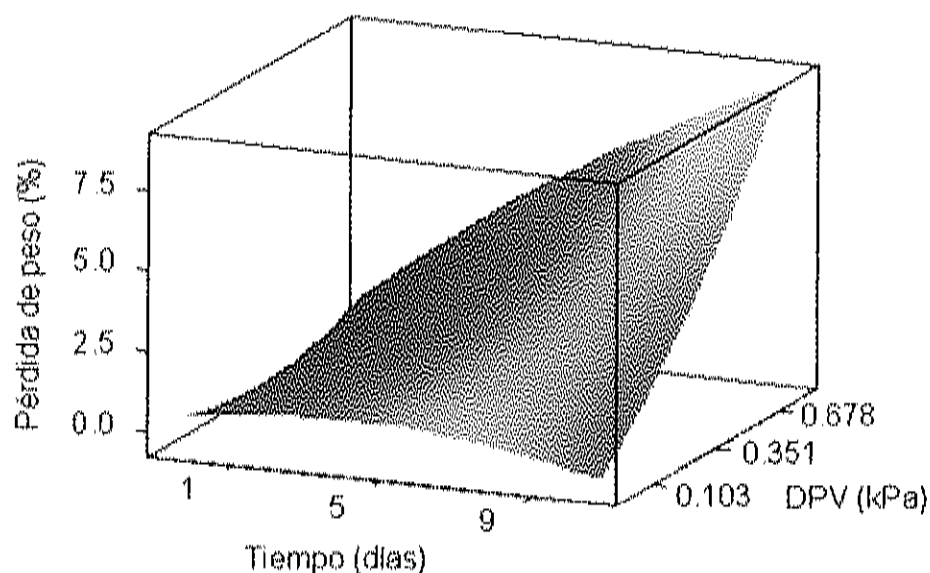


Figura 4. Superficie de respuesta para la pérdida de peso en chile bell, en función del tiempo y déficit de presión de vapor (DPV en kPa).



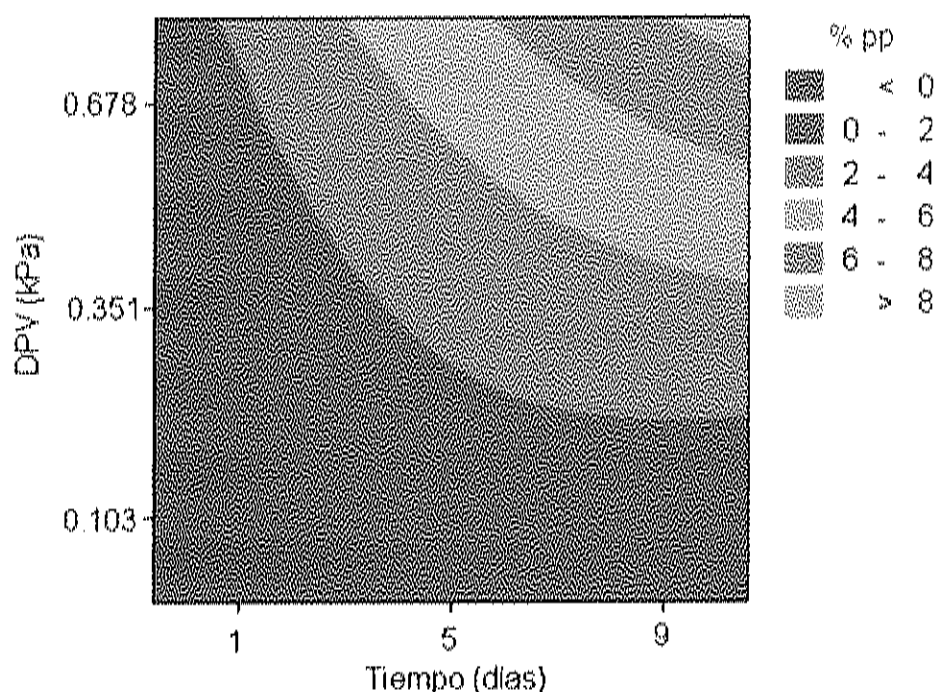


Figura 5. Grafica de contornos bidimensional para la pérdida de peso en chile bell en función a tiempo y déficit de presión de vapor (DPV en kPa).

Para observar de forma directa el efecto de la pérdida de peso sobre el DPV del almacenamiento y el tiempo, se generó la Figura 6, donde valores altos DPV (1.186 kPa) inducen pérdida de peso hasta el 18%, mientras que DPV inferiores a los 0.103 kPa no superan el 4% ambos a 10 días de almacenamiento. Sin embargo, se observa que para frutos almacenados a 1.186, 0.678 y 0.351 kPa, el tiempo máximo de almacenamiento será de 2, 6 y 8 días respectivamente, ya que una pérdida de peso superior al 6% en chile bell indica deterioro y pérdida de calidad comercial según Cantwell (1996). Por otro lado, se observó de forma subjetiva que la expresión de marchitez (Figura 6, simbolizado con flechas) en los frutos se presentó de forma desfasada en el tiempo según el DPV utilizado, llegando a concluir que 4% de pérdida de peso acumulada será suficiente para inducir pérdida de calidad en chile bell en función de la pérdida de peso, independientemente del DPV del almacenamiento.

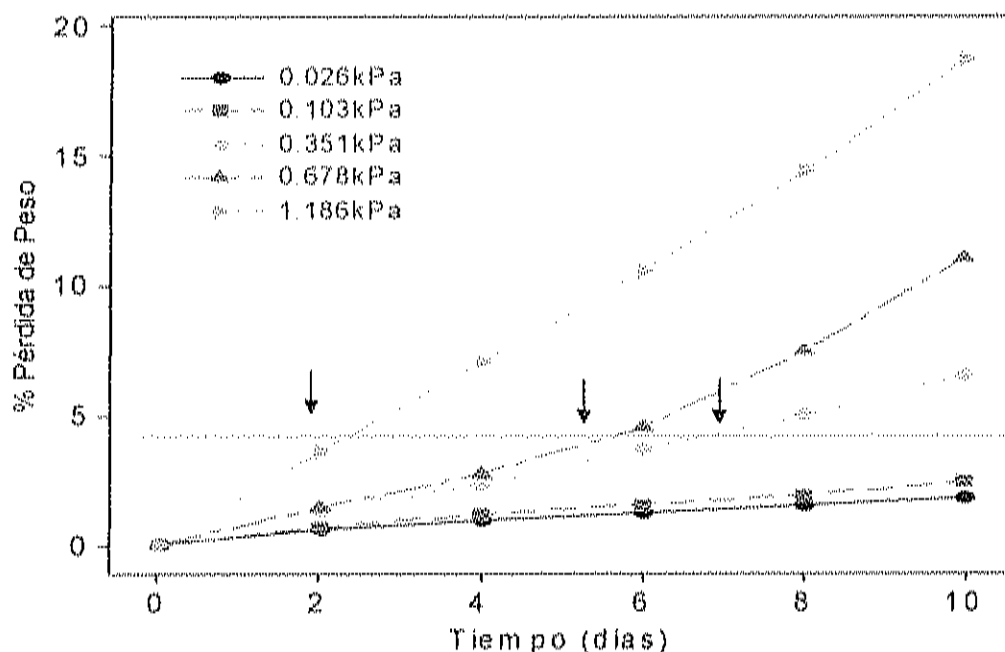


Figura 6. Porcentaje de pérdida de peso en frutos de chile bell almacenados bajo diferentes condiciones de DPV. La línea continua indica el % de pérdida de peso en donde se presentó marchitez y las flechas los días en que se presentaron los primeros síntomas de marchitez.

Ben-Yehoshua (1987) señala que en frutos de chile bell almacenados a una temperatura de 10°C a una humedad relativa del 60-75% (DPV entre 0.368 y .049 kPa, calculado con tables de Pearcy *et al.*, 1991) se presenta una pérdida de peso diaria 0.6% en relación con su peso fresco inicial. Similares resultados se observaron en este estudio al ubicar este comportamiento en la Figura 5, donde a un DPV de 0.35 kPa, se logró un 6% de pérdida de peso al día 10.

Estudios realizados en nueve variedades de chile bell, almacenados a diferentes DPV, mostraron que los frutos que se encontraban a un DPV de 0.21kPa presentaron menor pérdida de peso que los almacenados a DPV de 0.32 y 0.47kpa (Lowns *et al.*, 1994). Así mismo, Muy *et al.* (2004a), encontraron que en frutos de mango tuvieron la mayor pérdida de peso de 11% en frutos almacenados de DPV altos (1.52kPa) y 3% en los de bajos

DPV (0.22kPa). También, estos mismos autores señalan el beneficio de mantener DPV bajos (0.2kPa) durante el almacenamiento de pepino de mesa no mostrando síntomas de marchitamiento durante el tiempo que se desarrolló el experimento (Muy *et al.*, 2004b). Similar comportamiento se observó en frutos de rambutan almacenados a un DPV de 0.935 kPa (20°C y HR 60%), ya que el primer día de almacenamiento se registró una pérdida de peso del 18% aproximadamente un 18%, al día 4 fue de 30% y al día 7 del 38% (Landrigan *et al.*, 1996), lo que indica el efecto del tiempo de almacenamiento sobre el fruto.

### Firmeza

La firmeza se evaluó en frutos de chile bell almacenados bajo distintas condiciones de déficit de presión de vapor (DPV). En los resultados obtenidos se observó, mediante un análisis estadístico, que todos los coeficientes de regresión estimados fueron significativos, excepto el término Tiempo\*Tiempo, con un coeficiente de determinación múltiple igual a  $R^2=84.9$  y con ajuste de  $R^2=81.2\%$  (Cuadro 13), lo que corresponde a un buen modelo de regresión.

Cuadro 13. Análisis de regresión para la variable firmeza en frutos de chile bell.				
Términos	Coefficiente	SE coeficiente	T	P
Constante	6.1319	0.3654	16.783	0.000
Tiempo	2.0306	0.2889	7.030	0.000
DPV	1.7325	0.2889	5.998	0.000
Tiempo*Tiempo	-0.3992	0.3098	-1.289	0.212
DPV*DPV	1.1135	0.3098	3.595	0.002
Tiempo*DPV	1.3751	0.4085	3.366	0.003
$s = 1.155$ $R^2 = 84.9\%$ $R^2$ (ajustada) = 81.2%				

s = desviación estándar, SE = error estándar, T = estadístico T de Student, P = valor P,  $R^2$  = coeficiente de determinación múltiple.

El análisis de varianza se refiere a los componentes lineales, cuadráticos y de interacción en el modelo de regresión. Así mismo, se proporciona la prueba de ajuste del modelo (Cuadro 14), se encontró diferencia significativa en todos los términos, excepto para el término cuadrático (Tiempo\*Tiempo), el cual no es significativo. La falta de ajuste ( $P=0.000$ ), indica que este modelo no es una aproximación adecuada a la superficie de respuesta real. Al mismo tiempo, se estimaron los coeficientes del modelo en términos reales de la regresión (Cuadro 15).

Cuadro 14. Análisis de varianza de la regresión de firmeza en frutos de chile bell.

Efectos	GL	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
Regresión	5	150.573	150.573	30.1146	22.56	0.000
Lineal	2	114.000	114.000	56.9999	42.70	0.000
Cuadrático	2	21.446	21.446	10.7230	8.03	0.003
Interacción	1	15.127	15.127	15.1272	11.33	0.003
Error residual	20	26.699	26.699	1.3350		
Falta de ajuste	3	19.754	19.754	6.5847	16.12	0.000
Error puro	17	6.945	6.945	0.4085		
Total	25	177.272				

GL= grados de libertad, SS= suma de cuadrados, MS= Cuadrado medio, F= estadístico F, P= valor P

Cuadro 15. Coeficientes del modelo en términos reales de la regresión en frutos de chile bell.

Términos	Coeficientes
Constante	6.1319
Tiempo	2.0306
DPV	1.7325
Tiempo*Tiempo	-0.3992
DPV*DPV	1.1135
Tiempo*DPV	1.3751

A partir del Cuadro 15 y basados en las significancias que se reportan en el cuadro 14, se construyó el modelo de regresión estimado:

$$\text{Firmeza} = 6.1319 + 2.0306t + 1.7325\text{DPV} - 0.3992t^2 + 1.1135\text{DPV}^2 + 1.3751t\text{DPV}$$

Donde:

Firmeza = mm de deformación, t (tiempo) = días y DPV (déficit de presión de vapor) = kPa.

Dado que en el modelo anterior hay falta de ajuste significativo (Cuadro 14), limita la aplicación del modelo, sin embargo se presenta el análisis de la superficie. Al considerar que el coeficiente de determinación múltiple es muy bueno, se puede decir que la falta de ajuste posiblemente se debe a la falta de réplicas del experimento, esto basado en los grados de libertad obtenidos.

La gráfica de la superficie de respuesta para la firmeza en función a DPV y tiempo, presenta por un comportamiento tipo silla ascendente (Figura 7), al igual que en la pérdida de peso indicando una dependencia entre ambas variables. En este comportamiento, se puede observar como la pérdida firmeza tiende a un máximo conforme pasa el tiempo y aumenta el DPV en el almacenamiento de los frutos.

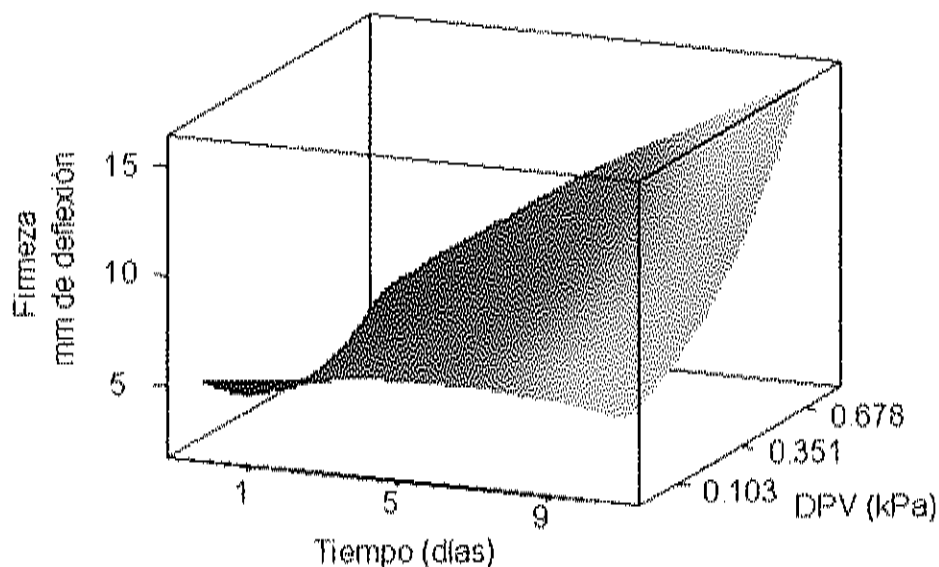


Figura 7. Superficie de respuesta para la firmeza en frutos de chile bell, en función del tiempo y déficit de presión de vapor (DPV en kPa).

En la Figura 8, se muestran los contornos de nivel, generados a partir de la Figura 7, la cual permite definir de los rangos en los cuales la firmeza puede aumentar o disminuir en función a DPV y tiempo.

Lurie *et al.* (1986), reportaron valores de firmeza en frutos de chile bell verdes y rojos, recién cosechados de 4 mm de deflexión, lo cual permite suponer que valores de 4 – 6 mm de deformación serían aceptables para considerar como de buena calidad. Con estos valores y usando la Figura 8, se puede seleccionar el DPV del almacenamiento que permita obtener este rango de firmeza en un tiempo determinado. De manera sencilla se observa que entre menor sea el DPV del almacenamiento el tiempo en que se pierde la firmeza son más prolongados.

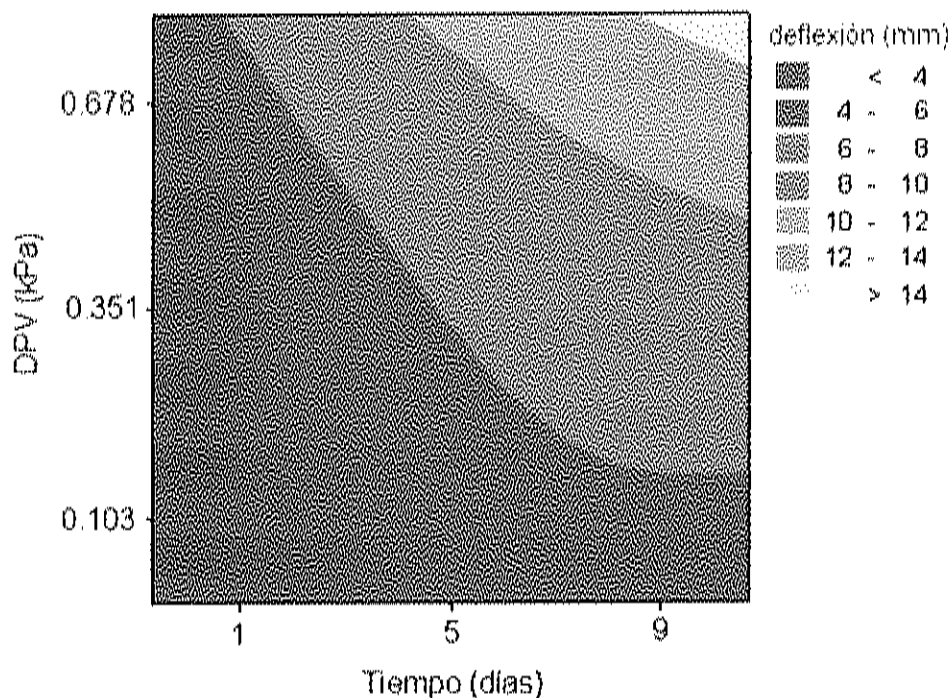


Figura 8. Grafica de contornos bidimensional para la firmeza (mm de deflexión) en frutos de chile bell en función a tiempo y déficit de presión de vapor (DPV en kPa).

En pepino de mesa el incremento en el DPV de las cámaras de almacenamiento y la ausencia de cera en los frutos, afectaron significativamente la firmeza durante el almacenamiento (Muy *et al.*, 2004b).

En la Figura 9 se generaron perfiles de la pérdida de firmeza en función del tiempo, para cada DPV de almacenamiento. Se puede observar el efecto que tiene almacenar a diferentes valores de DPV y tiempo, donde valores altos de DPV (1.186 kPa) inducen pérdidas de firmeza del 199%, mientras que DPV inferiores a los 0.103 kPa no superan el 5%, con una ligera disminución debido probablemente al exceso de humedad la cual tiende al equilibrio con el fruto y minimice los milímetros de la deflexión del tejido de los frutos.

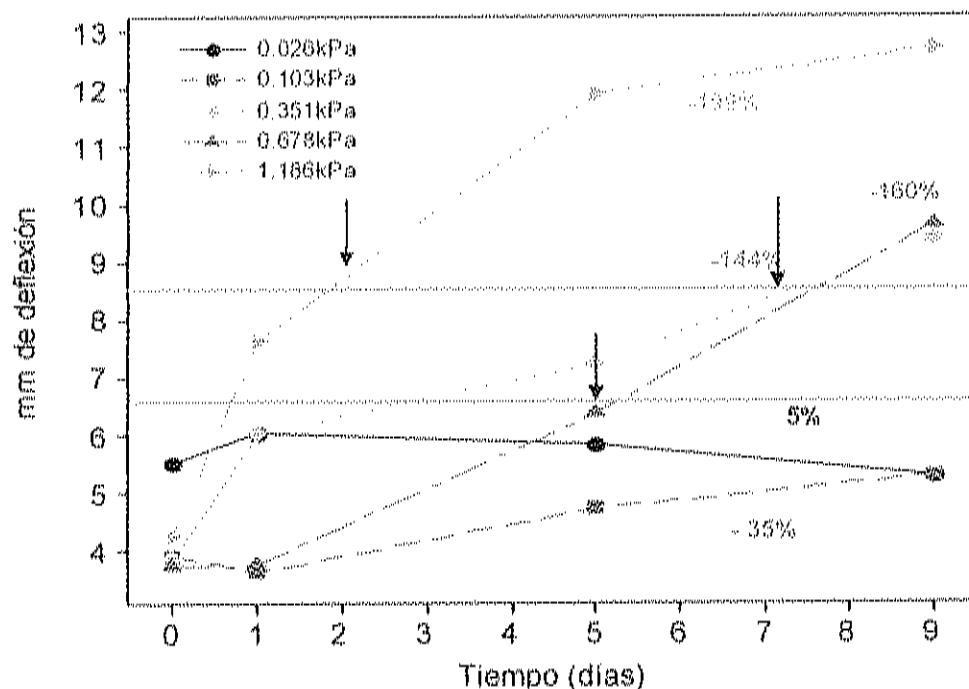


Figura 9. Milímetros de deflexión en frutos de chile bell almacenados bajo diferentes condiciones de DPV. Las líneas continuas indican los rangos de deflexión no aptos para su comercialización y las flechas indican los días en que se presentaron los primeros síntomas de marchitez.

Así mismo se puede observar en la Figura 9, que los frutos almacenados a DPV de 1.186 kPa, para el primer día pierden de manera considerable la firmeza, ya que se deforman aproximadamente 7mm, lo cual lo hace no agradable al tacto y por lo tanto no apto para comercializar, mientras que los almacenados a DPV de 0.026 y 0.103 kPa para el día 9 tiene una deflexión no mayor a los 6 mm.

Este comportamiento en los frutos de chile bell analizados, es similar al reportado por Lurie *et al.* (1986), en donde frutos almacenados a DPV de 0.29 kPa tuvieron una firmeza inicial de 5 mm de deflexión y para el día 21 presentaron una deflexión de 13-14mm.



Estudios realizados en mango se observó que los frutos que fueron almacenados a altos DPV (1.52kPa) perdieron más rápido su firmeza que los almacenados a bajos DPV (0.22kPa) (Muy *et al.*, 2004a). Este comportamiento también se observó en frutos de pepino de mesa reduciendo de manera significativa su firmeza durante el almacenamiento, ya que los frutos que fueron almacenados a un DPV de 0.2kPa no alcanzaron valores de deformación mayores de 3mm, mientras que los almacenados a un DPV de 1.26 kPa sufrieron la mayor deformación a los cuatro días de almacenamiento (Muy *et al.*, 2004b).

#### Potencial Hídrico

Mediante un análisis estadístico, se observó que todos los coeficientes estimados de la regresión fueron significativos, con un coeficiente de determinación múltiple igual a  $R^2=82.9$  y con ajuste de  $R^2=78.5\%$  (Cuadro 16), lo que corresponde a un buen modelo de regresión.

Cuadro 16. Análisis de regresión para la variable potencial hídrico en frutos de chile bell.				
Términos	Coefficiente	SE coeficiente	T	P
Constante	-0.85330	0.02837	-30.075	0.000
Tiempo	-0.09820	0.02243	-4.378	0.000
DPV	-0.15560	0.02243	-6.937	0.000
Tiempo*Tiempo	0.06646	0.02405	2.763	0.012
DPV*DPV	0.06696	0.02405	2.784	0.011
Tiempo*DPV	-0.12350	0.03172	-3.893	0.001
$s = 0.08972$ $R^2 = 82.9\%$ $R^2$ (ajustada) = 78.5%				

s= desviación estándar, SE = error estándar, T= estadístico T de Student, P= valor P,  $R^2$  = coeficiente de determinación múltiple.

Al mismo tiempo, se realizó el análisis de varianza de los componentes lineales, cuadráticos y de interacción del modelo de regresión, proporcionando la prueba de ajuste (Cuadro 17), encontrando diferencia significativa en todos los términos, no así como para la falta de ajuste ( $P=0.124$ ), lo que indica que el modelo de segundo orden es una aproximación adecuada a la superficie de respuesta real, obteniendo así, los coeficientes del modelo de la regresión (Cuadro 18).

Cuadro 17. Análisis de varianza de la regresión de potencial hídrico en frutos de chile bell.

Efectos	GL	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
Regresión	5	0.77321	0.77321	0.154642	19.21	0.000
Lineal	2	0.54164	0.54164	0.270818	33.64	0.000
Cuadrático	2	0.10955	0.10955	0.054777	6.80	0.006
Interacción	1	0.12202	0.12202	0.122018	15.16	0.001
Error residual	20	0.16099	0.16099	0.008050		
Falta de ajuste	3	0.04524	0.04524	0.015082	2.22	0.124
Error puro	17	0.11575	0.11575	0.006809		
Total	25	0.93420				

GL= grados de libertad, SS= suma de cuadrados, MS= Cuadrado medio, F= estadístico F, P= valor P

Cuadro 18. Coeficientes del modelo en términos reales de la regresión para frutos de chile bell.

Términos	Coeficientes
Constante	-0.8533
Tiempo	-0.0982
DPV	-0.1556
Tiempo*Tiempo	0.0665
DPV*DPV	0.0670
Tiempo*DPV	-0.1235

A partir del Cuadro 18 y basados en las significancias que se reportan en el cuadro 17, se construyó el modelo de regresión estimado:

$$\Psi_w = - 0.8533 - 0.0982t - 0.1556DPV + 0.0665 t^2 + 0.0670DPV^2 - 0.1235tDPV$$

Donde :  $\Psi_w$ = MPa, t=días y DPV=kPa

La gráfica de la superficie de respuesta para el potencial hídrico en función a DPV y tiempo, presenta un comportamiento no muy definido tipo silla (Figura 10), donde el potencial hídrico esta asociado al DPV del almacenamiento. En esta figura se puede observar que entre mayor sea el DPV, el valor del potencial hídrico se minimiza, es decir es más negativo.

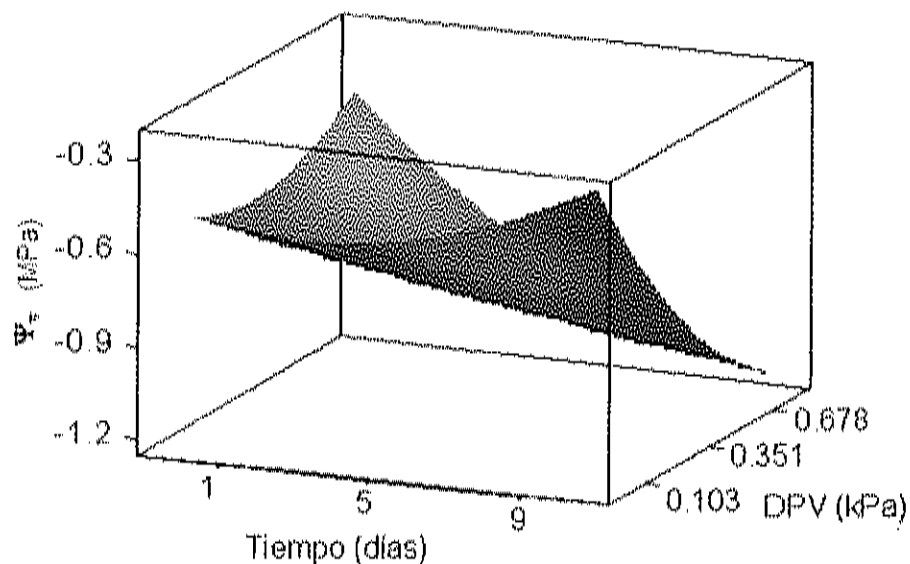


Figura 10. Superficie de respuesta para potencial hídrico (MPa) en frutos de chile bell, en función del tiempo (días) y déficit de presión de vapor (DPV en kPa).

En la Figura 11, se muestran los contornos de nivel obtenido a partir de la Figura 10, en la cual permite definir los rangos de potencial hídrico en función a DPV y tiempo. Aquí se puede observar que al utilizar DPV altos como condiciones de almacenamiento, el potencial hídrico se hace más negativo, conforme pasa el tiempo, no así en los DPV bajos en donde el potencial hídrico es menos negativo. Es así como a través de estos contornos, nosotros podemos seleccionar las condiciones en las cuales el potencial hídrico tiende a ser menos negativo por mayor tiempo. Ésta Figura nos muestra que si almacenamos los frutos de chile bell a DPV entre 0.103 y 0.351 kPa, el potencial hídrico al día 10 estará en los rangos de  $-0.6$  y  $-0.8$  MPa, esto coincide con los reportado por Lurie *et al.* (1986), en donde frutos de chile bell almacenados a DPV de 0.29 kPa tuvieron un descenso de  $-0.5$  a  $-0.8$  MPa, al día 11.

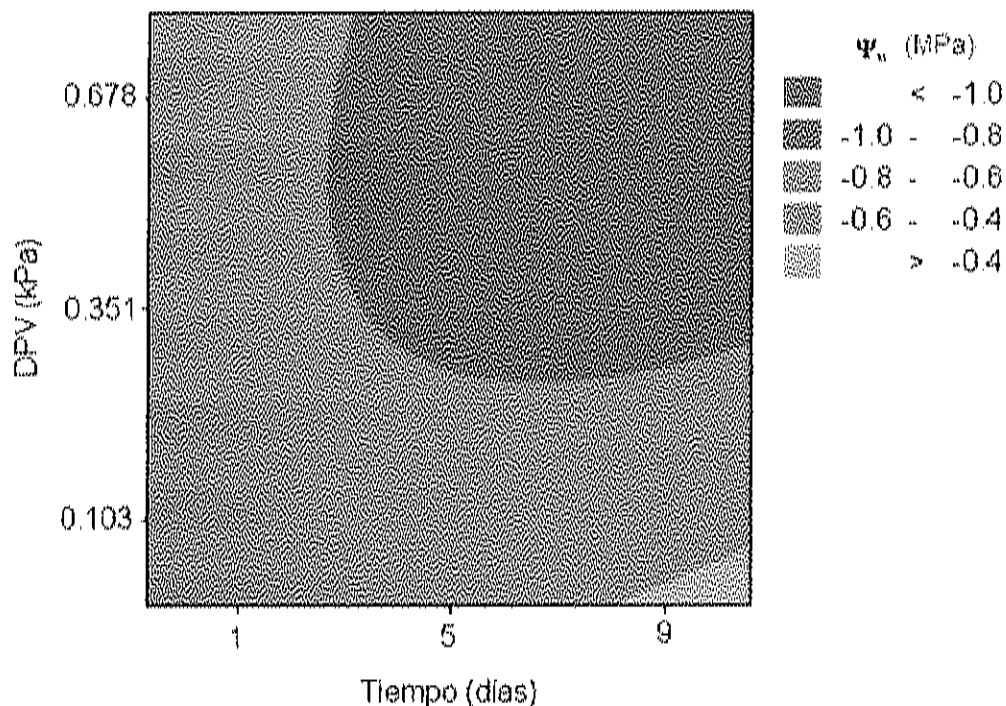


Figura 11. Gráfica de contornos bidimensional para potencial hídrico (MPa) en frutos de chile bell en función al tiempo (días) y déficit de presión de vapor (DPV en kPa).

Se han realizado estudios en diferentes plantas para analizar su respuesta cuando es sometida a un estrés hídrico, utilizando el  $\Psi_w$  como un factor importante. Por ejemplo se encontró que en los frutos de fresa, al momento de ser cosechados presentaron un  $\Psi_w$  de  $-1.2$  MPa, y se observó que a las 24h de haber sido sometidos a estrés hídrico ( $30^\circ\text{C}$  de día y  $18^\circ\text{C}$  de noche, con lámparas de sodio de alta presión) el  $\Psi_w$  se redujo a  $-1.7$  MPa (Pomper y Breen, 1997), indicando pérdida de agua.

Parra *et al.* (1999), realizaron estudios en plantas de zarzamora sometidas a estrés hídrico (sin riego), en donde pudieron observar que el  $\Psi_w$  de la planta disminuyó de un valor inicial de  $-2.3$  MPa a  $-3.3$  MPa a las 14h, mientras que las plantas que tenían riego su valor se redujo mínimamente ya que de un  $\Psi_w = -2.3$  MPa cambió a  $-2.7$  MPa a las 14h.

Este mismo comportamiento se registró en plantas de lima "Tahiti" en las cuales al momento de suspender el riego el  $\Psi_w$  disminuyó de  $-1.6$  MPa a  $-2.5$  MPa en el transcurso de 5 semanas, debido al estrés hídrico, ya que el  $\Psi_w$  depende principalmente del contenido de agua en la planta (Lugo *et al.*, 1996).

Para el caso de frutos, se ha encontrado en pepino sin encerar, almacenados a diferentes DPV's (0.2, 0.94 y 1.26 kPa) cambios en el  $\Psi_w$  con un valor inicial de  $-0.4$  MPa, registrando a los 16 días de almacenamiento valores de  $-0.5$ ,  $-0.6$  y  $-0.6$  MPa respectivamente (Muy *et al.*, 2004b). Comportamiento similar presentaron los frutos de pera asiática los cuales se obtuvieron en un cultivo en invernadero con condiciones de DPV = 4.3kPa (estrés hídrico) encontrando que al momento del corte el  $\Psi_w$  fue de  $-1.33$  MPa y a los días 14 y 35 el valor disminuyó a  $-1.93$  MPa y a  $-2.10$  MPa, respectivamente (Behboudian *et al.*, 1994).

Se realizaron estudios en el flavedo de frutos de naranjas dulces cv. Navelina, las cuales se almacenaron a 20°C con HR de 45% y 95% durante 14 días, en donde se observó una disminución en el  $\Psi_w$ , ya que se registró un valor inicial de -2.25 MPa, observándose a los 7 días un  $\Psi_w$  de -2.75 y de -2.20 respectivamente. Así mismo a los 14 días, se realizó otra medición en los frutos almacenados a DPV = 1.285 kPa (20°C y HR 45%) el valor de  $\Psi_w$  fue de -2.9 MPa, mientras que los almacenados a DPV = 0.117 kPa (20°C y HR 95%) el  $\Psi_w$  fue de -1.9 MPa (Alferez *et al.*, 2003).

Landrigan *et al.* (1996), observaron que el  $\Psi_w$  en frutos de rambutan almacenados a 20°C y HR 60% (DPV=0.935), este tiende a disminuir ya que registró valores de -1.2MPa al momento de corte, para el día 4 ya era de -3.2 MPa y para el día 9 el valor del  $\Psi_w$  fue de -5.1 MPa, estas mediciones se hicieron en el endocarpio fibroso del fruto.

### Potencial Osmótico

Al realizar el análisis estadístico se observó que los coeficientes estimados de la regresión fueron significativos, a excepción de DPV\*DPV y la interacción Tiempo\*DPV, teniendo el modelos un coeficiente de determinación múltiple igual a  $R^2=82.5$  y con ajuste de  $R^2=78.1\%$  (Cuadro 19), lo que corresponde a un buen modelo de regresión.

Se realizó el análisis de varianza de los componentes lineales, cuadráticos y de interacción del modelo de regresión, proporcionando la prueba de ajuste (Cuadro 20), encontrando diferencia significativa en todos los términos que componen a la regresión, siendo significativa también la falta de ajuste ( $P=0.000$ ), lo que esto último indica, que el modelo de segundo orden puede no ser una aproximación adecuada a la superficie de respuesta real.

Cuadro 19. Análisis de regresión para la variable potencial osmótico en frutos de chile bell.

Términos	Coficiente	SE coeficiente	T	P
Constante	- 0.636100	0.011560	- 55.028	0.000
Tiempo	- 0.041768	0.009139	- 4.570	0.000
DPV	- 0.061025	0.009139	- 6.678	0.000
Tiempo*Tiempo	- 0.044919	0.009800	- 4.583	0.000
DPV*DPV	- 0.008294	0.009800	- 0.846	0.407
Tiempo*DPV	- 0.035750	0.012924	-2.766	0.102
$s = 0.03655$ $R^2 = 82.5\%$ $R^2$ (ajustada) = 78.1%				

$s$  = desviación estándar, SE = error estándar, T= estadístico T de Student, P= valor P,  $R^2$  = coeficiente de determinación múltiple.

Cuadro 20. Análisis de varianza de la regresión de potencial osmótico.

Efectos	GL	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
Regresión	5	0.125878	0.125878	0.025176	18.84	0.000
Lineal	2	0.087498	0.087498	0.043749	32.74	0.000
Cuadrático	2	0.028156	0.028156	0.014078	10.54	0.001
Interacción	1	0.010224	0.010224	0.010224	7.65	0.012
Error residual	20	0.026725	0.026725	0.001336		
Falta de ajuste	3	0.017104	0.017104	0.005701	10.07	0.000
Error puro	17	0.009621	0.009621	0.000566		
Total	25	0.152603				

GL= grados de libertad, SS= suma de cuadrados, MS= Cuadrado medio, F= estadístico F, P= valor P

Cuadro 21. Coeficientes del modelo en términos reales de la regresión para frutos de chile bell.	
Términos	Coeficientes
Constante	0.6361
Tiempo	0.0418
DPV	0.0610
Tiempo*Tiempo	0.0449
DPV*DPV	0.0083
Tiempo*DPV	0.0357

A partir del Cuadro 21 y basados en las significancias que se reportan en el cuadro 20, se construyó el modelo de regresión estimado:

$$\psi_s = - 0.6361 - 0.0418t - 0.0610DPV + 0.0449t^2 - 0.0083DPV^2 - 0.0357tDPV$$

Donde:  $\psi_s$ = MPa, t=días y DPV=kPa

Con el modelo antes señalado, es posible determinar de forma matemática el potencial osmótico del chile bell, pero debido a la falta de ajuste significativa, limita la aplicación del modelo.

A partir de estos datos se generó la gráfica de la superficie de respuesta para el potencial osmótico en función a DPV y tiempo, se representa por un comportamiento que tiende a ser una cresta elevada, (Figura 12), donde el potencial osmótico esta asociado al DPV del almacenamiento, observando que entre mayor sea el DPV menor es el potencial osmótico.



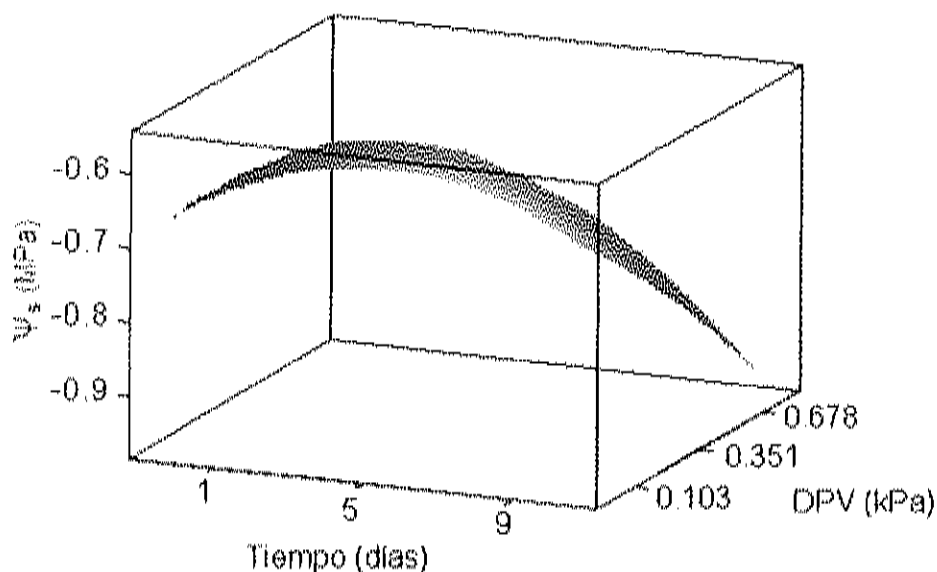


Figura 12. Superficie de respuesta para potencial osmótico (MPa) en frutos de chile bell, en función del tiempo (día) y déficit de presión de vapor (DPV en kPa).

Haciendo un corte de la Figura 12, se generan los contornos de nivel (Figura 13), el cual permite definir los rangos en los cuales se pueden encontrar valores de potencial osmótico más cercanos a cero (menos negativos), por un lapso de tiempo mayor. Al igual que en la figura anterior se observa que en condiciones de almacenamiento a DPV altos el valor del potencial osmótico se hace más negativo y viceversa.

Estudios realizados en zanahoria almacenada a DPV de 0.14, 0.314 y 1.032 kPa, se observó que a los 10 días de almacenamiento, el potencial osmótico disminuyó de valores de  $-1.1$  a  $-1.3$  MPa, excepto en el caso de las almacenadas a 0.14 MPa donde el potencial osmótico se mantuvo estable, debido al menor estrés hídrico (Shibairo *et al.*, 2002). Un comportamiento similar se presentó en este estudio, ya que el potencial osmótico en los frutos de chile bell, se hace más negativo conforme avanza el tiempo y se incrementa el DPV, en un rango de  $-0.6$  a  $-0.9$  MPa.

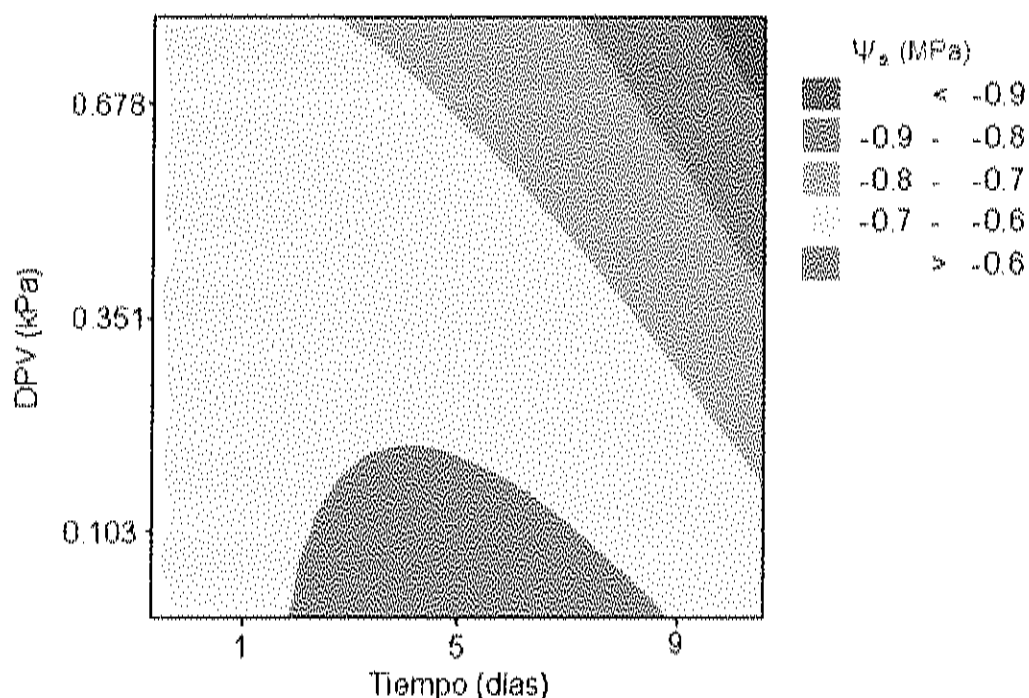


Figura 13. Grafica de contornos bidimensional para potencial osmótico (MPa) en frutos de chile bell en función a tiempo (día) y déficit de presión de vapor (DPV en kPa).

En estudios realizados en frutos de tomate cv Castelmart se observó que al ser almacenados a 20°C y HR 100% a los cuatro días de almacenamiento el valor del  $\psi_s$  disminuyó de -0.63MPa a -0.74MPa, (Shackel *et al.*, 1999). Comportamiento similar presentaron frutos de pepino sin encerar almacenados a un DPV de 1.26kPa en donde se observó que el  $\psi_s$  se redujo de -0.6MPa a -0.7MPa a los 12 días de almacenamiento, esto debido a que a medida que ocurre la pérdida de agua el potencial osmótico se reduce por efecto de la mayor concentración de solutos (Muy *et al.*, 2004b). Esto también se observó en frutos de mango cv Keitt sin encerar, almacenados a un DPV de 1.52kPa el  $\psi_s$  se redujo desde valores de -1.4MPa hasta -2.25MPa (Muy *et al.*, 2004a), esto debido a que en los frutos de mango al contenido de soluto aumenta cuando el fruto madura.

Shibairo *et al.* (2002), realizaron estudios en zanahoria, en donde pudieron observar que el  $\psi_s$  se redujo de  $-1.1\text{MPa}$  a  $-1.25\text{MPa}$  en frutos almacenados a  $2^\circ\text{C}$  y HR 80% (DPV = 0.141 kPa), observando una menor reducción al incrementar la temperatura de almacenamiento a  $13^\circ\text{C}$  y HR 79% (DPV = 0.314 kPa) registrando valores de  $-1.75\text{MPa}$ , mientras que los almacenados a  $13^\circ\text{C}$  y HR de 31% (DPV = 1.032 kPa) disminuyó hasta  $-2.0\text{MPa}$ , a los 30 días de almacenamiento, en donde los frutos con mayor estrés hídrico (menor HR) la disminución del valor del  $\psi_s$  fue más pronunciada. Esto debido a que al momento en que el fruto pierde agua el contenido de sólidos aumenta en proporción al contenido de agua y los potenciales se hacen más negativos. Comportamiento similar presentaron frutos de zanahoria almacenados a un DPV de 0.041 kPa ( $18^\circ\text{C}$  y HR 98%), en donde los valores de  $\psi_s$  fueron de  $-1.1\text{MPa}$  a  $-1.2\text{MPa}$  durante 2 días de almacenamiento (Herppich *et al.*, 1999).

Burdon y Clark (2001), estudiaron los frutos de plantas de kiwi sometidas a un alto y bajo régimen de irrigación, posteriormente fueron deshidratadas con aire seco ( $20^\circ\text{C}$  y HR 10% = 2.1 kPa), en donde después de la deshidratación los frutos provenientes de las plantas con bajo riego el valor del  $\psi_s$  se redujo de  $-1.1\text{MPa}$  a  $-1.6\text{MPa}$ , mientras que los de alto riego el cambio en su  $\psi_s$  fue de  $-1.05\text{MPa}$  a  $-1.15\text{MPa}$  debido a menor estrés hídrico.

### Potencial de Presión

Para estimar el modelo de regresión los datos se analizaron estadísticamente y se observó que todos los coeficientes estimados de la regresión fueron significativos, dando un coeficiente de determinación múltiple igual a  $R^2=76.8$  y con ajuste de  $R^2=70.9\%$  (Cuadro 22), lo que corresponde a un buen modelo de regresión.

Cuadro 22. Análisis de regresión para la variable potencial de presión en frutos de chile bell.

Términos	Coefficiente	SE coeficiente	T	P
Constante	-0.21720	0.02726	-7.969	0.000
Tiempo	-0.05830	0.02155	-2.706	0.014
DPV	-0.09645	0.02155	-4.476	0.000
Tiempo*Tiempo	0.11044	0.02311	4.779	0.000
DPV*DPV	0.07432	0.02311	3.216	0.004
Tiempo*DPV	-0.09150	0.03047	-3.003	0.007
$s = 0.08619$ $R^2 = 76.8\%$ $R^2$ (ajustada) = 70.9%				

s= desviación estándar, SE = error estándar, T= estadístico T de Student, P= valor P,  $R^2$  = coeficiente de determinación múltiple.

Mediante el análisis de varianza de los componentes lineales, cuadráticos y de interacción del modelo de regresión, proporcionando la prueba de ajuste (Cuadro 23), se encontró diferencia significativa en todos los términos que componen a la regresión, no siendo significativa la falta de ajuste ( $P=0.071$ ), esto indica, que el modelo de segundo orden es una aproximación adecuada a la superficie de respuesta real, para el cual se obtuvieron los coeficientes del modelo en términos reales (Cuadro 24).

Cuadro 23. Análisis de varianza de la regresión de potencial de presión en frutos de chile bell.

Efectos	GL	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
Regresión	5	0.49071	0.49071	0.098142	13.21	0.000
Lineal	2	0.20321	0.20321	0.101607	13.68	0.000
Cuadrático	2	0.22052	0.22052	0.110258	14.84	0.000
Interacción	1	0.06698	0.06698	0.066978	9.02	0.007
Error residual	20	0.14858	0.14858	0.007429		
Falta de ajuste	3	0.04928	0.04928	0.016427	2.81	0.071
Error puro	17	0.09930	0.09930	0.005841		
Total	25	0.63929				

GL= grados de libertad, SS= suma de cuadrados, MS= Cuadrado medio, F= estadístico F, P= valor P

Cuadro 24. Coeficientes del modelo en términos reales de la regresión para frutos de chile bell.	
Términos	Coeficientes
Constante	-0.2172
Tiempo	-0.0583
DPV	-0.0964
Tiempo*Tiempo	0.1104
DPV*DPV	0.0743
Tiempo*DPV	-0.0915

En base al Cuadro 24 y de acuerdo a las significancias que se reportan en el Cuadro 23, se construyó el modelo de regresión estimado:

$$\psi_p = - 0.2172 - 0.0583t - 0.0964DPV + 0.1104t^2 - 0.0743DPV^2 - 0.0915tDPV$$

Donde:  $\psi_p$ = MPa, t=días y DPV=kPa

Con el modelo antes señalado, es posible determinar de forma matemática el potencial de presión del chile bell, ya que es un buen estimador porque no tiene falta de ajuste significativa. A partir de estos datos se generó la gráfica de la superficie de respuesta para el potencial de presión en función a DPV y tiempo, se representa por una superficie con un mínimo (Figura 14), donde el potencial de presión se encuentra asociado al DPV del almacenamiento, así mismo se puede observar que entre mayor sea el DPV mayor es el potencial de presión.

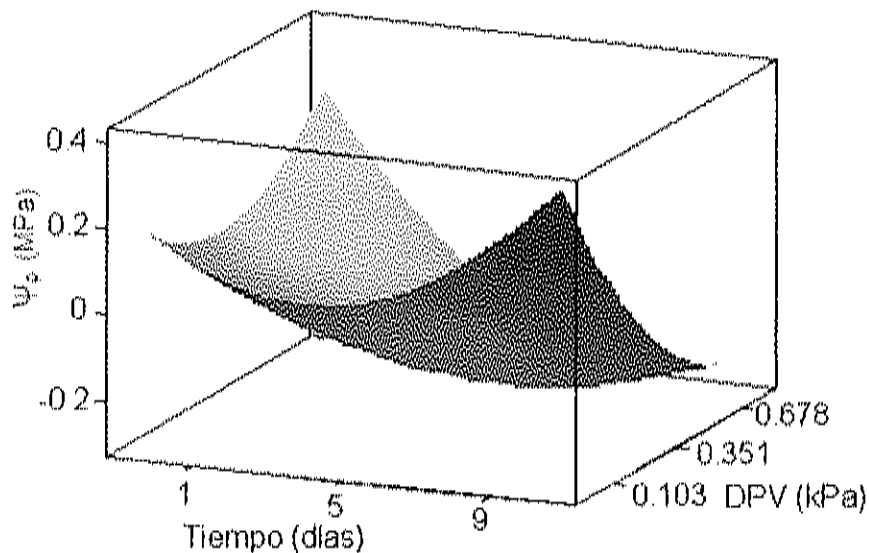


Figura 14. Superficie de respuesta para potencial de presión (MPa) en frutos de chile bell, en función del tiempo y déficit de presión de vapor (DPV en kPa).

Este tipo de superficie (Figura 14) genera los contornos de nivel (Figura 15), en los cuales se pueden localizar de manera sencilla, en que condiciones de DPV se pueden obtener valores de potencial de presión altos (positivos), por un lapso de tiempo mayor. Al igual que en la Figura 14 se observa que en condiciones de almacenamiento a DPV altos el valor del potencial de presión tiende a cero y por con el tiempo se hace negativo y viceversa.

Estudios realizados en zanahoria almacenados a 18°C y HR de 98% (DPV = 0.041 kPa) mostraron que en el transcurso de 2 días el potencial de presión disminuyó de 0.7 a 0.3 MPa, mientras que los almacenados a 18°C y HR de 85% (DPV = 0.309 kPa) disminuyó a -2.1 MPa (Herppich *et al.*, 1999). Similar a este trabajo, los frutos de chile bell que se encontraban a DPV de 0.026 y 0.103 kPa, disminuyeron su potencial de presión de 0.2 a 0.1 MPa, mientras que los almacenados a DPV de 0.678 y 1.186 kPa, fue 0.2 a -0.37 MPa, respectivamente.

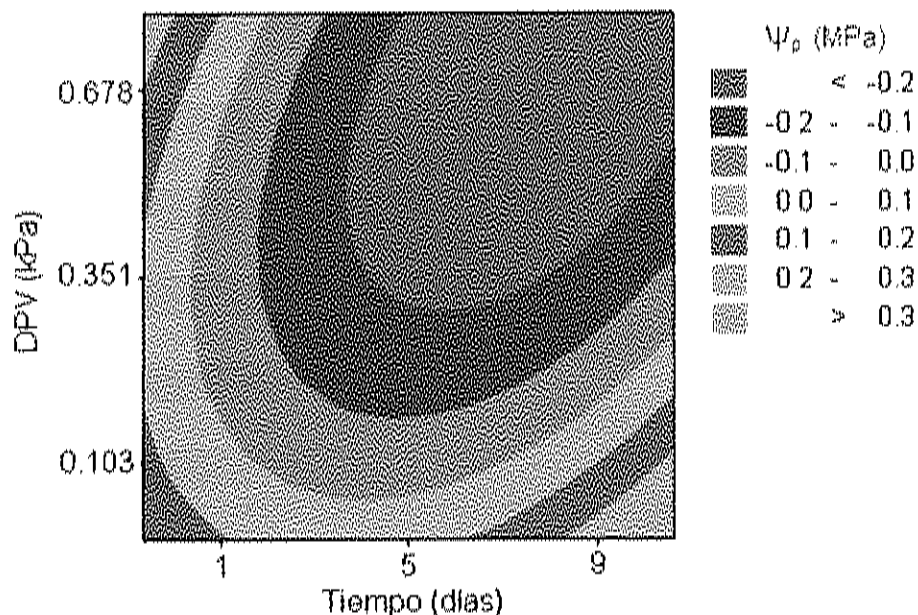


Figura 15. Grafica de contornos bidimensional para potencial de presión (MPa) en frutos de chile bell en función a tiempo y déficit de presión de vapor (DPV en kPa).

Se han realizado estudios en hojas de zarzamora, en donde se pudo demostrar que las plantas bajo riego mantuvieron un  $\psi_p = 0.6 \text{ MPa}$ , mientras que en las que se suspendió riego (déficit hídrico) el valor disminuyó a  $0.3 \text{ MPa}$ , esto muestra que cuando las condiciones de humedad son altas el potencial de presión de la célula del tejido se mantiene o aumenta (Parra *et al.*, 1999).

Shackel *et al.* (1991), observaron que en frutos de tomate cv. Castelmart almacenados a  $20^\circ\text{C}$  y HR 100%, al momento del corte el  $\psi_p = 0.04 \text{ MPa}$ , a los 4 días el  $\psi_p$  aumentó a  $0.07 \text{ MPa}$ , este comportamiento se puede atribuir al hecho de que al ser sometidos a HR de saturación, el fruto absorbió agua lo que lo hizo más turgente.

En estudios realizados en frutos de pera asiática sometidos a estrés hídrico (DPV= 4.3kPa), se pudo observar cómo al paso de 14 días de almacenamiento el potencial osmótico se redujo en los frutos de 0.17 MPa a 0.11 MPa (Behboudian *et al.*, 1994).

Burdon y Clark (2001), estudiaron los frutos de plantas sometidos a un alto y bajo régimen de irrigación y después fueron deshidratados con aire seco (20°C y HR10% = 2.103 kPa), en este experimento observaron en los frutos de las plantas sometidas a un alto régimen de riego el  $\psi_p$  disminuyó de 0.05MPa a -0.15MPa, mientras que los frutos provenientes de las plantas con déficit de agua el  $\psi_p$  se redujo de 0.025 MPa a -0.20 MPa.

Este comportamiento también fue observado por Muy *et al.* (2004), en frutos de pepino sin encerar, en donde los frutos almacenados a DPV 0.2kPa el  $\psi_p$  disminuyó de 0.2MPa a 0.1MPa mientras que los expuestos a DPV 1.26kPa el cambio en  $\psi_p$  fue de 0.2MPa a -0.1MPa, esto debido a la pérdida de agua; así mismo indicaron una posible plasmólisis celular del tejido.

Mills *et al.* (1996), observaron que los frutos de manzana cosechados de árboles irrigados diariamente su  $\psi_p$  se puede decir que se mantuvo durante los 180 días del experimento, ya que la disminución fue de 0.25MPa a 0.24MPa.

Beecher *et al.* (2001), realizaron estudios en champiñones (*Agaricus bisporus*) almacenados a 18°C, HR 95% (DPV = 0.103 kPa) y a 25°C y HR 95% (DPV = 0.158 kPa), en donde los almacenados a baja temperatura el  $\psi_p$  se mantuvo en valores de 0.5MPa y 0.4MPa mientras que los almacenados a alta temperatura el  $\psi_p$  disminuyó de 1.0MPa a 0.5MPa.



### Contenido Relativo de Agua

El CRA se evaluó en frutos de chile bell bajo diferentes condiciones de déficit de presión de vapor (DPV), en los cuales mediante un análisis estadístico observó que todos los coeficientes estimados de la regresión fueron significativos, a excepción de DPV\*DPV y Tiempo\*Tiempo, con un coeficiente de determinación múltiple igual a  $R^2=79.6$  y con ajuste de  $R^2=74.4\%$  (Cuadro 25), lo que corresponde a un buen modelo de regresión.

Cuadro 25. Análisis de regresión para la variable contenido relativo de agua (CRA) en frutos de chile bell.				
Términos	Coefficiente	SE coeficiente	T	P
Constante	88.0980	0.9521	92.527	0.000
Tiempo	-4.7871	0.7527	-6.360	0.000
DPV	-3.5862	0.7527	-4.764	0.000
Tiempo*Tiempo	-0.8449	0.8072	-1.047	0.308
DPV*DPV	-0.9612	0.8072	-1.191	0.248
Tiempo*DPV	-3.7600	1.0645	-3.532	0.002
$s = 3.011$ $R^2 = 79.6\%$ $R^2$ (ajustada) = 74.4%				

$s$  = desviación estándar, SE = error estándar, T = estadístico T de Student, P = valor P,  $R^2$  = coeficiente de determinación múltiple.

El análisis de varianza de los componentes lineales, cuadráticos y de interacción del modelo de regresión, proporcionando la prueba de ajuste (Cuadro 26), mostró diferencia significativa en todos los términos que componen a la regresión, menos los términos cuadráticos. La falta de ajuste fue significativa ( $P=0.000$ ), esto señala que el modelo de segundo orden limita la aplicación del mismo, sin embargo se muestra un análisis de la superficie. Así mismo el Cuadro 27 muestra los coeficientes calculados para este modelo.

Cuadro 26. Análisis de varianza de la regresión del contenido relativo de agua (CRA) en frutos de chile bell.

Efectos	GL	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
Regresión	5	705.72	705.72	141.143	15.57	0.000
Lineal	2	572.43	572.43	286.216	31.57	0.000
Cuadrático	2	20.18	20.18	10.091	1.11	0.348
Interacción	1	113.10	113.10	113.101	12.48	0.002
Error residual	20	181.31	181.31	9.066		
Falta de ajuste	3	100.80	100.80	33.599	7.09	0.003
Error puro	17	80.51	80.51	4.736		
Total	25	887.03				

GL= grados de libertad, SS= suma de cuadrados, MS= Cuadrado medio, F= estadístico F, P= valor P

Cuadro 27. Coeficientes del modelo en términos reales de la regresión.

Términos	Coeficientes
Constante	88.0980
Tiempo	-4.7871
DPV	-3.5862
Tiempo*Tiempo	-0.8449
DPV*DPV	-0.9612
Tiempo*DPV	-3.7600

A partir del Cuadro 27 y basados en las significancias que se reportan en el Cuadro 23, se construyó el modelo de regresión estimado, donde: CRA = %, t= días y DPV= kPa:

$$\text{CRA} = 88.098 - 4.7871t - 3.5862\text{DPV} - 0.8449t^2 - 0.9612\text{DPV}^2 - 3.76t\text{DPV}$$

Estos datos generan la gráfica de la superficie de respuesta para contenido relativo de agua en función a DPV y tiempo, en donde se presenta un comportamiento que tiende a ser tipo silla (Figura 16), pudiéndose observar que hay un punto crítico, en el cual dependiendo de nuestras condiciones al eje que se mueva se puede aumentar o disminuir el contenido relativo de agua, lo que se puede observar claramente que al almacenar los fruto de chile bell a DPV altos el contenido relativo de agua disminuye conforme transcurre el tiempo.

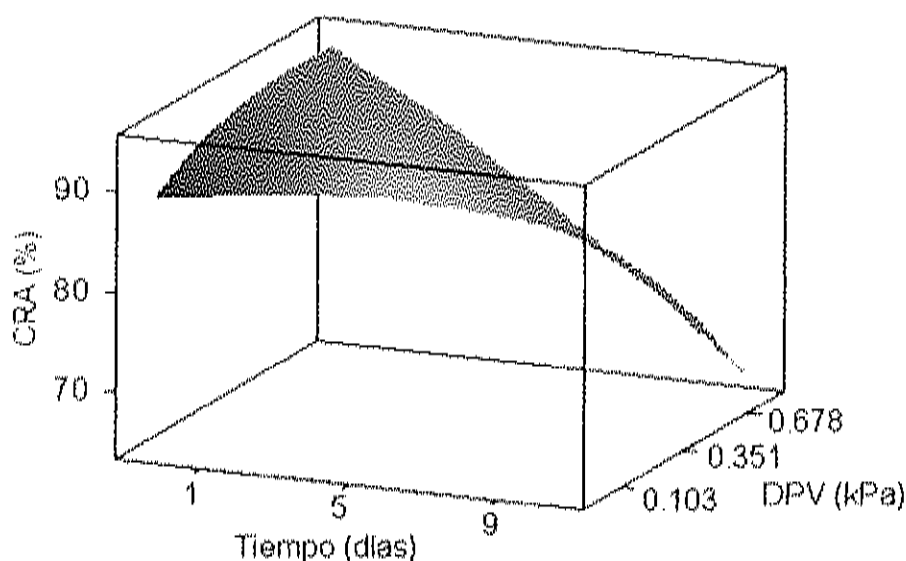


Figura 16. Superficie de respuesta para contenido relativo de agua (%) en frutos de chile bell, en función del tiempo y déficit de presión de vapor (DPV en kPa).

Este mismo comportamiento se puede observar a través de la gráfica de contornos de nivel (Figura 17), la cual se obtiene de la superficie de respuesta (Figura 16), donde se puede observar los rangos en cuales se encuentran los valores del contenido relativo de agua en función del DPV y tiempo. Se puede localizar el CRA en función de las condiciones de almacenamiento que utilice, conforme pasa el tiempo, observándose que a DPV bajos el contenido relativo de agua disminuye rápidamente conforme se prolonga el tiempo de exposición del fruto.

Así mismo, en la Figura 17, se muestran los contornos de nivel que permite definir los rangos de contenido relativo de agua en función a DPV y tiempo. Con ello, se puede seleccionar variables de respuesta que manifiesten la generación de valores de CRA mayores de 90%. Esto se puede observar fácilmente en DPV bajos.

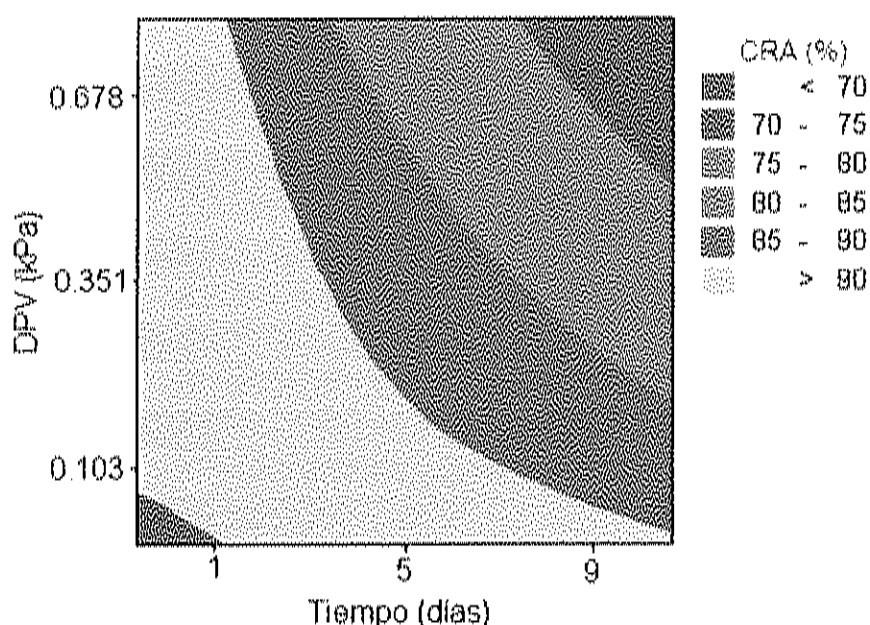


Figura 17. Grafica de contornos bidimensional para el contenido relativo de agua (%) en frutos de chile bell en función a tiempo y déficit de presión de vapor (DPV en kPa).

Lownds *et al.* (1993), reportaron que en nueve cultivares de chile bell el contenido relativo de agua se encontraba en un rango del 92-90% al momento de ser cosechados, el cual posiblemente se vio afectado por la pérdida de agua. Esto también es similar a lo reportado por Lurie *et al.* (1986), encontrando un contenido relativo de agua inicial para chile bell del 90% y de 88% cuando los frutos se almacenaron por 21 días a un DPV=0.29 kPa. Estos valores son similares a los encontrados en los frutos estudiados en este experimento, los cuales se encontraban en un rango del 90-95%.

Así mismo, en la Figura 17, se muestran los contornos de nivel que permite definir los rangos de contenido relativo de agua en función a DPV y tiempo. Con ello, se puede seleccionar variables de respuesta que manifiesten la generación de valores de CRA mayores de 90%. Esto se puede observar fácilmente en DPV bajos.

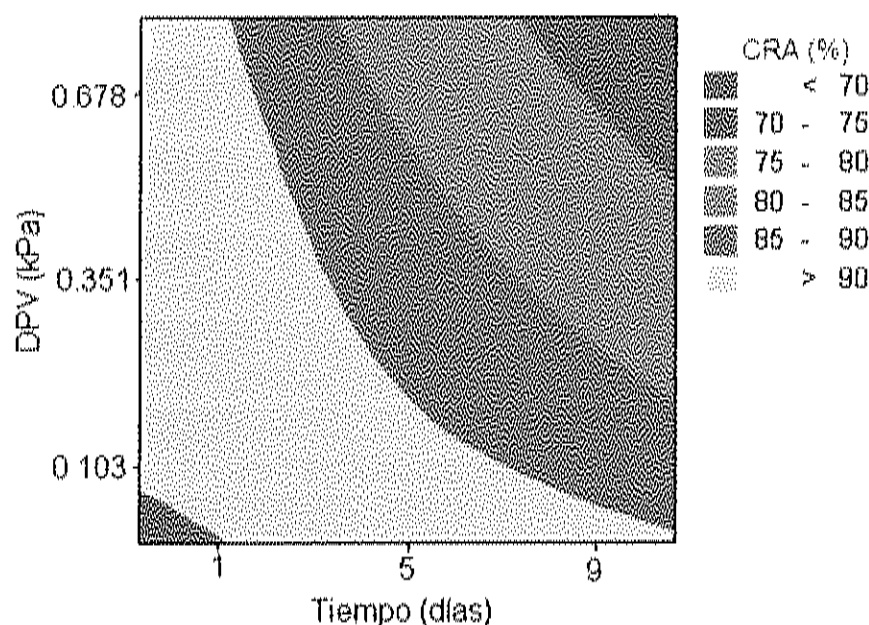


Figura 17. Grafica de contornos bidimensional para el contenido relativo de agua (%) en frutos de chile bell en función a tiempo y déficit de presión de vapor (DPV en kPa).

Lownds *et al.* (1993), reportaron que en nueve cultivares de chile bell el contenido relativo de agua se encontraba en un rango del 92-90% al momento de ser cosechados, el cual posiblemente se vio afectado por la pérdida de agua. Esto también es similar a lo reportado por Lurie *et al.* (1986), encontrando un contenido relativo de agua inicial para chile bell del 90% y de 88% cuando los frutos se almacenaron por 21 días a un DPV=0.29 kPa. Estos valores son similares a los encontrados en los frutos estudiados en este experimento, los cuales se encontraban en un rango del 90-95%.

Como se puede observar los frutos almacenados a DPV entre 0.13 y 0.351 kPa durante 5 días, poseen un contenido relativo de agua mayor del 90%. Este valor coincide con los reportado para chile bell verde el cual al día 5 tiene un CRA = 90% , con un ligero decremento de CRA = 89% al día 21 de almacenamiento a un DPV de 0.21kPa (Lownds *et al.*, 1993).

Báez (2001), reportó de igual manera, en frutos de chile bell amarillos presentan un contenido relativo de agua al momento del corte entre 95-96% y al ser almacenados a un DPV de 0.42 kPa al día 6 el CRA a 90%. Al ubicar esta condición en la figura 17 de este experimento, los resultados de CRA estarían en el rango de 80-85% para chile bell color verde.

Landrigan *et al* (1996), encontraron que frutos de rambutan almacenados a 20°C y HR 60% (DPV = 0.935 kPa), presentaron un CRA inicial de 95%, al día 4 se redujo a 80% y al día 7 a 70%. Aquí se puede observar que la pérdida de CRA fue de un 25% para los frutos almacenados en estas condiciones.

Pomper y Breen (1997), observaron que los frutos de fresa provenientes de plantas bajo estrés hídrico, su CRA estaba relacionado con el potencial de presión, observando que en los frutos estresados el  $\psi_p = -0.5\text{MPa}$  y el CRA=80%, mientras que los irrigados diariamente su  $\psi_p = -0.1\text{MPa}$  y el CRA=90%.

En estudios realizado en pepinos, el CRA al inicio del experimento tuvieron valores promedios de 93 y 91%, registrando una pérdida hasta del 10% en los frutos almacenados por 9 días a DPV =1.26kPa . En este mismo estudio se pudo observar que cuando los frutos de pepino tenían una reducción del 3% en su CRA, ocurrió un cambio en el potencial de presión de valores positivos a negativos (Muy *et al.*, 2004b).

### Sólidos Solubles Totales

En los sólidos solubles totales se observó que todos los coeficientes estimados de la regresión fueron significativos, a excepción de Tiempo\*DPV y Tiempo, con un coeficiente de determinación múltiple igual a  $R^2=65.0$  y con ajuste de  $R^2=56.2\%$  (Cuadro 28), lo que corresponde a un modelo aceptable dentro de rango de determinación.

Cuadro 28. Estimadores de los coeficientes de regresión para la variable sólidos solubles totales (°Brix) en frutos de chile bell.				
Términos	Coeficiente	SE coeficiente	T	P
Constante	4.39000	0.09740	45.071	0.000
Tiempo	0.09205	0.07700	1.195	0.246
DPV	0.35303	0.07700	4.585	0.000
Tiempo*Tiempo	0.28312	0.08258	3.429	0.003
DPV*DPV	0.17063	0.08258	2.066	0.052
Tiempo*DPV	0.05000	0.10890	0.459	0.651
$\delta= 0.3080$ $R^2= 65.0\%$ $R^2$ (ajustada)= 56.2%				

$\delta$  = desviación estándar, SE = error estándar, T= estadístico T de Student, P= valor P,  $R^2$  = coeficiente de determinación múltiple.

En el análisis de varianza se encontró una diferencia significativa en los componentes lineales, cuadráticos y de interacción del modelo de regresión, proporcionando la prueba de ajuste (Cuadro 29), que componen la regresión, excepto para la interacción Tiempo\*DPV la cual no es significativa, la falta de ajuste fue significativa ( $P=0.000$ ), esto indica que el modelo de segundo orden no es una aproximación adecuada a la superficie de respuesta real, y hay necesidad de ajuste. En el Cuadro 30 se muestran los coeficientes del modelo en términos reales.

Cuadro 29. Análisis de varianza de la regresión para la variables sólidos solubles totales (°Brix) en frutos de chile bell.

Efectos	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
Regresión	5	3.51795	3.51795	0.70359	7.42	0.000
Lineal	2	2.12969	2.12969	1.06484	11.22	0.001
Cuadrático	2	1.36826	1.36826	0.68413	7.21	0.004
Interacción	1	0.02000	0.02000	0.02000	0.21	0.651
Error residual	20	1.89744	1.89744	0.09487		
Falta de ajuste	3	1.15344	1.15344	0.38448	8.79	0.001
Error puro	17	0.74400	0.74400	0.04376		
Total	25	5.41538				

GL= grados de libertad, SS= suma de cuadrados, MS= Cuadrado medio, F= estadístico F, P= valor P

Cuadro 30. Coeficientes del modelo en términos reales de la regresión para frutos de chile bell.

Términos	Coeficientes
Constante	4.3900
Tiempo	0.0920
DPV	0.3530
Tiempo*Tiempo	0.2831
DPV*DPV	0.1706

A partir del Cuadro 30 y basados en las significancias que se reportan en el Cuadro 29, se construyó el modelo de regresión estimado (SST = sólidos solubles totales (°Brix), t = días y DPV = kPa):

$$\text{SST} = 4.39 + 0.92t + 0.353\text{DPV} + 0.2831t^2 + 0.1706\text{DPV}^2 + 0.05t\text{DPV}$$



Con el modelo antes señalado, limita la aplicación del mismo ya que de acuerdo al análisis estadístico esta variable no es un estimador para la calidad de frutos de chile bell, ya que el modelo no presentó un ajuste adecuado, pero tal vez solo se requieran más replicas.

La gráfica de la superficie de respuesta generada a partir de los datos para el contenido de sólidos solubles totales en frutos de chile bell en función a DPV y tiempo de almacenamiento, se representa por un comportamiento cóncavo hacia arriba, en el cual hay un punto estacionario mínimo (Figura 18), observando como los sólidos solubles totales tienden a un mínimo, conforme pasa el tiempo y disminuye el DPV.

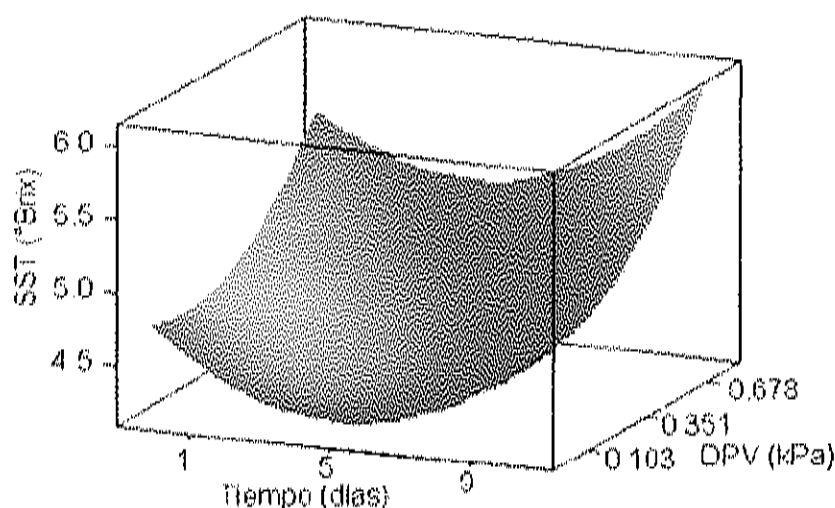


Figura 18. Superficie de respuesta para sólidos solubles totales (°Brix) en frutos de chile bell, en función del tiempo y déficit de presión de vapor (DPV en kPa).

La Figura 19, permite definir las condiciones de almacenamiento donde el contenido de sólidos solubles totales es menor, ya que por medio de líneas de contorno o de niveles muestra los rangos en los cuales los sólidos solubles totales se encuentran en función del DPV y del tiempo, donde a DPV bajos el contenido de sólidos solubles totales se minimiza y se maximiza a DPV altos.

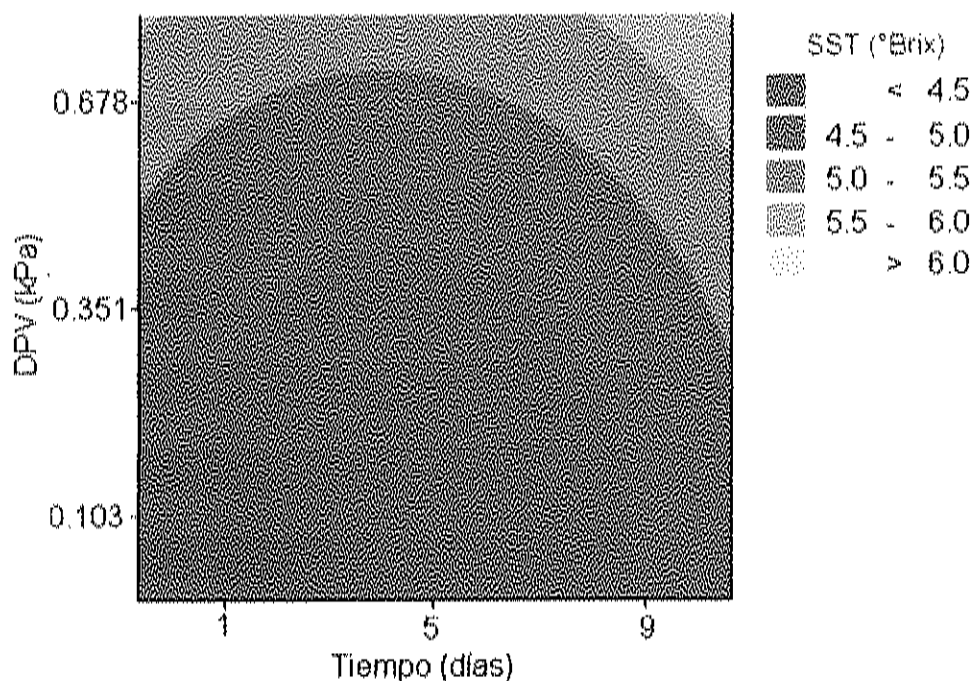


Figura 19. Grafica de contornos bidimensional para sólidos solubles totales (°Brix) en chile bell en función a tiempo y déficit de presión de vapor (DPV en kPa).

Báez (2001), reportó que en frutos de chile bell amarillos almacenados a DPV de 0.42 kPa, el contenido de sólidos solubles totales aumento de 7.3 a 8.5°Brix a los 14 días. De acuerdo a este estudio, el contenido de sólidos solubles totales no hubo variación significativa entre cada DPV, pero tuvieron un comportamiento similar, ya que al día 11, también se presentó un aumento en el contenido de sólidos solubles totales de 4.5 a 5.5 °Brix.

Este mismo comportamiento se observó en frutos de pepino sin encerar se relacionó el  $\psi_w$  con °Brix, ya que al aumentar los sólidos solubles totales, había una disminución en el  $\psi_w$ , obteniendo la siguiente ecuación:  $\psi_w = -0.101(^{\circ}\text{Brix}) - 0.18$  con una  $r^2=0.46$  (Muy *et al.*, 2004b), para este estudio el coeficiente de regresión es muy bajo a debido a que el pepino no se caracteriza por se un cultivo con elevado contenido de sólido solubles totales.

## Optimización

### **Variables Físicas**

Método de deseabilidad. Al agrupar las variables pérdida de peso, firmeza y contenido relativo de agua durante el almacenamiento de chile bell a distintos DPV, se obtuvo una deseabilidad compuesta igual 1, con un valor de tiempo= 11 días y DPV = 0.026 kPa, en estas condiciones se puede obtener de acuerdo a los datos proporcionados los valores mas cercanos a lo deseado. Así mismo, con estas condiciones se puede conocer el comportamiento de cada variable y su deseabilidad (Cuadro 31).

Cuadro 31. Optimización de las variables físicas en frutos de chile bell por el método de deseabilidad.		
DPV = 0.026 kPa Tiempo = 11 días D = 1.000		
Variable	Valor óptimo (calculado)	Deseabilidad D
Pérdida de peso	0.256 %	1.0
Firmeza	5.23 mm	1.0
(CRA)	90.31 %	1.0

Método de sobreposición de superficie. La Figura 20, muestra el área donde todas las variables tienen un valor óptimo o factible, así como las condiciones en las que coinciden las mismas, donde se puede observar que el área esta compuesta por una región triangular en donde a DPV altos y menor tiempo se pueden presentar estos valores, teniéndose una región muy pequeña y conforme disminuye el DPV, el tiempo es mayor y por lo tanto la región de color blanco se ve aumentada en área.

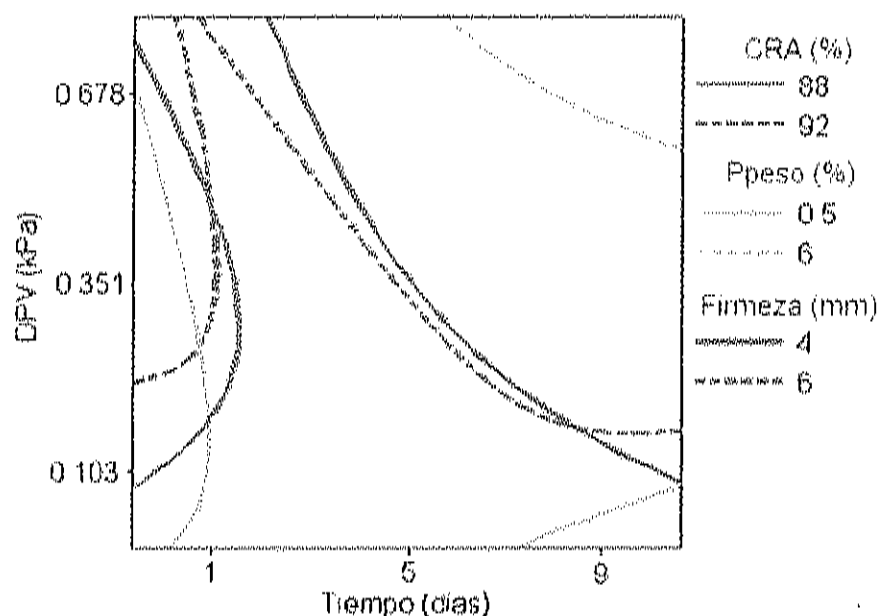


Figura 20. Sobreposición de curvas de nivel para las variables físicas (pérdida de peso = %, Firmeza = mm de deflexión y CRA = %) en frutos de chile bell.

Con los valores obtenidos mediante el método de deseabilidad, si se ubican en la región blanca de la Figura 20, se puede observar que coinciden dentro del rango de valores y las condiciones calculadas, en este método. Por lo que ambos métodos concuerdan con la información de que a menor DPV, mayor es el tiempo en el que se pueden conservar los valores óptimos para el conjunto de las variables físicas.

### Variables Hídricas

Método de deseabilidad. Al agrupar las variables potencial hídrico, potencial osmótico y potencial de presión durante el almacenamiento a distintos DPV, se obtuvo una deseabilidad compuesta igual 0.92, con un valor de tiempo = 11 días y DPV = 0.026 kPa, estos valores corresponde a la condición en donde se obtienen los valores más cercanos a lo óptimo de acuerdo al conjunto de datos obtenidos. Con estas condiciones se puede conocer el comportamiento de cada variable y su deseabilidad (Cuadro 32).

Cuadro 32. Optimización de las variables hídricas por el método de deseabilidad en frutos de chile bell.		
DPV = 0.026 kPa		
Tiempo = 11 días		
D = 0.92093		
Variable	Valor óptimo (calculado)	Deseabilidad D
Potencial hídrico ( $\Psi_w$ )	-0.2583 MPa	1.0
Potencial osmótico ( $\psi_p$ )	-0.6438 MPa	0.78
Potencial de presión ( $\psi_s$ )	0.3893 MPa	1.0

Método de sobreposición de superficie. Al sobreponer las curvas de nivel generadas por las variables hídricas estudiadas, se puede localizar la región en la cual coinciden los valores óptimos o aceptables, para cada una de ellas, así como las condiciones en las cuales se pueden presentar estos valores (Figura 21).

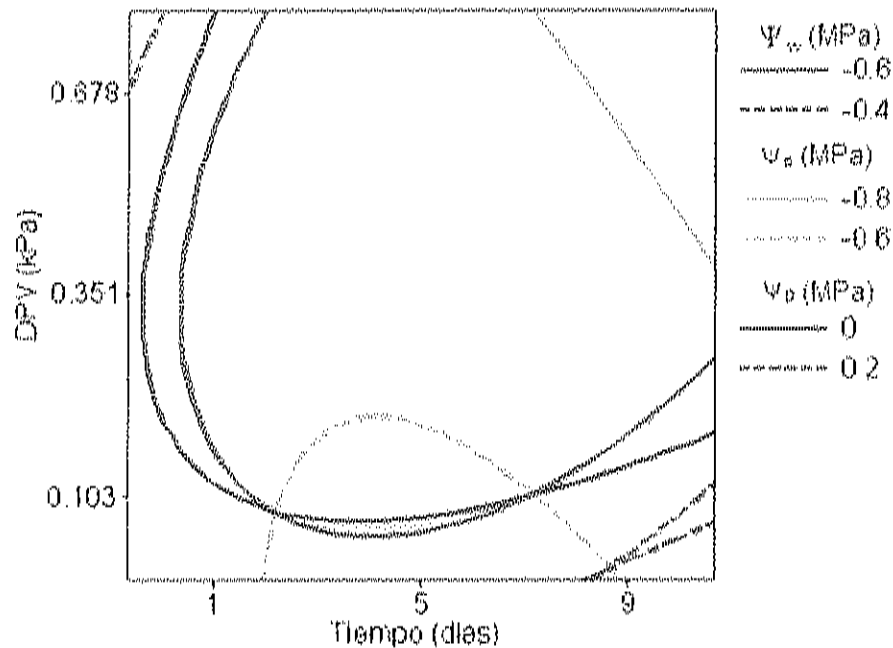


Figura 21. Sobreposición de curvas de nivel para las variables hídricas (potencial hídrico, osmótico y de presión = MPa) en frutos de chile bell.

### Análisis Histológico

Al realizar el análisis histológico, se observó de manera general que todos los frutos almacenados a diferentes condiciones de déficit de presión de vapor (DPV) presentaron ruptura de células en la región del pericarpio, decreciendo el daño conforme se acercaba a la epidermis. Este fenómeno fue dependiente de las condiciones de almacenamiento.

En la Figura 22 se muestran los cortes anatómicos de tejidos de frutos almacenados durante 5 días a diferentes condiciones de DPV. En la Figura 22A se observan las características del tejido cuando el fruto llegó de campo ( $D=0$ ) en donde, el tejido de la epidermis se encuentra íntegro y bien definido, así como las células del pericarpio. Similar comportamiento muestran los frutos almacenados a DPV cercanos a cero (0.026kPa y 0.103kPa), las células de la epidermis se encuentran íntegras y definidas, con ligeras deformaciones en las células del pericarpio, ubicados a una distancia aproximada de 600  $\mu\text{m}$  de la epidermis (Figura 22B y 22C). En este período los frutos presentaron valores promedio de  $\Psi_w$  mayores de  $-0.4\text{MPa}$  y de  $\psi_p$  mayores a  $0.3\text{MPa}$ , lo cual indica según la literatura frescura y turgencia en el tejido (Herppich *et al.*, 2000), lo que permite que las células se mantengan turgentes. En los frutos almacenados a DPV de 0.351kPa el deterioro celular se puede observar aproximadamente a 400  $\mu\text{m}$ . El tejido presenta grandes espacios aéreos bien definidos, producto de la ruptura de las paredes celulares (Figura 22D). En estas condiciones los valores de  $\Psi_w$  fueron de  $-0.6$  a  $-0.7\text{MPa}$ , y el  $\psi_p$  fue de 0 a  $-0.1\text{MPa}$ . Valores característicos de un estrés hídrico en los tejidos (Herppich *et al.*, 2000). En los frutos almacenados a DPV de 0.678kPa el deterioro celular en el pericarpio se encuentra cerca de la epidermis a una distancia de 300  $\mu\text{m}$  de este tejido, presentándose obliteración de células, formación de espacios aéreos y rompimiento de la pared celular (Figura 22E). Bajo estas condiciones los valores de  $\Psi_w$  fueron de  $-0.8$  a  $-0.9\text{MPa}$ , siendo los valores

de  $\psi_p$  de  $-0.1$  a  $-0.2$ MPa. Lo cual nos indica que el tejido perdió frescura y turgencia, habiendo plasmólisis en el tejido, ya que valores negativos de  $\psi_p$  de los tejidos son indicativos de la plasmólisis celular (Azcon-Bieto y Talon, 1993). En los frutos almacenados a  $1.186$ kPa se observó deterioro en las células de la epidermis. En el pericarpio se observa rompimiento de la pared celular y obliteración de células, así como formación de espacios aéreos (Figura 22F). Los valores de  $\Psi_w$  fueron de  $-0.9$  a  $-1.0$ MPa, siendo los valores de  $\psi_p$  de  $-0.1$  a  $-0.2$ MPa. Bajo este tratamiento se presentó el mayor estrés hídrico durante el almacenamiento de los frutos caracterizados por el elevado déficit de presión de vapor, lo cual indujo a los tejidos a la mayor pérdida de agua y deformación celular.

La Figura 23 muestra como los tejidos de los frutos almacenados por 11 días a diferentes condiciones de DPV, manifiestan la misma intensidad de cambio en la estructura celular de los frutos almacenados a distintas condiciones de DPV, el almacenamiento durante este tiempo incrementó el deterioro celular en los frutos, el cual se manifestó con una mayor superficie dañada del pericarpio hacia la epidermis del tejido. Los frutos que se encontraban almacenados a DPV con valores altos ( $0.678$ kPa y  $1.186$ kPa), mostraron deterioro en la epidermis y a una distancia aproximada de  $100 \mu\text{m}$  de esta estructura ya se presentaba obliteración total de las células del pericarpio, así como rompimiento de la pared celular y la formación de espacios aéreos. Bajo estas condiciones el  $\Psi_w$  presentó valores menores a  $-1.0$ MPa (es decir más negativos), el  $\psi_p$  tuvo valores menores de  $-0.2$ MPa (más negativos). El CRA fue menor del 70%. Aquí los frutos tuvieron una excesiva pérdida de agua de un 12-19%. Y la deflexión de los frutos fue de 10 hasta 13mm. Para este tiempo de almacenamiento, la mayoría de los frutos no se encontraban en condiciones de mercadeo, ya que perdieron todos los atributos de calidad requeridos para su comercialización.

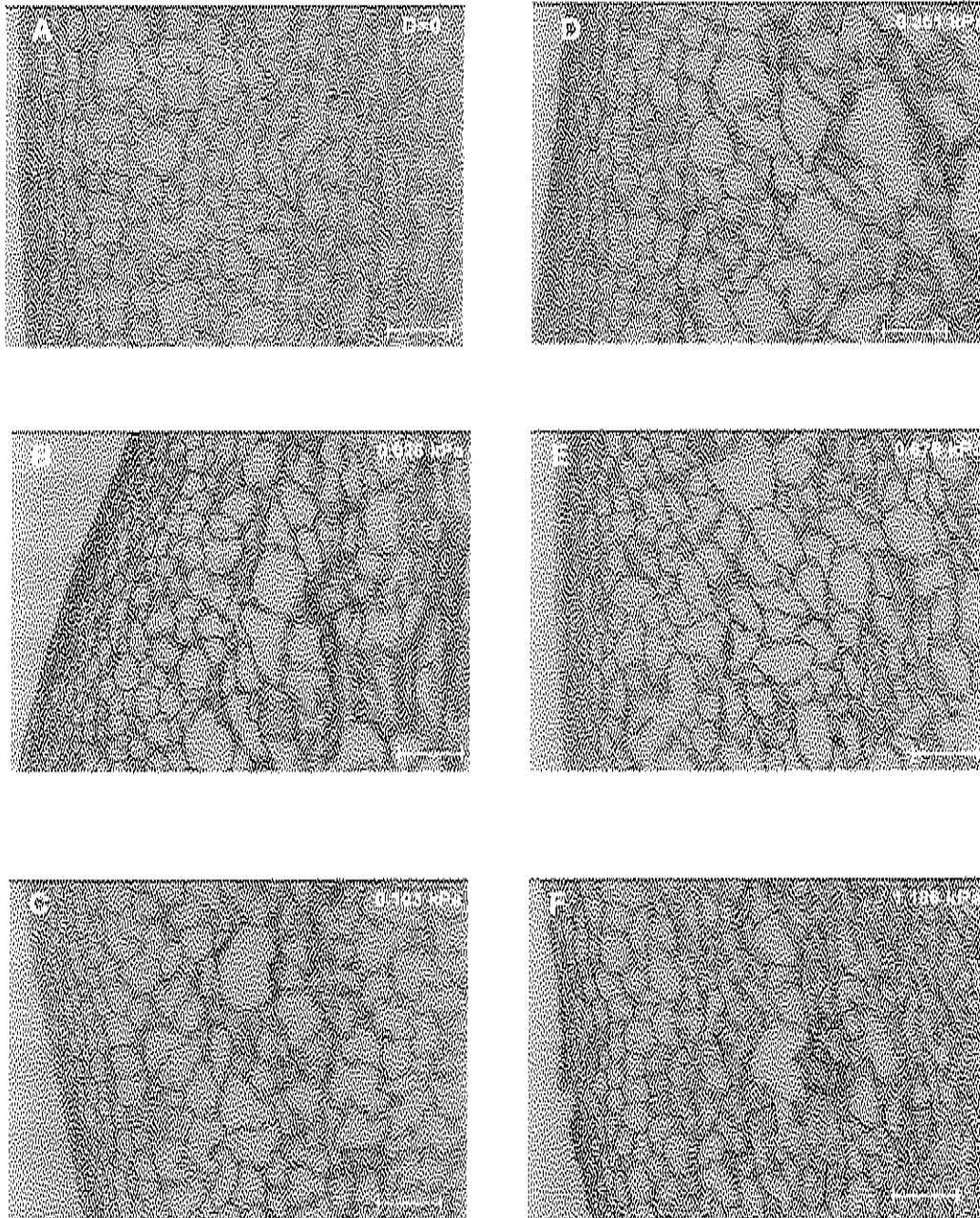


Figura 22. Cortes anatómicos de tejido de pericarpio de fruto de chile bell almacenados durante 5 días expuestos a condiciones de diferentes DPV. La barra indica 200  $\mu\text{m}$ . Nota: La Figura A se cita como referencia para comparar con los demás tejidos.



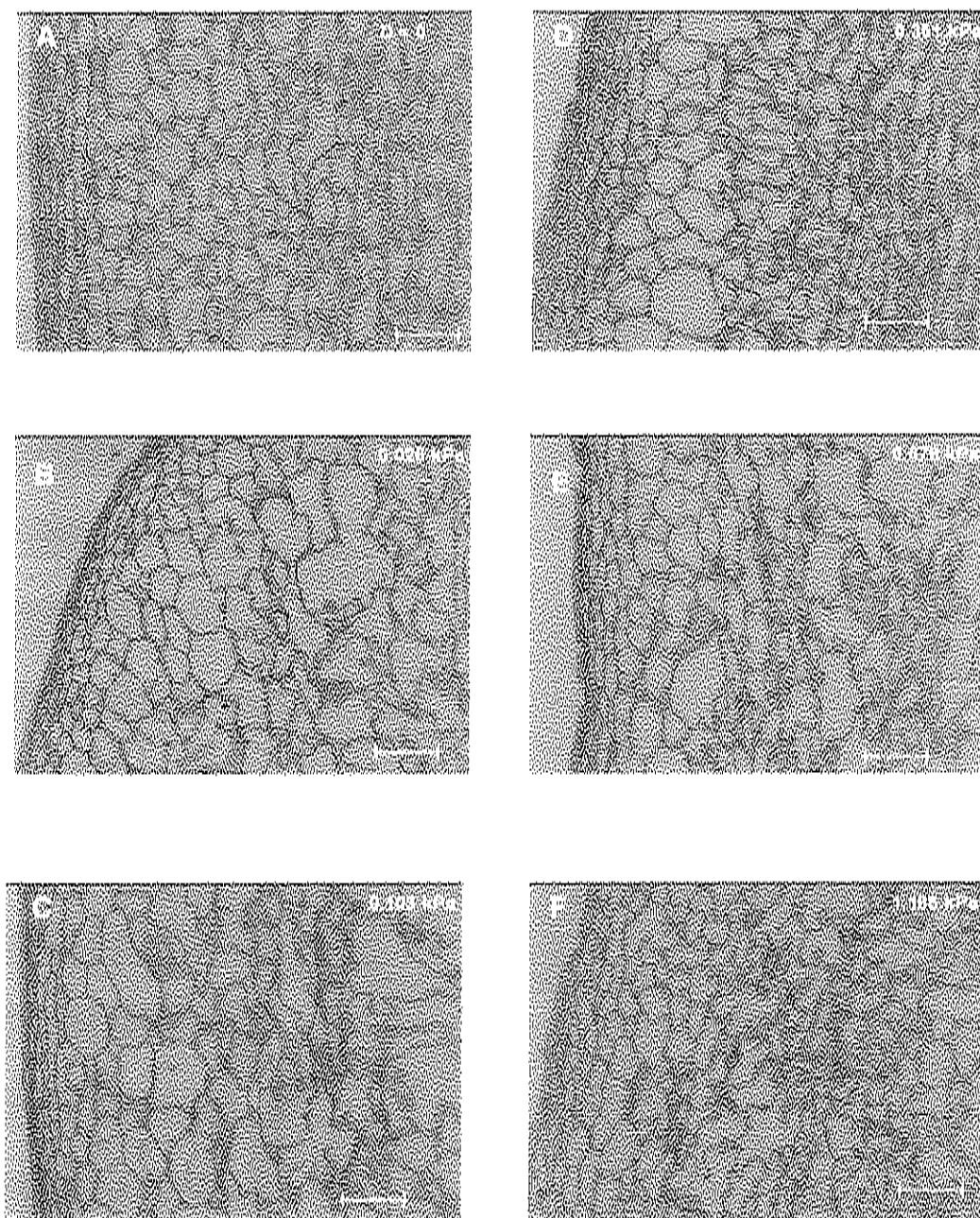


Figura 23. Cortes anatómicos de tejido de pericarpio de fruto de chile bell almacenados durante 11 días expuestos a condiciones de diferentes DPV. La barra indica 200  $\mu\text{m}$  Nota: La Figura A se cita como referencia para comparar con los demás tejidos.

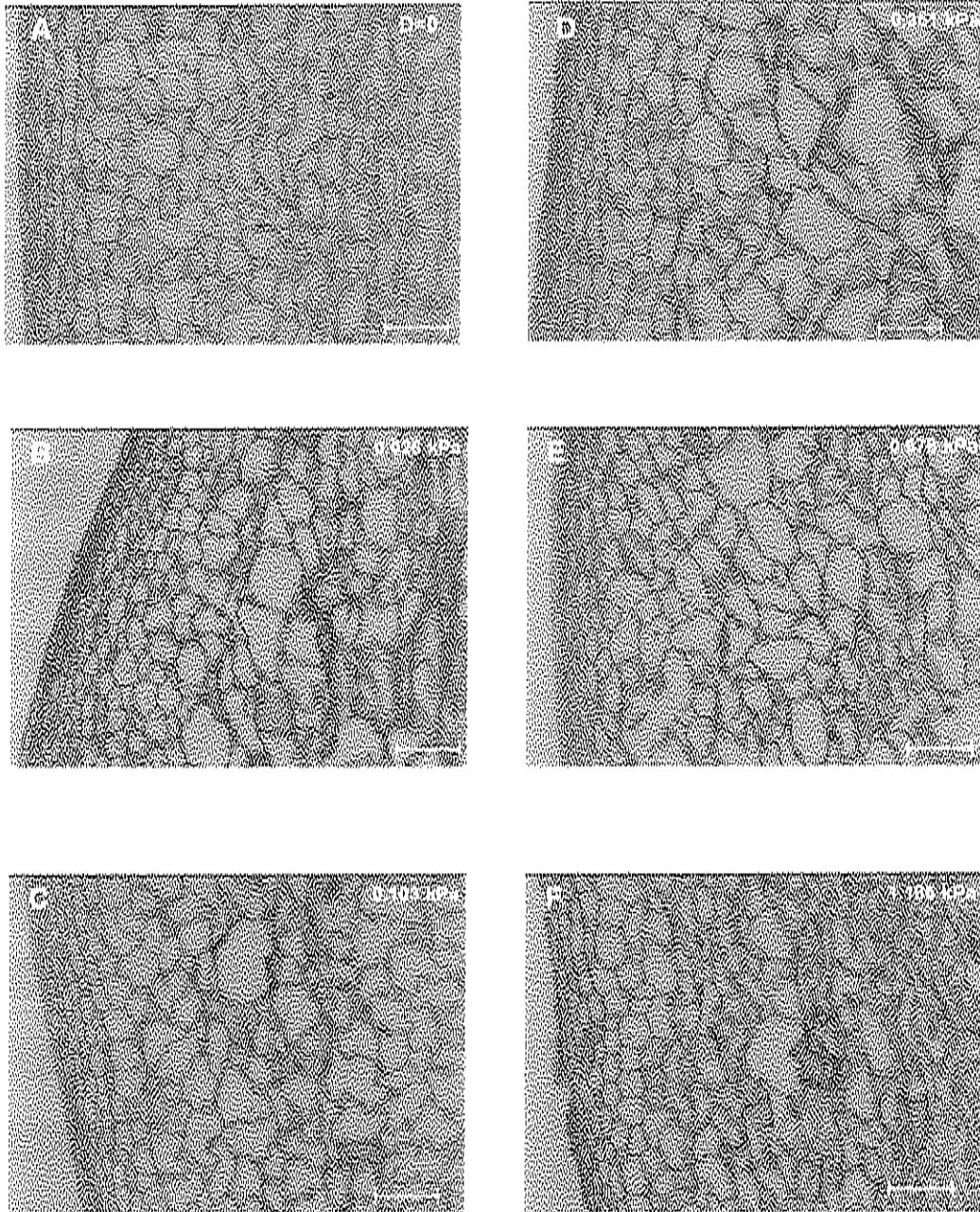


Figura 22. Cortes anatómicos de tejido de pericarpio de fruto de chile bell almacenados durante 5 días expuestos a condiciones de diferentes DPV. La barra indica 200  $\mu\text{m}$ . Nota: La Figura A se cita como referencia para comparar con los demás tejidos.

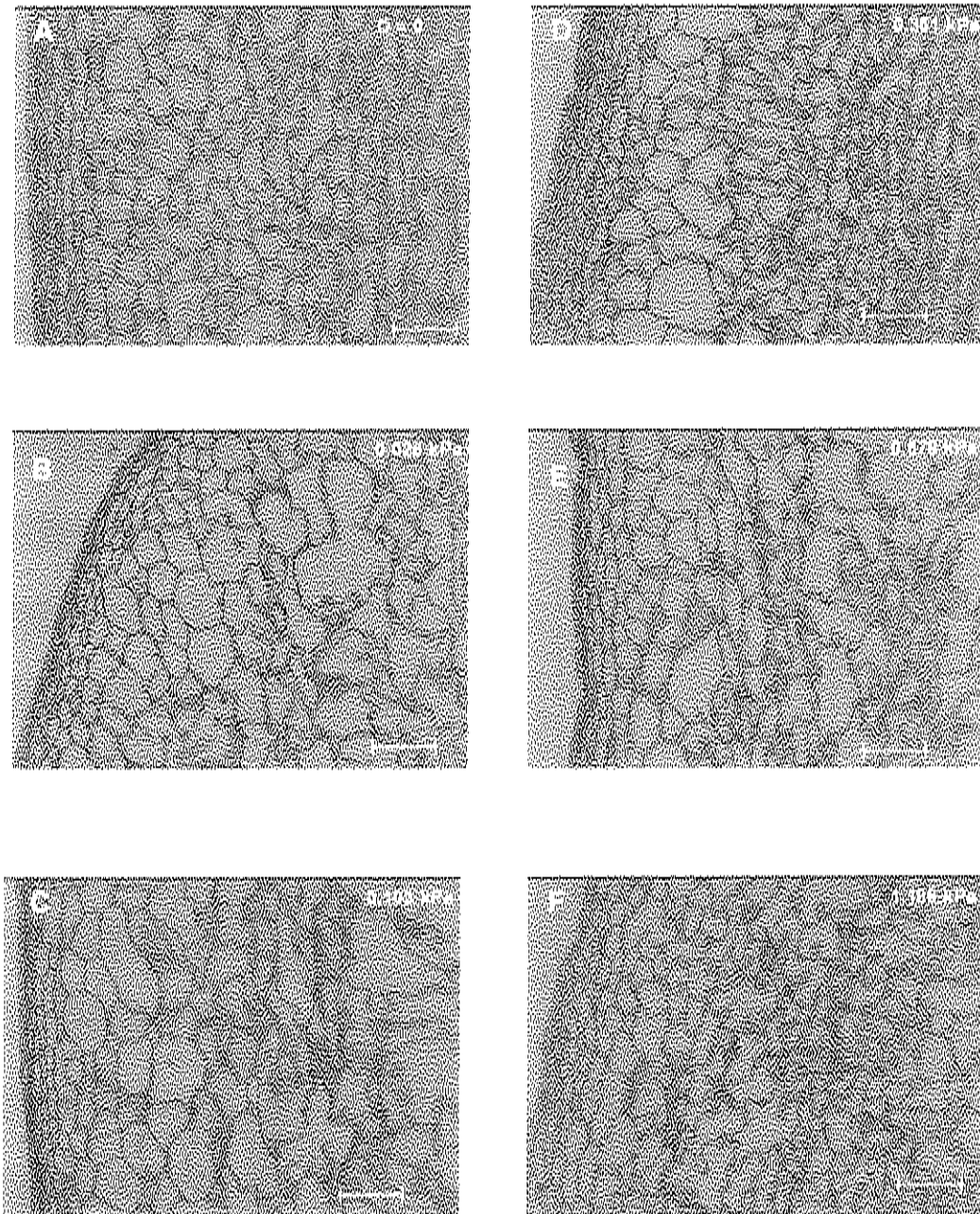


Figura 23. Cortes anatómicos de tejido de pericarpio de fruto de chile bell almacenados durante 11 días expuestos a condiciones de diferentes DPV. La barra indica 200  $\mu\text{m}$  Nota: La Figura A se cita como referencia para comparar con los demás tejidos.

## CONCLUSIONES

Los valores de déficit de presión de vapor (DPV) utilizados durante el almacenamiento de chile bell, es una variable importante de control, para mantener la calidad y la vida de anaquel en frutos.

Los frutos almacenados a menores DPV's, mantienen por mayor tiempo sus características de calidad, en comparación con los expuestos a altos DPV's.

El potencial hídrico, osmótico y de presión se hicieron más negativo en frutos almacenados a mayores DPV's, lo cual indica la pérdida de turgencia del fruto.

Los frutos almacenados a menores DPV's, mantienen por más tiempo sus características de calidad. Mientras que los frutos almacenados al altos DPV's aceleraron la pérdida de calidad de los mismos.

Las condiciones de almacenamiento a distintos valores de DPV ayudan a predecir la vida de anaquel en frutos de chile bell, así como las variables de calidad relacionadas con la misma.

El tejido del pericarpio del fruto se conserva en buenas condiciones por tiempos prolongados cuando se almacena a menores DPV's, mientras que el tejido se ve plasmolizado en poco tiempo cuando este se encuentra en condiciones de altos DPV's.

## BIBLIOGRAFÍA CITADA

**A.O.A.C. 1998.** Official methods of analysis. 16<sup>th</sup> Edition. William S., Ed. Published by Association of Official Analytical Chemist. Washington, D.C.

**Alfárez, F.; Agusti, M.; Zacarías, L. 2003.** Postharvest rind staining in Navel oranges is aggravated by changes in storage relative humidity: effect on respiration, ethylene production and water potential. *Postharvest Biology and Technology*. 28:143-152.

**Azcon-Bieto, J. y Talon M. 1993.** *Fisiología y Bioquímica Vegetal*, Edit. McGraw Hill Inteamericana , España.

**Báez, S. M. A. 2001.** Efecto de las Aplicaciones Precosecha de Calcio y Ácidos Carboxílicos en el Contenido Hídrico y la Vida de Anaquel de Chile Bell. Tesis de Maestría. CIAD, A.C. Culiacán, Sinaloa, México.

**Beecher, T.M., Magan N., Burton K.S. 2001.** Water potentials and soluble carbohydrate concentrations in tissue of freshly harvest and storage mushrooms (*Agaricus bisporus*). *Posthaverst Biology and Technology*. 22:121-131.

**Behdoudian, M.H.; Lawes, G.S.; Griffiths, K.M. 1994.** The influence of water deficit on water relations, photosynthesis and fruit growth in Asian pear (*Pyrus serotina* Rehd.) *Scientia Horticulturae* 60: 89-99.

**Ben-Yehoshua, S. 1987.** Transpiration, waters stress, and gas exchange . In: Weichmann J. (Ed.), Postharvest Physiology of Vegetables. Marcel Dekker, New York. pp. 113-170.

**Böttcher, H.; Günther, I.; Bauermann, U. 1999.** Physiological postharvest responses or marjoram (*Majorana hortensis* Moench). Postharvest Biology and Technology 15:41-52.

**Bourne, M.C. 1980.** Texture evaluation of horticultural crops. Hortscience. 15(1):51-57.

**Boyer, J.S.; Chin Wong, S. and Farguhar G.D. 1997.** CO<sub>2</sub> and water vapor exchange across leaf cuticle (epidermis) at various water potentials. Plant Physiol. 114:185-191.

**Burdon, J. and Clark C. 2001.** Effect of postharvest water loss on 'Hayward' kiwifruit water status. Postharvest Bilogy and Technology. 22:215-225.

**Cantwell, M. 1996.** Bell pepper: Recommendations for maintaining postharvest quality. Produce Facts. Perishables Handling No. 87. University of California. Davis, USA.

**Carmona, V.G. 2001.** Rol de la temperatura en el almacenamiento de productos frescos. En: Guía Técnica Poscosecha No. 5. Consejo Nacional de Producción. San José, Costa Rica. Pp. 1-17.

**Chaves, G.; Montiel, G.M.; Sgroppo. S.C.; Avanza, J.R. 2000.** Capacidad antioxidante de pimientos morrones. Laboratorio de Tecnología Química. Comunicaciones Científicas y Tecnológicas. FACENA. UNNE. Argentina.

**Chu Yi-Fang, Sun Jie, Wu Xianzhong and Liu Rui Hai. 2002.** Antioxidant and antiproliferative activities of common vegetables. *Journal Agricultural and Food Chemistry*. Vol. 50, No. 23. Pp 6910-6916.

**CIDH, 2003.** Comisión par la Investigación y Defensa de las Hortalizas  
<http://www.cidh.org.mx>

**Cook, J.R. and Papendick R.I. 1978.** Role of water potential in microbial growth and development of plant disease, with special reference to postharvest pathology. *Hortscience*. 13(5):559-564.

**Costa, M.G.; Pham Thi, A.T.; Pimentel, C.; Pereyra, R.O.; Zuily-Fodil, Y.; Laffray, D. 2000.** Differences in growth and water relations among *Phaseolus vulgaris* cultivars in response to induced drought stress. *Environmental and Experimental Botany*. 43:227-237.

**De Belle, N.; Herppich, W.; De Baerdemaecker, J. 2000.** A kinetic model of turgor loss in red cabbage cells during mild heat treatment. *Plant Physiology* 157:263-272.

**Díaz-Pérez, J.C. 1998.** Transpiration rates in eggplant fruit as affected by fruit and calyx size. *Postharvest Biology and Technology*. 13:45-49

**Díaz-Pérez, J.C. and Araiza E. 1997.** Changes in transpiration rates and skin permeance as affected by storage and stage of tomato fruit ripeness. 7th International controlled atmosphere research conference. July 13-18. University of California, Davis. USA.

**FAO. 2003.** Food and Agriculture Organization. Agriculture. Pepper.

**Freeman, B., Albrigo L.G., Biggs. 1979.** Ultrastructure and chemistry of cuticular waxes of developing *Citrus* leaves and fruits. *J. Amer. Soc. Hort. Sci.* 104(6): 801-808.

**Garrote, R.L.; Silva, E.R.; Bertone, R.A.; Avalle, A. 1998.** Pelado químico y termofísico de espárragos. *Ciencia y Tecnología de Alimentos*. Vol. 3. No.3.

**Gómez, E.R. Corzo, O. Bracho, N. y Moino, A. 2003.** Optimización de la deshidratación osmótica del melón utilizando la metodología de la superficie de respuesta. Inextenso del 27 Congreso Nacional de Estadística e Investigación Operativa. Venezuela.

**Gutiérrez, P.H.; de la Vara, S.R. 2003.** Análisis y diseño de experimentos. 1ª Edición. Editorial McGrawHill. México, D.F. Pp. 470-533.

**Harris, J.L. 1988.** Peppers. Safe methods to store, preserve and enjoy. University of California. Division of agriculture and natural resource. <http://anrcatalog.ucdavis.edu>.

**Herppich, W.B., Mempel H. and Geyer M. 2000.** Carrot water relation during postharvest. Effects on internal and external product quality. In: Integrated view of fruit & vegetables quality. Florkowski W.J., Prussia S.E. y Shewfelt R.L. Editors. International Multidisciplinary Conference. Technomic Publishing Co. Inc. Lancaster. Basel. Pp 64-72.

**Howard, L.R.; Smith, R.T.; Wanger, A.B.; Villalon, B.; Burns, E.E. 1994.** Provitamin A and Ascorbic Acid content of fresh pepper cultivars (*Capsicum annum*) and processed jalapeños. *Journal of Food Science*. Vol. 52. 2:362-365.



**Hsiao, T.C. 1990.** Measurements of plants water status. In: Irrigation of Agricultural Crops. Agronomy monograph. No. 30. Pp. 243-277.

**Hudson, D.E.; Butterfield, J.E.; Lachance, P.A. 1985.** Ascorbic acid, riboflavin, and thiamine content of sweet peppers during marketing. HortScience Vol. 20(1): 129-130.

**INFOAGRO, 2003.** <http://www.infoagro.com/hortalizas/pimiento.htm>

**Kader, A. 1992.** Quality and safety factors: Definition and evaluation for fresh horticultural crops. Storage. In: Postharvest Technology of Horticultural Crops. Agricultural and Natural Resources Publications. University of California. U.S.A.

**Landrigan, M., Morris S.C., Eamus D. y McGlasson W.B. 1996.** Postharvest water relationships and tissue browning of rambutan fruit. Sci. Horticulture. 66:201-208.

**Larqué S.A., Trejo L. C. 1990.** El agua en las plantas: Manual de prácticas de fisiología vegetal. Editorial Trillas. México, D.F. Pp. 39-57.

**Leonardi, C., Guichard, S. and Bortin, N. 2000.** High vapor pressure deficit influence growth, transpiration and quality of tomato fruits. Scientia Horticulturae 84:285-296.

**Lerdthanangkul, S. and Krochta, J.M. 1996.** Edible coating effects on postharvest quality of green bell peppers. Journal of food science. Vol.61(1):1796-179.

**Lin, W.C.; Hall, J.W.; Saltveit Jr., M.E. 1993.** Ripening stage affects the chilling sensitivity of greenhouse-grown peppers. *J. Amer. Soc. Hort. Sci.* 118(6) :791-795.

**Lownds, N. K., Banaras M. and Boslanda P. W. 1993.** Relationships between postharvest water loss and physical properties of pepper fruit (*Capsicum annum* L.). *HortScience* 28(12):1182-1884.

**Lownds, N. K., Banaras M. and Boslanda P. W. 1994.** Postharvest water loss and storage quality of nine pepper (*Capsicum*) cultivars. *HortScience* 28(12):1182-1884

**Lugo, U. L.; Araujo, B. F.; Villalobos, R. 1996.** Una metodología para la estimación del estrés hídrico en plantas de lima "Tahiti" (*Citrus* x "Tahiti"). *Rev. Fac. Agron. (LUZ) Venezuela.*13:49-60.

**Lui, L.H. and Kushalappa A.C. 2003.** Models to predict potato tuber infection by *Pythium ultimum* from duration of wetness and temperature, an leak-lesion expansion from storage duration and temperature. *Postharvest Biology and Technology* 27:313-322.

**Lurie, S., and Yehoshua B. 1986.** Changes in membrane properties and abscisic acid during senescence of harvest bell pepper fruit. *J. Amer. Soc. Hort. Sci.* 111(6): 886-889.

**Lurie, S., Shapiro B. and Yehoshua B. 1986.** Effects of water stress and degree of ripeness on rate of senescence of harvest bell pepper fruit. *J. Amer. Soc. Hort. Sci.* 111(6): 880-885.

**Maguire, K.M., Banks, N, Lang, A. 1999.** Sources of variation in water vapour permeance of apple fruits. *Postharvest Biology and Technology*. 17:11-17.

**Mendoza , W.A.M. y Báez, S.R. 1997.** Composición de las ceras cuticulares de frutos de tomate normales e híbridos *rin* y *ron*. *Hort. Mex.* 5 (4): 366-374.

**Meuser, F., Van Lenguerich, B. 1983.** Possibilities of quality optimization of industrially extruded flat breads. In: Zeuthen, P. (ed). *Thermal Processing and Quality of Foods*. Elsevier Applied Science Publishers. N.Y. U.S.A.

**Mills, T.M.; Behdoudian, M.H.; Clothier, B.E. 1996.** Water relations, growth, and the composition of "Braeeburn" apple fruit under deficit irrigation. *J. Amer. Soc. Hort. Sci.* 121(2): 286-291.

**MINITAB. 2004.** Minitab Inc. Release for windows. Statistical software. Version 14.0.

**Muy, R.D.; Siller C.J.; Díaz P.J.; Valdéz T.B. 2004a.** Las condiciones de almacenamiento y el encerado afectan el estado hídrico y la calidad del mango. *Rev. Fitotec. Mex.* Vol. 27(2)201-209.

**Muy, R.D.; Siller C.J.; Díaz P.J.; Valdéz T.B. 2004b.** Efecto de las condiciones de almacenamiento y el encerado afectan el estatus hídrico y la calidad poscosecha de pepino de mesa. *Rev. Fitotec. Mex.* Vol. 27(2)157-165.

**Myers, R.H. 1971.** *Response Surface Methodology*. Allyn and Bacon publishers. Boston. U.S.A.

**Nuez, F., Gil Ortega R. y Costa J. 1996.** El Cultivo de pimientos, chiles y ajíes. Ediciones Mindi-Prensa, Madrid, España. Pp. 15-30

**Parra, Q. R., Rodríguez O. J. y González H. V. 1999.** Transpiración, potencial hídrico y prolina en zarzamora bajo déficit hídrico. Terra Vol. 2(17): 125-130.

**Pearcy, R.W., Ehleringer J.R., Mooney, H.A. and Rundel P.W. 1991.** Plant Physiology Ecology. Field Methods and Instrumentation. Chapman and Hall Company. New York,

**Pomper, K.W. and Breen P.J. 1997.** Expansion and osmotic adjustment of strawberry fruit during water stress. J. Amer. Soc. Hort. Sci. 122(2): 183-189.

**Ryall, L.A. and Lipton W. 1978.** Refrigerated storage. In: Handling transportation and storage of fruits and vegetables. Vol. 1, AVI Publishing Company, INC. Westport, Connecticut. pp. 293-306.

**Salisbury, F.B y Ross C. W. 1994.** Fisiología Vegetal. Grupo Editorial Iberoamérica, S.A. de C.V. México, D.F. Pp. 29-46.

**Salunkhe, D. K; Desai, B. B. 1984.** Postharvest biotechnology of vegetables. Vol. I and II, CRC Press, Inc. Boca Ratón, Florida.

**Sargent, S.A. 1998.** Pepper production guide for Florida: Harvesting and handling. University of Florida. Commercial vegetable guide series. Circular 102 E. SP215.

**Schouten, R.E., Kessler, D., Orcaray L. and Kooten O. 2002.** Predictability of keeping quality of strawberry batches. *Postharvest Biology and Technology* 26:35-47.

**Schouten, R.E., Tijskens, L.M.M. and Kooten, O. 2002.** Predictability of keeping quality of batches of cucumber fruit based on a physiological mechanism. *Postharvest Biology and Technology* 26:209-220.

**Shackel, K.A.; Greve, C.; Labavitch, J.M.; Ahmadi, H. 1991.** Cell turgor changes associated with ripening in tomato pericarp tissue. *Plant Physiology* 97: 814 - 816.

**Shibaro, S.L., Upadhyaya, M.K. and Toivonen, P.M. 1997.** Postharvest moisture loss characteristics of carrot (*Daucus carota* L.) cultivars during short-term storage. *Scientia Horticulturae* 71:1-12.

**Spomer, L.A. 1985.** Techniques for measuring plant water. *Hortscience*. Vol. 20(6): 1021-1027.

**Toivonen, M.A. and Stan, S. 2004.** The effect of washing on physicochemical changes in packaged, sliced green peppers. *International Journal of Food Science and Technology*. 39:43-51.

**Turner, N.C. 1981.** Techniques and experimental approaches for the measurement of plant water status. *Plant soil*. Vol. 58:339-366.

**Varoquaux, P., Gouble, B., Barron C. and Yildiz, F.1999.** Respiratory parameter and sugar catabolism of mushroom (*Agaricus bisporus* Lange) *Postharvest Biology and Technology* 16:51-61.

**Villavicencio, L., Blankeship S. M., Sanders D.C. and Swallow W.H. 1999.** Ethylene and carbon dioxide production in detache fruit of selected peper cultivars. J. Amer. Soc. Hort. Sci. Vol. 124 (4):402-406.

**Wang, C.Y. 1997.** Effect of CO<sub>2</sub> treatment on storage and shelf life of sweet peppers. J. Amer. Soc. Hort. Sci. 102(6):808-812.

**Wills, R., McGlasson, B., Graham, D. and Joyce D. 1998.** Introducción a la Fisiología y Manipulación Poscosecha de Frutas, Hortalizas y Plantas Ornamentales. 2ª Edición. Editorial ACRIBIA. Zaragoza, España.

**Villavicencio, L., Blankeship S. M., Sanders D.C. and Swallow W.H. 1999.** Ethylene and carbon dioxide production in detache fruit of selected peper cultivars. *J. Amer. Soc. Hort. Sci.* Vol. 124 (4):402-406.

**Wang, C.Y. 1997.** Effect of CO<sub>2</sub> treatment on storage and shelf life of sweet peppers. *J. Amer. Soc. Hort. Sci.* 102(6):808-812.

**Wills, R., McGlasson, B., Graham, D. and Joyce D. 1998.** Introducción a la Fisiología y Manipulación Poscosecha de Frutas, Hortalizas y Plantas Ornamentales. 2ª Edición. Editorial ACRIBIA. Zaragoza, España.