

COLEGIO DE POSTGRADUADOS

INSTITUCIÓN DE ENSEÑANZA E INVESTIGACIÓN EN CIENCIAS AGRÍCOLAS

CAMPUS MONTECILLO

POSTGRADO DE RECURSOS GENÉTICOS Y PRODUCTIVIDAD

FRUTICULTURA

**MODELO EXPLICATIVO DEL EFECTO MECÁNICO Y FISIOLÓGICO
EN FRUTOS CAUSADO POR LAS CARGAS DINÁMICAS DURANTE EL
TRANSPORTE**

ARTEMIO PÉREZ LÓPEZ

T E S I S

PRESENTADA COMO REQUISITO PARCIAL

PARA OBTENER EL GRADO DE:

DOCTOR EN CIENCIAS


MONTECILLO, TEXCOCO, EDO. DE MÉXICO

2014

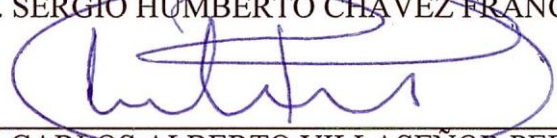
La presente tesis, titulada: **Modelo explicativo del efecto mecánico y fisiológico en frutos causado por las cargas dinámicas durante el transporte**, realizada por el alumno: **Artemio Pérez López**, bajo la dirección del Consejo Particular indicado, ha sido aprobada por el mismo y aceptada como requisito parcial para obtener el grado de:

DOCTOR EN CIENCIAS
RECURSOS GENÉTICOS Y PRODUCTIVIDAD
FRUTICULTURA


CONSEJO PARTICULAR

CONSEJERO: 


DR. SERGIO HUMBERTO CHÁVEZ FRANCO

ASESOR: 


DR. CARLOS ALBERTO VILLASEÑOR PEREA

ASESOR: 

DR. TEODORO ESPINOSA SOLARES

ASESOR: 

DR. LUIS HÉCTOR HERNÁNDEZ GÓMEZ

ASESOR: 

DRA. CONSUELO SILVIA O. LOBATO CALLEROS

Montecillo, Texcoco, Estado de México, noviembre de 2014

DEDICATORIA

“A mis seres queridos, con gran aprecio y compromiso”

María Paulina †, Filomeno

Dixie Donají, Svetlana Sinaí

Vicente, Zenaida, Rubén, Rosario, Macrina, Tomás

AGRADECIMIENTOS

Agradezco a los millones de mexicanos (as) que pagan impuestos, quienes, a través del Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) y el Colegio de Postgraduados, han financiado parte de mi formación.

A la Universidad Autónoma Chapingo y Departamento de Ingeniería Agroindustrial por el apoyo económico y brindarme la oportunidad de concluir con mis estudios de doctorado.

A los profesores integrantes de mi Consejo Particular por el esfuerzo, la dedicación, el tiempo y el apoyo que me han brindado, pero sobre todo por la infinita paciencia para conmigo y mis problemas.

A todos mis amigos, llámense profesor (a), compañero (a), amigo (a) o familia, quienes de alguna manera me han acompañado hasta hoy, aun en la distancia.

A la fundación Salvador Sánchez Colín (CICTAMEX S.C.), Estado de México y en especial al Dr. Rubén Elías Damián, por haber proporcionado los frutos para realizar la investigación.

CONTENIDO

INTRODUCCIÓN GENERAL	1
OBJETIVOS PARTICULARES	6
LITERATURA CITADA	7
CAPITULO I	9
EFFECTO DE REDUCTORES DE VELOCIDAD SOBRE LAS CARGAS DINÁMICAS EN EL TRANSPORTE.....	9
1.1 RESUMEN.....	9
1.2 ABSTRACT	10
1.3 INTRODUCCIÓN	11
1.4 MATERIALES Y MÉTODOS	18
1.4.1 Localización de topes sobre la superficie de la carretera por sus coordenadas geográficas.....	18
1.4.2 Medición del perfil de topes y cálculo del IRI	19
1.4.3 Medición de las fuerzas gravitacionales (fuerzas G).....	21
1.4.4 Análisis de datos	23
1.5 RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	24
1.5.1 Localización de topes sobre la superficie de la carretera por sus coordenadas geográficas.....	24
1.5.2 Medición de perfil de topes y cálculo del IRI	27
1.6 CONCLUSIONES	32
LITERATURA CITADA.....	33
CAPITULO II	36
VELOCIDAD DE RESPIRACIÓN Y LAS PROPIEDADES MECÁNICAS DE FRUTOS DE DURAZNO DURANTE EL ALMACENAMIENTO EN TRES ESTADOS DE MADUREZ... 36	36
2.1 RESUMEN.....	36
2.2 ABSTRACT	37
2.3 INTRODUCCIÓN	38

2.4 MATERIALES Y MÉTODOS	40
2.4.1 Materiales	40
2.4.2 Propiedades físicas	41
2.4.3 Propiedades mecánicas	44
2.4.4 Caracterización fisiológica	46
2.5 RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	47
2.5.1 Propiedades físicas	47
2.5.2 Caracterización fisiológica	50
2.5.3 Propiedades mecánicas	53
2.6 CONCLUSIONES	56
LITERATURA CITADA.....	57
CAPITULO III.....	62
EFFECTO DE LAS CARGAS DINÁMICAS DEL TRANSPORTE EN LA VELOCIDAD DE RESPIRACIÓN DE FRUTOS DE DURAZNO	62
3.1 RESUMEN.....	62
3.2 ABSTRACT	63
3.3 INTRODUCCIÓN	64
3.4 MATERIALES Y MÉTODOS	67
3.4.1 Materiales	67
3.4.2 Equipo de experimentación	67
3.4.3 Pruebas de carga dinámica en carretera.....	70
3.4.4 Análisis de datos.....	72
3.5 RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	73
3.6 CONCLUSIONES	83
LITERATURA CITADA.....	84
CONCLUSIONES GENERALES.....	86

INDICE DE FIGURAS

Figura 1. Estrategia Experimental.....	5
--	---

CAPÍTULO I EFECTO DE REDUCTORES DE VELOCIDAD SOBRE LAS CARGAS DINÁMICAS EN EL TRANSPORTE

Figura 1.1. Representación mediante el modelo de “un cuarto de carro” de <i>la masa suspendida</i> (x_s) y <i>masa no suspendida</i> (x_u) del vehículo (Luque <i>et al.</i> , 2005; Jazar, 2008).	11
Figura 1.2. Tipo de reductores de velocidad en la superficie de carreteras federales o vías primarias.	12
Figura 1.3. a) Representación de la dirección de absorción de energía en empaques estibados en la interacción carretera-vehículo-carga y b) elementos y acoplamientos en un sistema RVL (doble flecha significa tensión-compresión, flecha simple solo compresión) (Schoorl and Holt, 1982; Jones <i>et al.</i> 1991).	13
Figura 1.4. Representación de la viga móvil de tres metros (Arriaga-Patiño <i>et al.</i> , 1998).....	15
Figura 1.5. Identificación del tipo de fuerzas G en un sistema de coordenadas tridimensional ...	16
Figura 1.6. Prototipo de <i>escaneador de perfil</i> de topes	20
Figura 1.7. Acelerómetro y objeto de referencia empleados en la calibración.....	22
Figura 1.8. Serie de datos de aceleración en el eje z ($m \cdot s^{-2}$) durante el tiempo (s).....	23
Figura 1.9. Puntos de la ruta trazada por el GPS sobrepuestas en la imagen satelital de Google Earth (cada rectángulo blanco en las imágenes de la derecha representa un punto captado por el GPS con sus respectivas coordenadas geográficas).	25
Figura 1.10. Localización de topes sobre la imagen satelital de Google Earth® 2014 por sus coordenadas geográficas.	27
Figura 1.11. Perfil de dos topes con características representativas en el tramo de carretera estudiado.	28
Figura 1.12. Fuerza gravitacional y altura de tope en función del tiempo en el tramo de carretera estudiado	30

CAPÍTULO II VELOCIDAD DE RESPIRACIÓN Y LAS PROPIEDADES MECÁNICAS DE FRUTOS DE DURAZNO DURANTE EL ALMACENAMIENTO EN TRES ESTADOS DE MADUREZ

Figura 2.1. Representación de la longitud (L), diámetro mayor (M) y diámetro menor (N) de frutos durazno cv. Diamante.	41
---	----

Figura 2.2. Representación esquemática de la orientación en que se tomaron las muestras del mesocarpio del fruto de durazno, la orientación de las células, espacios intercelulares y haces vasculares dentro del mesocarpio. Las células y espacios intercelulares cerca de la superficie son esféricos y menos orientados, mientras que en el interior están radialmente elongados y orientados en columnas radiales. El área sombreada representa los espacios intercelulares y las líneas gruesas representan los haces vasculares (adaptado de Khan and Vincent (1993), Chalermchat <i>et al.</i> (2010)).....	45
Figura 2.3. Variación en la velocidad de respiración de frutos de durazno cv. Diamante en tres estados de madurez (M1 = verde; M2 = medio amarillo y M3 = amarillo) durante el almacenamiento a 20 ± 2 °C.	51
Figura 2.4. Variación en la pérdida de peso de frutos de duraznos cv. Diamante cosechados en tres estados de madurez (M1 = verde; M2 = medio amarillo and M3 = amarillo) durante el almacenamiento a 20 ± 2 °C.	52
Figura 2.5. Representación esquemática de las seis posibles formas de orientación de la carga en los tres planos primarios: x,y ; x,z and y,z . Este estudio solamente consideró la orientación radial (1) y la tangencial (3). (Adaptado de Khan and Vincent, 1993).....	55

CAPÍTULO III

EFECTO DE LAS CARGAS DINÁMICAS DEL TRANSPORTE EN LA VELOCIDAD DE RESPIRACIÓN DE FRUTOS DE DURAZNO

Figura 3.1. Esquema de recorrido del fruto desde el huerto de producción hasta el mercado de consumo	65
Figura 3.2. a) Sistema de generación de flujo continuo de aire y b) prototipo de aplicación de carga dinámica con sensores de CO ₂ y acelerómetro.	68
Figura 3.3 Conexión del sistema de adquisición de datos	70
Figura 3.4. Equipo de experimentación montado en vehículo de prueba.	71
Figura 3.5. Velocidad de respiración de frutos de durazno sometidos a dos cargas de compresión sin recorrido por carretera.	74
Figura 3.6. Velocidad de respiración de frutos de durazno sometidos a dos cargas de compresión y con recorrido de 5.8 km en carretera.	75
Figura 3.7. Velocidad de respiración de frutos de durazno sometidos a dos cargas de compresión y recorrido de 11.6 km en carretera.	76

INDICE DE CUADROS

CAPÍTULO I EFECTO DE REDUCTORES DE VELOCIDAD SOBRE LAS CARGAS DINÁMICAS EN EL TRANSPORTE

Cuadro 1.1. Coordenadas geográficas de los topes con el GPS.....	26
Cuadro 1.2. Media \pm desviación estándar de las variables de altura, longitud, Índice de Rugosidad Internacional (IRI) y fuerzas G _x , G _y y G _z calculados a partir del perfil únicamente de los topes.	29
Cuadro 1.3. Regresión lineal con errores autocorrelacionados y corrección por heterocedasticidad sobre la variable fuerzas gravitacionales en los diferentes ejes del sistema de coordenadas.	32

CAPÍTULO II VELOCIDAD DE RESPIRACIÓN Y LAS PROPIEDADES MECÁNICAS DE FRUTOS DE DURAZNO DURANTE EL ALMACENAMIENTO EN TRES ESTADOS DE MADUREZ

Cuadro 2.1. Luminosidad (L*), ángulo hue (hue) y pureza de color (chroma) (media \pm SD, n = 10) de la superficie duraznos cv. Diamante cosechados en tres estados de madurez.....	48
Cuadro 2.2. Propiedades físicas (media \pm SD, n = 50) de duraznos cv. Diamante cosechados en tres diferentes estados de madurez.....	49
Cuadro 2.3. Análisis de varianza multifactorial para la carga de compresión, deformación y módulo de elasticidad aparente de frutos de durazno.	54

CAPÍTULO III EFECTO DE LAS CARGAS DINÁMICAS DEL TRANSPORTE EN LA VELOCIDAD DE RESPIRACIÓN DE FRUTOS DE DURAZNO

Cuadro 3.1. Efecto de los factores distancia de recorrido y carga de compresión sobre la velocidad de respiración en frutos de durazno sometidos a carga dinámica en carretera.....	77
Cuadro 3.2. Estadística descriptiva de la velocidad de respiración R mL CO ₂ · kg ⁻¹ · h ⁻¹ y fuerzas gravitacionales G en los ejes x,y,z que constituyen los modelos de los diferentes tratamientos.....	77
Cuadro 3.3. Modelos de Función de Transferencia (MFT) de la relación entre la velocidad de respiración de frutos de durazno y las fuerzas gravitacionales en los tres ejes del sistema de coordenadas durante el recorrido por carretera.....	79
Cuadro 3.4. Modelos de Función de Transferencia de la relación entre la velocidad de respiración de frutos de durazno y la temperatura (T), humedad relativa (HR) e iluminación (I) del ambiente de almacenamiento durante un periodo de 72 h.....	82

MODELO EXPLICATIVO DEL EFECTO MECÁNICO Y FISIOLÓGICO EN FRUTOS CAUSADO POR LAS CARGAS DINÁMICAS DURANTE EL TRANSPORTE

Artemio Pérez López, Dr.

Colegio de Postgraduados, Campus Montecillo 2014

Las cargas dinámicas que experimenta el tejido de frutos durante el transporte modifican de forma considerable su velocidad de respiración y en gran medida están influenciadas por la irregularidad superficial de las carreteras. Se midieron el perfil de altura de topes y las fuerzas G del movimiento dinámico del vehículo en un tramo de carretera, las propiedades *físico-mecánicas* de frutos de durazno en diferente estado madurez y el impacto del movimiento dinámico del vehículo por efecto del tope sobre la velocidad de respiración de frutos de durazno. El movimiento dinámico del vehículo en carretera puede superar los 3 G de manera instantánea. Cada centímetro de incremento en la altura del tope genera 0.002 G y 0.001 G por segundo en el desplazamiento horizontal (G_x y G_y) y vertical (G_z) del vehículo, respectivamente. El tejido de frutos de durazno tiene comportamiento anisotrópico en sus propiedades mecánicas y es dependiente del estado de madurez de cosecha y de los días de almacenamiento. Los modelos de transferencia detectaron que por cada unidad de incremento en las fuerzas G, durante el desplazamiento horizontal del vehículo, se incrementa en 1% la velocidad de respiración. Esta cantidad se duplica cuando la distancia de recorrido y carga de compresión también se duplican. La respuesta en la respiración puede observarse hasta 6 minutos después del impacto. Los cambios en la temperatura y humedad relativa del ambiente también contribuyen significativamente en la velocidad de respiración.

Palabras clave: topes, carga dinámica, anisotropía, velocidad de respiración, durazno.

EXPLANATORY MODEL OF MECHANICAL AND PHYSIOLOGICAL EFFECT IN FRUITS CAUSED BY DYNAMIC LOADS DURING TRANSPORT

Artemio Pérez López, Dr.

Colegio de Postgraduados, Campus Montecillo 2014

The dynamic loads that the tissue experiences during the journey, considerably modify their respiration rate, and they are greatly influenced by the road superficial irregularity. The height profiles of speed bumps and G-forces of the vehicle's dynamic movement on a road section, the physical-mechanical properties of peach fruits in different maturity states, and the impact of the dynamic movement due to the speed bump on the respiration rate of peach fruits were all measured. The vehicle's dynamic movement on road can instantly surpass 3 G. Every centimeter increased in the speed bump's height generates 0.002 G and 0.001 G per second in a vehicle's horizontal displacement (G_x y G_y) and vertical movement (G_z), respectively. The peach fruit tissue showed an anisotropic behavior in its mechanical properties, and it is dependent from the harvesting maturity state and the storage days. The transfer function models detected that for every increase unit in G-forces during the vehicle's horizontal displacement, the respiration rate rises 1%. This amount is doubled when the tour length and compression load are also doubled. The answer in respiration can be observed up to 6 minutes after the impact. The changes in temperature and relative humidity also contribute significantly to the respiration rate.

Key words: speed bumps, dynamic load, anisotropy, respiration rate, peach fruit.

INTRODUCCIÓN GENERAL

El tejido vivo de los frutos está sujeto a cambios metabólicos irreversibles después de la cosecha, en donde la velocidad de respiración constituye el proceso central del metabolismo y consecuentemente regula la velocidad de deterioro del producto (Kader, 2002). Una condición anormal, impuesta desde el exterior, en el tejido de un fruto es la presencia de fuerzas compresivas o de impacto que le generan una situación de estrés o en caso extremo una lesión física. Ante esta situación, el tejido ejecuta sus propios mecanismos de defensa como la oxidación de los compuestos fenólicos que consecuentemente demanda incremento en el consumo de oxígeno (Kays and Paull, 2004). Posteriormente esto trae problemas de oscurecimiento enzimático, producción autocatalítica de etileno, pérdida acelerada de agua y vulnerabilidad del tejido a las infecciones fungosas (Knee and Miller, 2002; Kader, 2002; Berardinelli *et al.*, 2005).

Los esfuerzos que experimenta el tejido de frutos ocurren principalmente durante las operaciones de manipulación después de la cosecha. Dependiendo de los requerimientos y la localización del mercado de venta final, en algunas especies frutales, se crean rutas muy complejas de operaciones de manipulación que abarcan desde la cosecha, acondicionamiento, selección, empaque, almacenamiento y transporte. Los tipos de carga que dan origen al esfuerzo en el tejido se pueden clasificar en estáticas y dinámicas de acuerdo con su estado inercial (Nelson and Mohsenin, 1968; Lewis *et al.*, 2008). En el segundo caso, la carga se manifiesta en lapsos muy cortos que no producen daño visible en el tejido de manera inmediata, pero dejan un efecto de estrés acumulativo que repercuten en el metabolismo del fruto (Jones *et al.*, 1991; Lewis *et al.*, 2008). Estudios realizados por Singh and Xu (1993), Barchi *et al.* (2002) y Van Zeebroeck *et al.*

(2007) reportan que el impacto y la vibración del fruto durante el transporte representan la principal fuente de las cargas dinámicas.

Singh (1991) y Pierce *et al.* (1992) reportan que las cargas dinámicas que se transmiten sobre vehículo son influenciados por la rugosidad de la carretera, la distancia y velocidad de viaje, y el tipo de suspensión y número de ejes del vehículo. Sobre el producto que es transportado, Shulte Pason *et al.*, (1990) concluyeron que la carga dinámica está influenciado por el tipo empaque y del patrón de estibamiento. Algunos empaques como los recipientes de madera o plástico para transporte a granel pueden incrementar significativamente las cargas dinámicas dependiendo del lugar que ocupan dentro de la columna de estibamiento (Berardinaelli *et al.*, 2003).

La literatura reporta que se ha intentado modelar matemáticamente la interacción que existe entre la respuesta dinámica del vehículo y la irregularidad superficial de carreteras para fines de evaluación del desgaste y diseño de componentes de vehículos (Romero-Navarrete y Lozano-Guzmán, 1995; Jazar, 2008). Con respecto a la evaluación del daño en productos biológicos, Jones *et al.*, (1991) elaboraron un modelo de simulación por computadora por medio de la descripción de un sistema de *fuerzas-características*, entre los elementos del vehículo y la carga, para calcular el daño físico en términos de la cantidad de energía absorbida por los frutos como consecuencia del movimiento dinámico. La limitante de este estudio es que no considera el aspecto fenológico, morfológico y fisiológico del fruto, solo considera el mecánico.

En este sentido, en la literatura no se reportan metodologías que integren todos estos aspectos que permitan expresar de forma numérica la contribución de las irregularidades de la carretera en

el movimiento dinámico del vehículo y en la respuesta metabólica del fruto. Por tanto, la contribución de este estudio fue proponer una metodología de cuantificación del movimiento dinámico por efecto de la irregularidad superficial de la carretera. Por otra parte, se realizó un estudio de las propiedades *físico-mecánicas* de un fruto para establecer el tipo de respuesta de acuerdo con la orientación de la carga y el estado fisiológico de madurez del tejido. Finalmente el movimiento dinámico del vehículo, expresado en fuerzas gravitacionales, fue modelado por medio de modelos de función de transferencia (Ramírez-Guzmán, 1993; Box *et al.* 2008) para expresar de forma numérica el impacto de las fuerzas G sobre el patrón de respiración de frutos de durazno.

La relación entre la irregularidad superficial de carreteras y el movimiento dinámico del vehículo se obtuvo mediante la metodología de modelos de regresión lineal con la incorporación de errores autocorrelacionados (Koop, 2000; Donnelly, 2004) de la teoría de series de tiempo (Box *et al.* 2008). De la misma manera, la relación entre el movimiento dinámico del vehículo y la velocidad de respiración se obtuvo mediante análisis de regresión múltiple de series de tiempo con la construcción de *Modelos de Función de Transferencia* (MFT) (Ramírez-Guzmán, 1993; Box *et al.* 2008). A partir del MFT se calculó la ganancia (incremento) en la velocidad de respiración por efecto de las fuerzas G.

La estrategia experimental, que se muestra en la figura siguiente, se dividió en tres etapas:

En la primera etapa (Capítulo I). Se emplearon herramientas del SIG (GPS) para ubicar los topes sobre la carretera por sus coordenadas geográficas; se construyó un escaneador de perfiles para medir la irregularidad de la carretera con base en el perfil de cambio de altura y se emplearon

acelerómetros para medir la fuerzas G que se generan por el movimiento dinámico del vehículo durante su recorrido por carretera.

En la segunda etapa (Capítulo II). Se realizó una caracterización *físico-mecánica* y fisiológica de un fruto esférico para conocer la influencia del desarrollo fisiológico del tejido y la cantidad y orientación de la carga de compresión sobre las propiedades mecánicas.

En la tercera etapa (Capítulo III). Se construyó un prototipo que simula aplicación de carga de manera directa sobre los frutos acoplados a un sistema de inyección de aire en flujo continuo, con el cuál fue posible medir la respiración por medio de sensores y sistema de adquisición de datos.

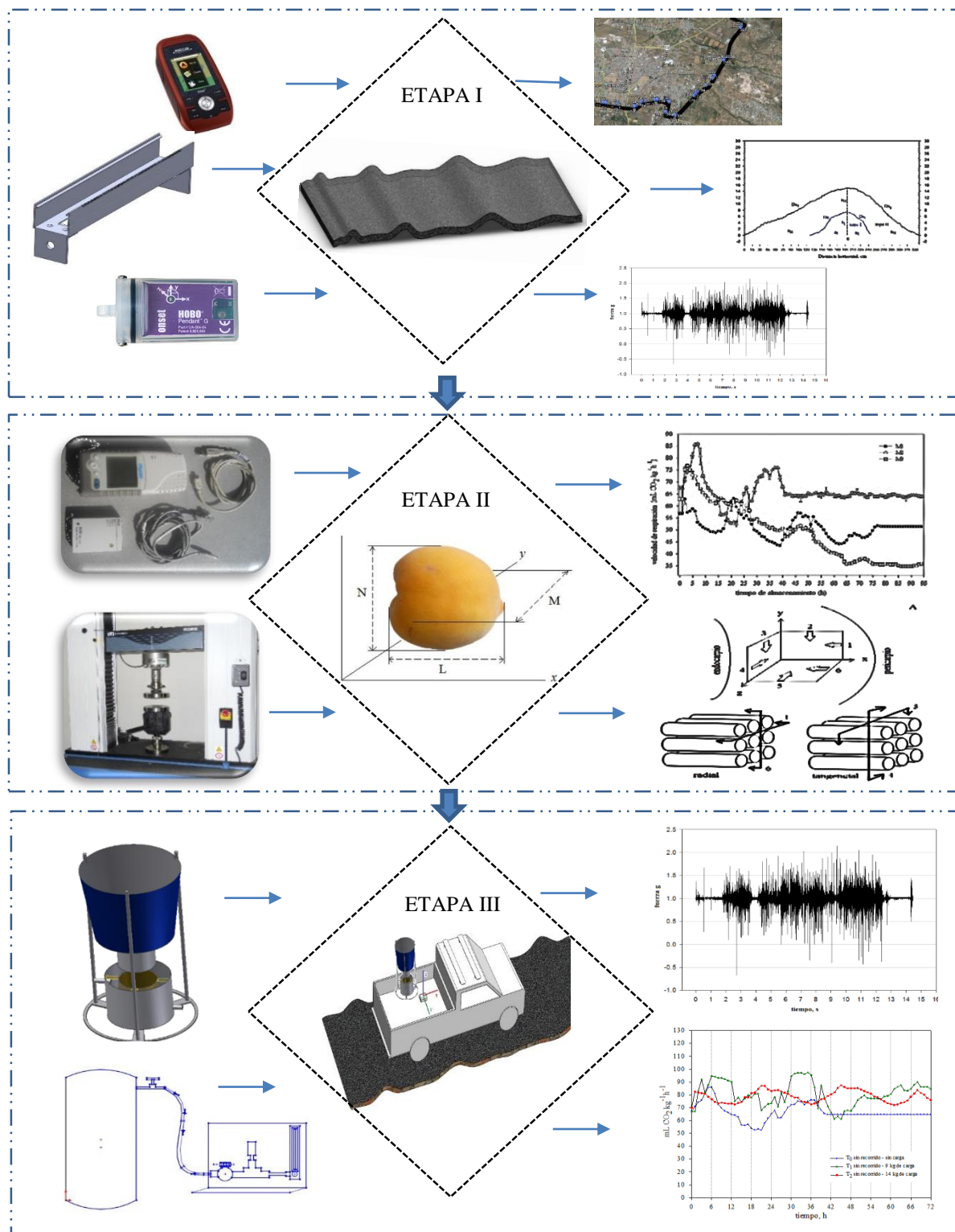


Figura 1. Estrategia Experimental

OBJETIVOS PARTICULARES

- Caracterizar un tramo de carretera federal con reductores de velocidad (topes) empleando herramientas de Sistemas de Información Geográfica (SIG) y teledetección.
- Desarrollar una metodología de cuantificación del movimiento dinámico del vehículo durante el transporte por efecto de reductores de velocidad (topes) sobre la carretera.
- Medir la velocidad de respiración de frutos de durazno por efecto del estado de madurez cosecha.
- Evaluar el efecto de la orientación de la carga de compresión y el estado fisiológico de madurez del tejido en las propiedades *físico-mecánicas* de frutos de durazno.
- Desarrollar una metodología de cuantificación del impacto del movimiento dinámico del vehículo durante el transporte y de las condiciones ambientales sobre la velocidad de respiración de frutos de durazno.

LITERATURA CITADA

- Barchi, G. L., Berardinelli, A., Guarnieri, A., Ragni, L., & Totaro, F.C. (2002). Damage to loquats by vibration-simulation intrastate transport. *Biosystems Engineering*, 82(3):305-312.
- Berardinelli, A., Donati, V., Giunchi, A., Guarnieri, A., & Ragni, L. 2005. Damage to pears caused by simulated transport. *Journal of Food Engineering*, 66:219-226.
- Box, G. E. P., G. M. Jenkins, G. C. Reinsel. 2008. Time Series Analysis: Forecasting and Control. Hoboken, New Jersey: John Wiley & Sons, Inc.
- Donnelly, N., D. Weatherburn, and M. Chilvers. 2004. The impact of the Australian heroin shortage on robbery in NSW. Crime and Justice Statistics bulletin, NSW Bureau of Crime Statistics and Research, Sydney.
- Jazar, R. N. 2008. Vehicle Dynamics: Theory and Application. Springer Science+Business Media, LLC, NY, USA.
- Jones, C. S., J. E. Holt, and D. Schoorlt. 1991. A Model to Predict Damage to Horticultural Produce during Transport. *Agricultural Engineering Research*, 50: 259-272.
- Kader, A. A. 200). *Postharvest Technology of Horticultural Crops*. Publication 3529. Richmond, CA: University of California. Agriculture and Natural Resources.
- Kays, S. J., & Paull, R. E. 2004. *Postharvest Biology*. Athens, Georgia: Exxon Press.
- Koop, G. 2000. Analysis of economic data. John Wiley & Sons, Chichester.
- Knee, M., & Miller, R. 2002. Mechanical Injury. In: M. Knee (Ed.), *Fruit Quality and its Biological Basis* (pp. 157-179). Sheffield, UK: Sheffield Academic Press Ltd.
- Lewis, R., Yoxall, A., Marshall, M. B., & Canty, L. A. 2008. Characterizing pressure and bruise in apple fruit. *Wear*, 264: 37-46.
- Nelson, C. W., N. N. Mohsenin. 1968. Maximum Allowable Static and Dynamic Loads and Effect of Temperature for Mechanical Injury in Apples. *Journal of Agricultural Engineering Research*, 13 (4):305-3 17.
- Pierce C D; Singh S P; Burgess G. 1992. A comparison of leafspring with air-cushion trailer suspension in the transport environment. *Packaging Technology and Science*, 5: 11-15
- Ramírez-Guzmán, M. E. 1993. SAS Macro for analyzing step and impulse response functions derived from transfer function models. Proceedings of the eighteenth annual SAS® users group International Conference New York, NY, USA.

- Romero-Navarrete, J. A. y A. Lozano-Guzmán. 1995. La respuesta dinámica de un cuarto de carro y el índice internacional de rugosidad. Instituto Mexicano del Transporte. Secretaría de Comunicaciones y Transportes. Publicación Técnica No. 67. Sanfandila, Qro. México.
- Schulte Pason N L; Timm E J; Brown G K; Marshall D E; Burton. C L. 1990. Apple damage assessment during intrastate transportation. *Applied Engineering in Agriculture*, 6(6): 753–758.
- Singh, S P. 1991. Vibration levels in commercial truck shipments. ASAE Paper No. 91–6016.
- Singh, S. P., Xu, M. 1993. Bruising in apples as a function of truck vibration and packaging. *Applied Engineering in Agriculture*, 9(5):455–460.
- Van Zeebroeck, M., V. Van linden, H. Ramon, J. De Baerdemaeker, B.M. Nicolai, E. Tijskens. 2007. Impact damage of apples during transport and handling. *Postharvest Biology and Technology*, 45:157–167.

CAPÍTULO I

EFECTO DE REDUCTORES DE VELOCIDAD SOBRE LAS CARGAS DINÁMICAS EN EL TRANSPORTE

1.1 RESUMEN

Los reductores de velocidad representan una irregularidad superficial muy frecuente en las carreteras federales y son consideradas una fuente de generación de las cargas dinámicas durante el transporte vía terrestre. Se emplearon herramientas de Sistemas de Información Geográfica (SIG) e imagen satelital para localizar los topes sobre un tramo de carretera. Se tomaron datos del perfil de elevación superficial del tramo de carretera y las fuerzas gravitacionales generadas en un vehículo durante el recorrido sobre la carretera. Los resultados indican que las dimensiones de construcción de los topes no siguen las recomendaciones de la norma vigente. El Índice de Rugosidad Internacional ($>20 \text{ mm}\cdot\text{m}^{-1}$) de la carretera muestra una irregularidad superficial muy pronunciada en donde la principal contribución son las dimensiones de topes. Durante el recorrido del vehículo se generan constantemente fuerzas G que alcanzan picos de 3.15 (G_x) y 2.25 ($-G_x$) en el sentido de avance horizontal, 3.15 (G_y) y -3.20 ($-G_y$) en el giro lateral, y 2.15 (G_z) y -2.38 ($-G_z$) en el movimiento vertical, del vehículo. Cada fuerza G representa las veces en que la carga del vehículo recibe su propio peso. El modelo estadístico de tendencia de fuerzas G, con relación al cambio en el perfil superficial de la carretera, muestra que se generan 0.002 G por cada segundo en el movimiento horizontal (G_x y G_y) y 0.001 fuerzas G por cada segundo en el movimiento vertical (G_z) del vehículo cuando la altura del perfil de la carretera incrementa un centímetro.

Palabras clave: carga dinámica, fuerza G, IRI, GPS, reductor de velocidad.

EFFECT OF THE SPEED BUMPS ON THE DYNAMIC LOADS DURING TRANSPORT

1.2 ABSTRACT

Speed bumps represent a very frequent superficial irregularity on the roads. Thus, they are considered a source generating dynamic loads while traveling on ground. Geographical Information Systems (SIG), and satellital images were used in order to locate speed bumps on a road section. Information about the superficial elevation profile of the road section, and the gravitational forces generated in a vehicle during a tour on the road was taken. The outcomes point out that the construction dimensions of speed bumps do not follow the recommended regulations. The International Roughness Index ($>20 \text{ mm}\cdot\text{m}^{-1}$) of the road shows a very pronounced superficial irregularity, in which the main contributions are the speed bumps dimensions. During the vehicle's journey, G-forces are constantly generated, that they can even reach 3.15 (G_x) and 2.25 ($-G_x$) peaks on a horizontal motion, 3.15 (G_y) and -3.20 ($-G_y$) on the side spin, and 2.15 (G_z) and -2.38 ($-G_z$) on the vehicle's vertical motion. Every G-force represents the times the vehicle's load receives its own weight. The G-force's statistical model in relation to the change of the road superficial profile shows that 0.002 G are generated every second in the horizontal motion (G_x y G_y), and 0.001 G-forces are generated every second on the vehicle's vertical motion (G_z) when the road's profile height increases one centimeter.

Key words: dynamic loads, G-force, IRI, GPS, speed bumps.

1.3 INTRODUCCIÓN

Una carga se define como una causa capaz de producir estados tensionales en una estructura. Las cargas, según el tiempo de aplicación, pueden clasificarse en *cargas permanentes*, como aquellas que comprenden el peso propio del sistema, o en *cargas accidentales*, cuya magnitud y/o posición pueden variar a lo largo de la vida útil del sistema. En este último caso, actúan de forma transitoria y en determinados momentos, según su estado inercial, se clasifican en *cargas estáticas* y *cargas dinámicas*. Las primeras son las que no cambian su estado de reposo o lo hacen muy lentamente en el tiempo (estado inercial despreciable), mientras que las cargas dinámicas varían rápidamente. Las cargas dinámicas tienen dos fuentes de origen, una depende de las características mecánicas del vehículo (*fuentes directas*) y la otra proviene de fuentes externas (*fuentes indirectas*). Cada uno representa una fuente de excitación que produce vibraciones que afectan tanto a la *masa suspendida* (peso del vehículo) como a la *masa no suspendida* (peso de componentes del sistema de amortiguación) (Romero-Navarrete y Lozano-Guzmán, 1995; Luque *et al.*, 2005; Jazar, 2008). Dichos componentes se pueden representar mediante un modelo de cuarto de carro (Figura 1.1).

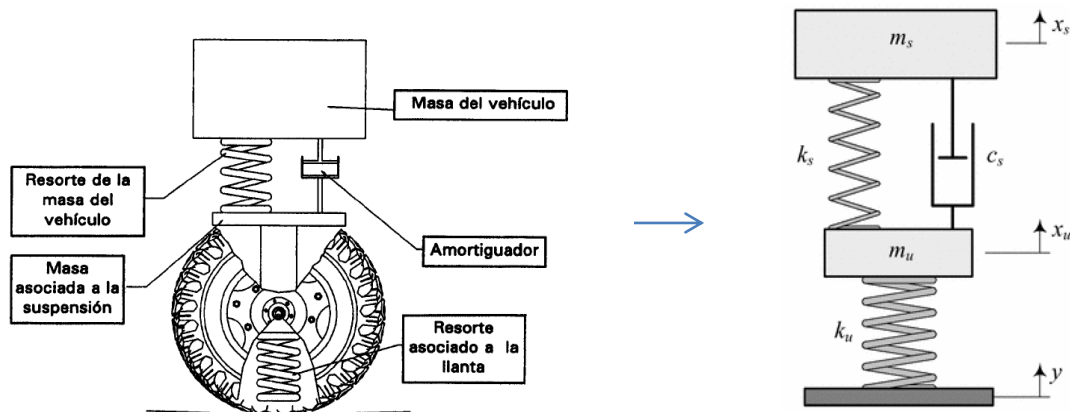


Figura 1.1. Representación mediante el modelo de “un cuarto de carro” de la *masa suspendida* (x_s) y *masa no suspendida* (x_u) del vehículo (Luque *et al.*, 2005; Jazar, 2008).

Las cargas por fuente directa dependen de las características de diseño y del grado de desgaste de los componentes del sistema de amortiguamiento del transporte. Mientras que las cargas por fuente indirecta se atribuyen a los cambios abruptos en el perfil superficial de la carretera (Holt and Schoorl, 1985). Una contribución muy importante a esta última son los reductores de velocidad (v.g. topes, vialetas, supervialetas, boyas, vibradores y vados) (NORTEC-SECOM 01-2007¹) que se construyen con criterios de diseño muy variados y fuera de la normatividad vigente de las entidades federativas (Figura 1.2).

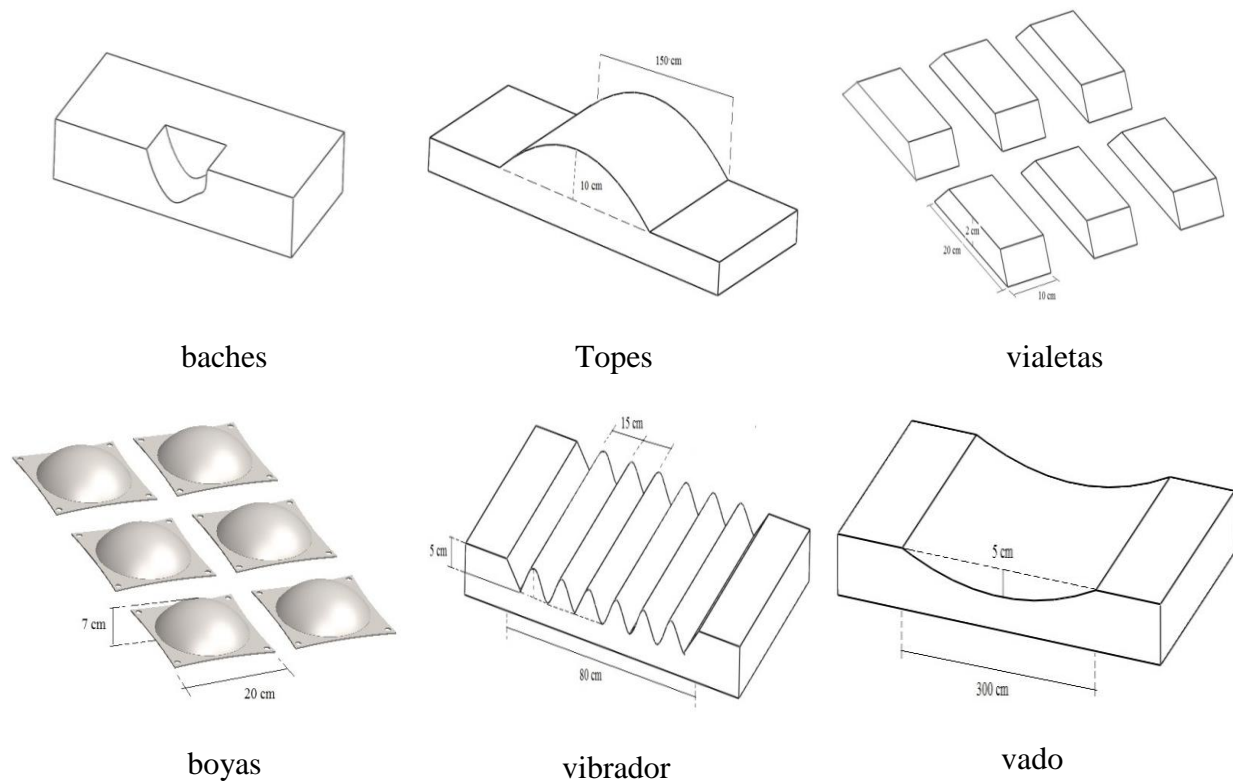


Figura 1.2. Tipo de reductores de velocidad en la superficie de carreteras federales o vías primarias.

¹ Gaceta de gobierno Libre y Soberano del Estado de México, 5 de junio de 2008. (http://www.ipomex.org.mx/ipo/portal/jcem/marcoJuridico/12_web, consultado 21 de enero de 2014)

La irregularidad superficial de las carreteras se ha traducido en importantes sobrecostos por los daños que ocasiona en los productos hortofrutícolas transportados diariamente (Arriaga-Patiño *et al.*, 1998). En un estudio realizado por Schoorl and Holt (1982) introdujeron el concepto del sistema RVL (*road-vehicle-load*) para explicar la respuesta dinámica del vehículo en carretera (Figura 1.3a) y para predecir el daño en productos hortofrutícolas.

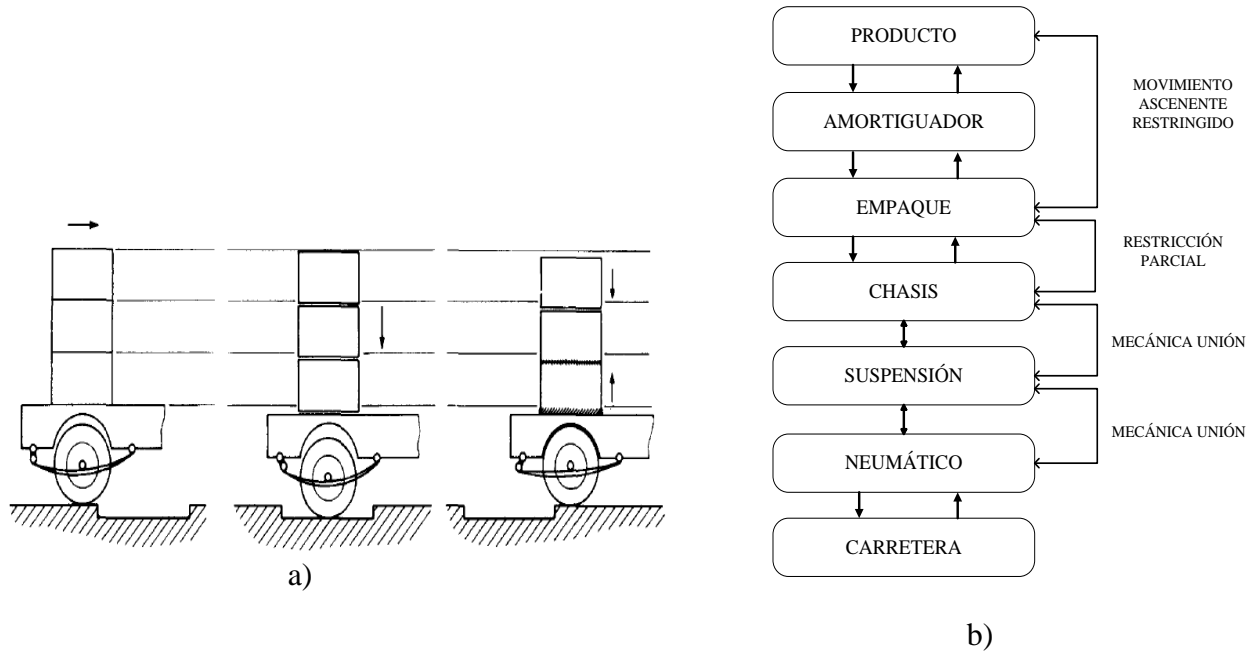


Figura 1.3. a) Representación de la dirección de absorción de energía en empaques estibados en la interacción carretera-vehículo-carga y b) elementos y acoplamientos en un sistema RVL (doble flecha significa tensión-compresión, flecha simple solo compresión) (Schoorl and Holt, 1982; Jones *et al.* 1991).

En un sistema RVL, la interacción entre el pavimento y los neumáticos transmiten fuerzas de compresión al neumático que posteriormente a través de la unión mecánica del subsistema *neumático-suspensión-chasis* se produce un efecto combinado de fuerzas *tensión-compresión*. Luego este subsistema excita la carga por medio de fuerzas de compresión. Dentro del empaque se producen fuerzas compresivas dentro del subsistema *producto-material de amortiguación-tapa superior del empaque*, debido a que el producto normalmente se acomoda dentro de las cajas en

capas separadas por un material elástico. Este mecanismo de transmisión de fuerzas es reversible nuevamente hasta el neumático del vehículo (Jones *et al.* 1991).

En los últimos 40 años se han realizado estudios sobre el efecto de esta interacción *neumáticos-rugosidad* de carreteras y los resultados concluyen que conforme aumenta el índice de rugosidad de la superficie, el coeficiente de carga dinámica sobre el vehículo también aumenta. Por lo tanto, este comportamiento dinámico del vehículo ha propiciado la idea de medir la magnitud de sus efectos en el transporte de frutas y verduras (Laker, 1978, Schoorl and Holt, 1982). Para medir la calidad de rodadura en una carretera se han establecido índices que permiten evaluar las deformaciones verticales que son los que afectan la dinámica de los vehículos que transitan sobre él. En 1986, el Banco Mundial propuso el Índice Internacional de Rugosidad, mejor conocido como IRI (*International Roughness Index*), como un estándar estadístico de la rugosidad. El cálculo matemático del IRI es con base en la acumulación de desplazamientos en valor absoluto de la masa superior con respecto a la masa inferior (en milímetros, metros o pulgadas) de un modelo de cuarto de carro (Figura 1.1) cuando viaja a una velocidad de $80 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$ (Sayer, 1995; ASTM, 2005; Loizos and Plati, 2014). El IRI se expresa en $\text{mm}\cdot\text{m}^{-1}$, $\text{m}\cdot\text{km}^{-1}$, $\text{in}\cdot\text{mi}^{-1}$, etc. Valores de IRI mayor que $12 \text{ m}\cdot\text{km}^{-1}$ corresponden a caminos con irregularidades muy fuertes (Arriaga-Patiño *et al.*, 1998; ASTM, 2005).

Normalmente el cálculo del IRI se realiza por medio de levantamiento topográfico con nivel y estatal. Un método alternativo para tramos cortos de carretera es la denominada “viga móvil de tres metros” (Figura 1.4).

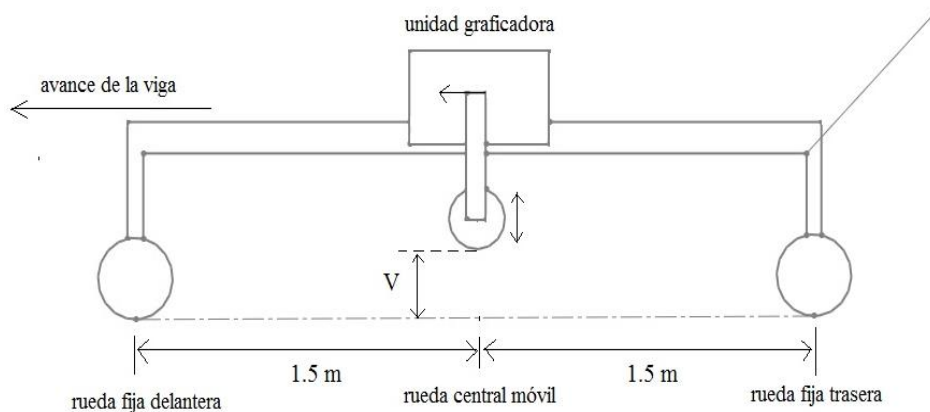


Figura 1.4. Representación de la viga móvil de tres metros (Arriaga-Patiño *et al.*, 1998)

La viga de tres metros es un equipo móvil que registra la diferencia de altura entre la superficie de la rueda central móvil y la línea horizontal que se forma por las ruedas delantera y trasera de la viga móvil (Figura 1.4). Esta diferencia de alturas se denomina “valor de la viga de tres metros (V)”. Se recomiendan intervalos de muestreo <300 mm bajo el supuesto que la pendiente es constante entre los puntos de elevación consecutivos. Sayers (1995) recomienda intervalos de 250 mm debido a que el perfil longitudinal es más suave.

Una forma de relacionar el patrón de movimiento del vehículo sobre la carretera es mediante las fuerzas gravitacionales, mejor conocidas como “*fuerzas G*”. Las fuerzas G no son una medida de la fuerza sino una medida intuitiva de la aceleración equivalente a la gravedad terrestre (**g**) sobre un objeto cualquiera en condiciones ideales (sin atmósfera u otro rozamiento). Por tanto, la fuerza de 1 G es una unidad definida a conveniencia calculada como la aceleración observada dividida por la gravedad estándar ($9.80665 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$) (Balldin, 2002). Para emplear este concepto es importante identificar la dirección y el sentido (signo) de la fuerza G, ya que el tejido de los seres vivos tiene diferentes intervalos de tolerancia de acuerdo con esta definición. Los estudios realizados al respecto mencionan que los tejidos vivos muestran mayor tolerancia a las fuerzas G en la dirección

horizontal (ejes x , y) que en la dirección vertical (eje z) (Wyrick, 2009). A continuación se describen las características de las fuerzas G en las diferentes direcciones en el sistema de coordenadas tridimensional (Figura 1.5).

i) Dirección z positiva ($+G_z$). La fuerza gravitacional se produce cuando el objeto acelera de forma vertical ascendente, lo cual ocasiona que la fuerza de inercia actúe en la dirección opuesta produciendo un efecto de hundimiento sobre el objeto en la misma dirección.

ii) Dirección z negativa ($-G_z$). La fuerza gravitacional se produce cuando el objeto acelera de forma vertical descendente, lo que ocasiona que la fuerza de inercia actúe en la dirección opuesta produciendo un efecto de elevación del objeto desde la superficie que lo sostiene.

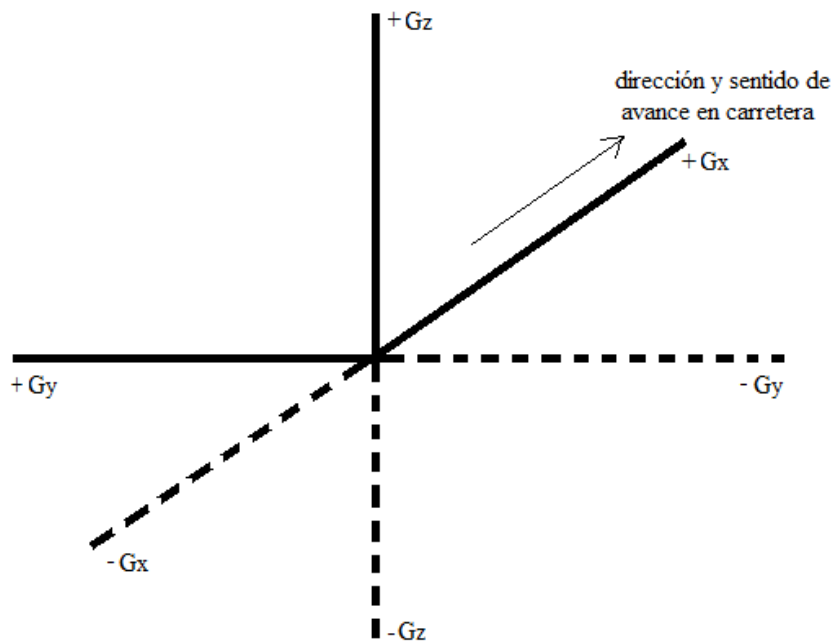


Figura 1.5. Identificación del tipo de fuerzas G en un sistema de coordenadas tridimensional

iii) Dirección x positiva ($+G_x$). La fuerza gravitacional se produce de manera horizontal y en la misma dirección de avance del objeto (aceleración), por lo que la fuerza de inercia actúa en la dirección opuesta produciendo un efecto de aplastamiento del objeto hacia atrás.

iv) Dirección x negativa ($-G_x$). La fuerza gravitacional se produce de manera horizontal y en la dirección contraria a la de avance del objeto (frenado), entonces la fuerza de inercia produce un empuje sobre el cuerpo hacia el frente.

v) Dirección y positiva ($+G_y$). La fuerza gravitacional se produce de manera horizontal y en dirección lateral izquierda al sentido de avance del objeto. La fuerza de inercia actúa en el sentido contrario.

vi) Dirección y negativa ($-G_y$). La fuerza gravitacional se produce de manera horizontal y en dirección lateral derecha al sentido de avance del objeto. La fuerza de inercia actúa en el sentido contrario.

El comportamiento dinámico del vehículo durante su recorrido en carretera ha propiciado la idea de estudiar un tipo de irregularidad superficial (tope) muy frecuente en las carreteras o vías federales. Se ha observado que solo algunas entidades federativas cuentan con normas para la construcción de los topes, sin embargo, no se atienden las recomendaciones mínimas en su diseño y lugar de construcción. En este sentido en el presente trabajo se plantearon los siguientes objetivos: a) realizar la geolocalización de topes con la ayuda de herramientas de sistemas de información geográfica (SIG) en un tramo de carretera federal; b) construir un prototipo de “escaneador de perfiles” y medir el perfil longitudinal de los topes en el tramo de carretera de estudio; c) Describir los topes de acuerdo con los datos del perfil y calcular el Índice de Rugosidad Internacional del tramo de carretera y d) medir las fuerzas G que recibe el vehículo durante el recorrido por la carretera donde se encuentran los topes.

1.4 MATERIALES Y MÉTODOS

1.4.1 Localización de topes sobre la superficie de la carretera por sus coordenadas Geográficas

Se eligió el tramo de carretera federal del periférico de Texcoco que conecta a la carretera federal 142 Texcoco de Mora-Chicoloapan de Juárez con la carretera federal 136 Texcoco-Calpulalpan (entrada al poblado de la Purificación). La razón por la que se escogió este tramo de carretera fue por la cantidad de topes que hay sobre ella.

Se realizó un recorrido en el tramo de estudio con la finalidad de trazar la ruta y la ubicación exacta de los topes por sus coordenadas geográficas empleando GPS (*Global Positioning System*). Se empleó un Smartphone Kempler&Strauss™ Mod. B2 (Kempler&Strauss, CA, USA) con sistema operativo windows mobile 6.1, processor Marvell@642MHz y receptor GPS satelital EarthMate SIRF_Star III con software DeLorme Atlas Street USA® 2009 (DeLorme, ME, USA). El Smartphone se conectó vía USB a la computadora portátil Acer Aspire® 5742-6430 con procesador Intel Core i3-380M 2.53 GHz (Acer Inc., Taiwán, República de China). La información enviada por el GPS fue grabado en tiempo real en la computadora con la ayuda del software DeLorme Atlas Street USA® 2009 (DeLorme, ME, USA) que tiene capacidad para guardar rutas recorridas.

Los equipos antes mencionados se montaron en un vehículo cuya velocidad de desplazamiento sobre la carretera fue $20\pm 5 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$ aproximadamente. Se escogió un día sin nubosidad en el cielo para tener mejor recepción de señales de satélite en el GPS.

El procedimiento seguido antes, durante y después del recorrido fue el siguiente:

- i) Sincronización de la hora en los relojes de la computadora, del smartphone y el cronómetro digital manual Casio®. Se usó como referencia el reloj *the official U.S. time*²
- ii) Previo al inicio del recorrido se interconectaron el GPS del Smartphone y el software DeLorme Atlas Street de la computadora portátil.
- iii) De forma manual se registró la hora de inicio del recorrido y la hora en que la llanta delantera del vehículo pasó sobre el tope. Se registraron de lectura de ida y de vuelta por el mismo tramo de carretera.
- iv) Una vez terminado el recorrido, los datos almacenado por el software DeLorme Atlas Street se exportaron en un formato de texto (*.txt) a la memoria de la computadora.
- v) Con el tiempo registrado de forma manual, de cada tope, se localizaron sus coordenadas en la base de datos generado por el GPS del smartphone.
- vi) Estas coordenadas posteriormente se introdujeron en el software libre Google Earth® 2014 v. 7.1.3.22.3 (Google Inc., CA, USA) con imágenes de satélite captadas por el sensor QuickBird (Satellite Imaging Corporation™, TX, USA) de fecha 24 de marzo de 2013, con la finalidad de dibujar la ruta sobre mapa y verificar las coordenadas obtenidas.

De manera alternativa y para efecto comparativos también se registraron coordenadas de cada tope en un GPS manual Magellan triton® 300 (MiTAC International Corp., Taiwán, China).

1.4.2 Medición del perfil de topes y cálculo del IRI

Se seleccionaron un número representativo de topes para medir su perfil. Para ello, se construyó un prototipo de “*escaneador de perfiles*” (Figura 1.6) cuyo principio de funcionamiento es similar a la “viga de tres metros” descrito por el Instituto Mexicano del Transporte de la Secretaria de

² <http://www.time.gov/timezone.cgi?Central/d/-6/java>

Comunicaciones y Transportes (Arriaga-Patiño *et al.*, 1998). Dado que la longitud horizontal de algunos topes rebasa los tres metros, se determinó construir la viga del escaneador de 3.45 m.

La viga principal del escaneador se construyó con un perfil de aluminio de 2 mm de grosor. Para medir las distancias verticales desde la superficie de la carretera hasta la viga horizontal, se fabricó un elemento móvil donde se colocaron un medidor de distancias laser SKIL® X-ACT 530 (Robert Bosch Tool Corporation, IL, USA) precisión +/-3.0 mm, con láser de 650 nm; y una cámara digital Nikon® Coolpix de 12 megapíxeles (Nikon Corp., Tokyo, Japón). Con la cámara se grabó un video de la pantalla del medidor láser durante el recorrido del elemento móvil sobre la viga horizontal. Se hicieron las adecuaciones necesarias a la viga para tomar la altura del perfil del tope por cada centímetro de desplazamiento horizontal.

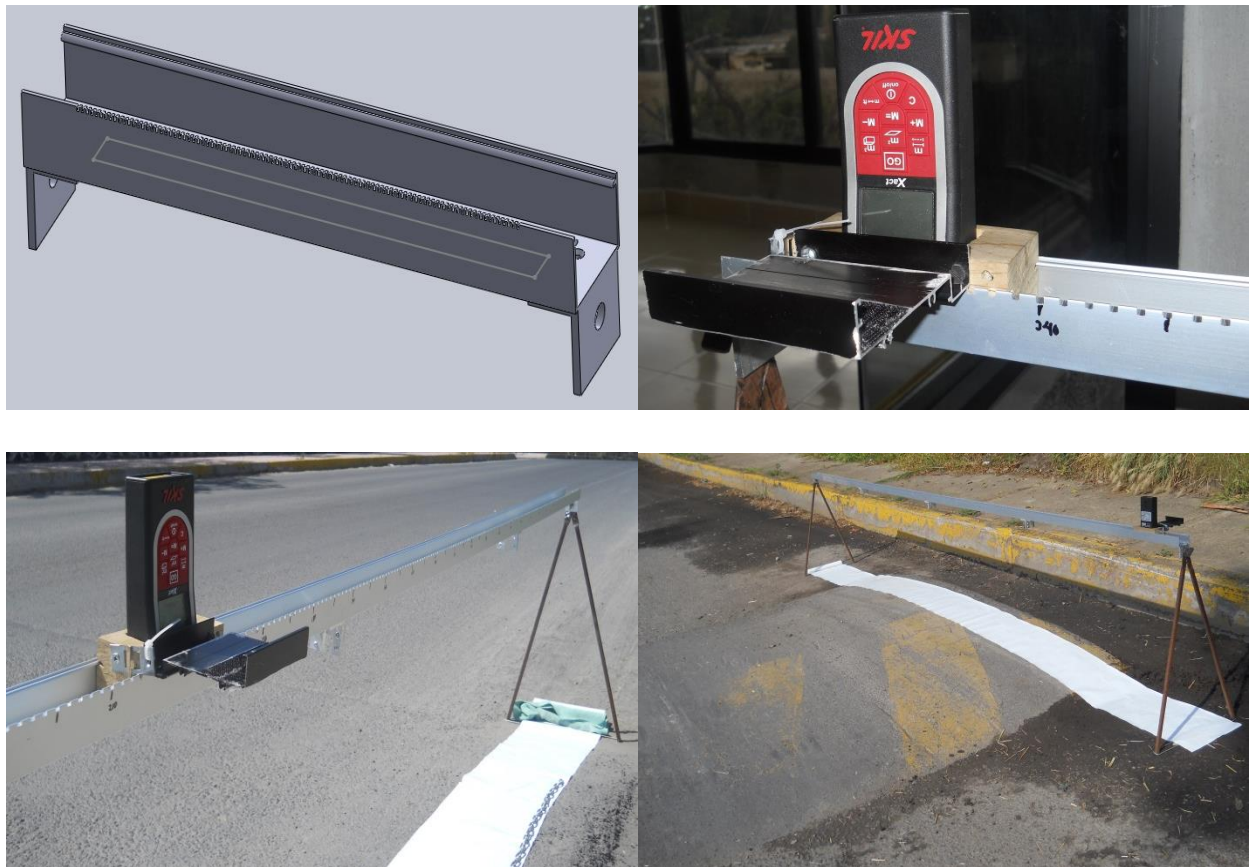


Figura 1.6. Prototipo de *escaneador de perfil de topes*

El peso de los instrumentos de medición colocados sobre la viga generó un pandeo en la misma, razón por la cual se construyó una curva de referencia sobre una superficie nivelada para corregir los datos del perfil de topes. Los datos del perfil de topes se emplearon para calcular sus dimensiones e índices que los describen. Se calculó también el Índice de Rugosidad Internacional (IRI) del tramo correspondiente a la longitud del tope y un estimado del tramo total de carretera de acuerdo con la metodología propuesta por Arriaga-Patiño *et al.* (1998). El IRI se expresa en $\text{mm}\cdot\text{m}^{-1}$.

1.4.3 Medición de las fuerzas gravitacionales (fuerzas G)

Las fuerzas gravitacionales, conocidas también como fuerzas G, se midieron con un acelerómetro HOBO® Pendant® G Acceleration Data Logger, modelo UA-004-64, (Onset Computer Corporation, MA, USA). El acelerómetro se programó con un dispositivo Optic USB Base Station with Coupler (Base UA) HOBO® (Onset Computer Corporation, MA, USA) conectado a una computadora personal por medio del software HOBOWare® Lite v. 3.1.0., a la frecuencia de 25 Hertz (25 datos por segundo). El software tiene la capacidad para registrar las fuerzas gravitacionales en unidades de aceleración ($\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$) o una unidad definida por conveniencia (G) (Balldin, 2002) que posteriormente se exportaron a una hoja de cálculo con el formato *.csv.

Previo a la toma de datos, se realizó un procedimiento de identificación de los ejes x , y , z en el acelerómetro de acuerdo con su posición al momento de tomar los datos. Se empleó durante el procedimiento un avión de juguete como objeto de referencia (Figura 1.7). El acelerómetro se colocó sobre el objeto de referencia y se realizaron movimientos de desplazamiento hacia las diferentes direcciones en el sistema de coordenadas tridimensional.

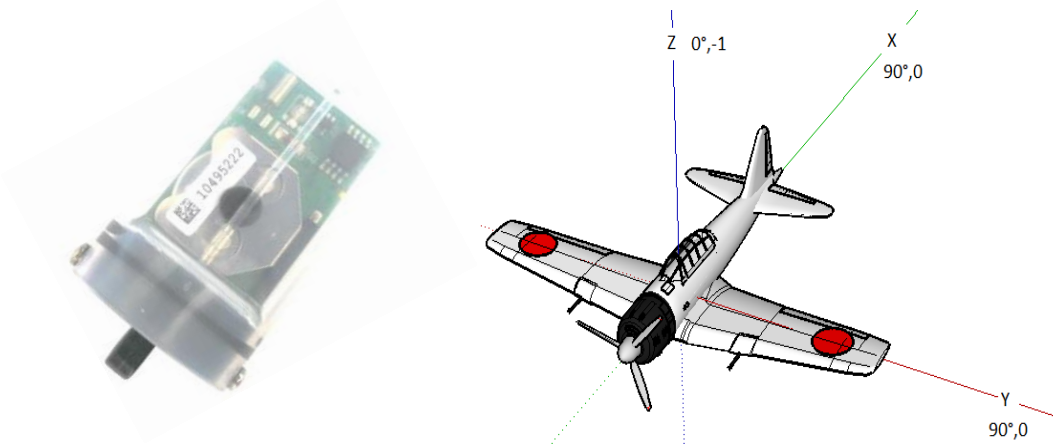


Figura 1.7. Acelerómetro y objeto de referencia empleados en la calibración

Cada operación inicia del reposo seguido de un movimiento de aceleración y concluye con una operación de frenado del acelerómetro para regresar nuevamente al reposo. Todas estas operaciones constituyen un ciclo, que en el acelerómetro se registra con valores positivos y negativos en cada eje, como se muestra en la Figura 1.8 para el eje z.

En la Figura 1.8, la primera señal corresponde al movimiento del acelerómetro en forma vertical ascendente (valores positivos) seguido de una operación de frenado (valores negativos). En la segunda señal el acelerómetro se tuvo movimiento vertical descendente (valores negativos) seguido de una operación de frenado (valores positivos). Este tipo de respuesta se obtuvo con el movimiento del acelerómetro en cada eje del sistema de coordenadas (Figura 1.5).

En las pruebas en carretera, el acelerómetro se colocó en la parte central de una camioneta Pick Up, de tal manera que el eje x coincidió con la dirección de avance del vehículo, el eje y coincide con los movimientos laterales y el eje z con el movimiento vertical. Los valores de fuerza

gravitacional se midieron en $\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$ y G. El acelerómetro se programó con una frecuencia de muestreo de 25 Hz (25 datos por segundo). La velocidad promedio de desplazamiento de la camioneta fue de $50 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$.

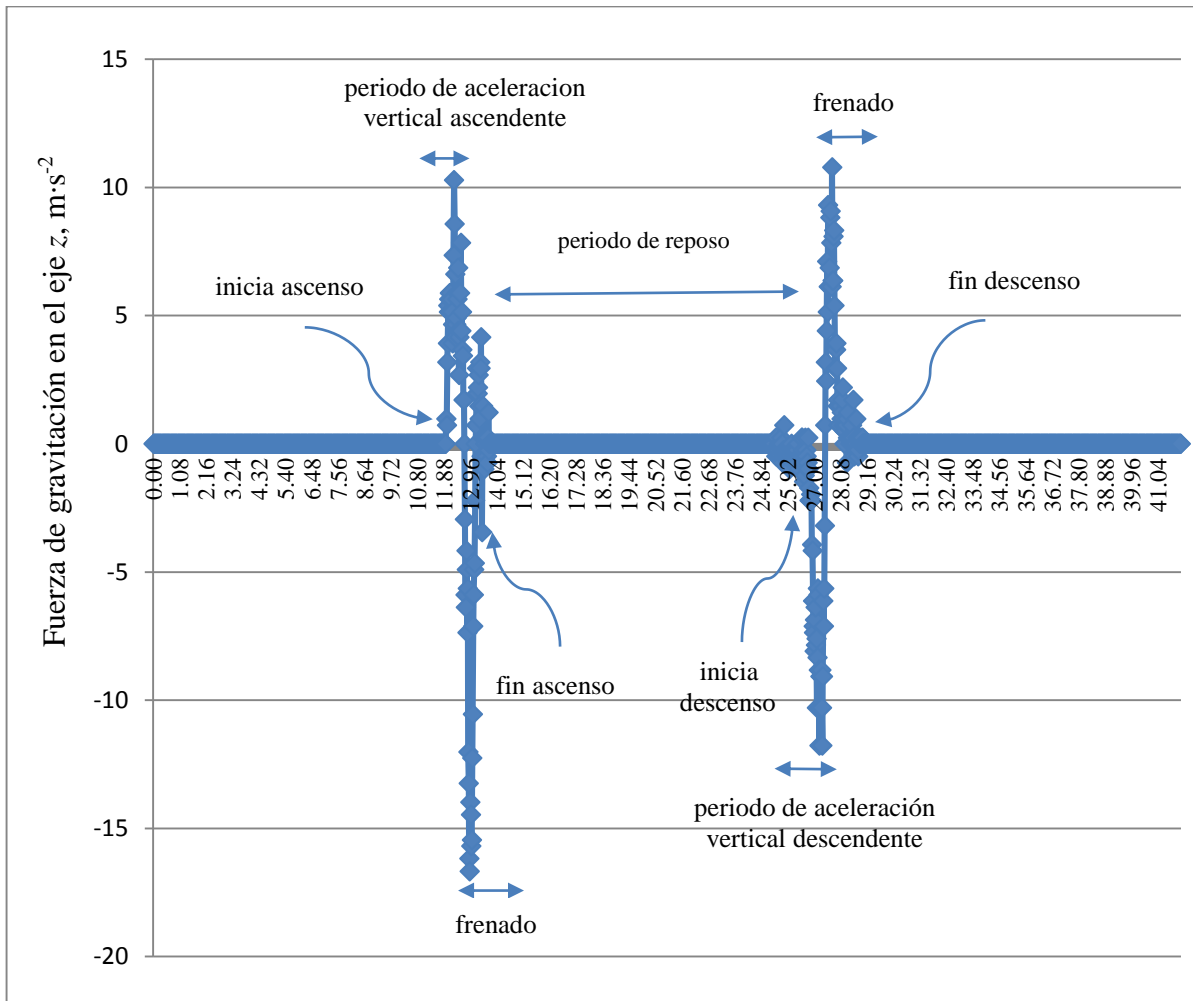


Figura 1.8. Serie de datos de aceleración en el eje z ($\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$) durante el tiempo (s)

1.4.4 Análisis de datos

Los datos de altura del perfil de carretera se emplearon para estimar un modelo estadístico para predecir el número de fuerzas G que se generan en el vehículo en cada eje siguiendo la teoría de series de tiempo (Box *et al.*, 2008). Se determinó que los datos no muestran componentes de

tendencia estocástica, por lo que las series se modelaron con la metodología de modelos de regresión lineal con la incorporación de errores autocorrelacionados (Koop, 2000). Estos modelos fueron estimados usando el procedimiento *PROC AUTOREG* del software SAS 9.2. Los coeficientes de los modelos iniciales fueron estimados usando mínimos cuadrados ordinarios (*ordinary least squares*). El diagnóstico de autocorrelación de errores se realizó empleando las estadísticas generalizadas de Durbin-Watson y una vez que se identificó autocorrelación, el modelo de regresión fue reajustado con los errores autocorrelacionados usando el procedimiento de estimación de Yule-Walker (*estimated generalised least squares*). Los residuales de este modelo reajustado fueron inspeccionados nuevamente para asegurar que todas las autocorrelaciones fueron consideradas adecuadamente (Donnelly, 2004).

1.5 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

1.5.1 Localización de topes sobre la superficie de la carretera por sus coordenadas geográficas

La ruta de puntos obtenida con el GPS, en el tramo de carretera, sobrepuesta en la imagen digital de Google Earth® se muestra en la Figura 1.9. La distancia total de la ruta fue 10.64 km. En la imagen satelital de Google Earth (figura del lado izquierdo), observada desde una altura de 11.1 km aprox., se aprecia una buena aproximación de la ruta del GPS con la imagen de la carretera. Sin embargo, un acercamiento (2.61 km) de las zonas marcadas con las letras A y B muestran una desviación de los puntos de la ruta de GPS con respecto a la imagen de la carretera (figuras lado derecho).

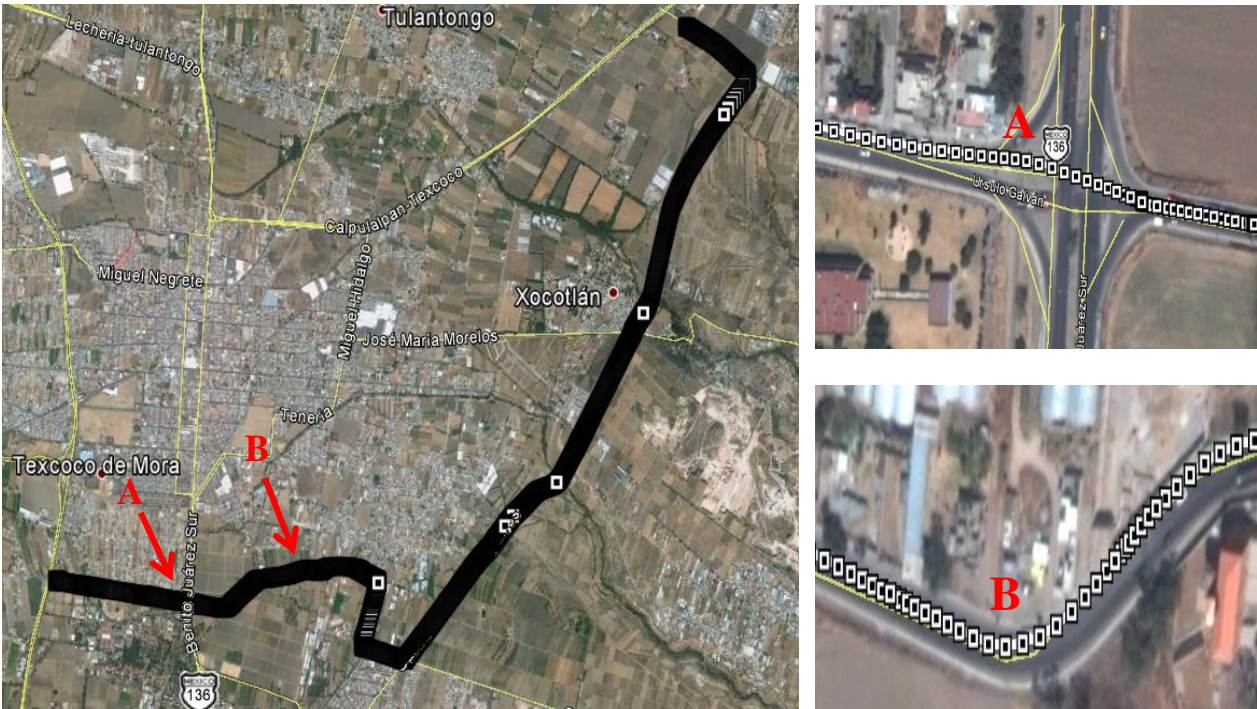


Figura 1.9. Puntos de la ruta trazada por el GPS sobrepuestas en la imagen satelital de Google Earth (cada rectángulo blanco en las imágenes de la derecha representa un punto captado por el GPS con sus respectivas coordenadas geográficas).

El desplazamiento entre las coordenadas del GPS y la imagen satelital de la carretera está ligado a los errores inherentes a cada sistema de captación de los datos. En la imagen satelital la precisión depende del tipo de sensor empleado en el satélite, el cambio de órbita de la plataforma del sensor, condiciones atmosféricas durante la captación de la imagen y la geometría de la superficie terrestre (Corbelle-Rico, 2006). En el GPS, el error proviene de la precisión del equipo, el número de satélites disponibles durante la medición, las condiciones climáticas, etc.

Las coordenadas geográficas de los toques (Cuadro 1.1) fueron introducidas en el software Google Earth® 2014 para su localización aproximada sobre la imagen satelital. Se observa que el desplazamiento fue mayor a los 3 m con respecto a la imagen (Figura 1.10).

Cuadro 1.1. Coordenadas geográficas de los topes con el GPS

Num. tope	Latitud	Longitud
1	19°29'46.79	98°53'34.79
2	19°29'46.32	98°53'31.27
3	19°29'44.21	98°53'15.27
4	19°29'43.93	98°53'13.46
5	19°29'40.79	98°52'50.14
6	19°29'42.24	98°52'47.25
7	19°29'47.54	98°52'40.46
8	19°29'48.95	98°52'34.78
9	19°29'50.77	98°52'21.14
10	19°29'51.09	98°52'17.95
11	19°29'51.05	98°52'6.820
12	19°29'48.73	98°52'1.810
13	19°29'47.21	98°52'0.890
14	19°29'32.56	98°52'5.520
15	19°29'27.71	98°51'52.61
16	19°29'28.23	98°51'51.55
17	19°29'56.60	98°51'25.61
18	19°29'59.28	98°51'23.16
19	19°30'3.390	98°51'19.63
20	19°30'12.69	98°51'6.990
21	19°30'23.35	98°50'57.59
22	19°30'24.35	98°50'57.03
23	19°30'27.70	98°50'54.96
24	19°30'53.53	98°50'39.84
25	19°30'57.42	98°50'37.01
26	19°30'58.54	98°50'36.14
27	19°30'59.33	98°50'35.57
28	19°31'50.05	98°50'10.80
29	19°31'51.96	98°50'9.190



Figura 1.10. Localización de topes sobre la imagen satelital de Google Earth® 2014 por sus coordenadas geográficas.

1.5.2 Medición de perfil de topes y cálculo del IRI

La Figura 1.11 muestra la descripción de dos topes con valores extremos en cuanto a altura y distancia horizontal. Se puede observar que sus dimensiones están fuera de las especificaciones de la norma técnica de la SCT del Estado de México (NORTEC-SECOM 01-2007³). En el tramo de carretera estudiado se caracterizaron 14 topes, de los cuales sólo el 21% cumple con la altura mas no así con la distancia horizontal y el 14% cumple con la longitud horizontal más no con la altura que recomienda la norma. El incumplimiento a los criterios de construcción y sitios recomendados

³ Gaceta de gobierno Libre y Soberano del Estado de México, 5 de junio de 2008. (<http://www.ipomex.org.mx/ipo/portal/jcem/marcoJuridico/12.web>, consultado 21 de enero de 2014)

para su ubicación, conducen a una serie de factores que favorecen la intensidad en la transmisión de carga dinámica sobre el vehículo y por consecuencia al producto que se transporta por vía terrestre (Schoorl and Holt, 1982; Loizos and Plati, 2008; Jazar, 2008).

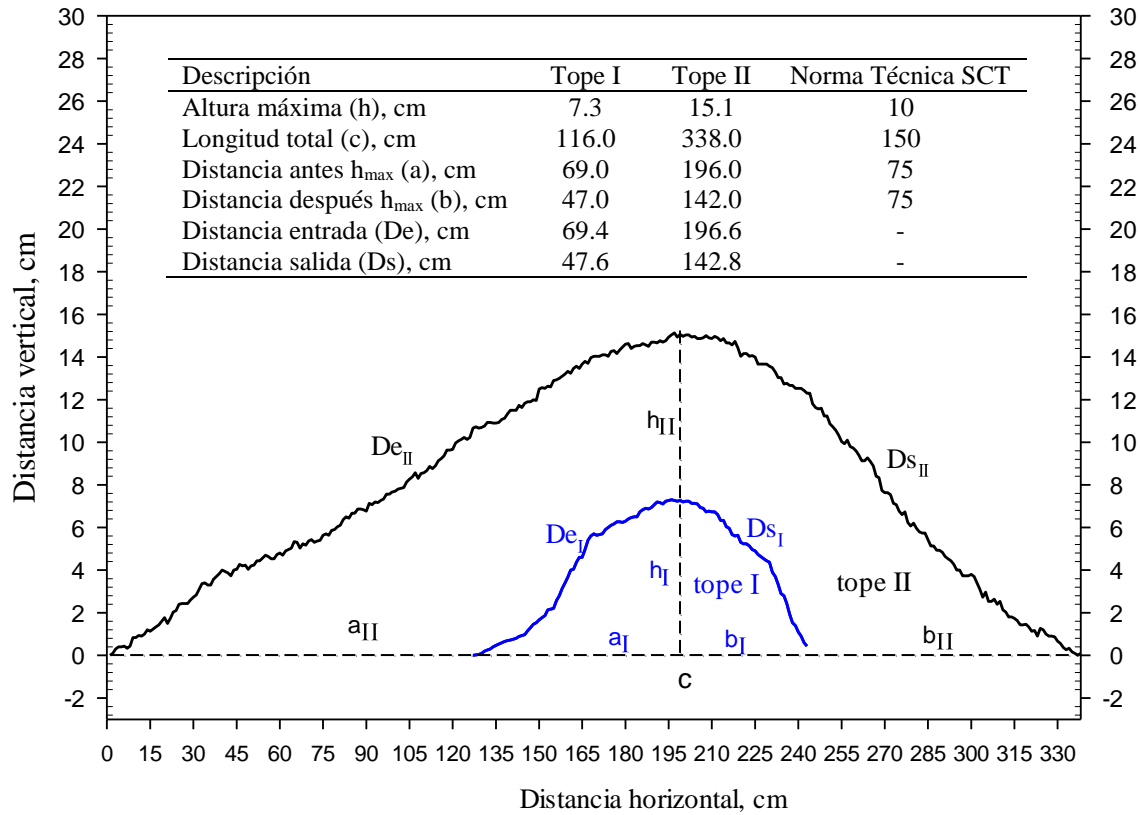


Figura 1.11. Perfil de dos tope con características representativas en el tramo de carretera estudiado.

Los valores promedio de altura, longitud e IRI (*International Roughness Index*) de los 14 tope estudiados fue 11.1 ± 1.6 cm, 260 ± 80.2 cm y 93.7 ± 19.5 mm·m⁻¹, respectivamente (Cuadro 1.2). La amplitud en los datos de altura (5.9 cm), longitud (228 cm) e IRI (70.5 mm·m⁻¹) reflejan la variabilidad que existe en los criterios de construcción. También se realizó el cálculo del IRI global para el tramo de carretera estudiado, el cual también considera los tramos sin tope, la media fue

26 mm·m⁻¹. Este valor de IRI representa un pavimento con irregularidades superficiales profundas, transitables a muy bajas velocidades (Arriaga-Patiño *et al.*, 1998; Sayers and Karamihas, 1998).

La fuerza gravitacional promedio, generado por cada segundo de recorrido del vehículo, por efecto del frenado horizontal (G_x), giro lateral (G_y) y aceleración vertical (G_z) fueron del orden de -0.2 G (-1.88 m·s⁻²), -0.1 G (-0.97 m·s⁻²) y 0.8 G (8.23 m·s⁻²) en las direcciones x, y, z, respectivamente (Cuadro 1.2). Sin embargo, tomando en cuenta que los datos fueron tomados a la frecuencia de 25 Hertz (25 datos por segundo) se observa que los cambios en las fuerzas G ocurren más rápidamente, de tal manera que pueden alcanzar valores extremos de 3.15 G por efecto de la aceleración (G_x) y -2.25 G por efecto del frenado (-G_x) del vehículo. Por efecto del giro lateral del vehículo los valores van de 3.15 G hasta -3.20 G. En tanto que, por efecto de la subida y bajada de los neumáticos sobre el tope se alcanzan 2.15 G y -2.38 G, respectivamente.

Cuadro 1.2. Media ± desviación estándar de las variables de altura, longitud, Índice de Rugosidad Internacional (IRI) y fuerzas G_x, G_y y G_z calculados a partir del perfil únicamente de los topes.

Variables	media ± DE	máximo	mínimo	amplitud
altura de tope (cm)	11.1±1.6	13.20	7.23	5.9
longitud de tope (cm)	260.0±80.2	335.0	107.0	228.0
IRI (mm·m ⁻¹)	93.7±19.5	128.1	57.5	70.5
Fuerza G _x (G)	-0.2±0.1	3.15 [†]	-2.25 [†]	5.4
Fuerza G _y (G)	-0.1±0.0	3.15 [†]	-3.20 [†]	6.35
Fuerza G _z (G)	0.8±0.0	2.15 [†]	-2.38 [†]	4.53

[†] Representan los valores extremos que experimenta el vehículo por efecto del *frenado-aceleración* (G_x), giro lateral *izquierda-derecha* (G_y) y movimiento vertical *abajo-arriba* (G_z) cuando encuentra un tope en su recorrido por la carretera.

En términos prácticos, un aumento de 1 G implica que cada componente del vehículo experimenta la misma cantidad de veces su propio peso en la respectiva dirección (Ballidin, 2002).

En el supuesto que un fruto estuviera soportando durante el viaje una carga de 1 kg, las fuerzas G generadas en cada dirección implicarían que el fruto estaría sujeto a fuerzas de 30.9 N en Gx, 22 N en -Gx, 30.9 en Gy, 31.3 N en -Gy, 21 N en Gz y 23.3 en -Gz. Por tanto, la cantidad de esfuerzo que se genera de manera permanente en repetidas ocasiones durante el viaje modifica su metabolismo.

El esfuerzo acumulado en un producto, durante el transporte vía terrestre, es resultado de varios factores que derivan de la irregularidad de la superficie de carreteras, entre los que se pueden mencionar: la distancia y tiempo de recorrido, la velocidad de circulación y condiciones mecánicas del vehículo, la posición de la carga dentro del vehículo, el número de estiba, etc. La Figura 1.12 muestra un ejemplo de serie de datos de aceleración que experimenta el vehículo, así como la altura máxima de cada tope sobre la carretera en función del tiempo de avance del vehículo sobre el mismo.

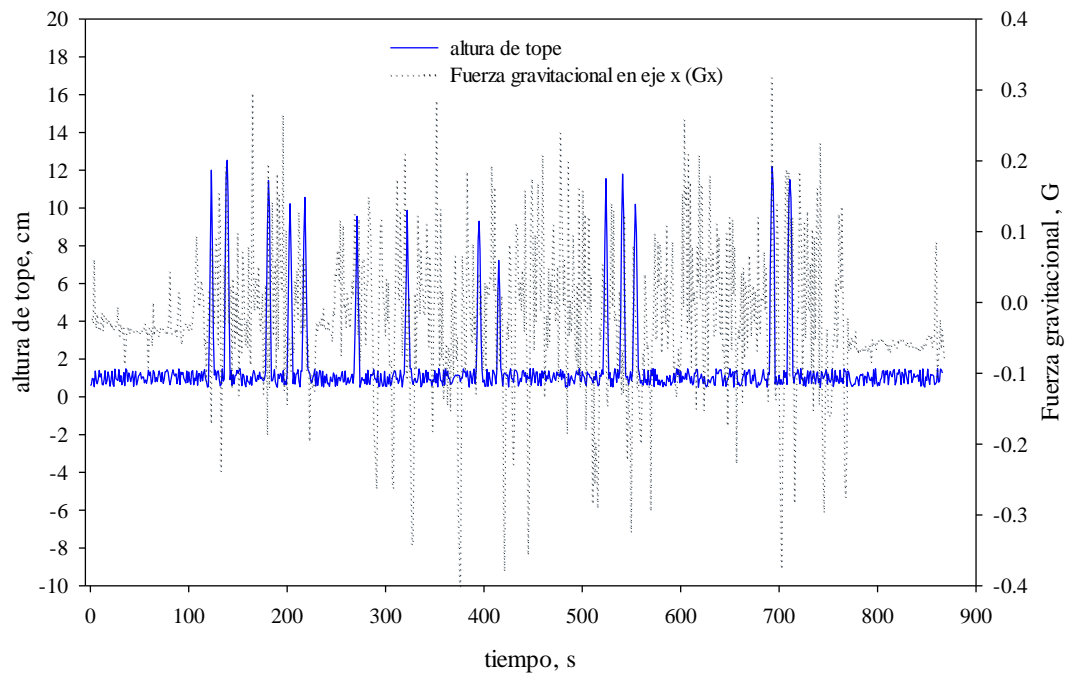


Figura 1.12. Fuerza gravitacional y altura de tope en función del tiempo en el tramo de carretera estudiado

El modelo estadístico de la tendencia de las fuerzas G, en los tres ejes, sobre el periodo de tiempo estudiado se presentan en el Cuadro 1.3. Los modelos de regresión final, para los tres ejes del sistema de coordenadas, muestran que la variable perfil de carretera (medida en cm) fue un predictor independiente significativo ($p < 0.05$) (Donnelly *et al.*, 2004). El coeficiente 0.002 del componente perfil superficie de carretera, en los ejes x y y , significa que por cada 1 cm de incremento en la altura del perfil, se generan 0.002 G en un segundo en el movimiento horizontal del vehículo. En el caso del movimiento vertical (eje z), el cambio es de 0.001 G en un segundo por cada 1 cm de incremento de altura del perfil. Los modelos para las variables Fuerzas G_x y G_z incorporaron términos autoregresivos (serial) de segundo y primer orden, respectivamente. Esto indica que los valores actuales de fuerza G fueron correlacionados con valores pasados de la serie en uno y dos periodos atrás. El modelo de la variable G_y incorporó componentes autoregresivos hasta de sexto orden.

Los datos de fuerzas gravitacionales en los tres ejes mostraron que la varianza del error no fue constante, por lo que en el modelo se consideró la corrección por heterocedasticidad mediante los modelos *generalized autoregressive conditional heterocedasticity* (GARCH). En este caso, los coeficientes empleados fueron significativos estadísticamente ($p < 0.05$) (Cuadro 1.3).

Cuadro 1.3. Regresión lineal con errores autocorrelacionados y corrección por heterocedasticidad sobre la variable fuerzas gravitacionales en los diferentes ejes del sistema de coordenadas.

Variable/Término	coeficiente	Error estándar	p-value
Fuerza G en eje x			
<i>Componente estructural</i>			
intercepto	-0.019	0.005	0.0003
Perfil superficie de carretera	0.002	0.002	0.0231
<i>Componente autorregresivo</i>			
AR(1)	-0.376	0.037	<.0001
AR(2)	-0.064	0.029	0.0270
<i>Corrección por heterocedasticidad</i>			
ARCH0	0.005	0.001	<.0001
ARCH1	0.400	0.060	<.0001
Fuerza G en eje y			
<i>Componente estructural</i>			
intercepto	-0.091	0.006	<0.0001
Perfil superficie de carretera	0.002	0.001	0.0241
<i>Componente autorregresivo</i>			
AR(3)	-0.149	0.029	<0.0001
AR(4)	-0.164	0.027	<0.0001
AR(5)	-0.079	0.031	0.0117
AR(6)	-0.140	0.028	<0.0001
<i>Corrección por heterocedasticidad</i>			
ARCH0	0.005	0.001	<0.0001
ARCH1	0.328	0.057	<0.0001
Fuerza G en eje z			
<i>Componente estructural</i>			
intercepto	1.003	0.001	<0.0001
Perfil superficie de carretera	0.001	0.001	0.0315
<i>Componente autorregresivo</i>			
AR(1)	0.042	0.041	0.0311
<i>Corrección por heterocedasticidad</i>			
ARCH0	0.001	0.001	<0.0001
ARCH1	0.204	0.054	0.0001

1.6 CONCLUSIONES

El tramo de carretera estudiado tiene una distancia total de 10.64 km y sobre ella se localizan 29 reductores de velocidad (topes). El empleo de herramientas del SIG (GPS) y los sistemas de teledetección (imagen satelital) para conocer la ubicación de los topes depende de la precisión y

condiciones de uso de los mismos. El diseño y construcción de los reductores de velocidad se encuentran fuera de las especificaciones de la norma técnica respectiva en cuanto a la altura (11.1 cm) longitud (260 cm) y lugar de ubicación. En valor promedio del Índice de Rugosidad Internacional del tramo de carretera estudiado es superior a $20 \text{ mm}\cdot\text{m}^{-1}$, lo que sugiere un tipo de carretera con irregularidades muy pronunciadas. Las fuerzas G promedio en los ejes x , y , z fueron 0.2, 0.09 y 0.8 G, respectivamente. El modelo estadístico de tendencia de las fuerzas G muestra que se generan $0.002 \text{ G}\cdot\text{s}^{-1}$ en el movimiento horizontal (G_x y G_y) y $0.001 \text{ G}\cdot\text{s}^{-1}$ en el movimiento vertical (G_z) del vehículo por cada 1 cm de incremento en la altura del perfil de la carretera. Los términos autorregresivos de los modelos indicaron que los valores actuales de las fuerzas gravitacionales fueron correlacionados en uno, dos y hasta seis periodos atrás de la serie. Los valores de fuerzas G representan la cantidad de veces en que la carga del vehículo recibe su propio peso en la respectiva dirección en que se aplica. De manera global, esto representa un esfuerzo que se acumula en el producto cuando se transporta vía terrestre e intensifica en función de los siguientes factores: distancia y tiempo de recorrido, la velocidad de circulación, condiciones mecánicas del vehículo, la posición de la carga dentro del vehículo y el número de estiba, entre otros.

LITERATURA CITADA

- Arriaga-Patiño, M. C., P. Garnica-Anguas y A. Rico-Rodríguez. 1998. Índice Internacional de Rugosidad en la red carretera de México. Instituto Mexicano del Transporte. Secretaría de Comunicaciones y Transportes. Publicación Técnica No. 108. Sanfandila, Qro. México.
- ASTM. 2005. Standard practice for computing international roughness index of roads from longitudinal profile measurements, ASTM Standards 04.03, Road and Paving Materials; Vehicle-Pavement Systems, E1926–98.

- Balldin, Ulf I. 2002. Acceleration effects on fighter pilots. In: K. B. Pandolf and R. E. Burr, *Medical aspects of Harsh Environments Volume 2*. Washington, DC: Office of the Surgeon General, Department of the Army, United States of America.
- Box, G. E. P., G. M. Jenkins, G. C. Reinsel. 2008. *Time Series Analysis: Forecasting and Control*. Hoboken, New Jersey: John Wiley & Sons, Inc.
- Corbelle-Rico, E., M.L. Gil-Docampo, J. Armestro-González, T. Rego-SanMartín. 2006. La escala cartográfica de la imagen de satélite. Caso particular de las imágenes de Ikonos y QuickBird. *Revista de Teledetección*, 26:18-24.
- Donnelly, N., D. Weatherburn, and M. Chilvers. 2004. The impact of the Australian heroin shortage on robbery in NSW. *Crime and Justice Statistics bulletin*, NSW Bureau of Crime Statistics and Research, Sydney.
- Holt, J. E. and D. Schoorl. 1985. A theoretical and experimental analysis of the effects of suspension and road profile on bruising in multilayered apple packs. *Journal of Agricultural Engineering Research*, 31:297-308.
- Jazar, R. N. 2008. *Vehicle Dynamics: Theory and Application*. Springer Science+Business Media, LLC, NY, USA.
- Jones, C. S., J. E. Holt, and D. Schoorl. 1991. A Model to Predict Damage to Horticultural Produce during Transport. *Agricultural Engineering Research*, 50: 259-272.
- Koop, G. 2000. *Analysis of economic data*. John Wiley & Sons, Chichester.
- Laker, I. B. 1978. The dynamic response of a single wheel suspension to computer generated road profiles. T.R.R.L. (UK). Report 360. 15 p.

- Loizos, A., and C. Plati. 2008. An alternative approach to pavement roughness evaluation, *International Journal of Pavement Engineering*, 9(1):69-78.
- Luque, P., D. Álvarez y C. Vera. 2005. Ingeniería del automóvil. Sistemas y comportamiento dinámico. International Thompson Ediciones. España. 516 p.
- Romero-Navarrete, J. A. y A. Lozano-Guzmán. 1995. La respuesta dinámica de un cuarto de carro y el índice internacional de rugosidad. Instituto Mexicano del Transporte. Secretaría de Comunicaciones y Transportes. Publicación Técnica No. 67. Sanfandila, Qro. México.
- SAS Institute, Inc. (2008). SAS/STAT® 9.2 *user's guide*. Cary, NC, USA: SAS Institute Inc.
- Sayers, M.W. 1995. On the calculation of international roughness index from longitudinal road profile, *Transportation Research Record*, 1501: 1–12.
- Sayers, M.W. and S. M. Karamihas. 1998. The Little Book of Profiling: Basic information about measuring and interpreting road profiles. University of Michigan Transportation Research Institute (UMTRI). USA. 100 p.
- Schoorl, D., and J. E. Holt. 1982. Road-vehicle-load interactions for transport of fruit and vegetables, *Agricultural Systems*, 8: 143-155.
- Schoorl, D., and J. E. Holt. 1985. Mechanical Damage in Agricultural Products: A Basis for Management, *Agricultural Systems*, 11: 143-157.
- Wyrick, B. 2009. Acceleration in Aviation: G-Force. Publication AM-400-09/4, Federal Aviation Administration, Civil Aerospace Medical Institute, Oklahoma City, OK. www.faa.gov/pilots/safety/.../Acceleration.pdf (fecha de consulta 31 octubre de 2013).

CAPÍTULO II

VELOCIDAD DE RESPIRACIÓN Y LAS PROPIEDADES MECÁNICAS DE FRUTOS DE DURAZNO DURANTE EL ALMACENAMIENTO EN TRES ESTADOS DE MADUREZ

2.1 RESUMEN

El conocimiento de las propiedades físicas, fisiológicas y mecánicas de los frutos es importante para su manejo postcosecha. Se evaluaron las propiedades físicas de frutos de durazno cv. Diamante cosechado en estado de madurez fisiológico, obteniendo los siguientes valores: esfericidad (0.98), densidad ($0.998 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$), densidad aparente ($0.61 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$), porosidad (0.38) y coeficiente de empaque (0.70). También se evaluaron las velocidad de respiración y las propiedades mecánicas (carga de compresión, deformación y módulo de elasticidad aparente) de los frutos de durazno durante el almacenamiento a temperatura ambiente, como una función de su estado de madurez (verde, medio amarillo y amarillo). Los frutos medio amarillos exhibieron mayor velocidad de respiración los frutos en estado verde o amarillo. El tejido de frutos de durazno mostró comportamiento anisotrópico, variando sus propiedades mecánicas con la orientación (tangencia o radial) de la carga compresiva. Las propiedades mecánicas del durazno exhibieron una fuerte dependencia con el estado de madurez de cosecha y velocidad de avance de la senescencia.

Palabras clave: propiedades físicas; estado de madurez; velocidad de respiración; carga de compresión, anisotropía; módulo de elasticidad aparente.

RESPIRATION RATE AND MECHANICAL PROPERTIES OF PEACH FRUIT DURING STORAGE AT THREE MATURITY STAGES

2.2 ABSTRACT

The knowledge of the physical, physiological and mechanical properties of fruits is important for its later harvest handling. The physical properties of peach fruit cv. Diamante harvested at physiological maturity stage were evaluated, obtaining the following values: sphericity (0.98), density ($0.998 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$), bulk density ($0.61 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$), porosity (0.38), and packing coefficient (0.70). The respiration rate and mechanical properties (compression load, strain and apparent elasticity modulus) of the peach fruit during storage at room temperature, as a function of its maturity stage (green, middle yellow and yellow) were also evaluated. Middle yellow fruits exhibited higher respiration rate than those corresponding to green and yellow ones. The peach fruit tissue showed anisotropic behavior, varying its mechanical properties with the orientation (tangential or radial) of the compressive load. The mechanical properties of peach exhibited a strong dependence on the degree of maturity at harvest and the rate of senescence progression.

Keywords: physical properties; maturity stage; respiration rate; compression load; anisotropy; apparent elasticity modulus.

2.3 INTRODUCCIÓN

Las estimaciones de la FAO (2011) indican que existen entre 40 y 50 % de pérdidas de frutas y hortalizas anualmente en los países en vías de desarrollo, de las cuales aproximadamente 16 % se debe al mal manejo en las actividades postcosecha, particularmente relacionadas a las limitaciones técnicas de manejo en la cadena de distribución. En el estado de México, el 68.5 % de los productores de durazno menciona que la actividad es económicamente rentable, pero la comercialización es limitada por los daños causados por insectos y los daños mecánicos (Larqué-Saavedra *et al.*, 2009). En relación a estos últimos, cualquier daño en el tejido tiene como efecto inmediato la oxidación de los compuestos fenólicos por la catecol oxidasa que demanda un incremento en el consumo de oxígeno. Este efecto persiste de manera prolongada en la respiración celular del tejido adyacente a la zona del daño, modificando el metabolismo global del fruto, el cual a su vez ocasiona oscurecimiento enzimático, producción autocatalítica de etileno, pérdida acelerada de agua y vulnerabilidad del tejido a las infecciones fungosas (Knee and Miller, 2002; Kader, 2002).

Las investigaciones realizadas en los últimos 40 años han dejado de manifiesto la necesidad de determinar las propiedades físico-mecánicas para cada fruto en particular, debido a la estrecha relación que existe entre estas propiedades con su grado de susceptibilidad de las distintos tipos de daño mecánico: impacto (Shulte Pason *et al.*, 1990; Fridley y Adrian, 1996; Ragni and Berardinelli, 2001), vibración (Barchi *et al.*, 2002, Berardinelli *et al.*, 2005) y compresión (Dan *et al.*, 2006; Villaseñor-Perea *et al.*, 2006; Haciseferogullari *et al.*, 2007; Lewis *et al.*, 2008).

Muchos autores han usado las pruebas mecánicas cuasi-estáticas para obtener datos objetivos de las propiedades mecánicas y texturales (Blahovec, 2001; Lu and Abbott, 2004; Wihelm *et al.*, 2004); esto debido a que en dichas condiciones, la primera parte de la curva fuerza-deformación

unitaria, en una prueba de compresión o tensión, es lineal y corresponde a un comportamiento elástico (Bourne, 2002; ASAE, 2005). De a ello, es importante que el módulo de elasticidad aparente y otros parámetros, tales como la deformación y carga de compresión, sean calculados con una deformación menor al primer punto de inflexión, ya que el cambio en la pendiente de la curva sugiere que algún tipo de fractura empieza a ocurrir dentro del tejido (Mohsenin, 1970; ASAE, 2005). Por tanto, es importante considerar que las características atribuibles a la debilidad del tejido de frutos, tales como: la baja compactación, la forma y el arreglo de las células del parénquima resultan en un comportamiento mecánico anisotrópico que responde de manera diferente a la carga mecánica impuesta desde diferentes direcciones (Khan and Vincent, 1990; Knee and Miller, 2002).

La resistencia mecánica de los frutos es el resultado de un conjunto de factores inherentes a su propia estructura, composición morfológica, estado de madurez, diferencias entre variedades e incluso entre frutos de una misma variedad y de las condiciones de manejo después de la cosecha (Whitelock *et al.*, 1999; Kays and Paull, 2004; ASAE, 2005). Esta resistencia tampoco es permanente en el tiempo porque depende principalmente de la velocidad con que ocurren los cambios metabólicos (Gao *et al.*, 1989; Bentini *et al.*, 2009). Debido a lo anterior, es importante evaluar la magnitud del cambio en las variables que están relacionadas con la resistencia mecánica durante el periodo de almacenamiento del fruto. Los resultados pueden tener aplicaciones importantes en el desarrollo de modelos de simulación por computadora para estudiar el comportamiento reológico del fruto (Lewis *et al.*, 2008; Gyeong-Won *et al.*, 2008; Kursat Celik *et al.*, 2011) y para el diseño de sistemas de clasificación, empaque y transporte, con el objetivo de minimizar el daño. Con base en lo expuesto, los objetivos de este trabajo fueron: (a) determinar las propiedades físicas (longitud, diámetro mayor, diámetro menor, diámetro medio geométrico,

esfericidad, área superficial, peso, volumen, densidad real, densidad aparente, porosidad y coeficiente de empaque) de duraznos cv. Diamante en tres estados de madurez, (b) estudiar el efecto del estado de madurez al momento de la cosecha sobre la velocidad de respiración del fruto durante el almacenamiento a temperatura ambiente (20 ± 2 °C) y (c) evaluar las propiedades mecánicas (carga de compresión, deformación y módulo de elasticidad aparente) del durazno durante el almacenamiento a temperatura ambiente, como función de su estado de madurez y la orientación de la carga de compresión.

2.4 MATERIALES Y MÉTODOS

2.4.1 Materiales

Los frutos de durazno (*Prunus persica* L.) cv. Diamante estudiados se obtuvieron de un huerto experimental ubicado en la comunidad de Coatepec Harinas ($18^{\circ}55'29.32''N$ $99^{\circ}46'07.98''O$), Estado de México. Los frutos correspondieron a tres estados de madurez, establecidos de acuerdo con el color de la superficie del fruto, usando una escala arbitraria: estado verde (M1) corresponde a frutos con 25% de su superficie con color amarillo; medio amarillo (M2) fue equivalente a frutos con 50% de su superficie con color amarillo y estado amarillo (M3) a frutos con 100% de su superficie con amarillo. La cosecha de cada estado de madurez se realizó a 117, 120 y 123 días después de antésis, respectivamente. Inmediatamente después de la cosecha los frutos se colocaron, en una sola capa, sobre tela de algodón dentro de cajas de cartón corrugado para evitar carga de compresión. Los frutos fueron trasladados al Departamento de Ingeniería Mecánica Agrícola de la Universidad Autónoma Chapingo y al Colegio de Postgraduados, ambos localizados en Texcoco, Estado de México, en un tiempo aproximado de tres horas. En el laboratorio se hizo nuevamente otra clasificación y aquellos frutos con daños percibidos visualmente fueron

desechados. Los frutos se almacenaron a la temperatura de $20\pm 2^{\circ}\text{C}$ después de la cosecha y durante los días de caracterización.

2.4.2 Propiedades Físicas

Inmediatamente después de la cosecha, 50 frutos correspondientes a cada estado de madurez fueron elegidos aleatoriamente para determinar sus propiedades físicas. Se midió la longitud (L), diámetro mayor perpendicular a L (M) y diámetro menor perpendicular a L y M (N) (Figura 2.1) con un calibrador digital Trupper® (CALDI-6MP, Truper Herramientas, S.A. de C.V., Estado de México, México). A partir de los datos obtenidos, se calculó el diámetro medio geométrico (D_g) y la esfericidad (ϕ) del fruto utilizando las ecuaciones (2.1) y (2.2) (Mohsenin, 1986):

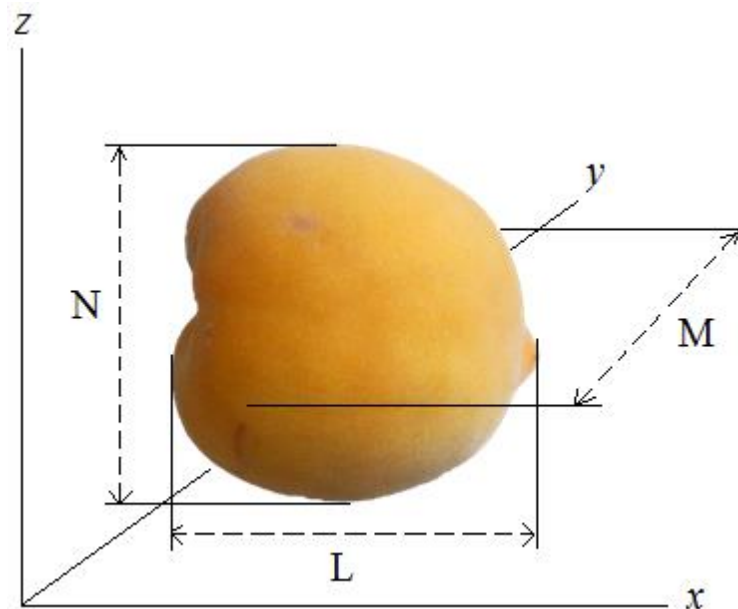


Figura 2.1. Representación de la longitud (L), diámetro mayor (M) y diámetro menor (N) de frutos durazno cv. Diamante.

$$D_g = (LMN)^{1/3} \quad (2.1)$$

$$\phi = D_g/L \quad (2.2)$$

Donde D_g es el diámetro medio geométrico y ϕ la esfericidad. Esta forma de evaluar la esfericidad asume que el volumen del fruto es igual al volumen de una elipsoide triaxial con interceptos L , M , N y que el diámetro de la esfera circunscrita es el intercepto más largo del elipsoide (Mohsenin, 1986). El área de la superficie del fruto (S) se calculó usando la ecuación (2.3) (McCabe *et al.*, 2001):

$$S = \pi D_g^2 \quad (2.3)$$

Donde S es el área superficial y D_g es el diámetro medio geométrico.

El peso de cada fruto se obtuvo con una balanza electrónica digital Ohaus (Adventurer™ Pro AV8101, Ohaus Corporation, Pine Brook, NJ USA). El volumen del fruto se obtuvo por el método de desplazamiento de agua. Se usó una probeta graduada de 2 L de capacidad, de peso conocido, en donde se vertió 1 L de agua y posteriormente se sumergió completamente el fruto. Se registró el volumen de agua desplazado y el peso total de la probeta. La densidad del fruto (ρ_f) se calculó mediante la ecuación (2.4) (Rafiee *et al.*, 2007):

$$\rho_f = \left(\frac{W_f}{W_f - W_w} \right) \rho_w \quad (2.4)$$

Donde ρ_f es la densidad del fruto, ρ_w es la densidad del agua (0.998 g/cm^3) a la temperatura promedio del ambiente (20°C), W_f y W_w son el peso individual del fruto y el peso del agua desplazado por el fruto, respectivamente.

La densidad aparente (ρ_a) se determinó por el método de la AOAC (1990), con base en el volumen ocupado por la muestra a granel colocada dentro de un contenedor de peso y volumen conocidos. En este caso se empleó una caja rectangular de cartón corrugado de $41 \times 28 \times 16$ cm y 530 g peso (Yahya *et al.*, 2013). Muestras al azar de frutos de los tres estados de madurez se

vertieron desde una altura constante de 15 cm y después se sacudió ligeramente la caja para el reacomodo de los frutos sin provocar su compactación. Solamente se consideró la fruta que llenó el volumen de la caja, la remanente fue removida con una regla de madera. Posteriormente se pesó la caja y se calculó la densidad aparente (ρ_a) usando la ecuación (2.5):

$$\rho_a = \frac{W_t}{W_b} \quad (2.5)$$

Donde ρ_a es la densidad aparente, W_t y W_b son el peso total de la fruta colocada dentro de la caja y el volumen de la caja, respectivamente.

La porosidad o la fracción de volumen vacío (ε) se determinó usando la ecuación (2.6) (Mohsenin, 1986; Vursavus *et al.*, 2006):

$$\varepsilon = (\rho_f - \rho_a) / \rho_f \quad (2.6)$$

Donde ε es la porosidad, ρ_a y ρ_f son la densidad aparente y densidad real del fruto, respectivamente. El coeficiente de empaque (λ), relación entre el volumen total de los frutos dentro del contenedor y el volumen del contenedor vacío, se calculó usando la ecuación (2.7) (Topuz *et al.*, 2005):

$$\lambda = \frac{V_t}{V_b} \quad (2.7)$$

Donde λ es el coeficiente de empaque, V_t y V_b son el volumen de los frutos vertidos en la caja y de la caja vacía, respectivamente.

Dado que el único criterio que se emplea en campo para la cosecha del durazno es el color, entonces fue importante medir esta variable (Espectrofotómetro Portátil X-rite, Mod. 3290, X-rite

Inc., Grand Rapids, Michigan, USA) en el día de cosecha para 10 frutos correspondientes a cada estado de madurez. Se determinó el valor promedio de la luminosidad (L^*), el ángulo de tono (Hue) y la pureza de color (Chroma) en tres posiciones distintas en la superficie de cada fruto. Así mismo, se registró el peso diario de los frutos durante cinco días y la pérdida de peso porcentual se calculó con base en el peso del día inicial.

2.4.3 Propiedades mecánicas

Pruebas de compresión uniaxial se aplicaron para determinar las propiedades mecánicas de carga de compresión (kN), deformación unitaria ($\text{mm}\cdot\text{mm}^{-1}$) y módulo de elasticidad aparente (MPa) (Rosenthal, 1999; Bourne, 2002) en frutos almacenados durante tres días a 20 ± 2 °C. El equipo utilizado fue una máquina universal de ensayos mecánicos INSTRON (modelo 3382, Instron, Norwood, MA, USA) con una velocidad de cruceta de $30 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ (ASAE, 2005) y una celda de carga de 100 kN. Dos muestras cilíndricas, 15 mm de diámetro por 15 mm de altura, se obtuvieron, con un sacabocados, de los lados opuestos de la zona ecuatorial de cada fruto. Se escogieron los tamaños de muestra señalados debido a que la altura de la muestra debe ser igual o menor que su diámetro; de otra manera, la prueba de compresión se vuelve menos reproducible y confiable debido al fenómeno de pandeo (Shaw y Young, 1988).

La primera muestra se obtuvo en la orientación perpendicular al eje cáliz-pedúnculo y la segunda en la orientación paralela al mismo eje (Figura 2.2). Lo anterior, asumiendo que las células se organizan en columnas radiales que divergen desde el endocarpio hasta la periferia del fruto, al igual que los espacios intercelulares y haces vasculares (Figura 2.2) (Khan y Vincent, 1990). Se emplearon los términos “radial” y “tangencial” para describir la orientación de la carga compresiva

sobre la muestra cilíndrica. El término “radial” se refiere a la propagación de la compresión radialmente al fruto y en dirección longitudinal de la columna de células, y “tangencial” a la propagación de la compresión en el eje paralelo a la tangente de la columna de células.

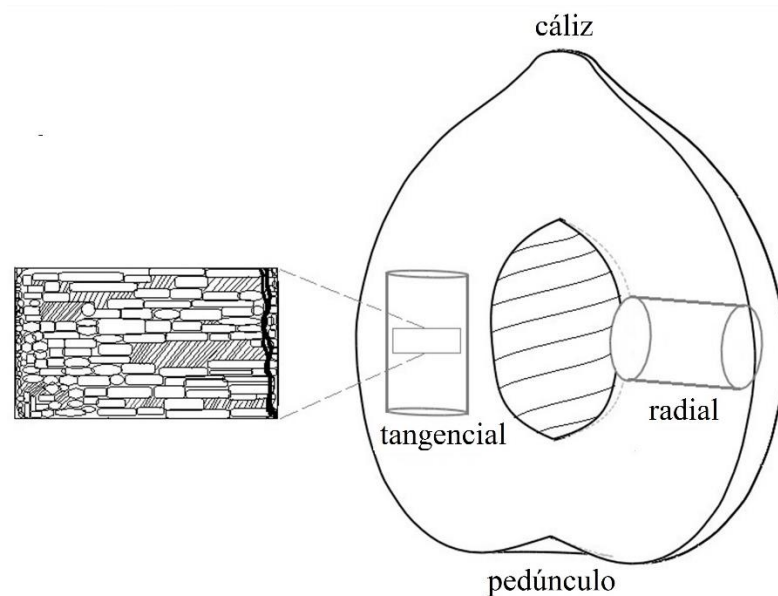


Figura 2.2. Representación esquemática de la orientación en que se tomaron las muestras del mesocarpio del fruto de durazno, la orientación de las células, espacios intercelulares y haces vasculares dentro del mesocarpio. Las células y espacios intercelulares cerca de la superficie son esféricos y menos orientados, mientras que en el interior están radialmente elongados y orientados en columnas radiales. El área sombreada representa los espacios intercelulares y las líneas gruesas representan los haces vasculares (adaptado de Khan and Vincent (1993), Chalermchat *et al.* (2010)).

Mediante pruebas preliminares de compresión y con la ayuda de las gráficas de carga-deformación, se determinó la distancia de compresión de la muestra. Esta correspondió al primer punto de inflexión en la curva de carga de *compresión-deformación*, caracterizada por un incremento en la deformación de la muestra pero sin cambios en el esfuerzo de compresión (ASAE, 2005; Sadrnia *et al.*, 2008). Cuando la deformación del material es moderada, se establece una relación lineal entre la fuerza y la deformación, y en estos casos el tejido puede definirse como un

material elástico (Moreira *et al.*, 2007; Bentini *et al.*, 2009). Las propiedades mecánicas señaladas se obtuvieron a partir de la región lineal de las curvas *carga-deformación*.

2.4.4 Caracterización fisiológica

Aproximadamente tres horas después de la cosecha, se midió la velocidad de respiración del fruto mediante un sistema de flujo de aire continuo (Young y Biale, 1962), consistente un compresor de aire; un tablero mezclador de gases equipado con un conjunto de válvulas y una columna barostática para el control de la presión del flujo de aire; y un recipiente de plástico con dos orificios para el flujo continuo de aire dentro del recipiente. Dentro del recipiente se colocaron frutos de peso conocido junto con un medidor de dióxido de carbono y temperatura (Telaire® modelo 7001, General Electric Company, CA, USA). El medidor se conectó en el canal externo de un sistema de adquisición de datos (HOBO® data loggers, modelo U12-012, Onset Computer Corporation, MA, USA). El sistema de adquisición de datos se programó para tomar datos de forma continua en una computadora personal con la ayuda del programa HOBOWare® Lite v. 3.1.0 (Onset Computer Corporation, MA, USA). Con ambos instrumentos se registraron las siguientes variables: CO₂ (ppm), temperatura (°C) y humedad relativa (%). Posteriormente, a partir de los datos de flujo volumétrico de aire que se inyectó al recipiente, la concentración de CO₂ en el aire a la entrada y salida del recipiente, y el peso del fruto dentro del recipiente se hicieron los cálculos, usando la ecuación (2.8), para expresar la velocidad de respiración en mL de CO₂ · kg⁻¹ · h⁻¹, durante 4 días de almacenamiento.

$$R_r = \frac{(CO_2)_o - (CO_2)_i}{100} \left(\frac{F}{P} \right) \quad (2.8)$$

Donde R_r es la velocidad de respiración, F es el flujo de aire que pasa a través del tablero mezclador, P es el peso de frutos dentro del recipiente y los subíndices “ o ” y “ i ” son la concentración de CO_2 en el aire de la salida y de la entrada del recipiente, respectivamente.

El diseño experimental empleado para la determinación de las propiedades físicas, mecánicas y fisiológicas de los frutos fue uno completamente al azar. Las medias de tres valores con su respectiva barra de error estándar se presentan en las gráficas de velocidad de respiración. Los valores de las propiedades físicas y la pérdida de peso se analizaron mediante análisis de varianza de clasificación simple. Se aplicó un análisis de varianza multifactorial para determinar que factor (estado de madurez, orientación de la carga de compresión y días de almacenamiento) tuvo efecto estadísticamente significativo sobre las propiedades mecánicas del tejido de frutos de durazno. Para cada factor significativo se utilizaron pruebas de rango múltiple de Tukey con el fin de determinar qué medias fueron significativamente diferentes de las que otros. La significación se estableció en $p \leq 0,05$. El análisis de datos se realizó con el software estadístico Statistical Analysis System for Windows 9.2 (SAS Institute Inc, Cary, NC, USA).

2.5 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

2.5.1 Propiedades físicas

Los valores de luminosidad (L^*), ángulo hue (hue) y pureza de color (chroma) de los frutos de durazno correspondientes a los tres diferentes estados de madurez se muestran en el Cuadro 1. Las variaciones en los valores de luminosidad, chroma y hue indicaron que conforme incrementa la madurez los frutos exhibieron un color amarillo rojizo brillante y más intenso. Los valores de las

propiedades relacionadas con la forma del fruto: diámetro medio geométrico (D_g), esfericidad (\emptyset) y área superficial (S) para los frutos con diferente estado de madurez (Cuadro 2.1) no mostraron diferencia significativa.

Cuadro 2.1. Luminosidad (L^*), ángulo hue (hue) y pureza de color (chroma) (media \pm SD, $n = 10$) de la superficie duraznos cv. Diamante cosechados en tres estados de madurez.

Propiedad de color	M1	M2	M3
L^*	64.17 ± 2.8^b	67.70 ± 2.6^{ab}	68.73 ± 4.4^a
Chroma*	38.77 ± 2.8^b	48.14 ± 2.4^a	49.34 ± 10.4^a
Hue*	85.72 ± 2.8^a	78.66 ± 2.1^b	75.73 ± 1.4^c

M1: estado verde; M2: estado medio amarillo y M3: estado amarillo.

^{a,b,c} Superíndices diferentes en la misma línea indican diferencias significativas ($p < 0.05$).

Los valores medios de D_g , \emptyset y S fueron 50.0 mm, 0.98 and 78.7 cm², respectivamente. Para otras variedades de durazno se reportan valores similares en la literatura. Zohrabi *et al.* (2013) reportó variaciones entre: 41.2-57.7 mm para D_g , 0.81-1.0 para \emptyset y 69.6-105.0 cm² para S , correspondientes a duraznos cv. Anjiri, Salil y Elberta cosechados en dos estados de madurez. Así mismo, Emadi *et al.* (2011) reportó un valor de esfericidad de 0.96 para durazno cv. Tabrizi.

Los valores de peso, volumen y densidad de duraznos entre diferentes estados de madurez (Cuadro 2) no mostraron diferencias significativas y sus valores medios fueron: 80.3 g, 80.4 cm³ y 0.998 g · cm⁻³, respectivamente. Estudios previos encontraron que la densidad varió entre 0.950 a 1.240 g · cm⁻³ para duraznos cv. Anjiri, Salil y Elberta (Zohrabi *et al.*, 2013) y cv. Tabrizi (Emadi *et al.*, 2011).

Cuadro 2.2. Propiedades físicas (media \pm SD, n = 50) de duraznos cv. Diamante cosechados en tres diferentes estados de madurez.

Propiedad	M1	M2	M3
Longitud (L) (mm)	50.0 \pm 2.4	51.2 \pm 2.4	49.8 \pm 2.8
Diámetro mayor (M) (mm)	51.2 \pm 2.6	49.8 \pm 1.0	48.9 \pm 2.6
Diámetro menor (N) (mm)	50.7 \pm 2.3	49.7 \pm 1.9	48.9 \pm 2.3
Diámetro medio geométrico	50.6 \pm 1.4	50.2 \pm 1.0	49.2 \pm 2.3
Esfericidad	0.99 \pm 0.0	0.98 \pm 0.0	0.99 \pm 0.0
Área superficial (cm ²)	80.6 \pm 4.5	79.3 \pm 3.1	76.3 \pm 7.4
Peso (g)	83.2 \pm 10.9	80.5 \pm 5.5	77.4 \pm 12.6
Volume del fruto (cm ³)	83.3 \pm 10.9	80.6 \pm 5.5	77.5 \pm 12.6
Densidad (g/cm ³)	0.998 \pm 0.0	0.998 \pm 0.0	0.998 \pm 0.0

M1: estado verde; M2: estado medio amarillo y M3: estado amarillo.

Las variaciones en las características de frutos dentro de la misma especie dependen de la diversidad genética y las diferentes condiciones de producción. Las propiedades físicas de frutos tienen aplicación en el diseño de equipos de manejo postcosecha, en la generación de modelos de predicción de peso basados en las dimensiones físicas (Lorestani and Tabatabaeefar, 2006) y en la predicción de pérdida de peso por transpiración bajo diferentes condiciones de almacenamiento (Whitelock *et al.*, 1999).

Las propiedades de frutos de los tres estados de madurez en el empaque, tales como densidad aparente, porosidad y coeficiente de empaque mostraron valores de 0.61 \pm 0.1 g · cm⁻³, 0.38 \pm 0.1 y 0.70 \pm 0.1, respectivamente. Estos valores representan el grado de compactación de frutos dentro del empaque y son empleados para el cálculo y diseño de sistemas de clasificación, almacenamiento y empaque (Mohsenin, 1986).

2.5.2 Caracterización fisiológica

Las diferencias en los estados de madurez de frutos de durazno mostraron cambios en su velocidad de respiración durante el almacenamiento (Figura 2.3). En términos generales los valores de la velocidad de respiración de frutos se incrementó durante la primer hora postcosecha, el cual significativamente menos pronunciado para M1 en comparación con los observados en M2 y M3. Los valores máximos de velocidad de respiración para los frutos varió en orden ascendente como sigue: M1 ($64 \text{ mL CO}_2 \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$) < M3 ($77 \text{ mL CO}_2 \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$) < M2 ($87 \text{ mL CO}_2 \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$). La cosecha de frutos climatéricos, tales como los duraznos, en su estado de madurez fisiológico muestran incrementos significativos en la velocidad de respiración, lo cual estimula ciertos cambios metabólicos que permiten el desarrollo de los atributos de madurez. Sin embargo, en los frutos cosechados fuera de este estado, el metabolismo respiratorio se convierte en senescente con bajos niveles y tendencia a la baja, aunque puede haber tendencias que muestran aumento, sin que este sea significativa, debido a los múltiples factores que intervienen en el metabolismo respiratorio (Kader, 2002; Kays and Paull, 2004).

Después del incremento inicial, la velocidad de respiración de los frutos mostró un comportamiento variable con tendencia a la baja (Figura 2.3). El decremento gradual en la velocidad de respiración de los frutos está relacionado con el grado de madurez del tejido (Kays and Paull, 2004). La cinética de respiración de los frutos de durazno alcanzó una condición de equilibrio, con valores casi constantes, aproximadamente a las 40 h para M2, 75 h para M3 and 80 h para M1. Los valores de ritmo respiratorio para M1 y M2 fueron más elevados que los de M3, probablemente porque los primeros tenían mayor cantidad de sustrato para la respiración. Las características deficientes de maduración desarrolladas por los frutos M1 coinciden con su patrón

de respiración, probablemente porque el estado inmaduro del tejido no permitió el desarrollo del fenómeno climatérico.

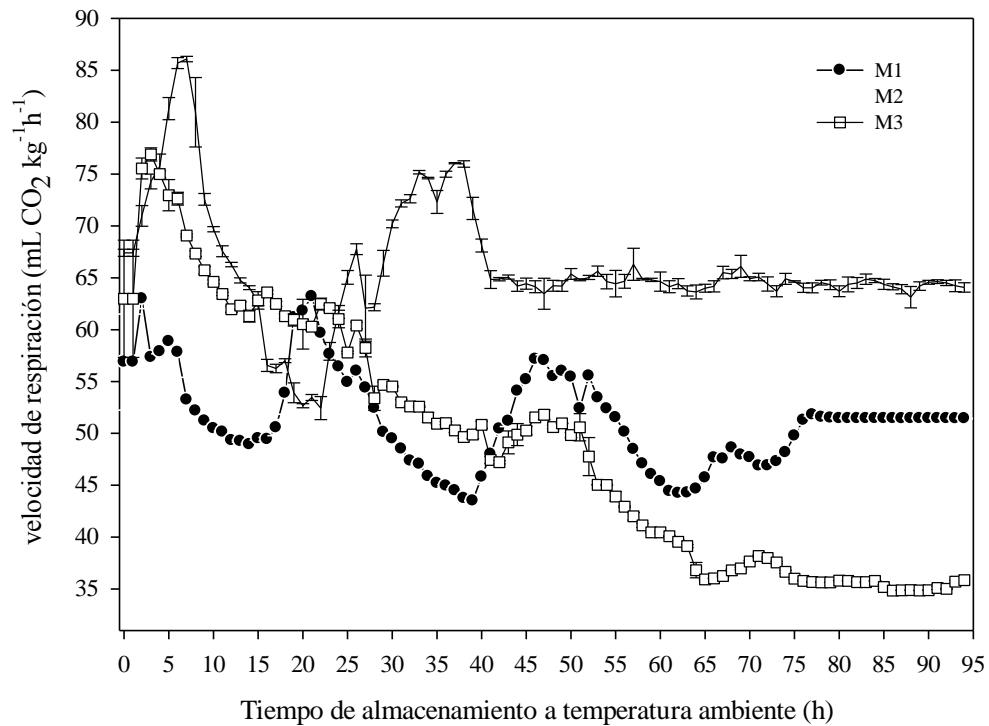


Figura 2.3. Variación en la velocidad de respiración de frutos de durazno cv. Diamante en tres estados de madurez (M1 = verde; M2 = medio amarillo y M3 = amarillo) durante el almacenamiento a 20 ± 2 °C.

El estado de madurez M2 desarrolló el color característico de frutos con madurez comercial en aproximadamente dos días después de la cosecha, lo cual presupone que el incremento respiratorio en la primera hora después de la cosecha induce el climatérico.

Aunque los frutos de durazno cosechados en diferentes estados de madurez no mostraron diferencias significativas en la pérdida de peso durante el almacenamiento, se observaron algunas tendencias en función de la etapa de madurez del durazno. Durante el primer día de

almacenamiento, la pérdida de peso del fruto correspondiente a los tres estados de madurez fue similar, alcanzando valores cercanos a 1% (Figura 2.4). Después del primer día, los frutos M1 y M2 experimentaron una tasa de pérdida de peso de más de 2%, mientras que en los frutos M3 fue 1.8%.

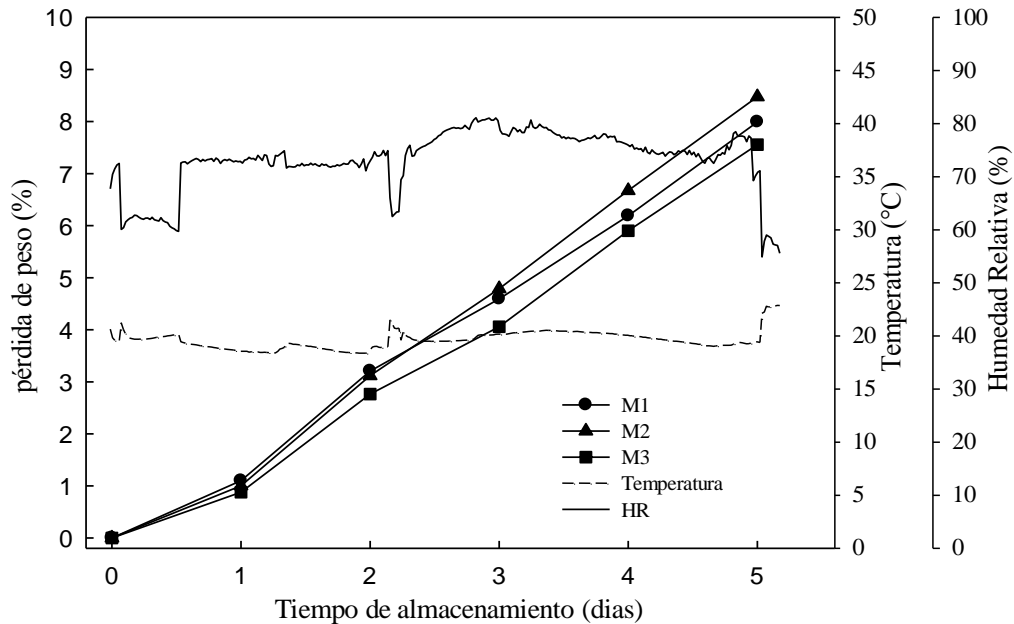


Figura 2.4. Variación en la pérdida de peso de frutos de duraznos cv. Diamante cosechados en tres estados de madurez (M1 = verde; M2 = medio amarillo and M3 = amarillo) durante el almacenamiento a 20 ± 2 °C.

La tendencia continuó durante el período de almacenamiento en orden ascendente de la siguiente manera: $M3 < M1 < M2$ (Figura 2.4). La temperatura, humedad relativa y el movimiento del aire son tres los factores ambientales que afectan directamente a la pérdida de humedad de la fruta durante el almacenamiento (Whitelock *et al*, 1999.); Sin embargo, en este estudio, estas condiciones ambientales mostraron variaciones muy pequeñas (Figura 2.4). Es probable que la tasa de consumo del sustrato respiratorio fue responsable de la disminución en el peso (Kays y

Paull, 2004) debido a la correspondencia entre la tasa de respiración y la pérdida de peso de la fruta. Para muchas frutas y verduras, síntomas de marchitamiento restan valor comercial al producto, causando pérdidas de peso de entre 5 a 10% (Kays, 1991). En duraznos, las pérdidas de peso no fueron muy severas en los tres estados de madurez estudiados, ya que después de cinco días de almacenamiento no superaron el 9% y no hubo evidencia de marchitamiento. Sin embargo, el ablandamiento del tejido fue un factor limitante.

2.5.3 Propiedades mecánicas

El estado de madurez del fruto en la cosecha, la orientación de la carga y los días de almacenamiento influenciaron significativamente los valores de carga de compresión, deformación y módulo de elasticidad aparente del tejido de durazno (Cuadro 2.3). El ANOVA Multifactorial mostró que carga de compresión tangencial resultó en valores más elevados de carga de compresión, en comparación con la orientación radial. Los estados de madurez avanzados y aumento de los días de almacenamiento resultaron en valores de carga de compresión más bajas en el durazno. La respuesta diferente exhibida por el tejido de duraznos como resultado de la orientación de la carga demostró su comportamiento anisótropo. La propiedad anisotrópica en el tejido de durazno puede atribuirse a la forma y disposición de las células del parénquima y otros componentes morfológicos. Los resultados mostraron que hay menos rigidez en el tejido en la dirección radial; a pesar de que las columnas del grupo células del parénquima crecen en esta dirección (Figura 2.5), también hay espacios intercelulares que actúan como espacios incorporados y concentradores de esfuerzos (Khan y Vincent, 1993; Kays y Paull, 2004).

El ANOVA multifactorial mostró que conforme avanza el estado de madurez en la cosecha y los días de almacenamiento incrementaron, la carga de compresión disminuyó (Cuadro 2.3).

Cuadro 2.3. Análisis de varianza multifactorial para la carga de compresión, deformación y módulo de elasticidad aparente de frutos de durazno.

Factor	Carga de compresión (N)	de deformación (mm·mm ⁻¹)	Módulo de elasticidad aparente (MPa)
Orientación compresión (A)			
Radial	15.98 ± 4.2 ^b	0.238 ± 0.0 ^b	0.414 ± 0.1 ^b
Tangencial	85.85 ± 6.6 ^a	0.591 ± 0.0 ^a	0.886 ± 0.0 ^a
Estado de madurez (B)			
Verde	47.79 ± 3.7 ^a	0.335 ± 0.0 ^c	0.789 ± 0.1 ^a
Medio Amarillo	36.99 ± 4.2 ^b	0.350 ± 0.0 ^b	0.530 ± 0.1 ^b
Amarillo	31.29 ± 6.7 ^c	0.370 ± 0.0 ^a	0.393 ± 0.1 ^c
Días de almacenamiento (C)			
1	53.35 ± 5.2 ^a	0.273 ± 0.0 ^c	0.930 ± 0.2 ^a
2	47.38 ± 4.4 ^b	0.361 ± 0.0 ^b	0.756 ± 0.1 ^b
3	30.04 ± 4.9 ^c	0.374 ± 0.0 ^{ab}	0.354 ± 0.0 ^c
4	23.16 ± 4.2 ^d	0.388 ± 0.0 ^a	0.260 ± 0.0 ^d
A×B	ns	ns	***
A×C	***	ns	***
B×C	***	***	ns
A×B×C	***	ns	***

^{a,b,c} Superíndices diferentes dentro de la misma columna correspondiente al factor indican que la media difiere significativamente ($p \leq 0.05$); ns: no significativo estadísticamente; ***: estadísticamente significativo a $p \leq 0.01$.

La disminución en la rigidez global del tejido están relacionados con el grado de alteración de las hebras de microfibrillas, que constituyen la pared celular primaria, como un resultado del grado de progresión de la senescencia del tejido (Redgwell y Fischer, 2002; Kays y Paull, 2004). De acuerdo con estos resultados, se sugiere que la cosecha del durazno se realice en estado medio amarillo (M2) y acomodar los frutos dentro del empaque de tal manera que la carga de compresión ocurra en la orientación tangencial al arreglo de las células (eje cáliz-pedúnculo).

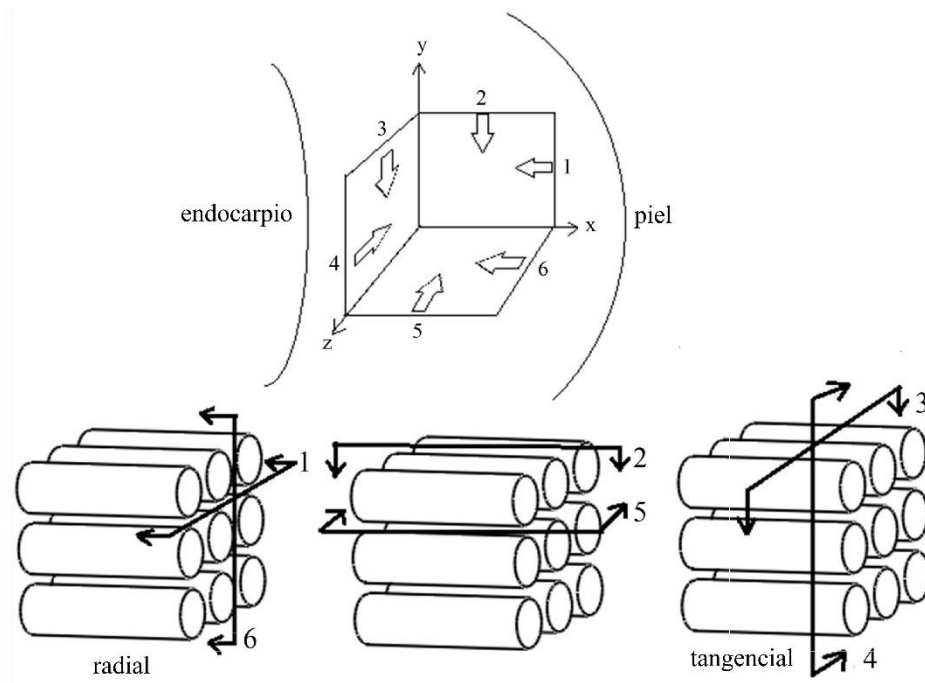


Figura 2.5. Representación esquemática de las seis posibles formas de orientación de la carga en los tres planos primarios: x,y ; x,z and y,z . Este estudio solamente consideró la orientación radial (1) y la tangencial (3). (Adaptado de Khan and Vincent, 1993).

Los valores de deformación del tejido de duraznos fueron más elevados cuando se aplicó compresión tangencial en comparación con los obtenidos por compresión radial (Cuadro 2.3). Estados de madurez avanzados y aumentos en los días de almacenamiento resultaron en valores de deformación más altos en el durazno. La disminución de la rigidez del tejido por el efecto del tiempo de almacenamiento depende en gran medida de la velocidad con que se producen los cambios estructurales en los constituyentes de la pared celular. Es importante tener en cuenta el grado de madurez del fruto en el momento de cosecha, debido a su influencia en la velocidad a la que se produce la pérdida en forma de las células de parénquima que dan rigidez global al tejido (Kays y Paull, 2004; Redgwell y Fischer, 2002).

La carga de compresión tangencial resultó en valores de módulo de elasticidad aparente más elevada en comparación con los obtenidos por carga de compresión radial. En contraste, estados de madurez avanzados e incrementos en los días de almacenamiento resultaron en menores valores de elasticidad aparente en el durazno. También la interacción entre factores influyó en las propiedades mecánicas del durazno (Cuadro 2.3). La interacción entre la orientación de compresión con la etapa de madurez ($A \times B$), días de almacenamiento ($A \times C$) y con ambos ($A \times B \times C$) determinaron la rigidez del tejido del fruto cuando se aplicó una carga de compresión. Las propiedades mecánicas de los frutos de durazno se pueden relacionar con algunas características fisiológicas y estructurales, tales como la presión de turgencia celular (Bentini *et al.*, 2009). Praeger *et al.* (2009) indicaron que tanto el módulo de elasticidad aparente y el coeficiente de rigidez están estrechamente relacionados con el volumen de agua del objeto estudiado. Nourian *et al.* (2003) informó que la disminución en el módulo de elasticidad aparente podría ser al menos parcialmente debido a la degradación y conversión de almidón en azúcares solubles.

2.6 CONCLUSIONES

Los frutos de durazno cv. Diamante tuvieron los siguientes valores para el diámetro medio geométrico esfericidad, superficie, densidad, densidad aparente, porosidad y coeficiente de empaque: 50.2 ± 2.2 mm, 0.98 ± 0.03 , 79.5 ± 7.0 cm², 0.998 g · cm⁻³, 0.61 ± 0.13 g · cm⁻³, 0.38 ± 0.13 y 0.70 ± 0.11 , respectivamente. Los frutos cosechados con un 50% de color amarillo en la superficie (M2) mostraron una tasa de respiración más alta a la presentada por los frutos cosechados en estado verde (M1) y amarillo (M3). La tasa de respiración más rápida de M2 se relaciona con el comportamiento climatérico del fruto con el consecuente desarrollo del color característico de un fruto completamente maduro después de dos días de almacenamiento. La

pérdida de peso fresco en los tres estados de madurez estudiados fue menor a 9% después de 5 días de almacenamiento sin presentar síntomas de marchitamiento severos. Los resultados demostraron que el tejido del durazno tiene un comportamiento anisotrópico, variando sus propiedades mecánicas con la orientación de la carga de compresión. Por lo tanto, esta información sugiere que los sistemas de empaque deben ser diseñados teniendo en cuenta estas propiedades. El módulo de elasticidad aparente del tejido mostró una fuerte dependencia sobre la orientación de carga compresiva, el grado de madurez en la cosecha y la velocidad de progresión de la senescencia. Las propiedades físicas y mecánicas del durazno evaluado son una importante base de datos para su uso en modelos de predicción de la velocidad de pérdida de peso y humedad, y para alimentar modelos de simulación por computadora de los daños mecánicos basados en métodos numéricos.

LITERATURA CITADA

- ASAE *Standards* (2005). S368.4. Compression test of food material of convex shape. St. Joseph, Michigan: American Society for Agricultural Engineering.
- AOAC (1990). *Official Methods of Analysis* (17th ed.). Washington, DC: Association of Official Analytical Chemists.
- Barchi, G. L., Berardinelli, A., Guarnieri, A., Ragni, L., & Totaro, F.C. (2002). Damage to loquats by vibration-simulation intrastate transport. *Biosystems Engineering*, 82(3), 305-312.
- Blahovec, J. (2001). Improved rate controlled model for stress relaxation in vegetables tissue. *International Agrophysics*, 15, 73-78.
- Bentini, M., Caprara, C., & Martelli, R. (2009). Physico-mechanical properties of potato tubers during cold storage. *Biosystems Engineering*, 104, 25-32.
- Berardinelli, A., Donati, V., Giunchi, A., Guarnieri, A., & Ragni, L. (2005). Damage to pears caused by simulated transport. *Journal of Food Engineering*, 66, 219-226.

- Bourne, M. C. (2002). *Food Texture and Viscosity: Concept and Measurement*. New York, NY: Academic Press.
- Chalermchat, Y., Malangone, L., & Dejmek, P. (2010). Electropermeabilization of apple tissue: Effect of cell size, cell size distribution and cell orientation. *Biosystems Engineering*, *105*, 357-366.
- Dan, H., Okuhara, K., & Kohyama, K. (2006). Mechanical stress distribution in cross-sections of cucumber cultivars during the fracture process. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, *86*(1), 26-34.
- Emadi, B., Abolghasemi, R., Aghkhani, M. H., & Beyraghi Toosy, Sh. (2011). Physical and mechanical properties of peach. *World Applied Sciences Journal*, *12*(1), 119-122.
- Fridley, R. B., & Adrian, P. A. (1996). Mechanical properties of peaches, pears, apricots and apples. *Transactions of the ASAE*, *9*(1), 135-138.
- FAO (2011). Food and Agriculture Organization of the United Nations: Global initiative on food loss and waste reduction. www.fao.org/ag/ags. Accessed 25 Feb 2013.
- Gao, Q., Pitt, R. E., & Bartsch, J.A. (1989). Elastic-plastic constitutive relations of the cell walls of apple and potato parenchyma. *Journal of Rheology*, *33*(2), 233-256.
- Gyeong-Won, K., Gab-Soo, D., Yeonghwan, B., & Yasuyuki, S. (2008). Analysis of mechanical properties of whole apple using finite element method based on three-dimensional real geometry. *Food Science Technology Research*, *14*(4), 329-336.
- Haciseferoğullari, H., Gezer, I., Özcan, M. M., & MuratAsma, B. (2007). Postharvest chemical and physical-mechanical properties of some apricot varieties cultivated in Turkey. *Journal of Food Engineering*, *79*, 364-373.
- Kays, S. J. (1991). *Postharvest Physiology of Perishable Plant Products*. New York, N.Y: Van Nostrand Reinhold.
- Kays, S. J., & Paull, R. E. (2004). *Postharvest Biology*. Athens, Georgia: Exxon Press.
- Khan, A. A., & Vincent, J. F. V. (1990). Anisotropy of apple parenchyma. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, *52*(4), 455-466.
- Khan, A. A., & Vincent, J. F.V. (1993). Anisotropy in the fracture properties of apple flesh as investigated by crack-opening test. *Journal of Materials Science*, *28*, 45-51.
- Kader, A. A. (2002). *Postharvest Technology of Horticultural Crops*. Publication 3529. Richmond, CA: University of California. Agriculture and Natural Resources.

- Knee, M., & Miller, R. (2002). Mechanical Injury. In: M. Knee (Ed.), *Fruit Quality and its Biological Basis* (pp. 157-179). Sheffield, UK: Sheffield Academic Press Ltd.
- Kursat Celik, H., Rennie, A. E. W., & Akinci, I. (2011). Deformation behavior simulation of an apple under drop case by finite element method. *Journal of Food Engineering*, *104*, 293-298.
- Larqué-Saavedra, B. S., Sangerman-Jarquín, D. Ma., Ramírez, V. B. A., Navarro B., & Serrano, F. M. E. (2009). Aspectos técnicos y caracterización del productor de durazno en el estado de México. *Agricultura Técnica en México*, *35*(3), 305-313.
- Lewis, R., Yoxall, A., Marshall, M. B., & Canty, L. A. (2008). Characterizing pressure and bruise in apple fruit. *Wear*, *264*, 37-46.
- Lorestani, A. N., & Tabatabaeefar, A. (2006). Modelling the mass of kiwi fruit by geometrical attributes. *International Agrophysics*, *20*, 135-139.
- Lu, R., & Abbott, J. A. (2004). Force/deformation techniques for measuring texture. In D. Kilcast (Ed), *Texture in Food* (pp. 109-145). Cambridge, England: Woodhead Publishing Limited.
- McCabe, W. L., Smith, J. C., & Harriott, P. (2001). *Unit Operations of Chemical Engineering*. New York, N.Y: The McGraw-Hill Companies, Inc.
- Mohsenin, N. N. (1970). Application of engineering techniques to evaluation of texture of solid food materials. *Journal of Texture Studies*, *1*(2), 133-134.
- Mohsenin, N. N. (1986). *Physical Properties of Plant and Animal Material*. New York, N.Y: Gordon and Breach Science Publishers.
- Moreira, R., Chenlo, F., Abelenda, N., & Vázquez, M. J. (2007). Rheological behaviour of chestnuts under compression tests. *International Journal of Food Science and Technology*, *42*, 1188–1194.
- Nourian, F., Ramaswamy, H. S., & Kushalappa, A. C. (2003). Kinetic changes in cooking quality of potatoes stored at different temperatures. *Journal of Food Engineering*, *60*, 257–266.
- Praeger, U., Herppich, W. B., König, C., Herold, B., & Geyer, M. (2009). Changes of water status, elastic properties and blackspot incidence during storage of potato tubers. *Journal of Applied Botany and Food Quality*, *83*, 1-8.
- Rafiee, S., Keramat, J. M., Jafari, A., Sharifi, M., Mirasheh, R., & Mobli, H. (2007). Determining some physical properties of bergamot (*Citrus medica*). *International Agrophysics*, *21*, 293-297.
- Ragni, L., & Berardinelli, A. (2001). Mechanical behavior of apples and damage during sorting and packaging. *Journal of Agricultural Engineering Research*, *78*(3), 273-279.

- Redgwell, R. J., & Fischer, M (2002). Fruit texture, cell wall metabolism and consumer perceptions. In: M. Knee (Ed.), *Fruit Quality and its Biological Basis* (pp. 46-88). Sheffield, UK: Sheffield Academic Press Ltd.
- Rosenthal, J.A. (1999). *Food Texture: Measurement and Perception*. Gaithersburg, Maryland: Aspen Publisher Inc.
- Sadrunia, H., Rajabipour, A., Jafari, A., Javadi, A., Mostofi, Y., Kafashan, J., Dintwa, E., & De Baerdemaeker, J. (2008). Internal bruising prediction in watermelon compression using nonlinear models. *Journal of Food Engineering*, 86, 272–280.
- SAS (1996). *SAS/STAT Software: Changes and enhancements through Release 6.12*. Cary, NC: SAS Institute Inc.
- Shaw, M. C., & Young, E. (1988). Rubber elasticity and fracture. *Journal of Engineering Materials and Technology*, 110(3), 258–265.
- Shulte-Pason, N. L., Timm, E. J., Brown, G. K., Marshall, D. E., & Burton, C. L. (1990). Apple damage assessment during intrastate transportation. *Transactions of the ASAE*, 6(6), 753-758.
- Singh, S. P. 1991. Vibration levels in commercial truck shipments. ASAE Paper No. 91–6016
- Topuz, A., Topakci, M., Canakci, M., Akinci, I., & Ozdemir, F. (2005). Physical and nutritional properties of four orange varieties. *Journal of Food Engineering Research*, 66, 519-523.
- Villaseñor-Perea, C. A., Chávez-Franco, S. H., Saucedo-Veloz, C., Salazar-Zazueta, A., Landois-Palencia, L. L., & Hernández-Gómez, L. H. (2006). Comportamiento mecánico y fisiológico de frutos de melón (*Cucumis melo* L.) bajo compresión axial. *Revista Fitotecnia Mexicana*, 29, 157-162.
- Vursavuş, K., Kelebek H., & Selli, S. (2006). A study on some chemical and physico-mechanic properties of three sweet cherry varieties (*Prunus avium* L.) in Turkey. *Journal of Food Engineering*, 74, 568-575.
- Wilhelm, L. R., Suter, D. A., & Brusewitz, G. H. (2004). Physical Properties of Food Materials. In: L. R. Wilhelm, D. A. Suter, & G. H. Brusewitz (Eds.). *Food and Process Engineering Technology* (pp. 23-52). St. Joseph Michigan: ASAE.
- Whitelock, D. P., Brusewits, G. H., & Ghajar, A. J. (1999). Thermal/physical properties affect predicted weight loss of fresh peaches. *Transaction of the ASAE*, 42(4), 1047-1053.
- Yahya, A., Hamdan, K., Ishola T. A., & Suryanto, H. (2013). Physical and mechanical properties of *Jatropha curcas* L. fruits from different planting densities. *Journal of Applied Science*, 13(7), 1004-1012.

Young, R. E., & Biale, J. B. (1962). Carbon dioxide effects on fruit respiration: measurement of oxygen uptake in continuous gas flow. *Plant Physiology*, 37(3), 409-415.

Zohrabi, S., Seiedlou, S., & Alipasandi, A. (2013). Study some physical and mechanical properties of three cultivars of peach in maturation stages. *World of Sciences Journal*, 1(4), 108-117.

CAPÍTULO III

EFFECTO DE LAS CARGAS DINÁMICAS DEL TRANSPORTE EN LA VELOCIDAD DE RESPIRACIÓN DE FRUTOS DE DURAZNO

3.1 RESUMEN

La irregularidad en la superficie de carreteras es el estímulo para la transmisión de las cargas dinámicas sobre los frutos durante el transporte. El efecto inmediato son los cambios en la velocidad de respiración que aceleran la entrada a la senescencia. Se evaluó la influencia de la carga de compresión, la distancia de recorrido y de las fuerzas gravitacionales generadas durante el transporte sobre la velocidad de respiración de frutos de durazno cv. Diamante. También se evaluó el impacto de la temperatura, humedad relativa e iluminación del ambiente de almacenamiento sobre la respiración de los frutos. Los modelos de transferencia detectaron impactos no contemporáneos (rezagados) de las fuerzas G sobre la velocidad de respiración. Cada unidad de incremento en las fuerzas G, generadas a partir del cambio en la velocidad de desplazamiento del vehículo, incrementa en 1 % la velocidad de respiración. El incremento en la distancia de recorrido y en la carga de compresión incrementó el ritmo respiratorio, lo que muestra el efecto acumulativo del daño en el tejido. El impacto de los factores ambientales mostró que por cada unidad de incremento en la temperatura y decremento también unitario en la humedad relativa aumentaron significativamente la velocidad de respiración de los frutos de durazno. Las cargas dinámicas generadas durante el transporte, los factores del ambiente de almacenamiento y las propiedades mecánicas del tejido del fruto afectan significativamente el metabolismo respiratorio de frutos.

Palabras clave: cargas dinámicas, fuerzas G, topes, velocidad de respiración; durazno.

EFFECT OF THE DYNAMIC LOADS OF TRANSPORT IN THE RESPIRATION RATE OF PEACH FRUITS

3.2 ABSTRACT

The irregularity of the surface on roads is the main incitement source for the dynamic loads transmission on the fruits while the latter are being transported. The immediate effects are the changes on the tissue respiration rate which accelerate the ageing process. The influence of the compression load was assessed, as well as the tour length and the gravitational forces generated over the peach respiration rate C_v . Diamond. while being transported. Likewise, the temperature impact, the relative humidity and the environment lighting on the fruits breathing rhythm were assessed. The transfer function models detected non-contemporary impacts (laggard) of G-forces over the respiration rate. Every increase unit in G-forces which have been generated from the vehicle displacement speed change increases the respiration rate 1%. It was observed that the displacement speed and the compression charge rises increased the respiration rate even more. This corroborates the cumulative effect of tissue harm. The impact models of the environmental factors showed that every unit of temperature increase and unit decrease of relative humidity significantly increased the respiration rate for peach fruits. The dynamic loads generated while being transported, the storage environmental factors, and the mechanical tissue properties of the fruit significantly affect the respiratory metabolism of the fruits.

Key words: Dynamic loads, G-forces, speed bumps, respiration rate, peach fruit.

3.3 INTRODUCCIÓN

Los frutos están sujetos a cambios metabólicos irreversibles después de la cosecha, en donde la velocidad de deterioro del producto es proporcional a la velocidad de respiración (Kader, 2002). En las operaciones de manejo postcosecha los frutos son sometidos a muchas situaciones que provocan esfuerzos en el tejido que dependiendo de la intensidad puede ocasionar daño permanente. El efecto inmediato es la oxidación de los compuestos fenólicos por la enzima catecol oxidasa que demanda un incremento en el consumo de oxígeno. Si la demanda subsistir de manera prolongada, en la respiración celular del tejido adyacente a la zona dañada, se modifica el metabolismo global del fruto que conduce a oscurecimiento enzimático, producción autocatalítica de etileno, pérdida acelerada de agua y vulnerabilidad del tejido a las infecciones fúngicas (Knee and Miller, 2002; Kader, 2002; Berardinelli *et al.*, 2005).

Los frutos, en general, siguen una ruta compleja después de la cosecha antes de llegar al almacén de un mercado de venta final (Figura 3.1). Durante este trayecto el fruto está expuesto a muchas operaciones de manipulación que incluyen la cosecha, selección, empaque, almacenamiento y transporte. El efecto adverso de la constante manipulación se refleja en la fisiología del fruto, cuya severidad depende del tipo de carga (estática o dinámica) y el tiempo de ocurrencia. En particular, existen patrones de carga que pueden pasar por desapercibido por manifestarse en lapsos muy cortos durante las operaciones de manipulación; sin embargo, pueden llegar a ejercer un efecto de resonancia en función de la intensidad de ocurrencia (Jones *et al.*, 1991; Lewis *et al.*, 2008). Estudios previos reportan que la principal causa de pérdida de la calidad en los productos hortofrutícolas en postcosecha es el esfuerzo producido por la carga compresiva que reciben durante el transporte (Acıcan *et al.* 2007; Lewis *et al.*, 2007).

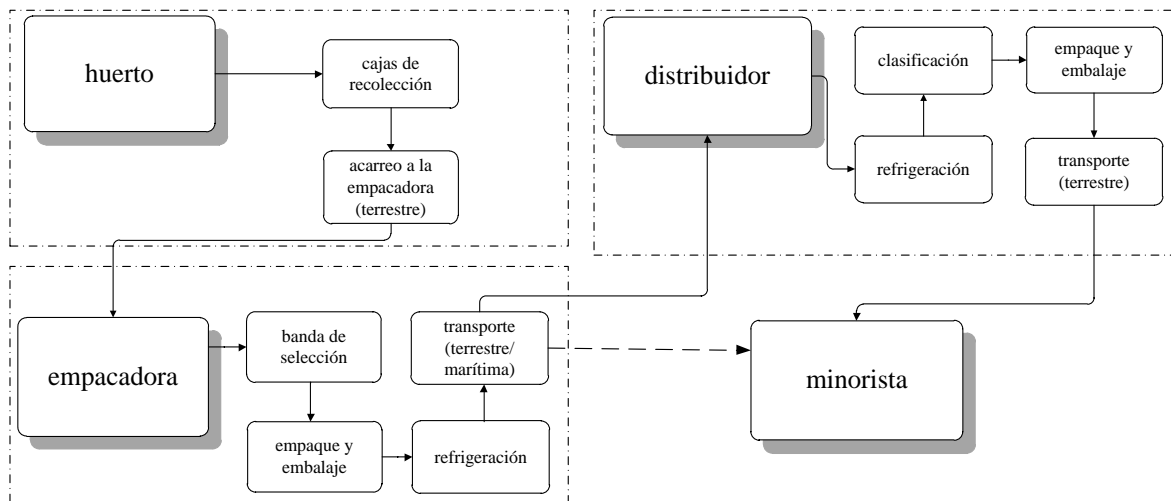


Figura 3.1. Esquema de recorrido del fruto desde el huerto de producción hasta el mercado de consumo

El mecanismo básico de transmisión de fuerzas inicia cuando los neumáticos del vehículo pasan sobre un cambio abrupto en el perfil superficial de la carretera, lo que ocasiona la transmisión de fuerzas compresivas hacia los neumáticos. Posteriormente, en el subsistema enlazado *neumático-suspensión-chasis*, generan continuamente fuerzas de tensión-compresión que excitan el libre movimiento de la carga del vehículo por medio de fuerzas de compresión e impacto (Holt and Schoorl, 1985; Jones *et al.* 1991). Este patrón cíclico de aplicación de la carga se conoce como carga dinámica (Van Zeebroeck *et al.*, 2006; Lewis *et al.*, 2007).

La magnitud del daño causado por las cargas dinámicas es variable en cada especie y depende de varios factores, entre ellos se pueden citar: la composición físico-química, el estado de madurez, la geometría, la interacción entre *carretera-vehículo-carga*, el material de empaque, la localización del fruto dentro del empaque y del empaque dentro del transporte, y la intensidad de la carga (Jones *et al.*, 1991; Knee and Miller, 2002; Acican *et al.*, (2007) tras realizar pruebas de carga dinámica en laboratorio con frutos de manzana cv. Granny Smith y Starkspur Golden Delicious colocadas

en cajas de madera, reportaron de 4 a 10% de fruta dañada. En otro experimento realizado con frutos de pera cv. Huanghua, colocadas en cajas de plástico, sometidas a carga dinámica mediante su transporte por carretera accidentada, se reportan valores de 35 a 70% de fruta dañada (Zhoua *et al.*, 2007). Así mismo, New (1983) reporta daños del orden de 45% en manzana cv. Golden Delicious puestas en cajas de cartón. Esto muestra la sensibilidad que tiene cada especie con su particular forma de manejo y las diferentes formas en que se presenta la carga.

Los agentes causales de las cargas dinámicas durante el transporte evidentemente los encontramos en la discontinuidad de la superficie de carreteras, como consecuencia de la falta de mantenimiento o por la construcción de reductores de velocidad (topes) (Holt and Schoorl, 1985; Jones *et al.*, 1991). El trabajo de identificación del tamaño del impacto de las cargas dinámicas y la influencia de los factores ambientales sobre el metabolismo respiratorio de frutos son de mucha importancia para poder construir patrones adecuados de apilamiento, procedimientos de manipulación y embalaje, logística de transporte y la creación de ambientes adecuados de almacenamiento (Vanstreels *et al.*, 2005; Kader, 2002). Debido a ello, se plantearon los siguientes objetivos: a) evaluar el impacto de las fuerzas gravitacionales que se generan durante el transporte sobre la velocidad de respiración de frutos de durazno cv. Diamante y b) medir la influencia de la temperatura, humedad relativa e iluminación del ambiente de almacenamiento sobre el ritmo respiratorio de los frutos.

3.4 MATERIALES Y MÉTODOS

3.4.1 Materiales

Se emplearon frutos de durazno (*Prunus persica* L.) cv. Diamante, provenientes de un huerto experimental ubicado en la comunidad de Coatepec Harinas (18°55'29.32"N 99°46'07.98"O), Estado de México. Se cosecharon frutos con 50% de color amarillo en su superficie de acuerdo con los resultados obtenidos por Pérez-López *et al.* (2014). Inmediatamente después de la cosecha los frutos se colocaron, en una sola capa, sobre tela de algodón dentro de cajas de cartón corrugado para evitar carga de compresión durante el transporte hasta llegar al lugar de experimentación. Los frutos fueron trasladados al Departamento de Ingeniería Mecánica Agrícola de la Universidad Autónoma Chapingo y al Colegio de Postgraduados, Texcoco, Estado de México, en un tiempo aproximado de tres horas. En el laboratorio se hizo nuevamente otra clasificación y aquellos frutos con daños percibidos visualmente fueron desechados. Durante el tiempo de experimentación los frutos permanecieron a la temperatura del ambiente ($20\pm 2^{\circ}\text{C}$).

3.4.2 Equipo de experimentación

Se diseñó un prototipo portátil que cumple con dos funciones principales, aplicar carga de manera directa sobre el fruto (Figura 3.2) y medir la velocidad de respiración en sistema de flujo continuo. El sistema de aplicación de carga consiste de un tubo de acero de 2 pulgadas, suspendido con libre movimiento, a través del cual se colocaron una pesas de gimnasio. En el extremo inferior del tubo se colocó una pieza de madera circular de 19 cm de diámetro que cumple la función de aplicar la carga de manera directa sobre los frutos. La base del prototipo consiste de un recipiente cilíndrico de doble pared. La pared exterior, de 34.5 cm de diámetro, es de lámina de acero y la pared interior de malla de alambre, de 21 cm de diámetro, cuya función es separar los frutos de las

paredes del recipiente exterior y permitir el libre paso del aire que viene del compresor. En el espacio de separación de ambas paredes (13.5 cm) se colocaron los sensores de medición de CO₂ y dentro de la malla de alambre los frutos. El recipiente externo está provisto de un dispositivo de entrada que permitió el libre paso de aire, con flujo controlado, sobre los frutos para formar el sistema de flujo continuo (Young y Biale, 1962) que permitió medir la velocidad de producción de CO₂ durante la etapa de experimentación de manera directa (Figura 3.2) (Pérez-López *et al.*, 2014).

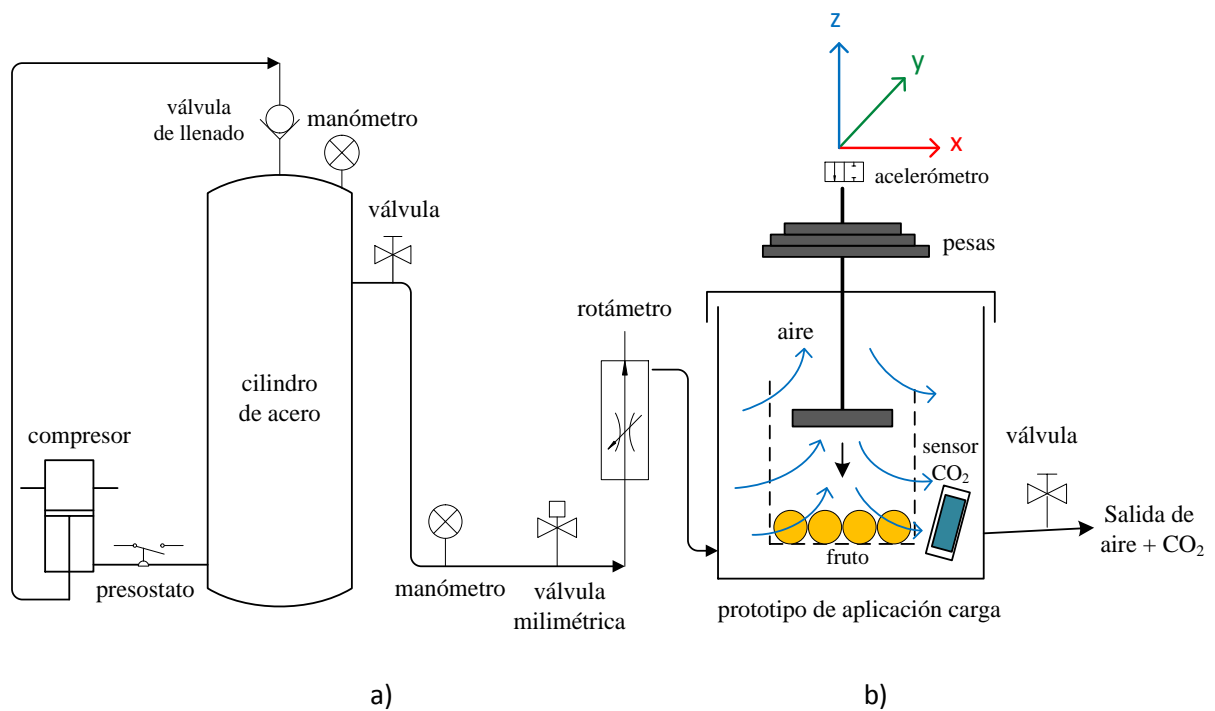


Figura 3.2. a) Sistema de generación de flujo continuo de aire y b) prototipo de aplicación de carga dinámica con sensores de CO₂ y acelerómetro.

El sistema de flujo continuo consiste básicamente de tres componentes: 1) un cilindro de acero inoxidable de 1100 L de capacidad equipado con una válvula de llenado, una tubería de salida del aire, un manómetro y un interruptor de presión de 175 lb·plg⁻² de capacidad en la parte inferior del cilindro; 2) un compresor de aire de 1 HP conectado al interruptor de presión y a la válvula de

llenado del cilindro; y 3) un tablero controlador de flujo de aire que se compone de un manómetro diferencial, una válvula milimétrica y un rotámetro, todos interconectados en serie con manguera de plástico.

El flujo de aire saliente del tablero dosificador pasa a través del recipiente del prototipo y sale por otra tubería hacia el ambiente externo. Dentro del recipiente se colocaron frutos de peso conocido junto con un medidor de dióxido de carbono y temperatura (Telaire® modelo 7001, General Electric Company, CA, USA). El medidor se conectó en el canal externo de un sistema de adquisición de datos (HOBO® data loggers, modelo U12-012, Onset Computer Corporation, MA, USA). El sistema de adquisición de datos se programó para tomar datos de forma continua en una computadora personal con la ayuda del software HOBOWare® Lite v. 3.1.0 (Onset Computer Corporation, MA, USA) (Figura 3.3). Con ambos instrumentos se midieron las siguientes variables: CO₂ (ppm), temperatura (°C), humedad relativa (%) e iluminación (lum·ft⁻²). Posteriormente, a partir de los datos de flujo volumétrico de aire, la concentración de CO₂ en el aire a la entrada y salida del recipiente, y el peso del fruto dentro del recipiente se hicieron los cálculos, empleando la siguiente ecuación (3.1), para expresar la velocidad de respiración en mL de CO₂ · kg⁻¹ · h⁻¹ (Pérez-López *et al.*, 2014), durante 72 h de experimentación.

$$R_r = \frac{(CO_2)_s - (CO_2)_e}{100} \left(\frac{F}{P} \right) \quad (3.1)$$

Donde, R_r es la velocidad de respiración, F es el flujo de aire que pasa a través del tablero dosificador, P es el peso de los frutos dentro del contenedor y los subíndices “e” and “s” son la concentración de CO₂ en la entrada y salida del contenedor, respectivamente.

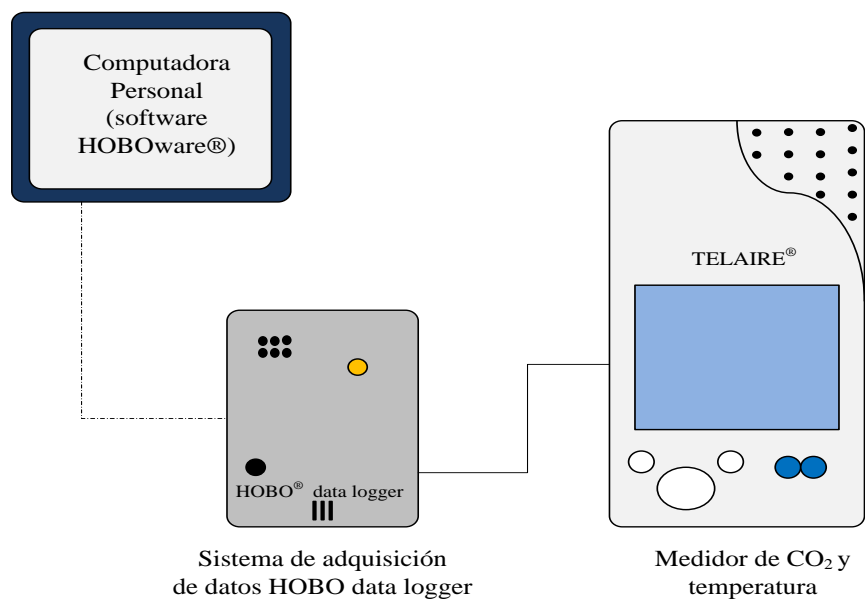


Figura 3.3 Conexión del sistema de adquisición de datos

3.4.3 Pruebas de carga dinámica en carretera

El sistema completo, compuesto por el prototipo de aplicación de carga y el sistema de flujo continuo para medir respiración, se colocó en una camioneta Pick Up (Figura 3.4) para realizar recorridos en el tramo de carretera del periférico de Texcoco a una velocidad promedio de 50 km·h⁻¹. Sobre este tramo de carretera se localizan en total 14 reductores de velocidad caracterizados previamente (capítulo I). Se formó un experimento factorial con seis tratamientos, en donde se manejaron como factores la distancia de recorrido con tres niveles (sin recorrido, 5.8 km y 11.6 km) y la carga de compresión con dos niveles (9 y 14 kg). La variable respuesta fue la velocidad de respiración a partir del momento de aplicación de los tratamientos y hasta por 72 h de almacenamiento posterior. El valor de referencia fue el tratamiento sin recorrido por carretera y sin carga de compresión.

Sobre el prototipo de aplicación de la carga se colocó un acelerómetro HOBO® Pendant® G Acceleration Data Logger, modelo UA-004-64, (Onset Computer Corporation, MA, USA) para medir las fuerzas gravitacionales. El acelerómetro se programó con un dispositivo Optic USB Base Station with Coupler (Base UA) HOBO® (Onset Computer Corporation, MA, USA) conectado a una computadora personal por medio del software HOBOWare® Lite v. 3.1.0., a la frecuencia de 25 Hertz (25 datos por segundo). El software tiene la capacidad para registrar las fuerzas gravitacionales en unidades de $m \cdot s^{-2}$ o G, que posteriormente se exportaron a una hoja de cálculo con el formato *.csv.

La posición del acelerómetro se colocó de tal manera que el eje “x” coincidió con la dirección de avance del vehículo, el eje “y” coincide con los movimientos laterales y el eje “z” con el movimiento vertical. Los valores de fuerza gravitacional se midieron en unidades de $m \cdot s^{-2}$ y g.

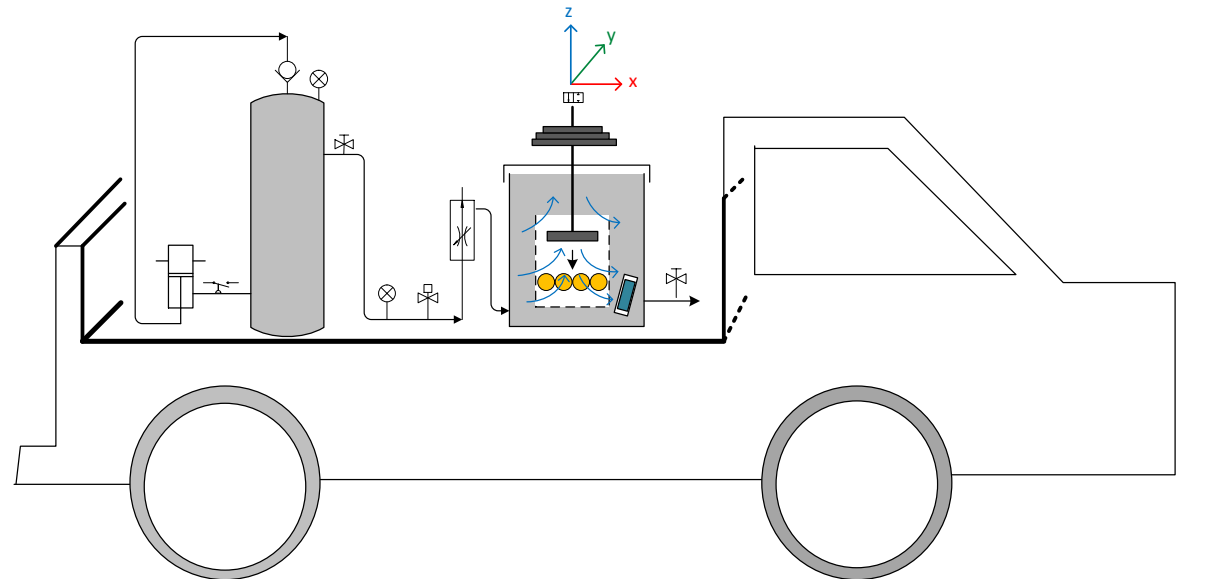


Figura 3.4. Equipo de experimentación montado en vehículo de prueba.

3.4.4 Análisis de datos

Los datos se analizaron conforme un diseño experimental de tipo completamente al azar con arreglo factorial 3^2 . Se realizó un análisis de varianza; cuando se detectaron diferencias significativas entre los niveles de los factores, se realizó comparación de medias con la prueba de Tukey ($P \leq 0.05$). El análisis de datos se realizó con el software estadístico Statistical Analysis System for Windows 9.2 (SAS Institute Inc., Cary, NC, USA).

Se emplearon análisis de regresión múltiple de series de tiempo para construir *Modelos de Función de Transferencia* (MFT) con el objetivo de encontrar la relación entre la velocidad de respiración de los frutos y las fuerzas gravitacionales que actúan sobre los mismos durante el recorrido por carretera. El mismo procedimiento se empleó para construir los modelos que muestran la relación entre la velocidad de respiración y los factores del ambiente de almacenamiento de los frutos (temperatura, humedad relativa e iluminación) durante un periodo de 72 h.

La formación de relaciones no contemporáneas (rezagadas) entre variables, a partir del análisis por MFT, permitió calcular la *función de respuesta del impulso* que describe el efecto global de un cambio en la variable explicativa, conocido como *ganancia del modelo* (Ramírez-Guzmán, 1993; Box *et al.* 2008). Una característica importante de los MFT es que su construcción incluye otros disturbios que no dependen de las variables explicativas, a los que se les conoce como *ruido*. Los modelos se construyeron empleando el procedimiento PROC ARIMA del software estadístico Statistical Analysis System for Windows 9.2 (SAS Institute Inc, Cary, NC, USA).

3.5 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La velocidad de respiración de los frutos de durazno sin compresión y sin carga compresiva (T_0) alcanzó un pico máximo de $86 \text{ mL CO}_2 \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$ seis horas después de su almacenamiento a temperatura del ambiente. En tanto que los frutos sometidos a carga compresiva se observó un incremento en la velocidad de respiración con valores máximos de 83 (T_2) y 92 (T_1) $\text{mL CO}_2 \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$ a las 2 y 4 h después de almacenamiento, respectivamente (Figura 3.5). Después de este periodo, la respiración de los frutos T_0 disminuyó paulatinamente hasta las 21 h y luego incrementó hasta un máximo 36 h después de almacenamiento. Los frutos que recibieron 9 kg de carga volvieron a incrementar su respiración 6 h después, seguido de una disminución para luego incrementar nuevamente hasta alcanzar un pico máximo de $97 \text{ mL CO}_2 \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$ a las 33 h. Los frutos del tratamiento con 14 kg de peso alcanzaron nuevamente un pico máximo a las 21 h con $87 \text{ mL CO}_2 \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$.

Estos resultados indican que el metabolismo respiratorio de los frutos de durazno tiene un incremento, hasta alcanzar un valor máximo, durante las primeras 6 h de almacenamiento; sin embargo, este puede adelantarse en función del estrés por carga compresiva. Asimismo, el segundo pico máximo en la respiración se adelantó en los frutos que fueron sometidos a carga de compresión mecánica, lo cual muestra un adelanto en los disturbios metabólicos ocasionados por el esfuerzo mecánico (Knee and Miller, 2002; Kays and Paull, 2004).

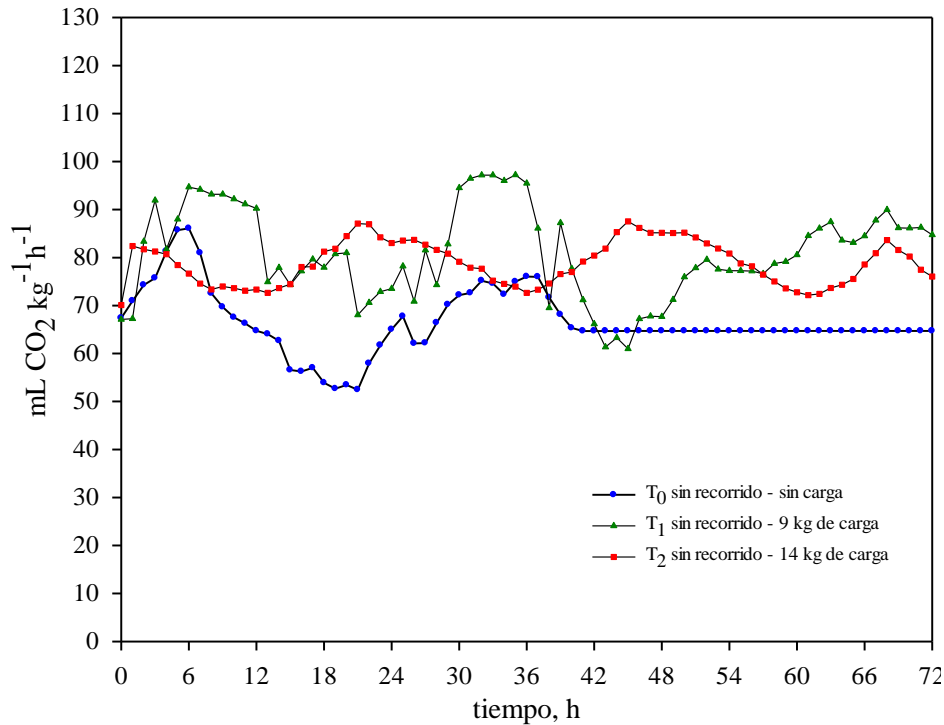


Figura 3.5. Velocidad de respiración de frutos de durazno sometidos a dos cargas de compresión sin recorrido por carretera.

El primer pico máximo en la velocidad de respiración de T₄ (5.8 km+14 kg) antecedió a T₃ (5.8 km+9 kg) por dos horas (Figura 3.6) con valores de 81 y 82 mL CO₂ · kg⁻¹ · h⁻¹, respectivamente. Posteriormente, el ritmo de respiración de T₄ se mantiene casi constante y por encima de T₃ hasta las 26 horas, después ambos comienzan un decremento hasta alcanzar un mínimo a las 39 h. El segundo valor máximo en la respiración de T₄ (81 mL CO₂ · kg⁻¹ · h⁻¹) se observó a las 47 h y el de T₃ (83 mL CO₂ · kg⁻¹ · h⁻¹) a las 52 h después de almacenamiento.

En los tratamientos T₃ y T₄ nuevamente se evidencia la influencia esfuerzo debido a la carga de compresión y distancia de recorrido por carretera.

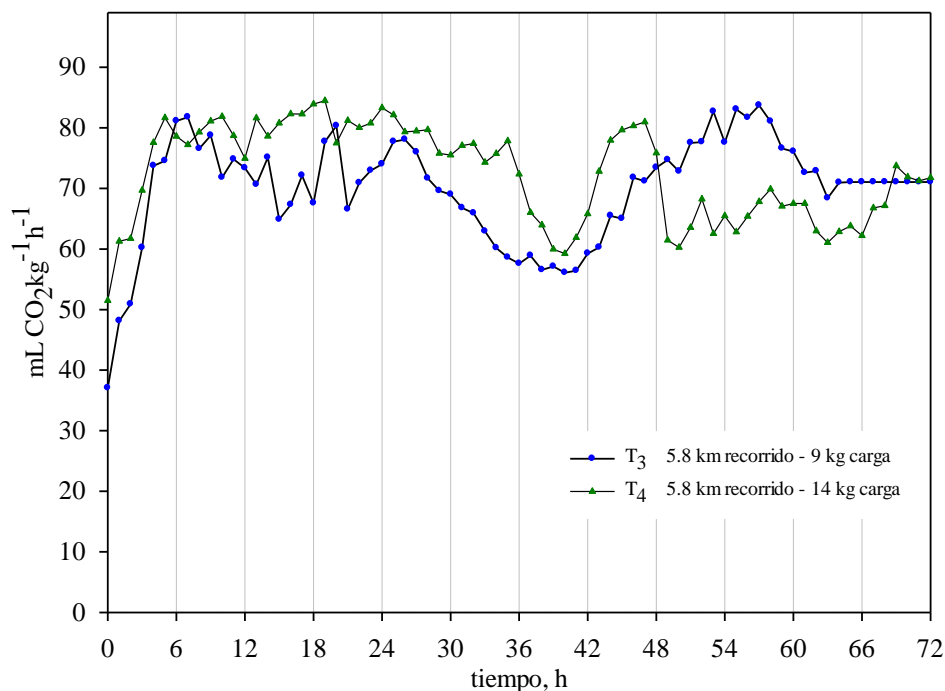


Figura 3.6. Velocidad de respiración de frutos de durazno sometidos a dos cargas de compresión y con recorrido de 5.8 km en carretera.

En los tratamientos sometidos a la distancia de recorrido de 11.6 km y cargas de compresión de 9 y 14 kg (Figura 3.7), el ritmo respiratorio alcanzó valores máximos de 117 (T₅) y 89 (T₆) mL CO₂ · kg⁻¹ · h⁻¹ a partir de la primera hora de almacenamiento. En aproximadamente 24 h después se observó nuevamente un valor máximo en la respiración. En todo momento la respiración del tratamiento que estuvo sujeto a la carga de 9 kg fue mayor que el tratamiento con 14 kg. Específicamente en estos tratamientos se observaron algunos frutos con daño visible en la piel por el tamaño de la carga aplicada y por el tiempo en que estuvieron sujetos bajo estas condiciones. Pérez-López *et al.* (2014) reportaron que la rigidez del tejido de frutos de durazno cv. Diamante depende fuerte de la anisotropía, grado de madurez del tejido y tiempo transcurrido después de la cosecha. Por tanto, la respuesta metabólica del fruto depende del grado de interacción

de estos tres factores con el nivel de esfuerzo que aportan los factores relacionados con el transporte.

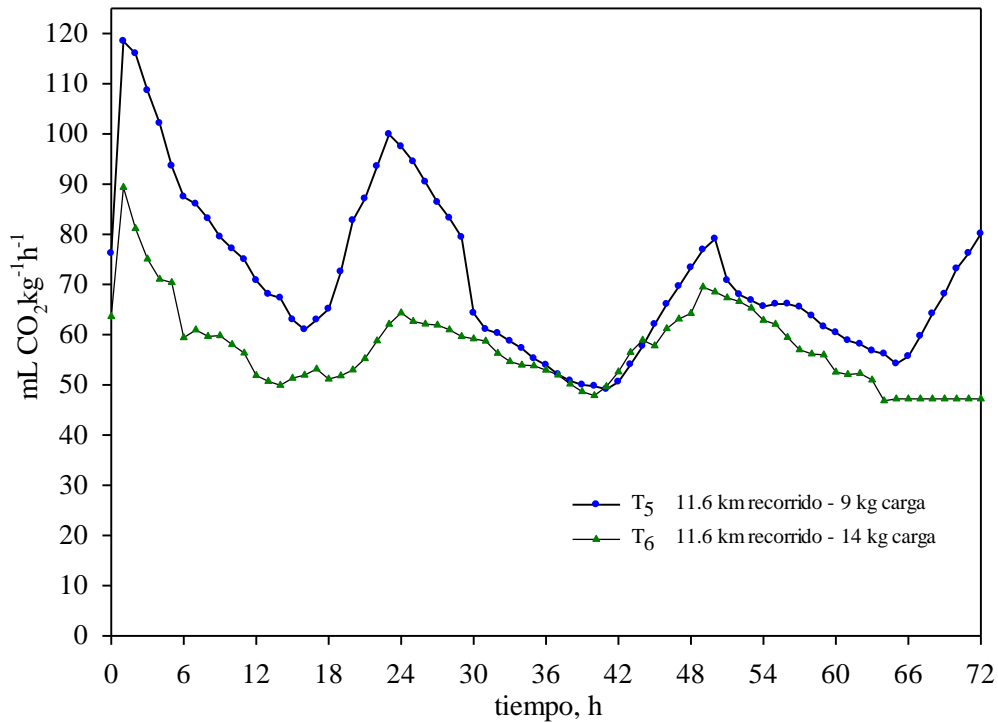


Figura 3.7. Velocidad de respiración de frutos de durazno sometidos a dos cargas de compresión y recorrido de 11.6 km en carretera.

La distancia de recorrido en la carretera y la carga de compresión afectaron significativamente la velocidad de respiración de frutos. Los incrementos en la distancia de recorrido y la carga de compresión resultaron en valores más bajos en la respiración de los frutos (Cuadro 3.1). Los resultados sugieren que el patrón de esfuerzo impuesto por la distancia de recorrido y la carga de compresión acelera el proceso de senescencia del fruto (Knee and Miller, 2002; Berardinelli *et al.*, 2005). La interacción entre los factores (A×B) tiene una influencia significativa sobre la velocidad de respiración cuando los frutos reciben carga dinámica en carretera (Cuadro 3.1).

Cuadro 3.1. Efecto de los factores distancia de recorrido y carga de compresión sobre la velocidad de respiración en frutos de durazno sometidos a carga dinámica en carretera.

FACTOR	Velocidad de respiración (mL CO ₂ · kg ⁻¹ · h ⁻¹)
NIVEL	
Distancia recorrido (A)	
Sin recorrido	78.75 ± 17.8 ^a
5.8 km	71.02 ± 8.9 ^b
11.6 km	64.30 ± 14.4 ^c
Carga de compresión (B)	
9 kg	73.25 ± 18.1 ^a
14 kg	69.46 ± 11.7 ^b
CV (%)	19.13
A*B	***

^{a,b,c} Superíndices distintos en la misma columna, indican diferencia significativa ($p \leq 0.05$).

*** indican significancia estadística $p \leq 0.01$. C.V.: Coeficiente de Variación.

Cuadro 3.2. Estadística descriptiva de la velocidad de respiración R [mL CO₂ · kg⁻¹ · h⁻¹] y fuerzas gravitacionales [G] en los ejes x,y,z que constituyen los modelos de los diferentes tratamientos.

Serie de tiempo	media	varianza
R ₀ : respiración de T ₀	53.21	28.94
R ₁ : respiración de T ₁	78.81	703.67
R ₂ : respiración de T ₂	78.92	52.98
R ₃ : respiración de T ₃	67.07	231.53
G _x : eje x (G)	-0.02	0.13
G _y : eje y (G)	-0.08	0.16
G _z : eje z (G)	1.00	0.02
R ₄ : respiración de T ₄	73.49	218.47
G _x : eje x (G)	0.13	0.20
G _y : eje y (G)	-0.20	0.17
G _z : eje z (G)	0.96	0.09
R ₅ : respiración de T ₅	91.94	294.29
G _x : eje x (G)	0.14	0.03
G _y : eje y (G)	-0.19	0.03
G _z : eje z (G)	0.85	0.39
R ₆ : respiración de T ₆	67.07	261.62
G _x : eje x (G)	0.10	0.01
G _y : eje y (G)	-0.08	0.01
G _z : eje z (G)	0.97	0.02

En el cuadro 3.2 se muestran las medias y varianza de la velocidad de respiración y las fuerzas gravitacionales en las diferentes direcciones. La media de respiración durante 72 horas de almacenamiento tiende a aumentar conforme aumenta la distancia de recorrido con excepción del tratamiento con la mayor carga (14 kg) y mayor recorrido (11.6 km), esto muestra que conforme el esfuerzo en el fruto es mayor, la velocidad de respiración disminuye, este comportamiento se puede atribuir a un metabolismo de senescencia más acelerado (Barchi *et al.*, 2002).

El primer modelo de función de transferencia (cuadro 3.3) indica que por cada unidad de incremento de las fuerzas G, sobre la media en el eje “x” ($-0.02+1=0.98 \approx 1$ g) mostrada en el Cuadro 3.2, existe una respuesta de incremento de 0.74 en la velocidad de respiración de los frutos ($67.07+0.74= 67.81$ mL CO₂ · kg⁻¹ · h⁻¹), esto significa un aumento de 1.1% adicional en el metabolismo respiratorio. Del mismo modo, la disminución de una unidad en el eje “y” ($-0.08-1=-1.08 \approx -1$ g) y en el eje “z” ($1-1= 0$ g) representan incrementos de 0.17 (0.3 %) y 0.32 (0.5%) en la velocidad media de respiración, respectivamente. Los resultados demuestran que los cambios en la velocidad de avance del vehículo (eje x) son los que contribuyen en mayor grado en el incremento del ritmo de respiración y los efectos se manifiestan con seis minutos de retraso (modelo 1). En segundo lugar está el efecto del movimiento vertical con un retraso de cuatro minutos y el movimiento lateral con cinco minutos de retraso después de que el fruto experimento las fuerzas G en las respectivas direcciones. Un comportamiento similar se observó en T₅, cuya semejanza con T₃ es que fueron sometidos a una carga similar (9 kg), por cada unidad de incremento de las fuerzas G en eje “x” incrementó 0.14 mL CO₂ · kg⁻¹ · h⁻¹ (0.2%) el ritmo de respiración; así mismo, cada unidad de disminución en ejes “y” y “z” repercutió en aumentos de 0.1 (0.1 %) y 0.02 (0.02 %) mL CO₂ · kg⁻¹ · h⁻¹ la respiración del fruto, respectivamente.

Cuadro 3.3. Modelos de Función de Transferencia (MFT) de la relación entre la velocidad de respiración de frutos de durazno y las fuerzas gravitacionales en los tres ejes del sistema de coordenadas durante el recorrido por carretera.

Tipo de modelo (Tratamiento)	Modelo ajustado	Ganancia		
		G _x	G _y	G _z
Modelo 1: (T ₃ : 5.8 km + 9 kg) R ₃ explicada por G _x G _y G _z	$R_3 = 0.7416B^6G_x - \frac{(0.3386B^5)}{(1 + 0.1872B + 0.8043B^2)}G_y - 0.3177B^4G_z$ $+ \frac{(1 + 0.7768B + 0.5666B^2 - 0.1192B^3)}{(1 + 0.2771B - 0.0164B^2 - 0.6496B^3)}a_t$	0.74	-0.17	-0.32
Modelo 2: (T ₄ : 5.8 km + 14 kg) R ₄ explicada por G _x G _y G _z	$R_4 = \frac{(0.4051B^7)}{(1 - 0.7633B + 0.9277B^2)}G_x$ $- \frac{(0.0728B^8)}{(1 - 1.7647B + 0.8584B^2)}G_y$ $+ \frac{(0.8472B^8)}{(1 + 1.6042B + 0.8431B^2)}G_z$ $+ \frac{(1 + 0.7768B + 0.5666B^2 - 0.1192B^3)}{(1 + 0.2771B - 0.0164B^2 - 0.6496B^3)}a_t$	0.35	0.78	0.25
Modelo 3: (T ₅ : 11.6 km + 9 kg) R ₅ explicada por G _x G _y G _z	$R_5 = 0.1352B^6G_x - 0.1018B^4G_y - 0.0221B^3G_z + \frac{(1 - 0.2962B^4)}{(1 - 0.2352B)}a_t$	0.14	-0.10	-0.02
Modelo 4: (T ₆ : 11.6 km + 14 kg) R ₆ explicada por G _x G _y G _z	$R_6 = 1.6685B^4G_x + 1.5283B^3G_y + 1.2798B^7G_z$ $+ \frac{(1 + 0.9535B)(1 + 0.1327B^7)}{(1 + 0.4327B - 0.3802B^2)}a_t$	1.67	1.52	1.27

Los modelos de los tratamientos T₄ y T₆ (14 kg) demuestran que las velocidades de respiración incrementaron por cada unidad de incremento en las fuerzas G sobre el fruto en las tres direcciones. La ganancia en la respiración en T₄ fue 0.34, 0.78, 0.25, mientras que para T₆ fue 1.67, 1.52, 1.27 para los ejes x, y, z, respectivamente (Cuadro 3.3). En el tratamiento T₆ (11.6 km + 14 kg) el incremento en la respiración fue superior al 2% sobre el valor de la media en las tres direcciones. El tiempo de respuesta en la respiración del fruto oscila entre 3-8 minutos después de haber experimentado las fuerzas G. Estos resultados claramente demuestran que la distancia de recorrido

y la carga aplicada representan un factor de esfuerzo constante sobre el metabolismo respiratorio de los frutos (Knee and Miller, 2002; Kays and Paull, 2004).

Los impactos no contemporáneos (rezagados) detectados por los modelos de transferencia representan una acumulación del daño en el fruto durante el transporte, cuya combinación con el estado de madurez fisiológico pueden definir la velocidad de entrada a la senescencia del fruto (Pérez-López *et al.*, 2014).

En el cuadro 3.4 se resumen el impacto de la temperatura (T), humedad relativa (HR) e iluminación (I) del ambiente sobre la velocidad de respiración después de haberse aplicados los tratamientos. En todos los modelos se detectaron impactos no contemporáneos (rezagados). Los modelos 5, 6 y 7 reflejan las ganancias en los tratamientos que no incluyeron recorrido por carretera. Los impactos detectados por el modelo de transferencia 5 indican que por cada unidad de incremento en la T y HR, la velocidad de respiración incrementa en aproximadamente 0.004 %. En el modelo 6 cada unidad de incremento en la T incremento de 0.09% la velocidad de respiración. En el modelo 7 se observó una relación inversa, una unidad de disminución en la T y HR incrementó la velocidad de respiración 0.04 (0.05 %) y 2.8 (3.5 %) $\text{mL CO}_2 \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$, respectivamente. El modelo de iluminación no fue significativo.

La ganancia, en cada uno de los modelos anteriores, traducida en incrementos en la velocidad de respiración, demuestra que el metabolismo del fruto tuvo mayor sensibilidad ante los aumentos en la T y disminución en la HR (Cuadro 3.4). Lo cual confirma que los frutos después de haber sido sometidos a un patrón de carga, como ocurrió en estos tratamientos, tienden a potenciar su

metabolismo con estímulos de ambientes secos y de mayor temperatura que aquellos que no experimentaron esfuerzos (Whitelock *et al.*, 1999). Así mismo, los modelos demuestran que los impactos no son contemporáneos sino que suceden con retrasos entre 1-8 minutos después de la intervención.

Los impactos detectados por los modelos 8, 9 y 10 revelan que la disminución unitaria en la T, HR e I fueron los que contribuyeron en mayor grado en los incrementos de la velocidad de respiración. En el modelo 8, el incremento fue 0.03 % por efecto de T y HR; en modelo 9 fue 0.01%, 0.1% y 0.1% por efecto de la T, HR e I, respectivamente. En modelo 10 fue 0.01%, 0.07%, 0.02%, respectivamente, para las mismas variables. Los tres modelos reflejan que la disminución en la humedad relativa del ambiente se tradujo en mayores incrementos en el ritmo respiratorio de los frutos que fueron sometidos a estrés por carga estática y dinámica durante el transporte. De igual manera los impactos no fueron contemporáneos.

En el modelo 11 el impacto no contemporáneo del incremento en la T eleva la velocidad de respiración hasta un 2.5 %. El impacto de la disminución de la HR fue de 0.1% (Cuadro 3.4). El modelo de la iluminación no fue significativo. Este resultado confirma mayor sensibilidad metabólica del fruto ante los factores ambientales regulado por la intensidad del esfuerzo previo por carga estática y dinámica.

La combinación de factores carga dinámica y condiciones psicrométricas del ambiente de almacenamiento tienen una influencia directa sobre el metabolismo del fruto de durazno a nivel celular (Whitelock *et al.*, 1999). La intensidad metabólica global del fruto finalmente queda

definida por la severidad del estrés impuesto por estos factores y por las propiedades mecánicas del tejido definidas por el estado fisiológico de maduración. Al respecto, Pérez-López *et al.* (2014) confirmaron el tejido de frutos de durazno pierde rigidez conforme el estado de madurez avanza y por la condición de anisotropía del tejido.

Cuadro 3.4. Modelos de Función de Transferencia de la relación entre la velocidad de respiración de frutos de durazno y la temperatura (T), humedad relativa (HR) e iluminación (I) del ambiente de almacenamiento durante un periodo de 72 h.

Tipo de modelo (Tratamiento)	Modelo ajustado	ganancia		
		T	HR	I
Modelo 5: (T ₀ : Sin recorrido+sin carga) R ₀ explicada por T HR I	$R_0 = 0.0006BT - 0.0028B^6HR + 0.0004B^4I$ $+ \frac{(1 - 0.6163B - 0.7427B^2 + 0.5884B^3)}{(1 + 0.9351B - 0.6132B^2 + 0.7875B^3 + 0.1488B^4)} a$	0.001	0.002	0.000
Modelo 6: (T ₁ : sin recorrido + 9 kg) R ₁ explicada por T HR I	$R_1 = 0.0743B^8T - 0.0347B^7HR + 0.0491B^8I$ $+ \frac{(1 - 0.4709B - 0.5669B^2 + 0.4599B^3)}{(1 - 0.1905B - 0.6431B^2 + 0.2199B^3 - 0.0634B^4)} a$	0.07	0.04	0.04
Modelo 7: (T ₂ : sin recorrido + 14 kg) R ₂ explicada por T HR I	$R_2 = -0.0418B^4T - \frac{(1.6638 + 1.6123B^2)}{(1 + 0.1674B)}HR$ $+ \frac{(1 - 0.0544B + 0.1967B^2 + 0.0912B^3 + 0.0495B^4)}{(1 - 0.7341B)} a_t$	-0.04	-2.80	ns
Modelo 8: (T ₃ : 5.8 km + 9 kg) R ₃ explicada por T HR I	$R_3 = -0.0174B^3T - 0.0162BHR - \frac{0.0016}{(1 + 0.9880B)}$ $+ \frac{(1 - 0.4253B + 0.0720B^2 + 0.0158B^3)}{(1 - 0.7259B)} a_t$	-0.02	-0.02	-0.00
Modelo 9: (T ₄ : 5.8 km + 14kg) R ₄ explicada por T HR I	$R_4 = 0.0144B^2T - 0.0658B^4HR - 0.0914B^3I$ $+ \frac{(1 - 0.5656B + 0.1257B^2)}{(1 - 0.7034B)} a_t$	0.01	-0.07	-0.09
Modelo 10: (T ₅ : 11.6 km + 9 kg) R ₅ explicada por T HR I	$R_5 = \frac{(2.5739 - 2.5712B^3)}{(1 - 0.9533B + 0.4035B^2)}T - 0.0647B^3HR - 0.0182B^2I +$ $(1 + 0.5370B + 0.2263B^2 + 0.2188B^3 + 0.1422B^4) a_t$	0.01	-0.06	-0.02
Modelo 11: (T ₆ : 11.6 km + 14 kg) R ₆ explicada por T HR I	$R_6 = (0.9084 + 0.7985B^4)T + (0.4943 - 0.5792B^3)HR + (1 - 0.5633B$ $- 0.0683B^2 - 0.0545B^3 + 0.0403B^4) a_t$	1.70	-0.08	ns

El límite crítico que debe cuidarse en el momento del diseño de empaques para el transporte es no crear condiciones de esfuerzo que detonen la resonancia en el tejido que conduzcan a la ruptura de células.

3.6 CONCLUSIONES

El efecto global del incremento en la distancia de recorrido y carga de compresión, se tradujo en un adelanto en los picos máximos de la velocidad de respiración de los frutos de durazno. Los modelos de transferencia detectaron impactos no contemporáneos de las fuerzas G sobre la velocidad de respiración de frutos, con retrasos que varían entre 3 y 6 min después del impacto. El mayor incremento en el ritmo de respiración (1.1%) se observa cuando las fuerzas G incrementan en una unidad en la dirección del eje x y en menor proporción se encuentran las contribuciones del eje y y z . Esto significa que los cambios en la velocidad de avance y frenado del vehículo (eje x) repercuten en mayor grado en el ritmo de respiración. Los resultados demuestran que las fuerzas G, generadas durante el transporte, debido a la irregularidad superficial de la carretera y a otros factores relacionados con la velocidad de avance del vehículo representan un factor de daño acumulado sobre el tejido del fruto. Los impactos no contemporáneos detectados por los modelos de transferencia, entre los factores del ambiente de almacenamiento y la velocidad de respiración de frutos, mostraron incremento en el ritmo de respiración por cada unidad de disminución de la humedad relativa o incremento de la temperatura. La intensidad metabólica global del fruto finalmente queda definida por la severidad del esfuerzo impuesto por los factores externos y por las propiedades mecánicas del tejido según su estado fisiológico de maduración, anisotropía y tiempo transcurrido después de la cosecha. La mayor contribución en el metabolismo respiratorio de frutos son las cargas dinámicas aplicadas durante el transporte, que a su vez dependen de otros

factores como la irregularidad superficial de carreteras, condición mecánica del vehículo y hábitos de manejo del conductor del vehículo.

LITERATURA CITADA

- Acican, T., K. Alibas; I.S. Özelkök. 2007. Mechanical damage to Apple during transport in wooden crates. *Biosystems Engineering*, 96(2): 239-248.
- Barchi, G. L., A. Berardinelli, A. Guarnieri, L. Ragni and C. Totaro Fila. 2002. Damage to Loquats by Vibration-simulating Intra-state Transport. *Biosystems Engineering*, 82 (3): 305–312.
- Berardinelli, A., Donati, V., Giunchi, A., Guarnieri, A., & Ragni, L. 2005. Damage to pears caused by simulated transport. *Journal of Food Engineering*, 66:219-226.
- Box, G. E. P., G. M. Jenkins, G. C. Reinsel. 2008. Time Series Analysis: Forecasting and Control. Hoboken, New Jersey: John Wiley & Sons, Inc.
- Holt, J. E. and D. Schoorlt. 1985. A theoretical and experimental analysis of the effects of suspension and road profile on bruising in multilayered apple packs. *Journal of Agricultural Engineering Research*, 31:297-308.
- Jones, C. S., J. E. Holt, and D. Schoorlt. 1991. A Model to Predict Damage to Horticultural Produce During Transport. *Agricultural Engineering Research*, 50: 259-272.
- Kader A. A. 2002. Postharvest technology of horticultural crops. University of California. Agriculture and Natural Resources. Publication 3311, USA.
- Kays, S. J. & Paull, R. E. 2004. *Postharvest biology*. Athens, Georgia: Exxon Press.
- Knee, M. & Miller, R. (2002). Mechanical injury. In: M. knee. (Ed.), *Fruit quality and its biological basis*. Sheffield, UK: Sheffield Academic Press Ltd.
- Lewis, R., A. Yoxall, L. A. Canty, and E. R. Romo. 2007. Development of engineering design tools to help reduce apple bruising. *Journal of Food Engineering*, 83: 356–365.
- Lewis, R., Yoxall, A., Marshall, M. B., & Canty, L. A. 2008. Characterizing pressure and bruise in apple fruit. *Wear*, 264:37-46.
- New J. H. 1983. Report on visits to Turkey to review the packaging of fresh fruits and vegetables. Report No. 1170. Tropical development research Institute England.

- Pérez-López, A., S. H. Chávez-Franco, C. A. Villaseñor-Perea, T. Espinosa-Solares, L. H. Hernández-Gómez and C. Lobato-Calleros. 2014. Respiration rate and mechanical properties of peach fruit during storage at three maturity stages. *Journal of Food Engineering*, 142:111-117.
- Ramírez-Guzmán, M. E. 1993. SAS Macro for analyzing step and impulse response functions derived from transfer function models. Proceedings of the eighteenth annual SAS® users group International Conference New York, NY, USA.
- SAS Institute, Inc. (2008). SAS/STAT® 9.2 *user's guide*. Cary, NC, USA: SAS Institute Inc.
- Van Zeebroeck M., E. Tjjskens, E. Dintwa, J. Kafashan, J. Loodts, J. De Baerdemaeker, and H. Ramon. 2006. The discrete element method (DEM) to simulate fruit impact damage during transport and handling: Model building and validation of DEM to predict bruise damage of apples. *Postharvest Biology and Technology*, 41: 85–91.
- Vanstreels E., M. C. Alamar, B. E. Verlinden, A. Enninghorst, J. K. A. Loodts, E. Tjjskens, H. Ramon and B. M. Nicolai. 2005. Micromechanical behavior of onion epidermal tissue. *Postharvest Biology and Technology*, 37: 163–173.
- Whitelock, D. P., Brusewits, G. H., & Ghajar, A. J. (1999). Thermal/Physical properties affect predicted weight loss of fresh peaches. *Transaction of the ASAE*, 42(4), 1047-1053.
- Young, R. E., & Biale, J. B. (1962). Carbon dioxide effects on fruit respiration: measurement oxygen uptake in continuous gas flow. *Plant Physiology*, 37(3), 409-415.
- Zhoua, R., S. Sub., L. Yan and Y. Li. 2007. Effect of transport vibration levels on mechanical damage and physiological responses of Huanghua pears (*Pyrus pyrifolia Nakai*, cv. Huanghua). *Postharvest Biology and Technology*, 46: 20–28.

CONCLUSIONES GENERALES

El diseño y construcción de los reductores de velocidad se encuentran fuera de las especificaciones de la norma técnica respectiva en cuanto a la altura (11.1 cm), longitud (260 cm) y lugar de ubicación. En valor promedio del Índice de Rugosidad Internacional del tramo de carretera estudiado es superior a $20 \text{ mm}\cdot\text{m}^{-1}$, lo que sugiere un tipo de carretera con irregularidades muy pronunciadas. El movimiento dinámico del vehículo en carretera puede superar los 3 G de manera instantánea. El modelo estadístico de tendencia de las fuerzas G muestra que se generan $0.002 \text{ G}\cdot\text{s}^{-1}$ en el movimiento horizontal (G_x y G_y) y $0.001 \text{ G}\cdot\text{s}^{-1}$ en el movimiento vertical (G_z) del vehículo por cada 1 cm de incremento en la altura del perfil de la carretera. En términos prácticos, las fuerzas G representan la cantidad de veces en que la carga del vehículo recibe su propio peso en la respectiva dirección en que se aplica. Esto implica una acumulación de esfuerzo en el producto cuando se transporta vía terrestre y depende la distancia y tiempo de recorrido, la velocidad de circulación y condiciones mecánicas del vehículo, la posición de la carga dentro del vehículo, el número de estiba, entre otros.

Los frutos cosechados con un 50% de color amarillo en la superficie (M2) mostraron una tasa de respiración más alta a la presentada por los frutos cosechados en estado verde (M1) y amarillo (M3). La tasa de respiración más rápida de M2 se relaciona con el comportamiento climatérico del fruto con el consecuente desarrollo del color característico de un fruto completamente maduro después de dos días de almacenamiento. Los resultados demostraron que el tejido del durazno tiene un comportamiento anisotrópico, variando sus propiedades mecánicas con la orientación de la carga de compresión. Por lo tanto, esta información sugiere que los sistemas de empaque deben ser diseñados teniendo en cuenta estas propiedades. El módulo de elasticidad aparente del tejido

mostró una fuerte dependencia sobre la orientación de carga compresiva, el grado de madurez en la cosecha y la velocidad de progresión de la senescencia.

El efecto global del incremento en la distancia de recorrido y carga de compresión, se tradujo en un adelanto en los picos máximos de la velocidad de respiración de los frutos de durazno. El mayor incremento en el ritmo de respiración (1.1%) se observa cuando las fuerzas G incrementan en una unidad en la dirección del eje x y en menor proporción se encuentran las contribuciones del eje y y z . Esto significa que los cambios en la velocidad de avance y frenado del vehículo (eje x) repercuten en mayor grado en el ritmo de respiración. Los resultados demuestran que las fuerzas G, generadas durante el transporte, debido a la irregularidad superficial de la carretera y a otros factores relacionados con la velocidad de avance del vehículo representan un factor de daño acumulado sobre el tejido del fruto. Los impactos no contemporáneos detectados por los modelos de transferencia, entre los factores del ambiente de almacenamiento y la velocidad de respiración de frutos, mostraron incremento en el ritmo de respiración por cada unidad de disminución de la humedad relativa o incremento de la temperatura. La intensidad metabólica global del fruto finalmente queda definida por la severidad del esfuerzo impuesto por los factores externos y por las propiedades mecánicas del tejido según su estado fisiológico de maduración, anisotropía y tiempo transcurrido después de la cosecha.