



UNIVERSIDAD
NACIONAL
DE COLOMBIA

Evaluación de un removedor de oxígeno y un adsorbente de humedad en el desarrollo de un empaque activo para la preservación de lulo (*Solanum quitoense*) en fresco

Hugo Javier Escobar Piña

Universidad Nacional de Colombia
Facultad de Ciencias Agrarias, Área Curricular de Alimentos y Agroindustria
Bogotá, Colombia

2022

Evaluación de un removedor de oxígeno y un adsorbente de humedad en el desarrollo de un empaque activo para la preservación de lulo (*Solanum quitoense*) en fresco

Hugo Javier Escobar Piña

Trabajo final presentado como requisito parcial para optar al título de:
Magister en Ciencia y Tecnología de Alimentos

Director:

Dr. Diego Alberto Castellanos Espinosa

Línea de Investigación: Calidad y Empaques para Alimentos

Universidad Nacional de Colombia
Facultad de Ciencias Agrarias
Área Curricular de Alimentos y Agroindustria
Bogotá, Colombia

2022

“¿Cuándo, si no es ahora?

¿Dónde, si no es aquí?

¿Quién, sino nosotros?”

-John F. Kennedy-

Declaración de obra original

Yo declaro lo siguiente:

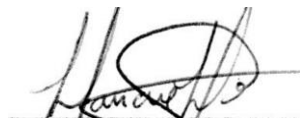
He leído el Acuerdo 035 de 2003 del Consejo Académico de la Universidad Nacional.

«Reglamento sobre propiedad intelectual» y la Normatividad Nacional relacionada al respeto de los derechos de autor. Esta disertación representa mi trabajo original, excepto donde he reconocido las ideas, las palabras, o materiales de otros autores.

Cuando se han presentado ideas o palabras de otros autores en esta disertación, he realizado su respectivo reconocimiento aplicando correctamente los esquemas de citas y referencias bibliográficas en el estilo requerido.

He obtenido el permiso del autor o editor para incluir cualquier material con derechos de autor (por ejemplo, tablas, Figuras, instrumentos de encuesta o grandes porciones de texto).

Por último, he sometido esta disertación a la herramienta de integridad académica, definida por la universidad.



Hugo Javier Escobar Piña

Fecha: 25/05/2022

Agradecimientos

A mi familia, por su estable y perenne apoyo y motivación durante este proceso.

Al profesor Diego A. Castellanos, por su paciencia, por la entrega de su tiempo y conocimientos e invaluable contribución para la ejecución de este trabajo y mi formación académica.

A la Facultad de Ciencias Agrarias y al Laboratorio de Calidad y Poscosecha de Productos Agrícolas, por el apoyo brindado durante la realización de este proyecto.

A la Universidad Nacional de Colombia y a la Universidad de Cundinamarca por la financiación de esta investigación a través de la “Convocatoria de Proyectos de Investigación conjuntos entre la Universidad de Cundinamarca y la Universidad Nacional de Colombia sede Bogotá – 2020, proyecto No 50970”.

Resumen

Evaluación de un removedor de oxígeno y un adsorbente de humedad en el desarrollo de un empaque activo para la preservación de lulo (*Solanum quitoense*) en fresco

Generalmente las cadenas de comercialización de frutas y verduras en los países en vías de desarrollos están poco tecnificadas, lo que genera altas pérdidas poscosecha con una reducción incontrolada de la calidad de los productos hortofrutícolas obtenidos en campo. El lulo o naranjilla (*Solanum quitoense*), una fruta nativa de los andes con amplias posibilidades de crecimiento de cultivo y procesamiento en la región de Cundinamarca en Colombia, no es la excepción a estas dificultades en la cadena de distribución. Para dar solución a esta problemática es necesario considerar los factores que influyen en la vida útil poscosecha del producto, específicamente lo relacionado con las condiciones de empaque y almacenamiento: temperatura, humedad relativa, nivel de oxígeno, materiales de empaque y configuración, componentes activos, entre otros. Una posibilidad interesante es el uso de empaques activos y con atmósferas modificadas donde estas variables pueden ser controladas. Considerando esto, en el presente trabajo se evaluó el uso de un elemento activo con capacidad de remoción de oxígeno y adsorción de humedad en un empaque con atmósferas modificadas para frutos de lulo a condiciones de refrigeración. El elemento activo empleado se configuró en forma de 'sachet' con mezclas de limadura de hierro y poliacrilato de sodio (PAS), ambos en polvo. Inicialmente, se ajustó la proporción de hierro y PAS con mejor capacidad de remoción de O₂ llegando a una mezcla al 50 %. Posteriormente se determinó la velocidad de consumo de O₂ y de producción de CO₂ (respiración) para los frutos de lulo en fresco. Finalmente, y empleando los resultados anteriores, se evaluó el efecto de diferentes cantidades del elemento activo sobre la atmósfera modificada (AM) en el espacio de cabeza del empaque, y sobre el deterioro de frutos frescos de lulo empacados en bandejas de ácido poliláctico (PLA) selladas con una película también de PLA con una perforación de $0,35 \pm 0,02$ mm para evitar el agotamiento del O₂ en el interior. Los tratamientos evaluados en el ensayo de empaque fueron: 1) bandejas macroperforadas de tereftalato de polietileno (PET) como control, 2) bandeja de PLA/PLA perforada, 3) bandeja de PLA/PLA perforada + 4 g de elemento activo y 4) bandeja de PLA/PLA perforada + 8 g de elemento activo. Las bandejas con los frutos fueron almacenadas a $12 \text{ }^\circ\text{C} \pm 1 \text{ }^\circ\text{C}$ y 75 ± 2 % de humedad relativa durante 30 días haciendo seguimiento de los cambios en los niveles de O₂ y CO₂ para las bandejas perforadas, además del porcentaje de pérdida de peso, apariencia general, color, acidez total titulable, relación de madurez, entre otras variables medidas para los frutos de lulo. De acuerdo con los resultados observados en el ensayo de empaque, se obtuvieron

niveles de O₂ de 16,4-19,2 % y de CO₂ de 1,7-5,3 % para los empaques perforados de PLA, obteniendo efectivamente en todos ellos una atmósfera modificada. Así mismo, la menor concentración de O₂ y la mayor concentración de CO₂ obtenidas se evidenciaron para el tratamiento con 8 g de elemento activo. Los resultados muestran el efecto favorable del uso de empaques con intercambio gaseoso controlado sobre la disminución de pérdidas de peso, así como el efecto conservador de la inclusión del removedor de oxígeno y humedad sobre la apariencia general, el color, la acidez total titulable y la relación de madurez de los frutos de lulo. La pérdida de calidad de los frutos fue inferior para el empaque perforado con los 8 g de elemento activo sin aumentar significativamente la pérdida de peso respecto a los otros empaques con AM y con resultados significativamente mejores respecto al empaque macroperforado de PET. Los resultados obtenidos muestran que es posible obtener una atmósfera modificada funcional y con efecto preservante combinando el uso de materiales de empaque biodegradables de PLA y un elemento activo con remoción de O₂ y adsorción de humedad. En circunstancias en donde se desee mantener una AM moderada (O₂ entre 10 y 20 %), el elemento activo puede incluirse en sistemas de empaque perforados o con moderada-alta permeación de O₂ requiriendo bajas cantidades de elemento activo por peso de producto.

Palabras clave: Naranjilla, empaque activo, removedor de oxígeno, adsorbedor de humedad, vida útil.

Abstract

Evaluation of an oxygen scavenger and a moisture adsorbent in the development of an active packaging for the preservation of fresh lulo (*Solanum quitoense*).

Generally, fruit and vegetable marketing chains in developing countries are poorly technified, which generates high postharvest losses with an uncontrolled reduction in the quality of fruit and vegetable products obtained in the field. The lulo or little orange (*Solanum quitoense*), a fruit native to the Andes with ample growth possibilities for cultivation and processing in the Cundinamarca region of Colombia, is no exception to these difficulties in the distribution chain. To solve this problem, it is necessary to consider the factors that influence the postharvest shelf life of the product, specifically those related to packaging and storage conditions: temperature, relative humidity, oxygen level, packaging materials and configuration, active components, among others. An interesting possibility is the use of active packaging and modified atmospheres where these variables can be better controlled. Considering this, the present work evaluated the use of an active element with oxygen removal and moisture adsorption capacity in a packaging with modified atmospheres for lulo fruits under refrigerated conditions. The active element used was configured in the form of a sachet with mixtures of iron particles and sodium polyacrylate (SPA), both in powder form. Initially, the proportion of iron and SPA with the best O₂ scavenger capacity was adjusted to a 50 % (w/w) mixture. Subsequently, the rate of O₂ consumption and CO₂ production (respiration) for fresh lulo fruits was determined. Finally, and using the previous results, the effect of different amounts of the active element on the modified atmosphere (MA) in the packaging, and on the deterioration of fresh lulo fruits packaged in polylactic acid (PLA) trays sealed with a PLA film with a 0.35 ± 0.02 mm perforation to avoid O₂ depletion inside was evaluated. The treatments evaluated in the packaging trial were: 1) macroperforated polyethylene terephthalate (PET) trays as control, 2) perforated PLA/PLA tray, 3) perforated PLA/PLA tray + 4 g of active element and 4) perforated PLA/PLA tray + 8 g of active element. The trays with the fruits were stored at 12 ± 1 °C and 75 ± 2 % relative humidity for 30 days monitoring the changes in O₂ and CO₂ levels for the perforated trays, in addition to the percentage of weight loss, general appearance, color, total titratable acidity, maturity ratio, among other variables measured for the lulo fruits. According to the results observed in the packaging test, O₂ levels of 16.4–19.2 % and CO₂ levels of 1.7–5.3 % were obtained for the PLA perforated packages, effectively obtaining a modified atmosphere in all of them. Likewise, the lowest O₂ concentration and the highest CO₂ concentration were obtained for

the treatment with 8 g of active element. The results show the favorable effect of the use of packaging with controlled gas exchange on the reduction of weight loss, as well as the conservative effect of the inclusion of the oxygen and moisture remover on the general appearance, color, total titratable acidity and ripening index of the lulo fruits. Fruit quality loss was lower for the perforated package with the 8 g of active element without significantly increasing the weight loss with respect to the other MA packages and with significantly better results with respect to the macroperforated PET package. This study show that it is possible to obtain a functional modified atmosphere with a preserving effect by combining the use of biodegradable PLA packaging materials and an active element with O₂ scavenger and moisture adsorption. In circumstances where it is desired to maintain a moderate MA (O₂ between 10 and 20 %), the active element can be included in perforated or moderate-high O₂ permeation packaging systems requiring low amounts of active element per weight of the product.

Key words: little orange, active packaging, oxygen scavenger, moisture adsorbent, shelf life.

Contenido

	<u>Pág.</u>
Resumen	VIII
Lista de Figuras	XIV
Lista de tablas	XVI
Lista de Símbolos y abreviaturas	XVII
Introducción	1
Planteamiento del problema.....	2
Comercialización	2
Empaque.....	3
Estrategias de preservación	4
Justificación	5
Objetivos	6
1. Capítulo 1. Revisión de literatura	7
1.1. El cultivo de lulo	7
1.1.1. Características del fruto	7
1.1.2. Desarrollo y madurez de los frutos	8
1.2. Cosecha	8
1.3. Poscosecha del lulo	9
1.4. Empaques con atmósferas modificadas.....	10
1.4.1. Ventajas de las atmósferas modificadas	11
1.4.2. Desventajas de las atmósferas modificadas.....	12
1.4.3. Ventajas de los empaques activos	12
1.4.4. Desventajas de los empaques activos.....	12
1.4.5. Aplicaciones de los empaques con AM	13
1.5. Materiales de empaque utilizados	13
1.6. Empaques activos combinados con AM	13
1.7. Principio de funcionamiento de los removedores de oxígeno y de humedad.....	14
1.7.1. Removedores de oxígeno.....	15
1.7.2. Removedores de humedad	16
1.7.2.1. Poliácrlato de sodio.....	17
1.8. Avances en el empaque de lulo y frutos similares durante la poscosecha	18
2. Capítulo 2. Materiales y métodos	22
2.1. Frutos y reactivos	22

2.1.1. Material vegetal	22
2.1.2. Limadura de hierro	22
2.1.3. Poliacrilato de sodio	22
2.2. Determinación de la cantidad de oxígeno removida por la limadura de hierro	23
2.3. Determinación experimental de la cantidad de oxígeno removida con diferentes proporciones de limadura de hierro y poliacrilato de sodio.	23
2.3.1. Experimentos con sachets y modelamiento matemático de la cinética de remoción de oxígeno	24
2.4. Experimentación y modelado matemático de la respiración del lulo.....	26
2.4.1. Determinación experimental de la velocidad de respiración de lulo.....	26
2.4.2. Modelo matemático de la cinética de respiración.....	27
2.5. Configuración de diferentes sistemas de empaque: tradicional, atmósferas modificadas y con remoción de Oxígeno	28
2.6. Evaluación del efecto de los empaques con atmósfera modificada y un tratamiento control sobre las características de calidad del lulo fresco almacenado	29
3. Capítulo 3. Resultados y Discusión	34
3.1. Modelado de la cinética de remoción de oxígeno de la mezcla: limadura de hierro más poliacrilato de sodio.....	34
3.2. Caracterización de la cinética de respiración del lulo en fresco empacado.....	40
3.3. Configuración del empaque activo.....	45
3.4. Efecto del removedor de oxígeno y del adsorbente de humedad sobre la calidad y vida útil del lulo en fresco	46
3.4.1. Pérdida de peso	52
3.4.2. Apariencia General	54
3.4.3. Coordenada a*	56
3.4.4. Acidez Total Titulable	57
3.4.5. Relación de Madurez.....	58
3.4.6. Módulo de Young	59
3.4.7. Sólidos solubles totales y pH	61
3.4.8. Color: Luminosidad (L*) y coordenada b*	62
3.4.9. Análisis integrado	63
4. Conclusiones y recomendaciones.....	65
4.1. Conclusiones.....	65
4.2. Recomendaciones	66
Referencias	67

Lista de Figuras

Figura 1-1: Diferentes modos de presentación de los elementos activos para controlar la humedad.	17
Figura 1-2: Estructura química del poliacrilato de sodio.	17
Figura 2-1: Experimento para la determinación de la proporción de limadura de hierro/poliacrilato de sodio más eficiente en la remoción de oxígeno a condiciones ambientales	24
Figura 3-1: Dinámica de remoción de oxígeno por limadura de hierro en diferentes cantidades y a 23 °C. Las barras de error corresponden a la desviación estándar para n = 3.....	34
Figura 3-2: Dinámica de remoción de oxígeno por diferentes proporciones de limadura de hierro y poliacrilato de sodio a 23 °C. Las barras de error corresponden a la desviación estándar para n = 2	36
Figura 3-3: Datos experimentales y estimados de remoción de oxígeno para la mezcla de limadura de hierro y PAS en proporción 1:1 expuestos a la atmósfera en cápsulas de Petri y a diferentes temperaturas. Las barras de error corresponden a la desviación estándar para n=3.....	36
Figura 3-4: Datos experimentales y estimados de remoción de oxígeno para la mezcla de limadura de hierro y PAS en proporción 1:1 contenida en ‘sachets’ a diferentes temperaturas. Las barras de error corresponden a la desviación estándar para n = 3.	37
Figura 3-5: Volumen de oxígeno removido por la mezcla activa en sachets en proporción 1:1 a diferentes temperaturas. Las barras de error corresponden a la desviación estándar para n = 3.	39
Figura 3-6: Datos experimentales y estimados de reducción de oxígeno y aumento de dióxido de carbono con respecto al tiempo de lulos almacenados a 5 °C en sistema cerrado. Las barras de error corresponden a la desviación estándar para n = 3.	41
Figura 3-7: Datos experimentales y estimados de reducción de oxígeno y aumento de dióxido de carbono con respecto al tiempo de lulos almacenados a 12 °C en sistema cerrado. Las barras de error corresponden a la desviación estándar para n = 3.	41
Figura 3 8: Datos experimentales y estimados de reducción de oxígeno y aumento de dióxido de carbono con respecto al tiempo de lulos almacenados a 23 °C en sistema cerrado. Las barras de error corresponden a la desviación estándar para n = 3.....	42
Figura 3-9: Velocidad de respiración (consumo de O ₂ y producción de CO ₂) experimental y estimada de frutos de lulos almacenados a 5 y 12 °C.....	42
Figura 3-10: Velocidad de respiración (consumo de O ₂ y producción de CO ₂) experimental y estimada de frutos de lulos almacenados a 23°C	43

Figura 3-11*: Datos experimentales y calculados de la concentración de oxígeno que se alcanzó en los diferentes tratamientos de empaques configurados para los frutos de lulo a 12 °C. Las barras de error corresponden a la desviación estándar para n = 3.	45
Figura 3-12*: Datos experimentales y calculados de la concentración de dióxido de carbono que se alcanzó en los diferentes tratamientos de empaques configurados para los frutos de lulo a 12 °C. Las barras de error corresponden a la desviación estándar para n=3.....	45
Figura 3-13: ‘Scores plot’ de las diez variables medidas en los siete momentos.....	46
Figura 3-14: ‘Loadings plot’ de las diez variables medidas en los siete momentos.....	47
Figura 3-15: ‘Scores plot’ de las veintitrés variables más influyentes en la diferenciación de los tratamientos.....	48
Figura 3-16: ‘Loadings plot’ de las veintitrés variables más influyentes en la diferenciación de los tratamientos.....	49
Figura 3-17: Dinámica de pérdida de peso de los frutos bajo el efecto de los tratamientos de empaque.....	52
Figura 3-18: Dinámica de adsorción de humedad por parte del elemento activo a 12 °C.....	53
Figura 3-19: Dinámica de la apariencia general de los frutos bajo el efecto de los tratamientos de empaque.....	54
Figura 3-20: Dinámica de la coordenada a* de los frutos bajo el efecto de los tratamientos de empaque.....	56
Figura 3-21: Dinámica de la acidez total titulable de los frutos bajo el efecto de los tratamientos de empaque.....	58
Figura 3-22: Dinámica de la relación de madurez de los frutos bajo el efecto de los tratamientos de empaque.....	59
Figura 3-23: Dinámica del Módulo de Young de los frutos de lulo bajo el efecto de los tratamientos de empaque.....	60
Figura 3-24: Dinámica de los sólidos solubles totales y el pH de los frutos de lulo bajo el efecto de los tratamientos de empaque	61
Figura 3-25: Dinámica del color: luminosidad y coordenada b* de los frutos de lulo bajo el efecto de los tratamientos de empaque	62

Lista de tablas

Tabla 3-1. Parámetros de regresión de la cinética de pseudo primero orden y Arrhenius para el removedor de oxígeno compuesto de limadura de hierro y PAS en proporción de 1:1 expuesto al aire en cápsulas de Petri y sachets.....	388
Tabla. 3-2. Parámetros de la cinética enzimática de Michaelis-Menten con inhibición por CO ₂ obtenidos a partir del modelado cinético de la respiración de frutos de lulo	44
Tabla. 3-3. Variables seleccionadas por el método de Wilks-Lambda	48
Tabla. 3-4. Evolución de las propiedades de calidad de lulos y comparación de medias bajo diferentes condiciones de empaque a 12°C y 75% HR.....	50

Lista de Símbolos y abreviaturas

Símbolo	Término	Unidad
A	Área de transferencia	
a*	Coordenada CIELAB de color rojo (+) /verde (-)	
AM	Empaque con atmósfera modificada	
ATT	Acidez total titulable	%
b*	Coordenada CIELAB de color amarillo (+) /azul (-)	
°C	Grados Celsius	
CO ₂	Dióxido de carbono	
cm	Centímetro	
d	Días	
E _a	Energía de activación, ecuación de Arrhenius	kJ mol ⁻¹
FOB	<i>Free on Board</i>	
g	Gramos	
HR	Humedad relativa	%
H ₂ O	Agua	
Kg	Kilogramo	
K _m	Constante cinética de Michaelis-Menten	
kPa	Kilo pascales	
K _{TR_{O2}} , K _{TR_{CO2}}	Coefficientes de permeación de oxígeno y dióxido de carbono a través de las perforaciones en los empaques	cm ³ d ⁻¹
L*	Coordenada de luminosidad CIELAB	
l	Espesor de película	
LD ₅₀	Dosis letal media	

Símbolo	Término	Unidad
mm	Milímetro	
MMA	Cinética de Michaelis-Menten con inhibición anticompetitiva por CO ₂	
m.s.n.m.	metros sobre el nivel del mar	
O ₂	Oxígeno	
PAS	Poliacrilato de sodio	
PET	Tereftalato de polietileno	
PLA	Ácido poliláctico	
P	Presión	kPa
pH	Potencial hidronio	
R	Constante universal de gases (0.008314)	kJ mol ⁻¹ kg ⁻¹
R ² _{adj}	Coefficiente de determinación ajustado	
r _{O2} , r _{CO2}	Tasa de consumo de O ₂ y producción de CO ₂	cm ³ kg ⁻¹ d ⁻¹
r _{O2max} , r _{CO2max}	Máxima velocidad de consumo de O ₂ y producción de CO ₂	cm ³ kg ⁻¹ d ⁻¹
r _{rem,O2}	Velocidad de remoción de oxígeno del elemento activo	
Q _{CO2} , Q _{O2}	Coefficientes de permeabilidad al dióxido de carbono y al oxígeno	cm ³ mm m ⁻² atm ⁻¹ d ⁻¹
T	Tiempo	d
T	Temperatura	K
Ton	Toneladas	
T _{ref}	Temperatura de referencia	K
s	Segundos	
SST	Sólidos solubles totales	%
US\$	Dólares estadounidenses	
V	Volumen libre del empaque	cm ³
v/v	Proporción volumen sobre volumen	
W _{rem,O2}	peso del removedor de oxígeno	
W	Peso de la fruta	kg
WL	Pérdida de peso del fruto	kg
y _{O2} , y _{CO2}	Concentración fracción molar O ₂ y CO ₂	
y _{O2out} , y _{CO2out}	Concentración externa en fracciones molares de O ₂ y CO ₂	

Introducción

El lulo (*Solanum quitoense*), es un fruto ampliamente consumido en países como Colombia y Ecuador. Es consumido de diferentes formas ya sea el fruto entero en fresco o procesado en: helados, salsas (Messinger y Lauerer, 2015), jaleas, mermeladas, tortas, yogurt, ensalada de frutas (Ramírez y Davenport, 2020), y principalmente en forma de jugo el cual se puede complementar con otros ingredientes que contrastan, intensifican o potencian el sabor típico del mismo.

A nivel global, aunque es un fruto poco conocido podría llegar a posicionarse el consumo de éste, debido a la creciente concientización de la población respecto a los beneficios para la salud asociados al consumo de frutos frescos como los son la prevención y mitigación de problemas como obesidad, hipertensión, diabetes, etc. En el caso del lulo, hay cada vez más información disponible en torno a los compuestos y el impacto favorable en la salud de quienes lo consumen (Betoret et al., 2019).

En términos macro se puede mencionar la riqueza de este fruto en proteínas, vitamina C, fibra, precursores de la vitamina A, minerales como: hierro, calcio, fósforo, y compuestos antioxidantes como los trans- β -caroteno, luteína y zeaxantina, ácidos clorogénicos y glucósidos de flavonol (Betoret et al., 2019). En particular los carotenoides de este fruto han sido asociados a la prevención de enfermedades como la hipertensión, obesidad y enfermedades cardiovasculares, los compuestos antihipertensivos del mismo son: N1,N4,N8-tris espermidina y N1,N8-bis espermidina, que son aminos bioactivos con actividad inhibitoria de la enzima convertidora de la angiotensina (ECA), por lo que indirectamente disminuyen la presión arterial por inhibición de la ECA que constriñe a los vasos sanguíneos (Forero et al., 2016).

Planteamiento del problema

Comercialización

Generalmente este fruto es comercializado entero y en fresco, con poco valor agregado, básicamente se clasifica por tamaño y estado de madurez en etapas previas y/o durante la comercialización por mayor y luego se expone en recipientes abiertos: cestas plásticas, cajas de madera, estanterías, entre otros, en comercios al por menor desde los cuales el consumidor final selecciona por aspecto visual y táctil aquellos frutos que le son más atractivos. Es de destacar que el 99% de la producción del año 2014 se orientó al consumo interno con un precio promedio para ese momento de 1,34 US\$/Kg, mientras que a nivel internacional dependiendo del mercado de destino oscilaba entre 2,6 y 8,6 FOB/Kg (Arias, 2015).

En esta cadena agroeconómica no es menos relevante el hecho de que actualmente sea uno de los frutos que actualmente Colombia está llevando al mercado internacional (Jaime-Guerrero et al., 2022), promovido entre otros factores por el creciente interés de los mercados de países desarrollados como Europa y Norte América en el consumo de nuevas especies de frutas, ya que asocian frutas frescas con beneficios para la salud, prevención de enfermedades, mejor apariencia de la piel, prevención de la obesidad y contenidos específicos de vitaminas, minerales y compuestos antioxidantes (Briz et al. 2008). Esto ha llevado a un incremento en el precio de frutas exóticas especialmente en los países ubicados en el norte de Europa, tendencia que es beneficiosa para los países exportadores, lo anterior se puede afirmar a partir del incremento del valor de las importaciones de estos rubros que asciende al 40 % en los 5 años previos al 2019 e incluyendo al mismo y que alcanzó un valor de 142 millones de euros para el mismo año” (CBI, 2022). Sin embargo cualquier fruto exótico para ser exitoso y tener buena acogida en el mercado requiere tener adecuadas estrategias de promoción del consumo, muy buen sabor y ser presentado de forma adecuada, ya que generalmente son costosos y los consumidores estarán dispuestos a desembolsar el monto que corresponda a su adquisición si en contraparte son significativamente satisfechas sus expectativas, por lo que se requiere que los productos lleguen a su destino en las condiciones que lo requiere el mercado (Sabbe et al., 2013).

Empaque

Uno de los factores principales para asegurar la calidad de los frutos hasta su adquisición por el consumidor final es el empaque. Actualmente las condiciones de manejo y empaque del lulo comparado con décadas anteriores han mejorado en cuanto a mayor tiempo de conserva. Un ejemplo de esto es el uso actual de cestas plásticas que son menos abrasivas y profundas comparado a los guacales de madera. Estos últimos se comercializan hoy en día en dimensiones de 40 x 45 x 50 cm con capacidad promedio de 28 kg, si bien su uso ha ido decayendo debido a que la pérdida de producto es muy alta: 53,9%, del cual 42% es debido a mal manejo y al empaque deficiente, ocasionando vida útil escasa, aproximadamente de 3 a 5 días (Muñoz et al., 1999) y (Forero-Cabrera et al., 2017). El inconveniente principal con las cestas plásticas y los guacales de madera es su nula protección contra la atmósfera externa, específicamente el nivel de O₂ y de humedad por lo cual es necesario proponer otras alternativas que lleven a configuraciones más favorables para la vida poscosecha del producto en la cadena de comercialización y distribución.

Otra posibilidad de mejora en el empaque es la disminución de la cantidad de masa de lulo por unidad de empaque primario puesto que se ha evidenciado que los daños son mayores en los frutos que están en el fondo del empaque con respecto a los que están en la superficie (Muñoz et al., 1999), cuando se trata de empaques con mayores cantidades de producto como los mencionados arriba. Escogiendo el tamaño apropiado y configurando el empaque a medida de las necesidades de preservación del producto se pueden lograr aún más beneficios respecto al mantenimiento de su calidad, evitando la manipulación excesiva por parte del consumidor y reduciendo el deterioro (Dos Santos et al., 2020). Cada producto tendrá un conjunto de parámetros de empaque que llevarán a una preservación óptima tales como tamaño, tipo de material de empaque, configuración y distribución del producto (Herrera et al., 2020).

Por otra parte, el incremento de la conciencia ecológica en la población mundial, en específico, mediante el uso de plásticos reusables, reciclados y/o degradables, provenientes de fuentes renovables o no (Meherishi et al., 2019), suma un reto adicional a las mejoras que se deben implementar en el empacado de frutos como el lulo. En ese sentido la tendencia va hacia el uso creciente de materiales plásticos biodegradables o compostables que pueden emplearse en sistemas de empaque que preserven el producto de forma adecuada, este es un reto mayor en la

industria hortofrutícola por los grandes volúmenes de materia prima que se manejan y por el bajo costo relativo de los productos a empacar.

Estrategias de preservación

En el caso del lulo (*Solanum quitoense*) y de la mayoría de los productos hortofrutícolas, la refrigeración es la primera estrategia de manejo que ayuda significativamente a prolongar la vida útil. Este tipo de productos se caracterizan por su alto contenido de agua y su metabolismo activo pues siguen respirando luego de ser cosechados. La temperatura influye directamente en la respiración, la pérdida de humedad (transpiración) y la actividad de microorganismos asociados al deterioro y por tal razón el uso de bajas temperaturas favorecerá la preservación de estos productos.

Además de la refrigeración, existen otras estrategias que pueden ayudar a disminuir la velocidad de respiración de los frutos empacados como el uso de empaques con atmósferas modificadas. En este sistema se busca la modificación en los niveles de gases en el espacio de cabeza del interior del empaque de tal forma que se alcance un balance de gases entre el dióxido de carbono y el oxígeno a niveles favorables para reducir la respiración, el metabolismo y el deterioro del producto (Arango et al., 1999; Castellanos y Herrera, 2017). Así mismo, se busca la reducción de la velocidad de multiplicación de microorganismos aerobios, su actividad en la degradación del producto y el inicio de procesos de oxidación que lleven a la degradación de metabolitos de interés (Gram et al., 2002; Sand, 2020).

A partir del balance de materia entre la permeación de gases en el empaque y la respiración del producto empacado se pueden alcanzar niveles de O_2 y CO_2 favorables para la preservación. Sin embargo, muchas veces el tiempo para alcanzar este balance puede ser largo (respecto al tiempo de vida útil esperado en el producto) o no se dispone de los materiales de empaque que conduzcan a los niveles de preservación deseados. En ese caso es posible incluir un componente extra, un elemento activo, que ayude a la remoción de O_2 para obtener mejores niveles de preservación. Así mismo, dada la necesidad de controlar la humedad en el sistema de empaque, un elemento activo también puede ser de utilidad para evitar la condensación excesiva de agua en el interior (Garavito et al., 2022).

Por lo antes expuesto, en esta investigación se buscó evaluar la inclusión de un elemento activo con la capacidad de remoción de O_2 constituido de limadura de hierro en un empaque con atmósferas modificadas, para disminuir la velocidad de respiración de una determinada masa de lulo, y así prolongar la vida útil y retrasar el deterioro de sus propiedades de calidad (Sabbe et al., 2013). Este tipo de sistemas de empaque pueden emplearse para la exportación a grandes distancias bajo condiciones de refrigeración o para su comercialización en anaquel durante mayores tiempos de exhibición.

Como el proceso de oxidación de la limadura de hierro es activada y continuada por la presencia de agua (Dey y Neogi, 2019), se debe incluir además un adsorbedor de humedad para tal efecto, en el presente estudio se empleó poliacrilato de sodio, que debe estar mezclado con la limadura de hierro para que pueda desencadenarse y facilitarse el proceso de remoción de oxígeno por parte de la limadura de hierro. La inclusión de este removedor de humedad además permite adsorber una parte significativa del exceso de humedad presente en el espacio de cabeza del empaque, lo cual evita la formación de condensación y a partir de ahí, minimiza el crecimiento de microorganismos causantes del deterioro de los tejidos vegetales (Agudelo-Rodríguez et al., 2020).

Justificación

El lulo es un fruto promisorio en el departamento de Cundinamarca en Colombia por tener un mejor rendimiento promedio por hectárea: 11,8 Ton con respecto a la media nacional que es de 9,3 Ton para el período 2007-2018 (Agronet, 2022). Su potencial de crecimiento en la región está fuertemente ligado a la cercanía con Bogotá y con su zona metropolitana la cual alberga más del 15 % de la población nacional por lo cual constituye una enorme zona de mercado. Así mismo, dado el hecho que Bogotá es un nodo de distribución, transporte y exportación, las posibilidades de comercialización del producto cultivado en Cundinamarca se hacen mayores, entre otros aspectos por generar algo más del 26% del producto interno bruto con 260.207 mil millones de pesos para el año 2020 y estar entre las regiones que más aporta a las actividades relacionadas con la agricultura, ganadería, silvicultura y pesca con un 12,5% del PIB de este sector de la economía para los años comprendidos entre el 2005 y el 2020 (Departamento Administrativo Nacional de Estadísticas - DANE, 2022).

Por lo anterior, en el presente trabajo se buscó la configuración de un sistema de empaque activo con atmósferas modificadas incluyendo un elemento removedor de O_2 y adsorbedor de humedad en forma de 'sachet' con el fin de prolongar la vida útil del lulo para su distribución a largas distancias y su comercialización en anaquel en los pisos de ventas de los comercios nacionales e internacionales. El sistema de empaque propuesto puede ayudar a regularizar la calidad de los frutos que se ofertan, disminuir la merma de producto y el riesgo asociado a la comercialización de este. Así mismo, con esta propuesta de empaque se pretende ayudar a facilitar la distribución masiva del producto por mayor tiempo y a un mayor número de consumidores para incidir positivamente en toda la cadena de producción, empaquetado, transporte y comercialización de esta fruta desde la región de Cundinamarca hacia otros mercados nacionales y de exportación dado el potencial nutricional y organoléptico de la fruta (Sabbe et al., 2013).

Objetivos

Objetivo general

Evaluar un elemento removedor de oxígeno complementado con un adsorbente de humedad en el desarrollo de un empaque activo con atmósfera modificadas para la preservación de lulo en fresco.

Objetivos específicos

- 1) Determinar la capacidad y la velocidad de remoción de oxígeno para diferentes mezclas de limadura de hierro y poliacrilato de sodio a diferentes temperaturas y evaluar su inclusión en un elemento activo de empaque en forma de sachet.
- 2) Determinar la velocidad de respiración (consumo de O_2 y producción de CO_2) de frutos de lulo en fresco a diferentes temperaturas.
- 3) Evaluar el efecto de diferentes sistemas de empaque con atmósferas modificadas y con la inclusión de un elemento activo compuesto de limadura de hierro y poliacrilato de sodio sobre la calidad y vida útil del lulo en fresco.

1. Capítulo 1. Revisión de literatura

1.1. El cultivo de lulo

El lulo, o naranjilla como es conocido popularmente en Ecuador pertenece a la familia de las Solanáceas, es denominado científicamente como (*Solanum quitoense*), se cultiva ampliamente en Perú, Ecuador, Colombia, Panamá, Costa Rica y Honduras (Jaime-Guerrero et al., 2022). Es un cultivo que requiere ambientes con suficiente precipitación (1000 – 2800 mm/año) y penumbra porque tiene alta velocidad de transpiración, crece bien en zonas con altitudes entre 1600 y 2400 m.s.n.m y temperaturas entre 16 y 24 °C (Fisher et al., 2021).

1.1.1. Características del fruto

La coloración exterior del lulo varía dependiendo del grado de madurez de los frutos, desde tonalidades verdes cuando está inmaduro hasta tonalidades entre anaranjado y amarillo cuando alcanza la madurez de consumo, su forma es de redonda a ovoide con diámetros que varían de 4 a 8 cm y una masa que oscila entre 73 y 209 g (Jaime-Guerrero et al., 2022). Internamente está dividido en cuatro secciones, la pulpa es de color verde, jugosa y con grandes cantidades de semillas pequeñas, puede presentar valores de pH entre 3,5 y 5,0. (González et al., 2014), valores de grados Brix entre 8,5 y 13,6 (Igual et al., 2014; Morillo et al., 2019) e índices de madurez: proporción resultante de dividir el porcentaje de sólidos solubles totales entre el porcentaje de acidez total titulable, entre 1,83 y 2,84, dependiendo del estado fisiológico de los frutos (González et al., 2014). La madurez de la fruta está correlacionada con el aumento de sólidos solubles totales (SST), lo que resulta en una pulpa dulce en etapas avanzadas de maduración, sin embargo, el valor de pH no varía significativamente con la maduración (Acosta et al., 2009).

1.1.2. Desarrollo y madurez de los frutos

El crecimiento y desarrollo de los frutos de lulo se asemeja con facilidad a una curva tipo sigmoidea simple, determinada por tres procesos: la división celular, el alargamiento celular y la maduración del fruto (Jaime-Guerrero et al., 2022), la primera puede ir hasta los 80 días después de antesis o floración (dda), la segunda hasta los 160 (dda), y la fase de maduración va hasta la cosecha (Ochoa-Vargas et al. 2016).

1.2. Cosecha

Las flores y frutos en el árbol de lulo se ubican en las axilas de las ramas y tallos (Ramírez et al., 2018), lo cual aunado al hecho de ser un arbusto de baja estatura de 1,35 a 1,85 m (Viera et al., 2021) facilita las labores de cosecha, que es realizada en su mayor parte de forma manual. Los rendimientos pueden ser altos, llegar a 10 Kg de lulo por planta, lo que equivale según la densidad de plantación a rendimientos alrededor de las 19,73 toneladas por hectárea (Viera et al., 2021), siendo apropiado cosecharlos cuando la mitad de la superficie de los frutos ha alcanzado tonalidades anaranjadas y amarillas.

El método de cosecha afecta la calidad del fruto, por ejemplo, en el Departamento de Nariño (Muñoz et al., 2014) hicieron una caracterización y encontraron que 37,3% de los productores usan cestas plásticas, 11,9% usa cestas pequeñas, y un alto porcentaje: 50,8% cosecha con sacos, embalaje que ocasiona gran cantidad de daños físicos por compresión. Otro factor que afecta la calidad del lulo es el modo de transporte desde el lugar de recolección hasta donde es vendido, en el caso del departamento nombrado, 54,2% de los productores transporta la cosecha en el hombro, 37,3% utiliza caballos y sólo 8,5% usa equipos de transporte mecánicos.

En cuanto a la frecuencia de cosecha el 50,8% de los productores de la región lo hace cada 15 días, el 40,7% lo hace cada 21 días y cada 30 días el 8,5%, este factor se debe tener muy en cuenta para lograr alta uniformidad en la clasificación de los frutos por estados de maduración (Muñoz et al., 2014), ya que a menor intervalo de cosecha mayor es la uniformidad de los lotes cosechados.

1.3. Poscosecha del lulo

Una vez cosechado, el lulo puede permanecer viable para el consumo humano bajo condiciones ambientales (17-25 °C) alrededor de dos semanas, tiempo que se puede acortar o extender un poco más dependiendo de las condiciones de temperatura y humedad relativa específicas del lugar en el que se tenga almacenado; bajo refrigeración puede prolongarse significativamente este tiempo de vida útil (Molano-Díaz et al., 2022). El lulo completamente maduro se ablanda y fermenta rápidamente, mientras que la fruta en estado de madurez medio (2 – 3 según la Norma Técnica Colombiana 5093) (ICONTEC, 2002) se mantendrá en buenas condiciones a temperatura ambiente durante 8 días.

El lulo se caracteriza por ser un fruto climatérico con una velocidad respiratoria relativamente baja, alrededor de 13,91 mg de CO₂ kg⁻¹ h⁻¹ durante la cosecha (Ochoa-Vargas et al. 2016), incluso durante el pico climatérico es de 28 mg de CO₂ kg⁻¹ h⁻¹ (Arango et al., 1999). El estado de madurez de cosecha y las condiciones de almacenamiento influyen en la firmeza del fruto, la relación de madurez y otras propiedades fisicoquímicas como color, sabor, aroma, textura (Casierra et al., 2004).

La etapa poscosecha se inicia con una limpieza manual de cada fruta para retirar las “espinas” (pubescencias) que la cubren. Esta limpieza se realiza manualmente con cepillos o telas que no causen abrasión, en fruta seca o mojada a manera de secado. Es conveniente hacer énfasis en el cuidado durante esta etapa, ya que generalmente es la que resulta en las mayores pérdidas por maltrato de la fruta, generalmente se pierde en la etapa poscosecha entre el 10 y el 30% de la producción (Jaime-Guerrero et al., 2022).

En cuanto a la temperatura apropiada de almacenamiento se reportan valores entre 4 y 7.5 °C (Arango et al., 1999; Forero-Cabrera et al., 2017) concluyen que temperaturas inferiores a los 13,5 °C y superiores a los 7 °C son apropiadas para prolongar la vida útil del lulo, mientras que (Molano-Díaz et al., 2022) recomiendan que para prolongar la vida útil del lulo se debe almacenar a 4 °C.

Entre los factores intrínsecos que incrementan las pérdidas poscosecha del lulo se cuentan la relación área superficial/volumen, el tipo de cáscara y el estado de madurez del fruto (Casierra-Posada et al., 2004).

1.4. Empaques con atmósferas modificadas

La técnica utilizada para prolongar la vida útil y preservar la frescura de alimentos basada en el uso del metabolismo propio de frutos y vegetales para modificar las concentraciones de oxígeno y de dióxido de carbono en el interior del empaque es conocida como atmósferas modificadas (Dwi et al., 2021). Mediante el uso de los empaques con atmósferas modificadas (AM) se logra incrementar los niveles de CO₂ y disminuir los niveles de O₂ teniendo como efecto la disminución de la velocidad de aquellos procesos que favorecen la senescencia y el deterioro de éstos, como lo son la respiración y el crecimiento de microorganismos aeróbicos, la respiración del vegetal y la cantidad de agua que pierden por transpiración (Castellanos y Herrera, 2017; Floros y Matsos, 2005).

Para la implementación de esta técnica se cuenta con diversos factores para alcanzar la concentración de gases de equilibrio deseada, los cuales son: la velocidad de respiración del producto, la permeabilidad del empaque a los gases, el volumen libre del empaque, área efectiva de transferencia del empaque, el peso del producto empacado (Yun et al., 2017); la permeabilidad de la película que es a su vez afectada por las corrientes de aire alrededor del empaque, la humedad relativa y la temperatura (Dwi et al., 2021); este último factor también afecta el metabolismo del producto almacenado y como consecuencia el tiempo en que se alcanza la atmósfera deseada (Jalali et al., 2017).

Además de lograr la concentración de gases que ayuda a aumentar la vida útil del vegetal almacenado, el balance en el nivel de gases dentro del sistema de empaque en atmósferas modificadas se debe alcanzar en el menor tiempo posible (Sousa-Gallagher y Mahajan, 2013) y mantener durante todo el período de almacenamiento. Esto se logra mediante el balance de las velocidades de permeación a los gases a través del empaque (material de empaque y los orificios), y la velocidad de respiración del producto empacado. Sin embargo, en circunstancias en las que no es posible alcanzar los niveles deseados usando únicamente procesos de permeación a través del empaque, se hace necesario la inclusión de elementos activos para regular o controlar el nivel de gases de interés como el oxígeno, dióxido de carbono, vapor de agua o etileno (Kuswandi, 2020).

En cuanto a la incorporación de elementos activos para la remoción de oxígeno los más comúnmente utilizados son el hierro, ácido ascórbico, enzimas, sales, ácidos grasos como el ácido

oleico y el linolénico, entre otros (Kuswandi, 2020). Generalmente se utilizan para disminuir o evitar: el daño por bacterias, el desarrollo de sabores desagradables, cambios de color, el desarrollo de compuestos tóxicos (Yan et al., 2022), y reducir la pérdida de vitamina C (Cichello, 2015).

El uso de removedores de oxígeno en la industria alimentaria es completamente seguro, puesto que no libera gases peligrosos durante el proceso de remoción de oxígeno, la dosis letal media (LD₅₀) es baja, por ejemplo la del hierro férrico es de 16 g kg⁻¹ y dado que el peso de un removedor típico de 100 cm³ de oxígeno tiene un peso de 2.5 g (Cichello, 2015), hace falta que una persona promedio de 70 kg ingiera 448 removedores estándar de oxígeno para poner en peligro su vida, lo cual es poco probable de que ocurra.

1.4.1. Ventajas de las atmósferas modificadas

Los empaques con atmósferas modificadas resultan en las siguientes ventajas para la conservación del producto:

- Aumenta la vida útil en días, incluso en semanas comparado con los sistemas tradicionales de empaque y almacenamiento.
- Retrasa la maduración.
- Reduce los daños fisiológicos, la pérdida de peso y el crecimiento de hongos.
- Reduce la velocidad de respiración de los vegetales.
- Ayuda a mantener la calidad en términos de color, olor, humedad.
- No requiere el uso de conservantes, en todo caso los requiere en cantidades menores.
- Permite expandir el área de distribución y reducir los costos de transporte debido a que se pueden ampliar los lapsos de entrega.
- En países subdesarrollados puede tener impactos significativos debido a la insuficiente cantidad de equipos de refrigeración y a que su implementación es de bajo costo.
- Reduce la cantidad de alimentos con baja calidad que es manipulada y distribuida.
- Existen amplias posibilidades de crear marcas que permitan distinguirse de productos similares.
- Es posible centralizar o semicentralizar la etapa de empaque.

(Kargwal et al., 2020) y (Dwi et al., 2021).

1.4.2. Desventajas de las atmósferas modificadas

Entre los posibles inconvenientes o fallos de las atmósferas modificadas se cuentan los siguientes:

- Debido a que las condiciones intrínsecas de los productos varían ampliamente debido al estado de maduración, variedad, localidad de cultivo, nutrición, y la permeabilidad de las películas cambia dependiendo del método de obtención, fabricante, entre otros; no hay configuración estándar para la implementación de estas.
- Requiere inversiones adicionales en maquinaria y mano de obra en el sistema de empaçado.
- Cuando se diseña de modo inadecuado puede causar daños por la creación de condiciones anaeróbicas causando fermentación en los productos (Dwi et al., 2021; Kargwal et al., 2020).

1.4.3. Ventajas de los empaques activos

Los sistemas de empaques activos traen consigo ventajas adicionales al sistema de atmósferas modificadas simple:

- Ayudan a conservar el contenido de vitamina C del producto almacenado.
- Mitigan el pardeamiento.
- Mitigan la rancidez.
- Reducen la cantidad de agua condensada en el interior del empaque visualizándose con facilidad los productos en el interior de este (Yildirim et al., 2018).

1.4.4. Desventajas de los empaques activos

Por otra parte, los empaques activos pueden llegar a presentar algunos inconvenientes:

- Implica un costo adicional al consumidor tanto por los materiales usados, como por el trabajo requerido para disponerlos adecuadamente dentro del empaque.
- Hay riesgo de migración de compuestos hacia los productos empaçados.
- Cuando los elementos activos son incluidos directamente en el material de empaque se puede dificultar los procesos de reciclaje de estos.
- No hay suficiente legislación al respecto que permita a los interesados conocer con facilidad las posibilidades y restricciones a las que podrían verse sometidas las innovaciones en el sector.

- Existe cierta aversión en los consumidores debido al desconocimiento y poca familiaridad con este tipo de empaques (Firouz et al., 2021).

1.4.5. Aplicaciones de los empaques con AM

La técnica de atmósferas modificadas se ha utilizado con éxito en diversos vegetales: brócoli, coliflor, zanahoria, ajo, cebolla, tomate, espinaca, etc., bajo condiciones de refrigeración, sin embargo, a temperatura ambiente también ha logrado tener efectos de preservación, pero menos duraderos. En frutos como: manzana, banano, arándanos, feijoa, uva, guayaba, mandarina, papaya, pera, fresa, entre otros, ha incrementado en todos los casos la vida útil desde un 40 a un 100 % con respecto a los almacenados bajo condiciones atmosféricas (Castellanos y Herrera, 2017).

1.5. Materiales de empaque utilizados

Se ha utilizado materiales flexibles y semirrígidos, de diferentes dimensiones y espesor, así como con perforaciones y sin éstas para la configuración de atmósferas modificadas, entre los materiales más ampliamente utilizados están: polietileno de baja densidad (LDPE), polietileno de alta densidad (HDPE), polipropileno (PP), cloruro de polivinilo (PVC), tereftalato de polietileno (PET), entre otros.

1.6. Empaques activos combinados con AM

Así como con el O₂, a veces es conveniente introducir un componente adicional para mantener el control de la humedad en el interior de un empaque (Garavito et al., 2022). En cuanto al vapor de agua se refiere, se han utilizado a nivel experimental varios materiales para adsorber humedad de la cámara del empaque y evitar la condensación en las superficies de los frutos y empaques, entre los materiales evaluados están: cloruro de calcio, sorbitol, xilitol, cloruro de sodio, cloruro de potasio, gel de sílice y bentonita (Aday et al., 2011), es deseable que los materiales a usar tengan alta capacidad de adsorción y al mismo tiempo una baja o moderada velocidad de adsorción, esto con la intención de no promover la deshidratación del vegetal; en cuanto a la cantidad de material adsorbente a utilizar depende de la velocidad de transpiración del fruto a conservar y del tiempo de almacenamiento esperado (Gaona-Forero et al., 2018).

La disposición de los elementos activos en los empaques se puede hacer de diferentes formas, se pueden arreglar en 'sachets' que consiste en un material altamente permeable al vapor de agua que contiene en el interior el compuesto activo, éstos se pueden colocar en cualquier lugar del envase, tienen la desventaja de que pueden cambiar las propiedades organolépticas del alimento en caso de llegar a estar en contacto con el mismo o si por algún esfuerzo mecánico imprevisto se rompen; otra disposición son las almohadillas, las cuales se colocan usualmente en la parte inferior del empaque para que absorban en este caso el agua que drene del alimento, se utilizan con frecuencia para alimentos con alta humedad y drenaje de agua por parte de los tejidos, debido entre otras cosas al corte de los mismos, también se pueden incorporar los materiales adsorbentes en la película plástica con la que está fabricado el empaque para mejorar la permeabilidad al gas de interés, ésta última modalidad se puede disponer en multicapas (Gaikwad et al., 2018).

1.7. Principio de funcionamiento de los removedores de oxígeno y de humedad

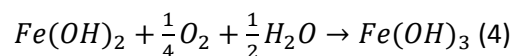
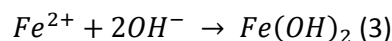
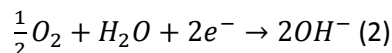
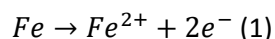
El principio de funcionamiento de los removedores de oxígeno está basado en diferentes reacciones; los que se clasifican como metálicos (polvo de hierro, hierro activado, óxido ferroso, sales de hierro, etc.) se basan en la oxidación del hierro bajo la presencia de humedad y de modo opcional de un catalizador; los orgánicos (ácido ascórbico, tocoferol, hidroquinona, ácido gálico, ácidos poliinsaturados, etc.) se basan en la oxidación de sustratos orgánicos en presencia de un catalizador metálico o una sustancia alcalina; los inorgánicos (sulfato, tiosulfato, dióxido de titanio, etc.) se basan en la oxidación de sustratos inorgánicos ante la irradiación de luz ultravioleta; a base de polímeros (resinas de óxido-reducción, complejos de polímeros metálicos) se basan en la oxidación de componentes poliméricos en presencia de un catalizador metálico, mayormente el cobalto y los que se pueden denominar a base de enzimas (etanol oxidasa, glucosa oxidasa, lacasa) se basan en la inmovilización del oxígeno (Gaikwad et al., 2018).

El principio de funcionamiento de los removedores de humedad se basa en la utilización de materiales higroscópicos que atraigan e interaccionen con las moléculas de vapor de agua que están dentro del empaque y así puedan reducir y mantener la humedad relativa en un rango que evite la condensación de agua en las superficies de los frutos, así se disminuye el desarrollo y proliferación de microorganismos.

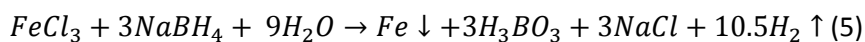
1.7.1. Removedores de oxígeno

A nivel comercial se presentan en diferentes formas: ‘sachets’, incorporados en películas plásticas y etiquetas, siendo la más aceptada por el consumidor cuando se incorpora en el material con que está fabricado el empaque, ésta última modalidad tiene la ventaja de que aumenta el área de exposición del material y por tanto la capacidad de remoción de oxígeno, además de no tener partes móviles en el interior del sistema. Sin embargo, un problema importante es que el empaque debe ser almacenado en un ambiente apropiado (bajo en O_2 y humedad), a veces por largos periodos para impedir la oxidación del hierro antes de tiempo.

Los removedores de oxígeno que emplean hierro en polvo como componente activo constituyen la subcategoría de empaques activos más relevante junto con los adsorbedores de humedad. Estos removedores están basados en el principio de oxidación del hierro hasta hidróxido de hierro (III) en presencia de humedad o sustancias como $FeCl_3$ o $AlCl_3$ ” (Dey y Neogi, 2019). El mecanismo de reacción es descrito por las Ecuaciones 1, 2, 3 y 4.



Respecto a las condiciones de operación, se ha observado que con el incremento de temperatura aumenta la remoción de oxígeno y que las partículas de hierro de dimensiones nanométricas son capaces de remover oxígeno tanto si están en presencia de humedad como si no, éstas se producen por reducción de la sal de hierro en presencia de borohidrato de sodio, tal como se muestra en la Ecuación 5. Así mismo, cuando se ha comparado partículas de hierro en escala de micro dimensiones con respecto a aquellas con nano dimensiones se ha encontrado que estas últimas tienen mejor capacidad de remoción de oxígeno” (Foltynowicz et al., 2017).



Algunas de las desventajas de los removedores de oxígeno basados en la oxidación del hierro son la posible contaminación del alimento por el metal y su dependencia de la temperatura, lo cual puede causar remoción espontánea de oxígeno de forma prematura cuando se está en presencia de altas temperaturas o por el contrario la ralentización de remoción cuando se esté en presencia de bajas temperaturas, éstas representan dificultades técnicas que deben resolverse cuando se trata de empaques para alimentos (Gaikwad et al., 2018). Por otro lado, en un ambiente de baja humedad la velocidad de remoción se verá disminuida bastante si no se utiliza nanopartículas de hierro.

Se espera que para el año en curso el mercado de esta industria alcance los 2,41 billones de dólares liderado por las empresas: Mitsubishi Gas Chemical Company (Japón), Basf SE (Alemania), Ecolab Inc. (Estados Unidos), Clariant Ltd. (Suiza) y Kemira OYJ (Finlandia) (Gaikwad et al., 2018).

1.7.2. Removedores de humedad

Los removedores de humedad regulan la actividad de agua al interior de los empaques controlando el exceso de condensación y suprimiendo así el crecimiento de microorganismos (Choi y Lee, 2013). El modo en que se disponen puede ser variado: sachets (bolsitas), películas plásticas, bandejas y almohadillas tal como se muestra en la Figura 1-1. Todas las modalidades tienen la finalidad de absorber el agua líquida exudada o adsorber parte del vapor de agua transpirada (evaporada) desde el producto empacado (Gaikwad et al., 2019).

En principio, los removedores de humedad se pueden caracterizar por ser sustancias higroscópicas que atraen y atrapan moléculas de agua del medio que les rodea y se pueden dividir en dos tipos: controladores de la humedad relativa (desecantes), adsorben humedad presente en el espacio libre de los empaques mediante reacción química, y los controladores de los exudados líquidos (absorbentes), absorben los fluidos líquidos que drenan de los alimentos mediante reacción física y química (Yildirim et al. 2018).

Entre los compuestos utilizados como removedores de humedad tenemos tres grupos, inorgánicos: bentonita, cloruro de calcio, óxido de calcio, sulfato de calcio, algunas arcillas y gel de sílice; orgánicos: celulosa, fructosa, almidón modificado y sorbitol, y polímeros superabsorbentes:

sílica-gel, cloruro de sodio, copolímeros de almidón, sales de poliacrilato tales como poliacrilato de sodio, etc. (Drago et al., 2020).

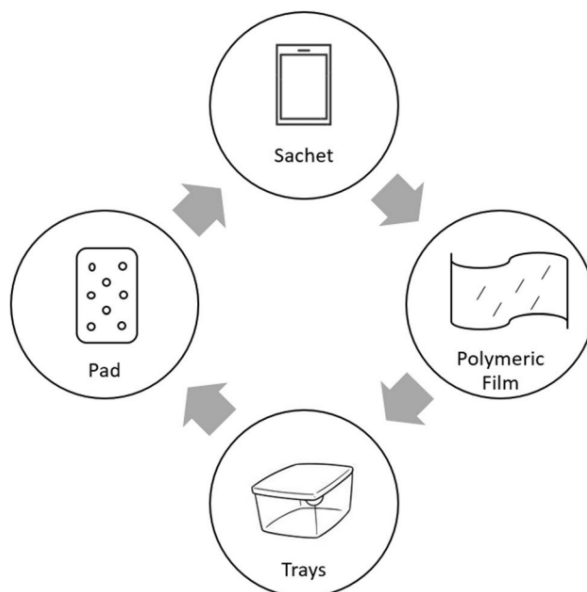


Figura 1-1: Diferentes modos de presentación de los elementos activos para controlar la humedad. Fuente: Gaikwad et al., (2019)

1.7.2.1. Poliacrilato de sodio

El poliacrilato de sodio está compuesto por cadenas largas en las que se repite la siguiente estructura química $[-CH_2-CH(CO_2Na)-]_n$ (Figura 1-2). Este super-adsorbente tiene la capacidad de adsorber agua de 200 a 300 veces su peso; cuando se disuelve en agua forma una solución transparente y espesa debido a la interacción iónica de las moléculas (Al-Nasra y Daoud, 2013). Entre sus propiedades mecánicas destacan: buena estabilidad mecánica, alta resistencia al calor y una fuerte hidratación. Cuando se encuentra en un medio acuoso, los átomos de sodio son desplazados por moléculas de agua que se unen al polímero mediante puentes de hidrógeno, formando un hidrogel. Estas uniones producen que la cadena se alargue y las redes que formaban previamente se hinchen, aumentando enormemente su tamaño.

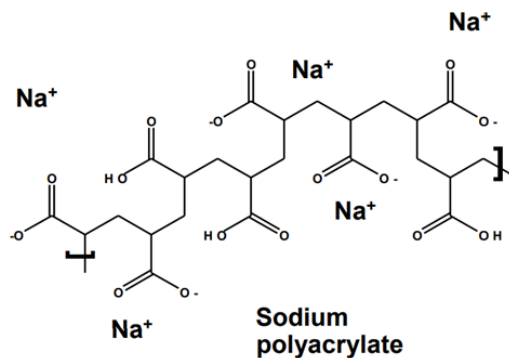


Figura 1-2: Estructura química del poliacrilato de sodio.
Fuente: Hubbe y Koukoulas, (2016)

Algunas de las aplicaciones del poliacrilato de sodio son: espesante, floculante, dispersante, agente reductor de arrastre, adhesivo y revestimiento. Otra característica de este material es que puede ser reutilizado, esto debido a que tiene altas eficiencias de adsorción y desorción de agua. Es un material con una capacidad máxima de adsorción de agua estimada de $777.32 \pm 13.85 \text{ g g}^{-1}$ y una velocidad de adsorción de $41.792 \pm 1.182 \text{ g g}^{-1} \text{ d}^{-1}$ a $23 \text{ }^\circ\text{C}$ (Gaona-Forero et al., 2018). Su aplicación en la industria de alimentos y farmacéutica está aprobada por la agencia federal de fármacos y alimentos del Departamento de Salud y Servicios Humanos de los Estados Unidos (FDA) como un aditivo seguro de ser consumido por vía oral (Liu et al., 2016).

1.8. Avances en el empaque de lulo y frutos similares durante la poscosecha

Forero-Cabrera et al., (2017) evaluaron el efecto de colocar hojas de banano (*Musa paradisiaca*) en el interior de canastillas plásticas y de forma intercalada entre frutos de lulos sobre las características fisicoquímicas de los mismos a diferentes temperaturas y humedad relativa $7 \text{ }^\circ\text{C}$ (HR $90 \pm 5\%$), $10,25 \text{ }^\circ\text{C}$ (HR $85 \pm 5\%$), $13,5 \text{ }^\circ\text{C}$ (HR $60 \pm 5\%$), $16,75 \text{ }^\circ\text{C}$ (HR $50 \pm 5\%$) y $20 \text{ }^\circ\text{C}$ (HR $40 \pm 10\%$).

Las variables que evaluaron fueron porcentaje de pérdida de peso, color, acidez total titulable y módulo de Young; con respecto a la pérdida de peso los datos mostraron que aumenta constantemente con el aumento de la temperatura y con el paso de los días de almacenamiento, con valores alrededor del 2% para la temperatura más baja (7°C) a los 15 días de medición y del 6,5% para la temperatura más alta (20°C), los investigadores aseguran que la inclusión de las hojas

de banano logra reducir el porcentaje de pérdida de peso de los frutos debido a que reduce la velocidad de transpiración, como consecuencia el módulo de Young disminuyó más en aquellos frutos almacenados en empaque tradicional, es decir, sin la inclusión de hojas de bananos ya que perdieron mayor cantidad de agua por transpiración, siendo menos turgentes.

En cuanto al color, los investigadores que llevaron a cabo el trabajo mencionado y citando a (Mejía et al., 2012) afirman que la coordenada b^* en el espacio de color CIELAB es clave para rastrear los cambios de color en el lulo, puesto que de alguna manera resume los cambios externos que suceden en el fruto cosechado y almacenado, en la misma línea afirman que la combinación de temperatura de almacenamiento y empaque juega un papel importante en la degradación de los pigmentos del lulo, esta combinación puede desacelerar los cambios de color debidos a la maduración, en cuanto al por qué sucede así, (Forero-Cabrera et al., 2017) afirman que una menor disponibilidad de oxígeno retrasa que se manifieste el matiz amarillo-anaranjado propio del lulo maduro.

Arango et al., (1999) estudiaron la conservación del lulo antes de alcanzar el pico climatérico en una atmósfera modificada, para esto utilizaron bolsas plásticas con un volumen aproximado de 300 cm^3 , fabricadas con polietileno de baja densidad ($910 - 920 \text{ kg m}^{-3}$), de diferentes espesores: 76, 40 y $29 \mu\text{m}$.

En algunos tratamientos incluyeron un removedor de etileno (Ethylene Control Inc., Selma, California, USA) compuesto de permanganato de potasio impregnado en alúmina porosa, los ensayos fueron llevados a cabo bajo refrigeración donde se controló apropiadamente la humedad relativa, todas las unidades experimentales contenían de 400 a 450 g de lulos por bolsa, las mismas fueron termo selladas luego de ingresarse los frutos.

Llegaron a las conclusiones de que el lulo es un fruto climatérico con una relativa baja velocidad de respiración, incluso durante el climaterio es de ($28 \text{ mg CO}_2 \text{ Kg}^{-1} \text{ h}^{-1}$); que se requiere empacar en bolsas con bajo grosor: $29 \mu\text{m}$ para evitar que se formen condiciones anaeróbicas que comprometa la maduración normal del lulo; la temperatura crítica de almacenamiento es 5°C debido a que a esta temperatura y por debajo de la misma los frutos muestran daños irreversibles por frío, por lo que recomiendan almacenar a $7,5^\circ\text{C}$ si se desea alcanzar una vida útil de 15 días; si

no es económicamente viable la refrigeración en el sitio que se almacene el producto recomiendan utilizar un removedor de etileno que ayuda a prolongar la vida útil hasta 21 días en condiciones de temperatura ambiente y hasta 50 días si se usa en combinación con refrigeración.

Llerena Silva et al., (2020) evaluaron el efecto de atmósferas modificadas, sobre la capacidad antioxidante de los frutos: arazá (*Eugenia stipitata* McVaugh), lulo (*Solanum quitoense* Lam.), y tomate de árbol (*Solanum betaceum* Cav.). La capacidad antioxidante fue evaluada por dos métodos: (ABTS) ácido 2,2'-azino-bis-3-etilbenzotiazolona-6-sulfónico y (DPPH) 1,1-difenil-2-picrilhidrazilo a los 1, 4, 7, y 10 días. Los tratamientos de atmósferas modificadas (AM) fueron: (A: 2,5% O₂ y 5,0% CO₂); (B: 2,5% O₂ y 2,5% CO₂); y (C: 80% O₂ y 10% CO₂). Llegaron a las conclusiones de que los frutos climatéricos: arazá y lulo respondieron mejor a los tratamientos de atmósferas modificadas que los no climatéricos como el tomate de árbol y que la capacidad antioxidante del lulo aumenta después de ser expuestos a la atmósfera modificada bajo condiciones de refrigeración.

Agudelo-Rodríguez et al. (2020) Evaluaron el efecto de empaques activos con removedor de humedad (poliacrilato de sodio) en diferentes cantidades (0, 9,1 y 18,2 g/empaque) en el que a la vez se alcanzó a modificar la atmósfera a 4,6% de CO₂ y 17,2% de O₂ ya que los envases estaban totalmente sellados y sólo había intercambio gaseoso a través de una perforación de 1,15 mm; sobre las variables: índice de deterioro, firmeza, pH, sólidos solubles totales y color del tomate: (*Solanum lycopersicum* Mill. var.: Chonto), y encontraron que no hubo diferencias significativas en las variables estudiadas a lo largo de los 17 días en que evaluaron las diferentes configuraciones de empaques, aunque para la firmeza si fue notable la diferencia en especial entre el empaque sin adsorbedor de humedad y el que contenía la mayor cantidad de adsorbedor de humedad que presentó los menores valores de firmeza a los 17 días de evaluación, detrimento que se vio compensado con un mejor estado fitosanitario de los frutos almacenados bajo esta configuración de empaque y la ausencia de condensación en el interior de los mismos.

Castellanos et al., (2016) utilizaron un sistema de ecuaciones para modelar sistemas de empaques de atmósferas modificadas y predecir con facilidad y alto grado de acierto la variación en la concentración de gases en el interior de empaques contentivos de tomate (*Solanum lycopersicum* Mill), para ello hicieron uso de la ecuación de Michaelis-Menten con inhibición

anticompetitiva por CO_2 para describir la respiración del fruto, para la transferencia de gases a través de micro perforaciones realizadas en los empaques las ecuaciones de difusión de Fick, y la ley de Arrhenius para considerar los efectos de la temperatura sobre los parámetros dependientes de la misma, los materiales de empaque que utilizaron fueron polipropileno (PP), ácido poliláctico (PLA) y polietileno de baja densidad (LDPE), los tomates fueron almacenados por 12 días a $13,5^\circ\text{C}$, entre los resultados principales destaca el ajuste del modelo propuesto a los datos experimentales con un coeficiente de determinación R^2 entre 0,89 y 0,98 para la concentración de oxígeno y entre 0,83 y 0,97 para la concentración del dióxido de carbono, concluyen que el modelo se puede usar para definir la superficie requerida del empaque y el diámetro de las perforaciones a realizar para alcanzar una determinada concentración de O_2 en el espacio libre del empaque.

2. Capítulo 2. Materiales y métodos

2.1. Frutos y reactivos

2.1.1. Material vegetal

Los frutos de lulo cv. Castilla se obtuvieron de un cultivo comercial de un año y medio en el municipio de Ramiriquí, Boyacá, vereda Potreros, finca la Loma, ubicado a 2325 m.s.n.m latitud 5° 24' 53.8" N longitud 73° 20' 04.8" W con precipitación promedio anual de 1135 mm, temperatura entre 8 y 20 °C y humedad relativa media de 85%, luego se transportaron al Laboratorio de Empaques y Vida Útil de Alimentos de la Universidad Nacional de Colombia (Bogotá, Colombia; P = 74,660 kPa). Del lote se seleccionaron los frutos sin evidencia de daño mecánico o microbiológico. Estos fueron entonces sometidos a un proceso de limpieza y desinfección con agua haciendo inicialmente un lavado con agua corriente, luego haciendo una inmersión en una solución de 100 ppm (v/v) de hipoclorito de sodio durante un minuto y finalmente se dejaron secar al ambiente para luego realizar los ensayos de respiración y de empaque activo.

2.1.2. Limadura de hierro

Se obtuvo a partir del lijado de esponjillas de acero al carbono marca TidyHouse (Koba Colombia S.A.S., Bogotá, Colombia) luego fueron conservadas hasta su uso en un recipiente de vidrio sellado apropiadamente para evitar la oxidación prematura.

2.1.3. Poliacrilato de sodio

El poliacrilato de sodio en polvo fue adquirido en la empresa An-Gel® (Bogotá, Colombia) con tamaños de 0,060 a 0,150 mm.

2.2. Determinación de la cantidad de oxígeno removida por la limadura de hierro

El primer experimento realizado consistió en la evaluación del efecto de diferentes cantidades de limadura de hierro sobre la cantidad de oxígeno removido en un volumen de aire conocido. Para ello se colocaron 1 y 2 g de limadura en cápsulas de Petri que a su vez se introdujeron en un recipiente de 1730 cm³ sellado herméticamente. Las capsulas con la limadura se pusieron sobre un soporte plástico de tal manera que quedaran ubicados en el centro, a media altura dentro del recipiente. Dentro de este último también se colocó otra cápsula de Petri en la parte inferior con 10 cm³ de agua destilada para mantener altos los niveles de humedad relativa y de este modo facilitar la oxidación del hierro. Para hacer el seguimiento del nivel de O₂ en fracción molar dentro del recipiente a lo largo del tiempo se empleó un analizador óptico, marca OpTech®-O₂ Model P (MOCON, Inc., Minneapolis, MN, EUA) el cual cuenta con un sensor de platino que es sensible a la concentración de oxígeno a la que está expuesto, éste se adhirió a la parte interna de la cámara hermética.

Los recipientes herméticos con el montaje antes descrito fueron conservados en una cámara modelo C240 (DiES, Medellín, Colombia) a $23,0 \pm 0,5$ °C, las medidas del nivel de O₂ se tomaron regularmente a lo largo de 20 días de evaluación. El experimento fue realizado por triplicado y se reportó el promedio y la desviación estándar de 3 recipientes. A partir de los datos obtenidos se estimó el comportamiento y la capacidad de remoción de O₂ por parte de la limadura de hierro utilizada.

2.3. Determinación experimental de la cantidad de oxígeno removida con diferentes proporciones de limadura de hierro y poliacrilato de sodio.

Como se mencionó previamente, para que la oxidación del hierro se lleve a cabo se requiere la presencia de humedad. Para maximizar la presencia de humedad y con ello la remoción de O₂ se hizo la evaluación del efecto de diferentes mezclas de limadura de hierro y poliacrilato de sodio a 23 °C con un montaje similar al descrito arriba solo para la limadura de hierro. Los tratamientos evaluados consistieron en diferentes proporciones en peso de los materiales activos: limadura de hierro y poliacrilato de sodio 1:1, 1:0,33 y 1:3, respectivamente, tal como se muestra

en la Figura 2-1. En todos los casos se usó 1 g de limadura de hierro. Los componentes se colocaron uniformemente mezclados en capsulas de Petri dentro de una cámara cerrada de 921,5 cm³ que a su vez contenía otra cápsula de Petri con 10 cm³ de agua destilada. Posteriormente se midió la fracción molar de oxígeno con el medidor óptico de O₂ en los recipientes cerrados igual que en el anterior experimento. Las medidas se tomaron regularmente a lo largo de 20 días de evaluación de tres réplicas y se reportó el promedio y la desviación estándar correspondiendo cada unidad experimental a un recipiente cerrado. A partir de los datos obtenidos en esta etapa se determinó la proporción de limadura de hierro y poliacrilato con la mayor capacidad de remoción de O₂.

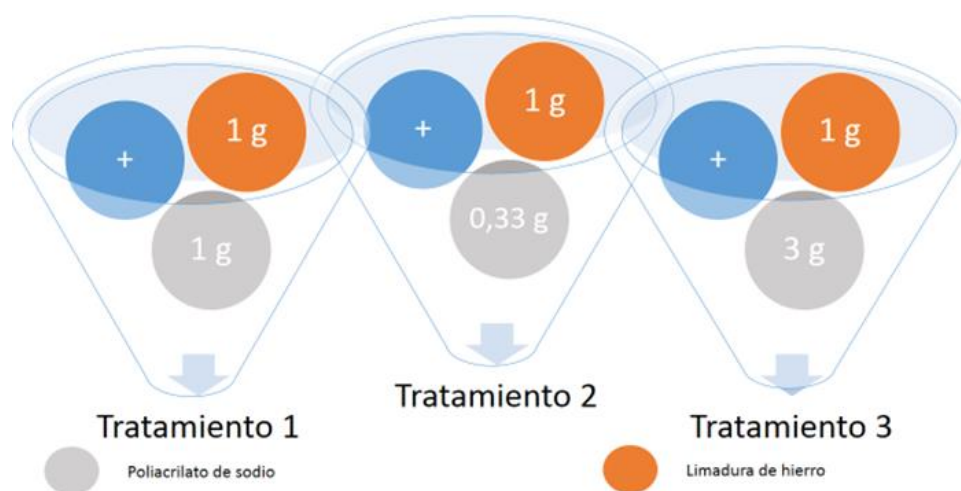


Figura 2-1: Experimento para la determinación de la proporción de limadura de hierro/poliacrilato de sodio más eficiente en la remoción de oxígeno a condiciones ambientales

2.3.1. Experimentos con sachets y modelamiento matemático de la cinética de remoción de oxígeno

Una vez obtenida la mejor proporción de componentes para la remoción de O₂, se hicieron experimentos con esta mezcla a tres temperaturas de interés: 5 °C (temperatura de refrigeración), 12 °C (temperatura de refrigeración comercial) y 23 °C (temperatura ambiente de referencia), utilizando 1 g de la mezcla activa en la misma proporción y con montaje experimental similar al definido antes, bajo dos modalidades de exposición al aire: distribución uniforme en cápsulas de Petri e incorporación de los elementos activos en sachets de papel vegetal de algodón poroso, para de esa forma tener en cuenta en los cálculos el efecto de barrera que pudiese ofrecer el material constitutivo del mismo. Se tomaron datos de la fracción molar de O₂ a lo largo del tiempo de forma

regular para cada temperatura y mezcla activa haciendo el experimento por triplicado y reportando los valores promedio y la desviación estándar.

A partir de los datos obtenidos se propuso un modelo cinético de pseudo primer orden, Ecuación 6, para describir el comportamiento experimental evidenciado. En este modelo la disminución de la fracción molar de O₂ (y_{O2}) con respecto al tiempo (t) para el recipiente hermético de volumen libre constante (V) estará en función del peso del removedor de O₂ y de la cantidad de O₂ removida (C_{O2}) en un momento dado.

$$V \frac{dy_{O_2}}{dt} = -W_{scv} k_{scv} (C_{O_2, max} - C_{O_2}) \quad (6)$$

En la Ecuación 6, W_{scv} es el peso de removedor de O₂ (kg), k_{scv} es el coeficiente de velocidad de remoción (d⁻¹) y C_{O2,max} es la cantidad máxima de O₂ que puede ser removida por peso de removedor (cm³ kg⁻¹). La cantidad de O₂ removida (C_{O2}) puede estar en función de la fracción molar inicial (y_{O2,ini}) y de la fracción molar en un momento dado (y_{O2}) de la siguiente forma.

$$C_{O_2} = \left(\frac{V}{W_{scv}} \right) (y_{O_2, ini} - y_{O_2}) \quad (7)$$

Reemplazando la Ecuación 7 en la Ecuación 6 e integrando esta última se puede representar la fracción molar de O₂ en función del tiempo (t), Ecuación 8, para el recipiente hermético con el removedor.

$$y_{O_2} = y_{O_2, ini} + \left(\frac{W_{scv} C_{O_2, max}}{V} \right) (e^{-k_{scv} t} - 1) \quad (8)$$

El efecto de la temperatura (T) en la cinética de remoción de O₂ fue incluido utilizando la ecuación de Arrhenius, Ecuación 9, para el coeficiente de velocidad de remoción de O₂ (k_{scv}).

$$k_{scv} = k_{scv, ref} e^{-\frac{E_a}{R} \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_{ref}} \right)} \quad (9)$$

En la Ecuación 9, E_a corresponde a la energía de activación del proceso de remoción de O₂ (kJ mol⁻¹) y k_{scv,ref} (d⁻¹) es el coeficiente de velocidad de remoción a la temperatura de referencia

(T_{ref}), en este caso 23 °C [296.15 K] (Gaona-Forero, et al., 2018). La cantidad máxima de O₂ removido ($C_{O_2,max}$) se consideró independiente de la temperatura puesto que está relacionada exclusivamente con el material de remoción, en esta investigación con el hierro, R es la constante de gases (0.008314 kJ mol⁻¹ K⁻¹).

Para obtener los parámetros de remoción de O₂ en las Ecuaciones 8 y 9, es decir, $C_{O_2,max}$, $k_{scv,ref}$ y E_a se llevó a cabo una regresión multiparamétrica no lineal usando la herramienta Solver (Método de resolución evolutiva) de Excel® (Microsoft Corporation., Redmond, WA, USA). La regresión de los parámetros se llevó a cabo por minimización de la sumatoria de los cuadrados de los errores residuales entre los datos experimentales y los calculados a partir de las Ecuaciones 8 y 9 (Garavito et al., 2022).

El procedimiento de regresión descrito anteriormente se empleó para modelar la cinética de remoción de oxígeno de la mezcla de hierro y poliacrilato de sodio tanto expuesta al aire en cápsulas de Petri como para la contenida en 'sachets' estimando los parámetros del modelo de pseudo primer para ambas condiciones.

2.4. Experimentación y modelado matemático de la respiración del lulo

2.4.1. Determinación experimental de la velocidad de respiración de lulo

La determinación experimental de la respiración de los frutos se llevó a cabo a diferentes temperaturas utilizando el método de sistema cerrado de acuerdo con la metodología propuesta por diferentes autores (Castellanos et al., 2016; Gómez et al., 2019). Las muestras con un peso total de $0,408 \pm 0,039$ kg (3 frutos) se colocaron en recipientes plásticos sellados herméticamente con un espacio libre promedio de 1809 cm³. Los contenedores fueron almacenados en cámara climática marca DiES modelo C240 a: 5 °C (temperatura de refrigeración), 12 °C (temperatura de refrigeración comercial) y 23 °C (temperatura ambiente de referencia) ± 1 °C y 75% $\pm 2,5\%$ de humedad relativa (HR). Las concentraciones de CO₂ y O₂ en el espacio de cabeza se midieron a diferentes intervalos de horas hasta que la cámara alcanzaba valores cercanos al 2 % de O₂ esto con el fin de no inducir procesos de respiración anaeróbica en los frutos, la concentración de CO₂ se midió tomando una muestra de gas de 5 cm³ a través de un sello de goma situado en la parte

superior del contenedor mediante un analizador electrónico Dansensor CheckPoint 3® (Mocon Inc., Minneapolis, MN, EE. UU.), la de O₂ mediante un analizador óptico, marca OpTech®-O₂ Model P (MOCON, Inc., Minneapolis, MN, EUA), el cual cuenta con un sensor de platino sensible a la concentración de oxígeno a la que está expuesto que se adhirió a la parte interna de las cámaras herméticas. Todas las pruebas bajo los diferentes ajustes de temperatura se llevaron a cabo por triplicado, reportando el valor medio de las mediciones.

En la cinética de respiración, el consumo de O₂ (r_{O_2}) y las velocidades de producción de CO₂ (r_{CO_2}) de las muestras de lulos se estimaron experimentalmente para cada temperatura utilizando las Ecuaciones 10 y 11 (Castellanos et al., 2016):

$$r_{O_2}(t) = \left(\frac{V}{W}\right) \left(\frac{y_{O_2}(t-1) - y_{O_2}(t+1)}{\Delta t}\right) \quad (10)$$

$$r_{CO_2}(t) = \left(\frac{V}{W}\right) \left(\frac{y_{CO_2}(t-1) - y_{CO_2}(t+1)}{\Delta t}\right) \quad (11)$$

Donde, $r_{O_2}(t)$ y $r_{CO_2}(t)$ son las velocidades de consumo de oxígeno y de producción de dióxido de carbono por los frutos en el tiempo (t) ($\text{cm}^3 \text{kg}^{-1} \text{d}^{-1}$), V es el volumen libre del empaque (cm^3), W es el peso de los frutos (kg), $y_{O_2}(t-1)$ y $y_{CO_2}(t-1)$ son las fracciones molares de O₂ y CO₂ en la medición anterior al tiempo (t), $y_{O_2}(t+1)$ y $y_{CO_2}(t+1)$ son la siguiente medición al tiempo (t). Δt es el tiempo transcurrido entre ($t - 1$) y ($t + 1$).

2.4.2. Modelo matemático de la cinética de respiración

Para representar las velocidades de respiración en función de la concentración de O₂ y CO₂ se utilizó el modelo enzimático de Michaelis-Menten con inhibición anticompetitiva por CO₂ dado que este modelo ha sido empleado previamente por varios autores para representar la respiración en frutas (Castellanos et al., 2017; Garavito et al., 2021; Rahayu et al., 2021). En este modelo a medida que el nivel de CO₂ aumenta alrededor del producto, la velocidad de respiración de este se ve reducida dado que es más difícil para las moléculas de O₂ alcanzar las células vegetales. La velocidad de consumo de oxígeno r_{O_2} fue representada mediante la Ecuación 12.

$$r_{O_2} = \frac{r_{O_2}^{max} y_{O_2}}{K m_{O_2} + y_{O_2} \left(1 + \frac{y_{CO_2}}{K m_{CO_2}}\right)} \quad (12)$$

Donde $r_{O_2}^{max}$ es la velocidad máxima de consumo de O_2 ($cm^3 kg^{-1} d^{-1}$), Km_{O_2} es la constante de Michaelis y Kmu_{CO_2} es la constante de inhibición debida al CO_2 . La velocidad de producción de CO_2 fue representada con una ecuación similar a la 12 únicamente cambiando los parámetros a $r_{CO_2}^{max}$, Km_{CO_2} y Kmu_{CO_2} (Castellanos et al., 2017). Los datos experimentales y_{O_2} y y_{CO_2} obtenidos a cada temperatura sirvieron para ajustar los parámetros cinéticos de la Ecuación 12, por regresión no lineal multiparamétrica integrando las ecuaciones de respiración, de Arrhenius y los datos experimentales usando la herramienta Solver (Método de resolución evolutiva) de Excel® (Microsoft Corporation., Redmond, WA, USA). La regresión tuvo como objetivo minimizar la suma de cuadrados del error entre los datos experimentales y los modelados (Garavito et al., 2022).

2.5. Configuración de diferentes sistemas de empaque: tradicional, atmósferas modificadas y con remoción de Oxígeno

En el espacio libre del empaque las concentraciones de oxígeno y dióxido de carbono pueden ser representadas haciendo un balance de masa para cada gas en el cual se considera el consumo de oxígeno y la generación de dióxido de carbono por los frutos, la velocidad de adsorción por los elementos activos, la transferencia a través del material de empaque y los cambios de presión o volumen. Como el material de empaque utilizado era rígido, pudo considerarse constante el volumen interno de este a lo largo del tiempo de almacenamiento. Asumiendo que la atmósfera en el interior del empaque antes de hacer el sellado es similar a la externa, cuyos valores de referencia son conocidos se pudo hacer un balance de masa para cada gas en lo sucesivo mediante las Ecuaciones 13 y 14.

Para el oxígeno, el cambio en la fracción molar con respecto al tiempo se representa de la siguiente forma:

$$V \frac{dy_{O_2}}{dt} = \left(K_{TRO_2} + \frac{APQ_{O_2}}{L} \right) (y_{O_2,out} - y_{O_2}) - Wr_{O_2} - W_{rem,O_2} r_{rem,O_2} \quad (13)$$

Para el dióxido de carbono:

$$V \frac{dy_{CO_2}}{dt} = \left(K_{TRCO_2} + \frac{APQ_{CO_2}}{L} \right) (y_{CO_2,out} - y_{CO_2}) + Wr_{CO_2} \quad (14)$$

Donde y_{O_2} y y_{CO_2} son las fracciones molares respectivas de oxígeno y dióxido de carbono en el empaque, $y_{O_2,out}$ y $y_{CO_2,out}$ son las fracciones molares respectivas de oxígeno y dióxido de carbono en el ambiente, W es el peso de los frutos (kg), Q_{O_2} y Q_{CO_2} son los coeficientes de permeabilidad del material de empaque al oxígeno y al dióxido de carbono (para este trabajo se tomaron de Garavito et al., 2022), r_{O_2} y r_{CO_2} son las velocidades de consumo de oxígeno y de producción de dióxido de carbono por parte del vegetal, K_{TRO_2} y K_{TRCO_2} son los coeficientes de transmisión de oxígeno y dióxido de carbono a través de la perforación realizada en la película de PLA, A es el área superficial de la película de PLA del empaque por la cual se transfieren los gases, L es el espesor de la película de empaque, P es la presión del sistema, r_{rem,O_2} es la velocidad de remoción de oxígeno del elemento activo: limadura de hierro + poliacrilato de sodio y W_{rem,O_2} es el peso del removedor de oxígeno (Agudelo-Rodríguez et al., 2020).

Los coeficientes de transmisión de gas a través de la perforación en el material de empaque K_{TRO_2} y K_{TRCO_2} fueron calculados a partir de las Ecuaciones 15 y 16. (Castellanos et al., 2016):

$$K_{TR,O_2} = \frac{D_{O_2,aire}(0.5N\pi d^2)}{l+0.5 N^{0.5}d} \quad (15)$$

$$K_{TR,CO_2} = \frac{D_{CO_2,aire}(0.5N\pi d^2)}{l+0.5 N^{0.5}d} \quad (16)$$

En las ecuaciones anteriores, $D_{O_2,aire}$ y $D_{CO_2,aire}$ corresponden a la difusividad del O_2 y CO_2 en aire (los datos se obtuvieron también de Castellanos et al., 2016) N es el número de perforaciones (una en este caso), d es el diámetro de las perforaciones (cm), l es el espesor de la película (cm).

2.6. Evaluación del efecto de los empaques con atmósfera modificada y un tratamiento control sobre las características de calidad del lulo fresco almacenado

Se configuraron 18 bandejas por tratamiento contentivas de 3 lulos con un peso total promedio de $0,271 \pm 0,021$ kg, ya que las muestras se tomaron de forma destructiva, es decir, se extrajeron los frutos se midieron las variables y posteriormente no se volvieron a utilizar, los tratamientos consistieron en (1) un control: bandejas macroperforadas de tereftalato de polietileno (PET) sin atmósfera modificada, este es el modo en que se expone tradicionalmente el

producto al consumidor; (2) tratamiento de empaque rígido como base y cubierto con película biodegradable de ácido poliláctico (PLA) perforada sin elemento activo; (3) tratamiento de empaque rígido como base y cubierto con película biodegradable (PLA) con 4 gramos de elemento activo y (4) tratamiento de empaque rígido como base y cubierto con película biodegradable (PLA) con 8 g de elemento activo. El grosor de la película de ácido poliláctico (PLA) utilizada fue de 0,044 mm y del empaque rígido 0,47 mm, respectivamente, estos espesores fueron medidos utilizando un micrómetro digital marca Mitutoyo modelo MDC-1" PJ (Mitutoyo Corporation, Kanagawa, Japón).

La temperatura a la cual se condujo el experimento fue de 12 ± 1 °C que es la temperatura de refrigeración comercial de góndola o anaquel, en cámara climática marca DiES modelo C240 con HR de $75 \pm 2\%$ y en cámara climática marca Memmert modelo ICH110 a la misma temperatura y humedad relativa y desviaciones estándar respectivas de $\pm 0,5$ °C y 1-2 %. Los frutos fueron almacenados por un tiempo total de 30 días.

En los empaques con atmósferas modificadas se hizo una perforación de $0,35 \pm 0,02$ mm en la película de PLA con una aguja delgada. El tamaño de la perforación se determinó utilizando un microscopio óptico Olympus CX31 (Olympus Corporation, Tokio, Japón).

Al inicio del ensayo se hizo una medición inicial de todas las variables que fue el punto de partida para todos los experimentos, se midió: peso, color, apariencia general, sólidos solubles totales, acidez total titulable, pH, diámetro, fuerza máxima de compresión, desplazamiento ante la fuerza máxima de compresión y variables derivadas como el módulo de Young y la relación de madurez, posteriormente cada cinco días se evaluaron las mismas características de la siguiente forma:

Apariencia General (daños por microorganismos y senescencia de los frutos): se estimó visualmente mediante una escala discreta entre 0 y 5 basado en la cantidad de daño y lesiones evidentes en la superficie y pulpa de los frutos almacenados, donde 5 corresponde a frutos sin daños evidentes (Área afectada (Aa) = 0%), 4 a frutos ligeramente dañados (Aa = 1-15%), 3 a frutos moderadamente dañados (Aa = 15-30%), 2 a frutos con daños severos (Aa = 30-50%) y 1 a frutos totalmente dañados (Aa > 50%). La apariencia general se reportó como el promedio de las

valoraciones recibidas por cada empaque y se redondeó al número entero más cercano (Castellanos et al., 2016a).

Módulo de Young: se midió la resistencia de los frutos a la compresión (N) con máquina de ensayo de tracción marca Lonroy modelo LR C-001 (Dongguan Lonroy Equipment Co., Ltd., Guangdong, China), hasta que se fracturaba el fruto por efecto del esfuerzo ejercido, al mismo fruto se le midió el diámetro en el sentido en que se ejercía el esfuerzo y la deformación (cm) a la que cedía el fruto por efecto de la compresión, con estos datos se hizo el cálculo del módulo de Young con la siguiente fórmula.

$$\text{Módulo de young} = \frac{\text{Fuerza máxima} * \text{diámetro del fruto}}{\text{Área} * \text{desplazamiento} * 100} \quad (17)$$

El área fue calculada mediante la siguiente fórmula:

$$\text{Área} = \frac{\pi * \text{desplazamiento}^2}{4} \quad (18)$$

pH: se tomó una muestra de 1 cm³ de jugo proveniente de la mezcla del zumo extraído de frutos de las bandejas de cada tratamiento, luego se diluyó y homogeneizó en agua destilada en una proporción 1:14 y se midió el pH con un titulador digital Metrohm 916 Ti-Touch (Metrohm AG, Herisau, Suiza), mediante la inmersión del electrodo.

Acidez total titulable: el titulador digital anteriormente mencionado entre los valores que reporta al analizar la acidez está la cantidad de hidróxido de sodio (0,1N) vertida para neutralizar el ácido presente en la solución, con este dato y conociendo que el principal ácido constitutivo de la pulpa del lulo es el ácido cítrico (Mejía et al., 2012) se calculó la acidez total titulable con la Ecuación 19.

$$\%ATT = \frac{\text{cm}^3 \text{ de NaOH} * \text{Normalidad} * \text{peso eq. ácido} * 100}{\text{Peso de la muestra} * 1000 \text{ cm}^3} \quad (19)$$

Sólidos solubles totales (%p/p): se determinó midiendo el índice de refracción del jugo obtenido de la pulpa de muestras de lulos en un refractómetro digital Hanna® modelo HI96801 (Hanna Instruments, Woonsocket, Rhode Island, Estados Unidos)

Color: el color de los frutos se midió en un punto que fuese representativo del color predominante del fruto ubicado a nivel ecuatorial con respecto a un eje imaginario que va del pedúnculo al ápice. La medición se realizó usando un espectrofotómetro 3nh modelo ys3020 (Shenzhen 3nh Technology Co., Ltd., Shenzhen, China), reportando las coordenadas del espacio de color CIELAB L*, a* y b*. Se hizo una medición por bandeja, reportando el valor medio de cada tratamiento. “L*” indica la luminosidad, donde 0 es negro y 100 blanco. Valores de “a*” < 0 indican tendencia hacia el verde y >0 hacia el rojo. “b*” < 0 indica tendencia hacia el azul y > 0 hacia el amarillo.

Relación de madurez: se calculó mediante la relación existente entre la cantidad de sólidos solubles totales y la acidez total titulable en determinado momento, mediante la Ecuación 20.

$$\text{Relación de madurez} = \frac{\text{sólidos solubles totales (\%)}}{\text{acidez total titulable (\%)}} \quad (20)$$

Pérdida de peso PP (%): se identificaron y pesaron los frutos correspondientes a cada bandeja con balanza marca OPTIKA® modelo B214AI (OPTIKA S.r.l. Ponteranica, Italia) al inicio del ensayo y luego en el día en que se extrajeron para analizar las otras variables de acuerdo con la planificación prevista, con los datos obtenidos se calculó el porcentaje de pérdida de peso mediante la siguiente fórmula:

$$\% \text{ de PP} = \frac{\text{Peso inicial} - \text{Peso final}}{\text{Peso inicial}} * 100 \quad (21)$$

Análisis estadístico

Para determinar la capacidad predictiva del modelo de empaque activo, se comparó los datos experimentales y los datos predichos del oxígeno removido o consumido para los experimentos donde se evaluó el removedor de O₂ y para los experimentos donde se evaluó la velocidad de respiración de los lulos, respectivamente, en este último también se evaluó el ajuste entre los datos experimentales y los modelados para la producción de CO₂, calculándose el coeficiente de determinación ajustado R²_{adj} en cada uno de los modelos.

Para evaluar el efecto del empaque activo y el efecto del adsorbedor sobre la calidad de los lulos, primero se realizó un análisis de componentes principales para visualizar la existencia o no de diferencias significativas entre los tratamientos al analizar todo el conjunto de variables, luego con el método de Wilks-Lambda se seleccionaron las variables (un tercio de las mismas) que más contribuyen a diferenciar los tratamientos y se realizó nuevamente el análisis de componentes principales, luego se hizo prueba de normalidad con la prueba de Shapiro-wilk al 0,05 de significancia (Royston, 1982) por cada variable por cada día de medición, se hizo un análisis de varianza de dos vía (ANOVA) para las variables evaluadas, las diferencias significativas entre medias fueron estimadas mediante la prueba HSD de Tukey a un nivel de significancia de 0,05, los cálculos se hicieron mediante el uso del software Matlab (MathWorks, Inc., Natick, MA, EUA)” (Agudelo-Rodríguez et al., 2020).

3. Capítulo 3. Resultados y Discusión

3.1. Modelado de la cinética de remoción de oxígeno de la mezcla: limadura de hierro más poliacrilato de sodio

En la primera etapa de desarrollo de la investigación se procedió a evaluar el proceso de remoción de oxígeno por parte de la limadura de hierro en diferentes cantidades: 1 y 2 gramos a 23 °C, los resultados se muestran en la Figura 3-1.

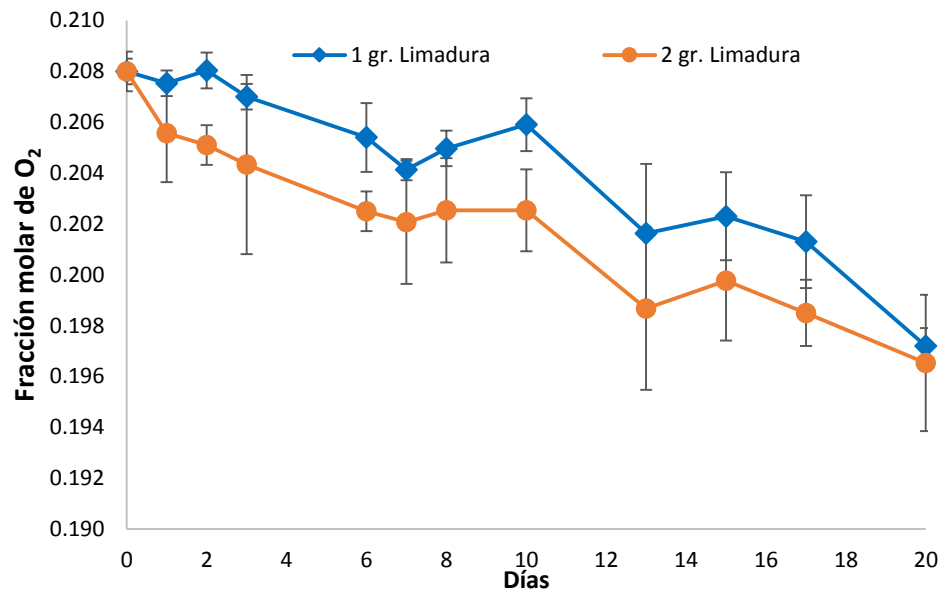


Figura 3-1: Dinámica de remoción de oxígeno por limadura de hierro en diferentes cantidades a 23 °C. Las barras de error corresponden a la desviación estándar para $n = 3$.

A partir de la Figura 3-1 se observa el descenso de la fracción molar de oxígeno en el aire contenido en el recipiente a medida que avanzan los días, aunque a una velocidad muy baja ya que en el transcurso de 20 días de evaluación la diferencia en la fracción molar de oxígeno entre el contenido inicial y final de oxígeno fue en promedio de 0,0108. Los datos también muestran

períodos de descenso constante y de estabilidad relativa de forma alterna, ya que entre el inicio del experimento y el día 7 se observa un descenso constante en la fracción molar de oxígeno, entre el día 7 y 10 una estabilidad relativa, para luego descender hasta el día 13, mantenerse relativamente estable entre el día 13 y 17 y continuar el descenso hasta el día 20.

La baja velocidad de remoción de oxígeno es debida a que si bien la humedad relativa en el interior del recipiente podría ser elevada por la inclusión de la cápsula de Petri con agua libre, ésta no es suficiente para desencadenar con rapidez el proceso de oxidación del hierro, esto va en línea con lo observado en la dinámica de remoción de oxígeno caracterizada por períodos alternos de descenso y de estabilidad relativa, el primero correspondería a un lapso de suficiente hidratación de la limadura de hierro y el segundo a un período de condensación de agua en la superficie para luego de superar las capas oxidadas entrar en contacto con las reducidas.

A partir de los resultados obtenidos se determinó que un gramo de limadura de hierro oxidaba una cantidad de aire que no era considerablemente diferente de la oxidada por dos gramos de limadura de hierro estando uniformemente distribuidos en un área de 28,3 cm² (área de una cápsula de Petri). El siguiente paso en la configuración del elemento activo fue la determinación de la proporción más favorable de poliacrilato de sodio con respecto a la cantidad de limadura de hierro seleccionada (1 g) para potenciar la velocidad y capacidad de remoción de oxígeno, la Figura 3-2 muestra los resultados.

A partir de la gráfica se observa la diferencia significativa en la velocidad de remoción de oxígeno entre los tratamientos en los que se mezcló la limadura de hierro con el poliacrilato de sodio con respecto al tratamiento donde sólo se incluyó la limadura de hierro, entre las mezclas evaluadas la proporción de una parte de poliacrilato de sodio por una parte de limadura de hierro resultó tener mayor velocidad de remoción de oxígeno con respecto a las proporciones de 1:0,33 y 1:3, para el período de tiempo evaluado, también se observa como el tratamiento de 1:3 descendió acentuadamente a partir del día 17 por lo que habría que evaluarlo por un tiempo más prolongado para verificar que se mantenga la tendencia, esto podría ser de interés para frutos cuya vida útil poscosecha esperada sea superior a 30 días tales como las manzanas (*Malus domestica*). Dado que el vegetal a trabajar en la presente investigación no tiene una vida útil poscosecha esperada superior a los 30 días se seleccionó la proporción de 1:1 para evaluar la velocidad y

capacidad de remoción de oxígeno de la misma en cápsulas de Petri a tres temperaturas de interés, los resultados se muestran en la Figura 3-3.

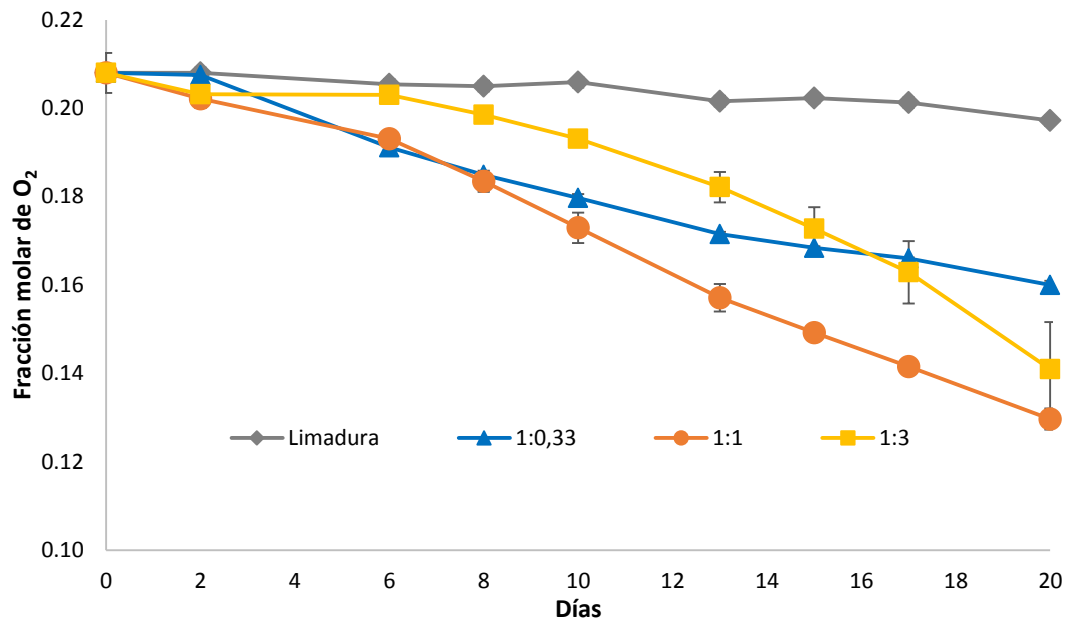


Figura 3-2: Dinámica de remoción de oxígeno por diferentes proporciones de limadura de hierro y poliacrilato de sodio a 23 °C. Las barras de error corresponden a la desviación estándar para n = 2

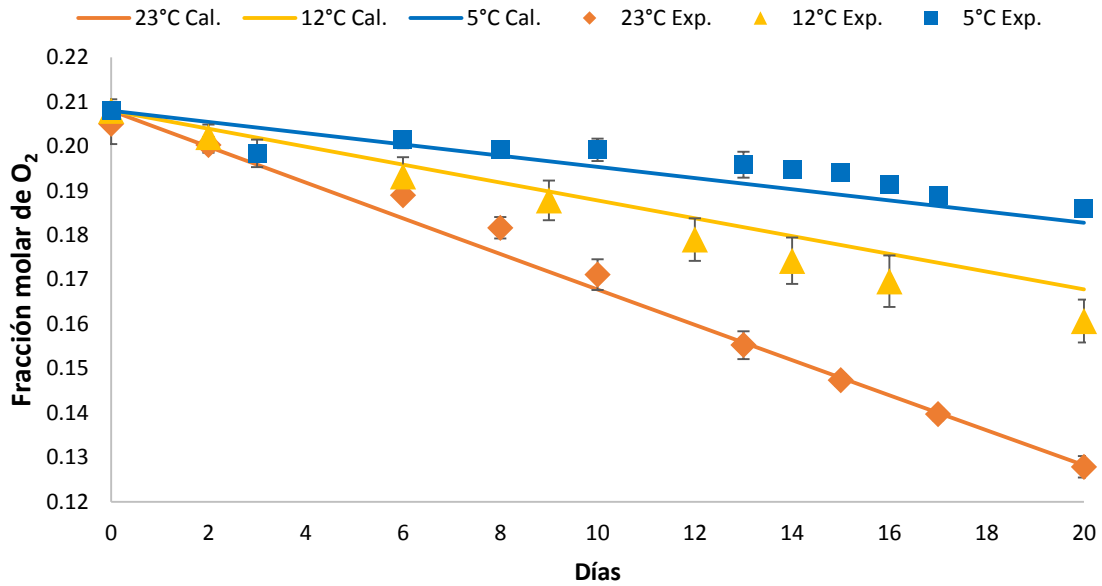


Figura 3-3: Datos experimentales y estimados de remoción de oxígeno para la mezcla de limadura de hierro y PAS en proporción 1:1 expuestos a la atmósfera en cápsulas de Petri y a diferentes temperaturas. Las barras de error corresponden a la desviación estándar para n = 3.

Los resultados muestran el aumento de la velocidad de remoción de oxígeno a medida que aumenta la temperatura a la que está expuesto el elemento activo, siendo dos veces mayor la velocidad de remoción de oxígeno a 23 °C con respecto a la velocidad de remoción de oxígeno a 12 °C y de tres veces mayor con respecto a la obtenida a 5 °C, comparando la velocidad de remoción de oxígeno a 12 °C con respecto a la de 5 °C la primera es 1,6 veces mayor con respecto a la segunda.

Este patrón de comportamiento se va a repetir al momento de evaluar la misma configuración del elemento activo dispuesto en ‘sachets’ y evaluado a las temperaturas de interés, los resultados gráficos se muestran en la Figura 3-4, a partir del mismo y de los mostrados en la Figura 3-3 se obtuvieron los parámetros cinéticos de los modelos de pseudo primer orden los cuales se muestran en la Tabla 3-1.

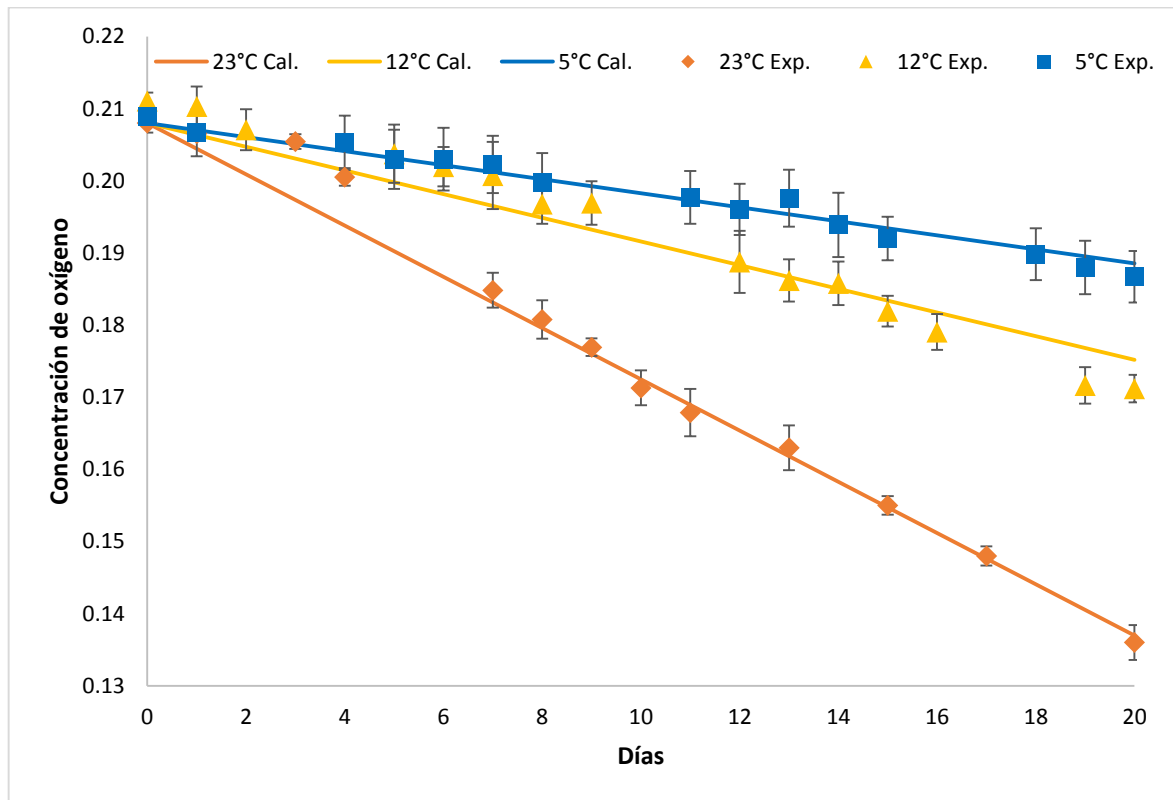


Figura 3-4: Datos experimentales y estimados de remoción de oxígeno para la mezcla de limadura de hierro y PAS en proporción 1:1 contenida en ‘sachets’ a diferentes temperaturas. Las barras de error corresponden a la desviación estándar para n = 3.

Tabla 3-1. Parámetros de regresión de la cinética de pseudo primero orden y Arrhenius para el removedor de oxígeno compuesto de limadura de hierro y PAS en proporción de 1:1 expuesto al aire en cápsulas de Petri y sachets

Parámetros del modelo sin sachet (Ecuaciones. 6-9)	
E_a (kJ mol ⁻¹)	44,280 ± 0,644*
$k_{ref. a 23\text{ °C}}$ (d ⁻¹)	0,0017 ± 0,0000
C_{max} (cm ³ kg ⁻¹)	1082569 ± 16029
R^2 ajustado	0,945
Parámetros del modelo con sachet (Ecuaciones. 6-9)	
E_a (kJ mol ⁻¹)	46,215 ± 0,696*
$k_{ref. a 23\text{ °C}}$ (d ⁻¹)	0,0015 ± 0,0001
C_{max} (cm ³ kg ⁻¹)	1082569 ± 16029
R^2 ajustado	0,943

*Desviación estándar incluida para n = 3.

Comparando las Figuras 3-3 y 3-4 se puede observar que el comportamiento en la remoción de O₂ es similar para la mezcla en la cápsula de Petri sin 'sachet' y con la inclusión de 'sachet'. En ambos casos, la cinética de pseudo primer orden tiene un alto grado de ajuste y buena representación del comportamiento experimental como se observa en la Tabla 3-1. Sin embargo, al incluir la mezcla de elemento activo en el 'sachet' se pierde algo de la velocidad de remoción de oxígeno con valores del coeficiente de velocidad de 0,0017 d⁻¹ sin 'sachet' vs 0,0015 d⁻¹ con 'sachet' respectivamente. Esto se debe fundamentalmente a la resistencia de transferencia al O₂ que se tiene por las paredes del 'sachet' lo que limita la disponibilidad de O₂ para que entre en contacto con el hierro y el PAS. En todo caso, esta pérdida de velocidad de remoción es de menos del 20 % al incluir el 'sachet' de algodón poroso.

Con respecto al modelo propuesto se puede afirmar que tiene alto grado de ajuste a los datos experimentales con R^2 ajustado de 0,945 y 0,943; es decir, se puede utilizar el modelo propuesto para estimar el volumen de oxígeno removido por determinada cantidad del elemento activo a determinada temperatura bajo condiciones cercanas al 100% de humedad relativa.

También a partir de los resultados obtenidos y la literatura disponible se puede discutir que la energía de activación (E_a) estimada es similar a las reportadas por (Galotto et al., 2009) para pellets removedores de oxígeno con $E_a = 20$ kJ mol⁻¹, (Charles et al., 2005) para sachets

removedores de oxígeno con $E_a = 48,99 \text{ kJ mol}^{-1}$ y (Grosvenor et al., 2005) para hierro policristalino con $E_a = 32,6 \text{ kJ mol}^{-1}$.

Con respecto a la capacidad y velocidad de remoción de oxígeno se puede afirmar que el removedor configurado tiene una adecuada capacidad de remoción de oxígeno pero una baja velocidad de remoción de oxígeno cuando se compara con productos similares, ya que expuesto a la atmósfera en 'sachets' a 23 °C y condiciones cercanas al 100% de humedad relativa logró remover 33 cm^3 de oxígeno por gramo de removedor a los 20 días de evaluación, Figura 3-5, mientras que O-Buster y Oxyfree 504A, tienen la capacidad de remover aproximadamente 31,33 cm^3 de oxígeno por gramos de removedor a 23 °C de temperatura y 53% de Humedad relativa en 30 horas (Braga et al., 2010).

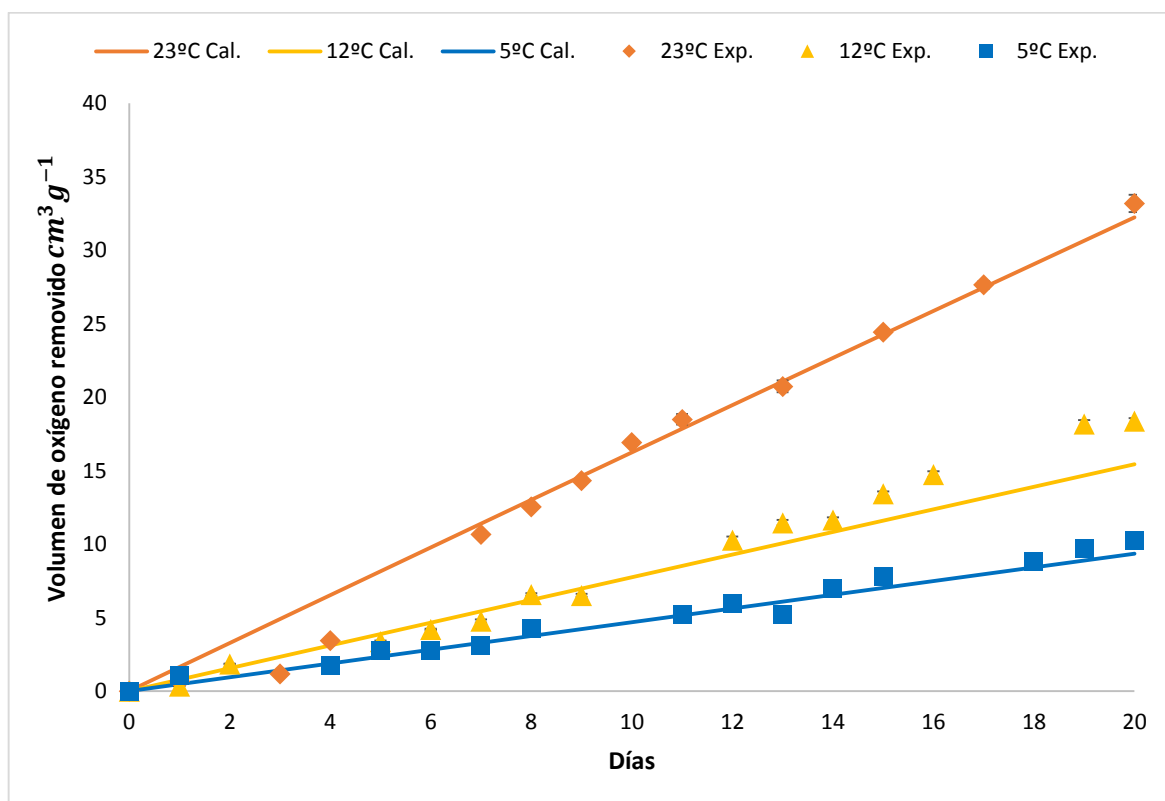


Figura 3-5: Volumen de oxígeno removido por la mezcla activa en sachets en proporción 1:1 a diferentes temperaturas. Las barras de error corresponden a la desviación estándar para $n = 3$.

Por otra parte si se compara con el removedor diseñado y evaluado por (Braga et al., 2010) compuesto de limadura de hierro, un agente activo, zeolita sintética, cloruro de sodio y carbonato de calcio, se puede afirmar que tiene una baja capacidad y velocidad de remoción de oxígeno ya

que este removedor alcanzó a remover aproximadamente 53 cm³ de oxígeno por gramo de removedor bajo las condiciones señaladas en tan solo 30 horas; lo mismo se puede afirmar si se compara con el removedor ATCO® LH-100 que tiene una capacidad de remoción aproximada de 43 cm³ de oxígeno por gramo de removedor en 30 horas. (Charles et al., 2006).

3.2. Caracterización de la cinética de respiración del lulo en fresco empacado

En este apartado se muestra la cinética de respiración de los frutos de lulos bajo diferentes condiciones de temperatura = 5, 12 y 23°C con respecto al tiempo y con respecto a la concentración de oxígeno en el ambiente.

Como se observa en las Figuras 3-6, 3-7 y 3-8 a mayor temperatura de almacenamiento mayor es el volumen de oxígeno que es consumido por el vegetal en un determinado período de tiempo, de la misma forma se observa el aumento de la producción de dióxido de carbono con el incremento de la temperatura, por ejemplo, una fracción molar de oxígeno de 0,172 y de dióxido de carbono de 0,027 a 5°C se alcanza a los 18 días de almacenamiento mientras que a 12°C se alcanza en menos de un día y a 23°C se alcanza a las 8 horas, esto comprueba la eficacia de la refrigeración para la conservación de la calidad poscosecha del lulo.

Estos resultados son similares en tendencia con los presentados por Bhande et al., (2008) quienes evaluaron la respiración de bananos (*Musa paradisiaca*) bajo diferentes condiciones de temperatura: 10,15, 20, 25 y 30 °C y muestran que a 20 °C se igualan las concentraciones de oxígeno y dióxido de carbono en la cámara cerrada aproximadamente a una fracción molar de 0,1 cuando ha transcurrido un tiempo de 20 horas, mientras que en la presente investigación los lulos almacenados a 23 °C igualaron la concentración de oxígeno y de dióxido de carbono en una fracción molar de 0,09 en 28,7 horas, de la comparación se puede deducir que los frutos de lulo tienen una velocidad de respiración menor a la de los bananos.

También son similares en tendencia con los presentados por (Ho et al., 2020) quienes evaluaron la respiración de pitahaya (*Hylocereus undatus*) bajo diferentes condiciones de temperatura: 2, 6, 13, 23 y 35 °C y muestran que a 23 °C se igualan las concentraciones de oxígeno y dióxido de carbono en la cámara cerrada aproximadamente a una fracción molar de 0,1 cuando ha transcurrido un tiempo aproximado de 13 horas. En línea con lo expuesto en el párrafo anterior

comparativamente el lulo es un fruto con menor velocidad de respiración con respecto a la pitahaya y el banano.

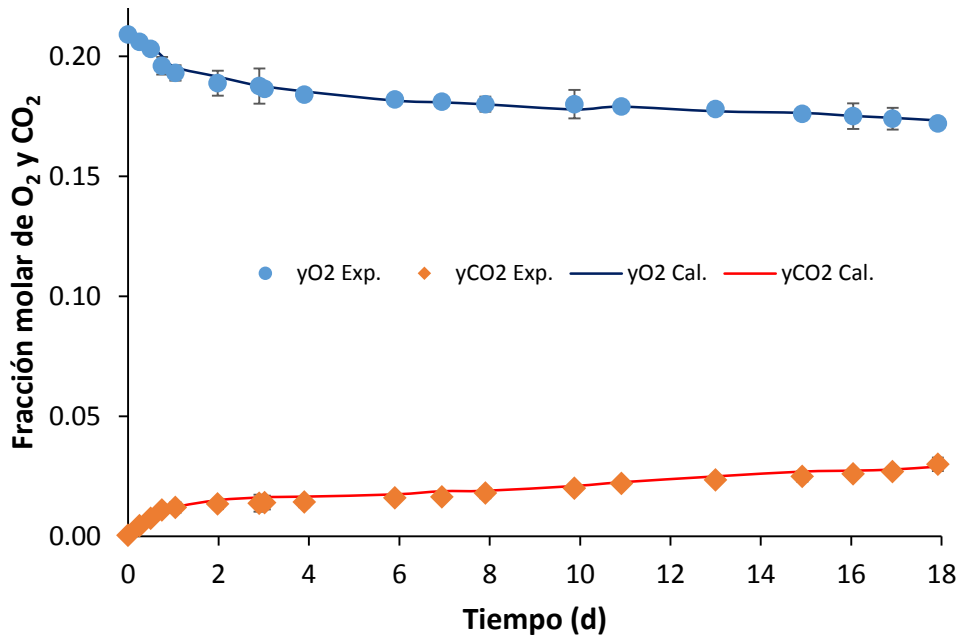


Figura 3-6: Datos experimentales y estimados de reducción de oxígeno y aumento de dióxido de carbono con respecto al tiempo de lulos almacenados a 5 °C en sistema cerrado. Las barras de error corresponden a la desviación estándar para n = 3.

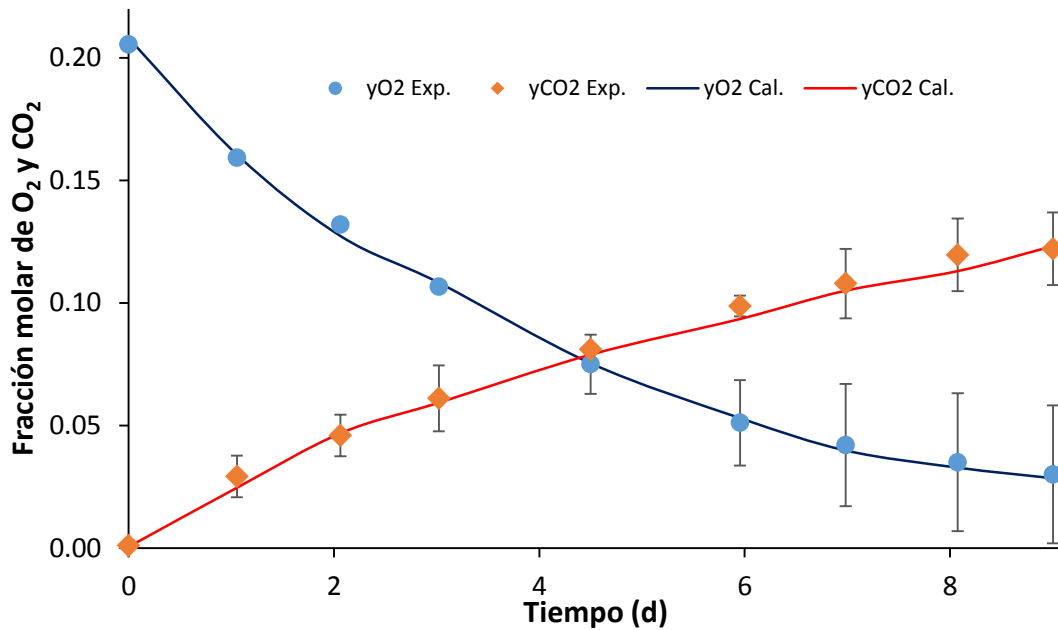


Figura 3-7: Datos experimentales y estimados de reducción de oxígeno y aumento de dióxido de carbono con respecto al tiempo de lulos almacenados a 12 °C en sistema cerrado. Las barras de error corresponden a la desviación estándar para n = 3.

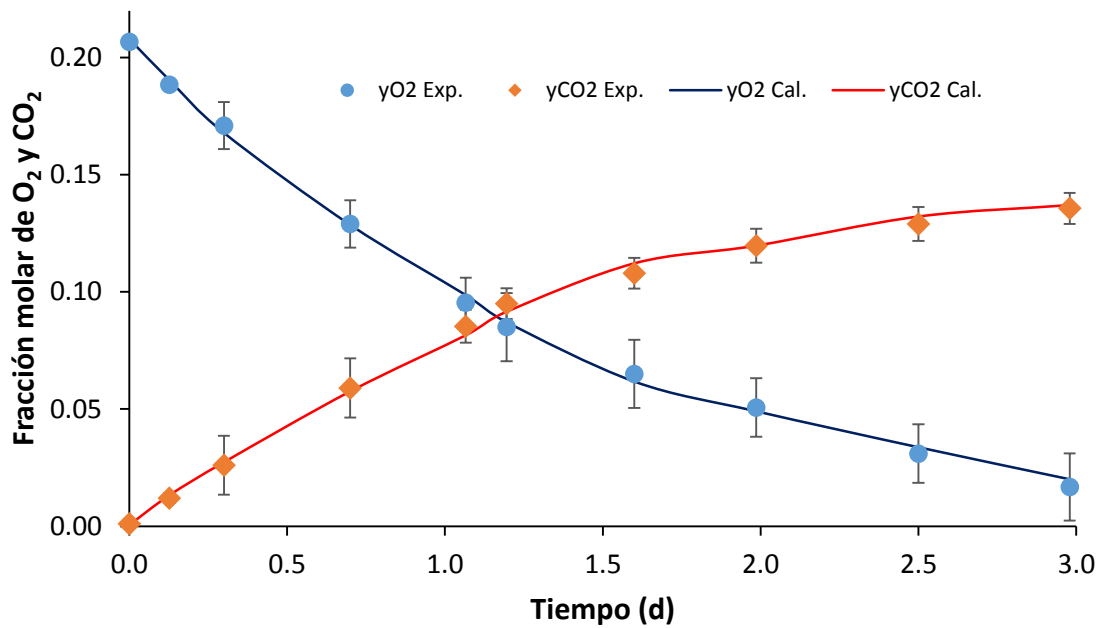


Figura 3-8: Datos experimentales y estimados de reducción de oxígeno y aumento de dióxido de carbono con respecto al tiempo de lulos almacenados a 23 °C en sistema cerrado. Las barras de error corresponden a la desviación estándar para n = 3.

Si se observa la dinámica de respiración ahora no con respecto al tiempo sino con respecto a la concentración de oxígeno y por el eje de las ordenadas se representa no la concentración molar de oxígeno sino el volumen de oxígeno que es consumido por un kilogramo de fruto en un día se obtienen las Figuras 3-9 y 3-10.

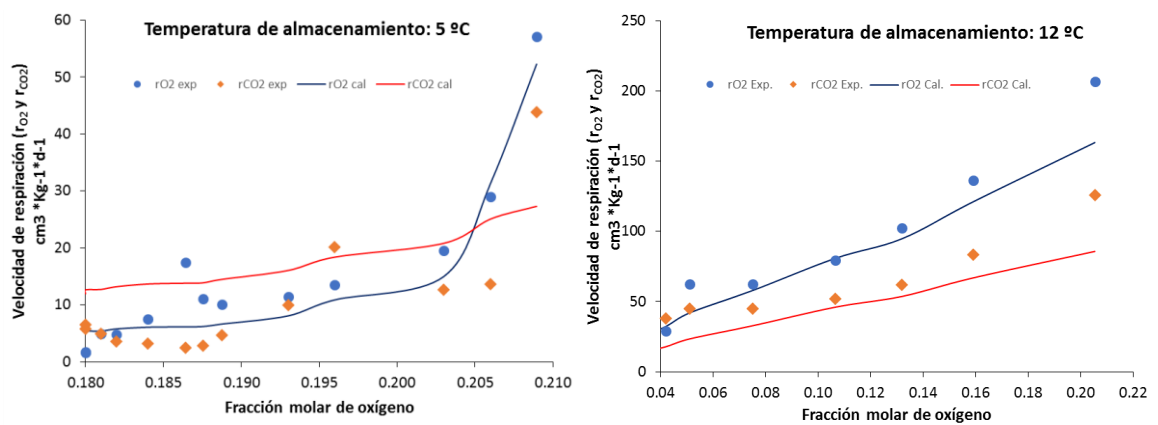


Figura 3-9: Velocidad de respiración (consumo de O₂ y producción de CO₂) experimental y estimada de frutos de lulos almacenados a 5 y 12 °C

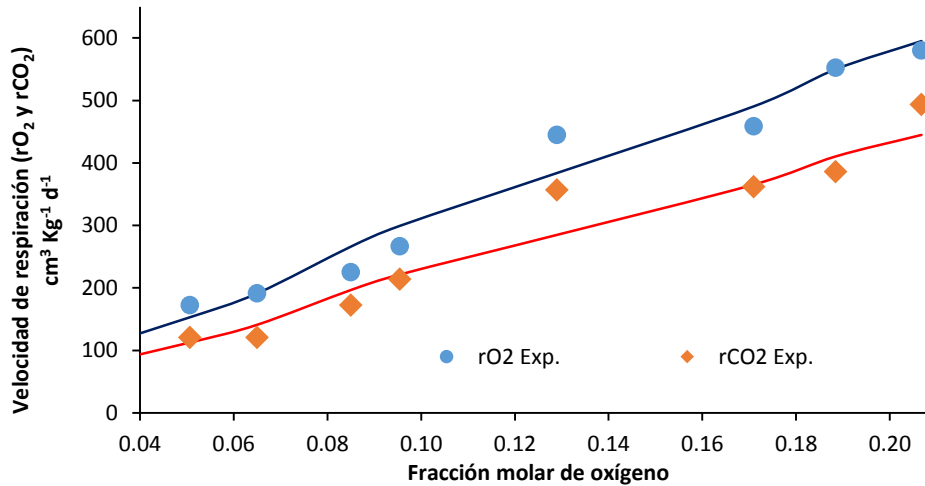


Figura 3-10: Velocidad de respiración (consumo de O₂ y producción de CO₂) experimental y estimada de frutos de lulos almacenados a 23°C

A partir de las tres gráficas anteriores se puede visualizar con claridad que la velocidad de respiración disminuye a medida que desciende la concentración de oxígeno en el ambiente circundante, tendencia que es independiente de la temperatura a la que esté almacenado el fruto, es notable que para reducir la velocidad de respiración aproximadamente a la mitad se requiere una atmósfera modificada más acentuada a medida que aumenta la temperatura, en el caso de los frutos almacenados a 12 °C con una concentración de oxígeno en fracción molar entre 0,12 y 0,14 se logra reducir la velocidad de respiración a la mitad, mientras que a 23 °C se requiere una concentración de oxígeno menor, aproximadamente entre 0,08 y 0,10 para lograr el mismo efecto.

Por otra parte si se compara las velocidades máximas alcanzadas por los frutos de lulo almacenados a 23 °C de temperatura y concentración ambiental de oxígeno que es de alrededor 20,8% con respecto a otros frutos almacenados a temperaturas similares se puede decir que el lulo tiene bajas velocidades de respiración ya que los valores máximos alcanzados por los frutos de lulos fueron de 580 y 493,4 cm³ kg⁻¹ d⁻¹ de O₂ consumido y CO₂ producido, respectivamente, para visualizar el contraste se pueden citar varios ejemplos: para uchuva (*Physalis peruviana* L., cv. Colombia) almacenada a 25,6°C y concentración ambiental de oxígeno (Garavito et al., 2021) reportan velocidades de respiración de aproximadamente 2600 y 3750 cm³ kg⁻¹ d⁻¹ de O₂ consumido y CO₂ producido, respectivamente, para aguacate (*Persea americana* cv. Hass) almacenado a 24°C y concentración ambiental de oxígeno (Castellanos et al., 2017 a) reportan velocidades de respiración de 2680 y 3030 cm³ kg⁻¹ d⁻¹ de O₂ consumido y CO₂ producido,

respectivamente, en el mismo trabajo para frutos de feijoa (*Acca sellowiana* Berg) almacenados bajo las mismas condiciones de temperatura se reportan valores de 3650 y 4230 $\text{cm}^3 \text{kg}^{-1} \text{d}^{-1}$, de O_2 consumido y CO_2 producido, respectivamente y para banano (*Musa paradisiaca*) almacenado a 25 °C y concentración ambiental de oxígeno (Mendoza et al., 2016) se reportan velocidades de 3350 y 3500 $\text{cm}^3 \text{kg}^{-1} \text{d}^{-1}$, de O_2 consumido y CO_2 producido, respectivamente; en promedio la velocidad de respiración del lulo es 6 veces menor comparada con los frutos citados.

Tales resultados hacen pensar que es provechoso la inclusión del removedor de oxígeno en el empaquetado de lulo debido a que es un fruto que respira con menor velocidad con respecto a otros frutos y por otra parte que tiende a disminuir su velocidad de respiración a medida que disminuye la concentración de oxígeno del ambiente que le rodea.

Por otra parte, en vistas a la configuración del empaque activo se simuló matemáticamente con los datos experimentales la respiración del lulo con el modelo de Michaelis-Menten con inhibición anticompetitiva por CO_2 y se ajustaron los parámetros con la ecuación de Arrhenius lo que permite modelar la respiración de frutos de lulo bajo diversas condiciones de temperatura de almacenamiento, los parámetros obtenidos se muestran en la Tabla 3-2.

Tabla. 3-2. Parámetros de la cinética enzimática de Michaelis-Menten con inhibición por CO_2 obtenidos a partir del modelado cinético de la respiración de frutos de lulo

Oxígeno			
O_2	$r_{\text{O}_2\text{max}} \text{cm}^3 \text{kg}^{-1} \text{d}^{-1}$	K_m	K_{mu}
P_{ref}	5460,63 ± 831,10	1,70 ± 0,26	53,68 ± 8,17
$E_a \text{ (kJ mol}^{-1}\text{)}$	93,88 ± 14,29	12,97 ± 1,97	468,50 ± 71,31
R^2 ajustado = 0,991			
Dióxido de Carbono			
CO_2	$r_{\text{CO}_2\text{max}} \text{cm}^3 \text{kg}^{-1} \text{d}^{-1}$	K_m	K_{mu}
P_{ref}	7354,00 ± 1119,11	2,09 ± 0,39	49,78 ± 9,27
$E_a \text{ (kJ mol}^{-1}\text{)}$	122,71 ± 22,86	19,72 ± 3,67	376,30 ± 70,11
R^2 ajustado = 0,974			

De los modelos destacan los altos coeficientes de R^2_{ajustado} que tienen para determinar el consumo de oxígeno y la producción de dióxido de carbono para frutos de lulos almacenados en condiciones de temperatura y humedad relativa similares a las evaluadas, estos coeficientes de ajuste son similares a los obtenidos por Garavito et al., (2021) con R^2_{ajustado} de 0,964 y 0,981 para el oxígeno y dióxido de carbono, respectivamente.

3.3. Configuración del empaque activo

Mediante la integración de las ecuaciones con los parámetros calculados tanto para simular la dinámica de remoción de oxígeno por parte de los elementos activos como para simular la dinámica de consumo de oxígeno y de producción de dióxido de carbono por frutos de lulo y conociendo parámetros específicos de los empaques utilizados se puede realizar un balance de materia dinámico para cada gas que permite configurar la atmósfera modificada adecuada para determinada cantidad de lulos bajo determinadas condiciones de temperatura y humedad relativa, tal como se muestra en las Figuras 3-11 y 3-12.

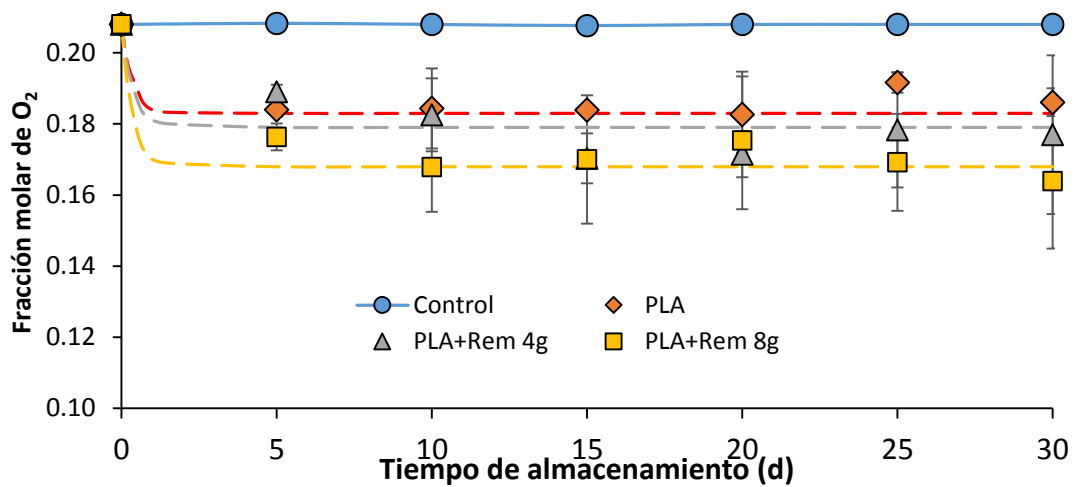


Figura 3-11*: Datos experimentales y calculados de la concentración de oxígeno que se alcanzó en los diferentes tratamientos de empaques configurados para los frutos de lulo a 12 °C. Las barras de error corresponden a la desviación estándar para n = 3.

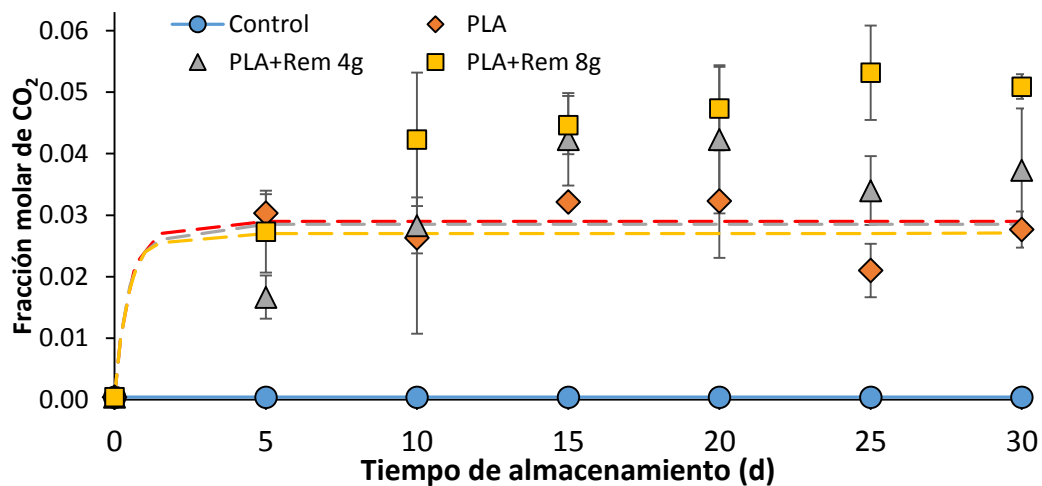


Figura 3-12*: Datos experimentales y calculados de la concentración de dióxido de carbono que se alcanzó en los diferentes tratamientos de empaques configurados para los frutos de lulo a 12 °C. Las barras de error corresponden a la desviación estándar para n = 3.

* Las líneas por secciones corresponden a los datos calculados, los símbolos a los datos experimentales

A partir de las Figuras 3-11 y 3-12 se visualiza que el balance de masa calculado para el oxígeno se ajusta considerablemente a los datos experimentales registrados, en cambio en el balance de masa para el dióxido de carbono se ajusta de forma considerable a las concentraciones alcanzadas bajo el tratamiento de PLA, mientras que para los otros dos tratamientos de atmósfera modificada PLA + Rem 4g y PLA + Rem 8g muestra un ajuste menor respecto al comportamiento experimental. Esto puede deberse al efecto que el elemento activo puede tener en la modificación del comportamiento de la generación de CO₂ en el fruto resultando en un incremento adicional al que se estimó con la cinética de Michaelis-Menten.

3.4. Efecto del removedor de oxígeno y del adsorbente de humedad sobre la calidad y vida útil del lulo en fresco

La calidad de los frutos de lulos empacados en los diversos tratamientos aplicados se midió mediante diez variables: pérdida de peso, apariencia general, acidez total titulable, relación de madurez, módulo de Young, grados Brix, pH, y color en el espacio CIELAB*: luminosidad*, coordenada a* y coordenada b*, en siete momentos: 0, 5, 10, 15, 20, 25 y 30 días.

Para visualizar de forma sintética el efecto de los empaques configurados sobre las variables de calidad medidas se realizó en primer lugar un análisis multivariado mediante la técnica de análisis de componentes principales para detectar a partir del conjunto de datos la existencia de similitudes y diferencias entre los tratamientos aplicados, a continuación se muestran las gráficas de score plots y loading plots, Figuras 3-13 y 3-14, respectivamente.

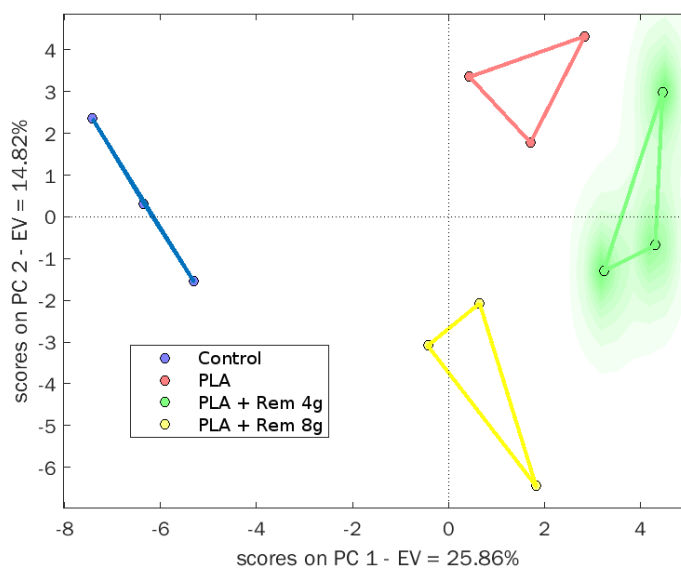


Figura 3-13: 'Scores plot' de las diez variables medidas en los siete momentos

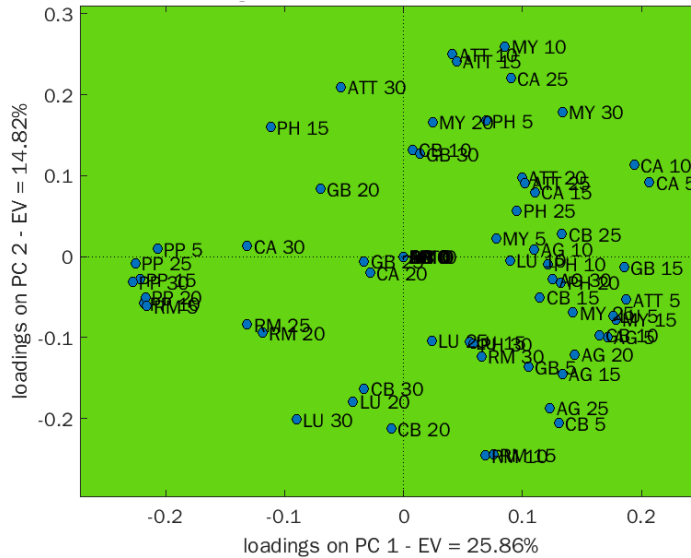


Figura 3-14: 'Loadings plot' de las diez variables medidas en los siete momentos

A partir de los dos gráficos anteriores se puede visualizar que todos los tratamientos son diferentes entre sí, ya que no existe solapamiento entre las áreas que ocupan cada uno; también se visualiza que el tratamiento control es totalmente diferente de los otros tres tratamientos por estar ubicado diametralmente opuesto a los otros tres y que los tratamientos más similares entre sí son PLA y PLA + Rem 4g, es decir, los empacados en bandeja rígida con película de ácido poliláctico y los que contenían un sachet con 4 gramos de removedor.

En el loadings plot no se llega a distinguir con facilidad las variables y el tiempo de medición de las mismas que más contribuyen a distinguir los efectos de los tratamientos por la gran cantidad de variables implicadas, muchas de las cuales sólo causan ruido ya que lo visualizado explica el (25,86 + 14,82 = 40,68%) de la varianza, por tal motivo se hizo el análisis de Wilks-Lambda para determinar el grado en que cada una de las variables contribuía a distinguir los efectos de los tratamientos y se seleccionó el tercio de variables que más aportan a la diferenciación de los tratamientos.

En la tabla 3-3 se muestran las variables seleccionadas como más influyentes en la diferenciación de los tratamientos, siendo la pérdida de peso desde el día 5 hasta el día 30, la apariencia general a los días 5, 15 y 25 y los otras variables marcadas con equis en el cuadro.

Tabla. 3-3. Variables seleccionadas por el método de Wilks-Lambda

Variable	Tiempo de Medición						
	0	5	10	15	20	25	30
Pérdida de peso		X	X	X	X	X	X
Apariencia General		X		X		X	
Coordenada a*		X	X		X	X	
Acidez Total Titulable	X		X		X		
Relación de Madurez		X		X	X		
Módulo de Young	X			X			
Grados Brix	X						
pH				X			

A continuación se muestran las gráficas de scores plot y loadings plot, Figuras 3-15 y 3-16, respectivamente, resultantes de incluir sólo las variables más influyentes en la diferenciación de los tratamientos.

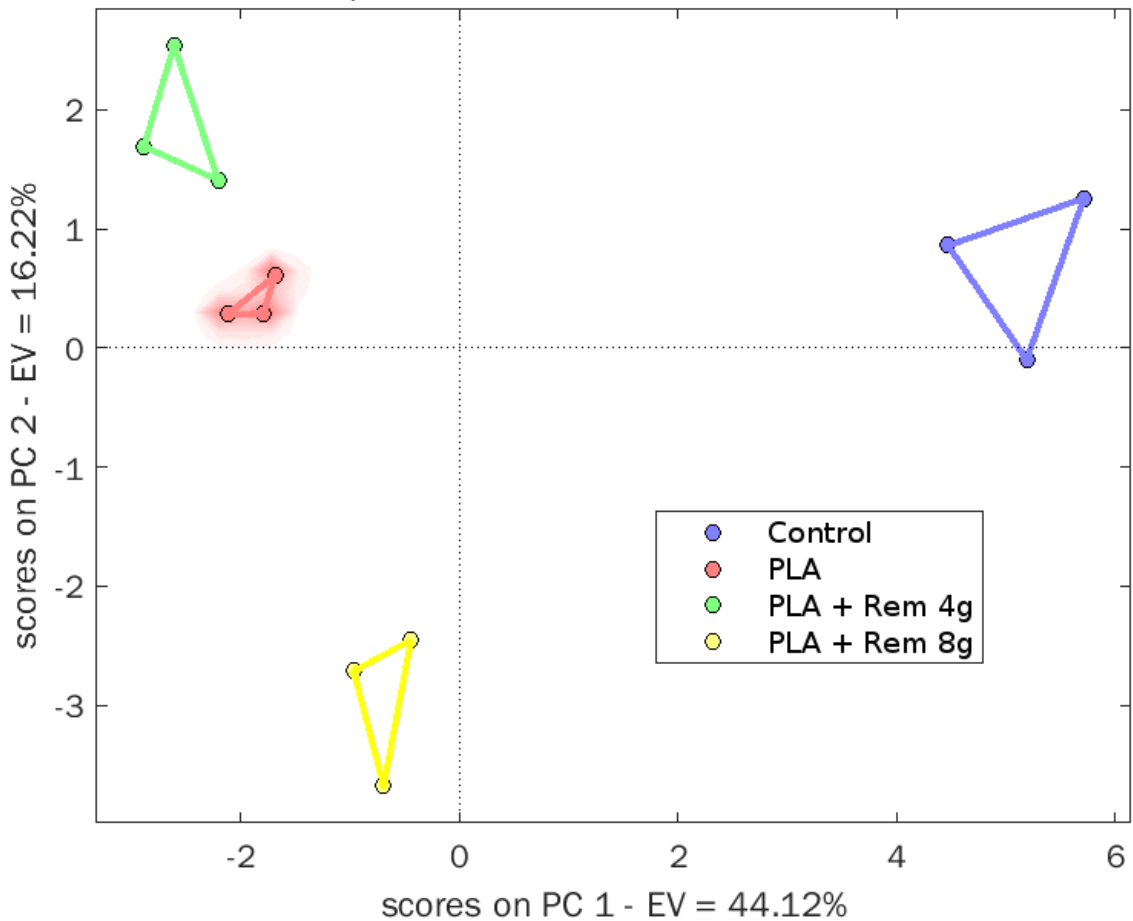


Figura 3-15: 'Scores plot' de las veintitrés variables más influyentes en la diferenciación de los tratamientos

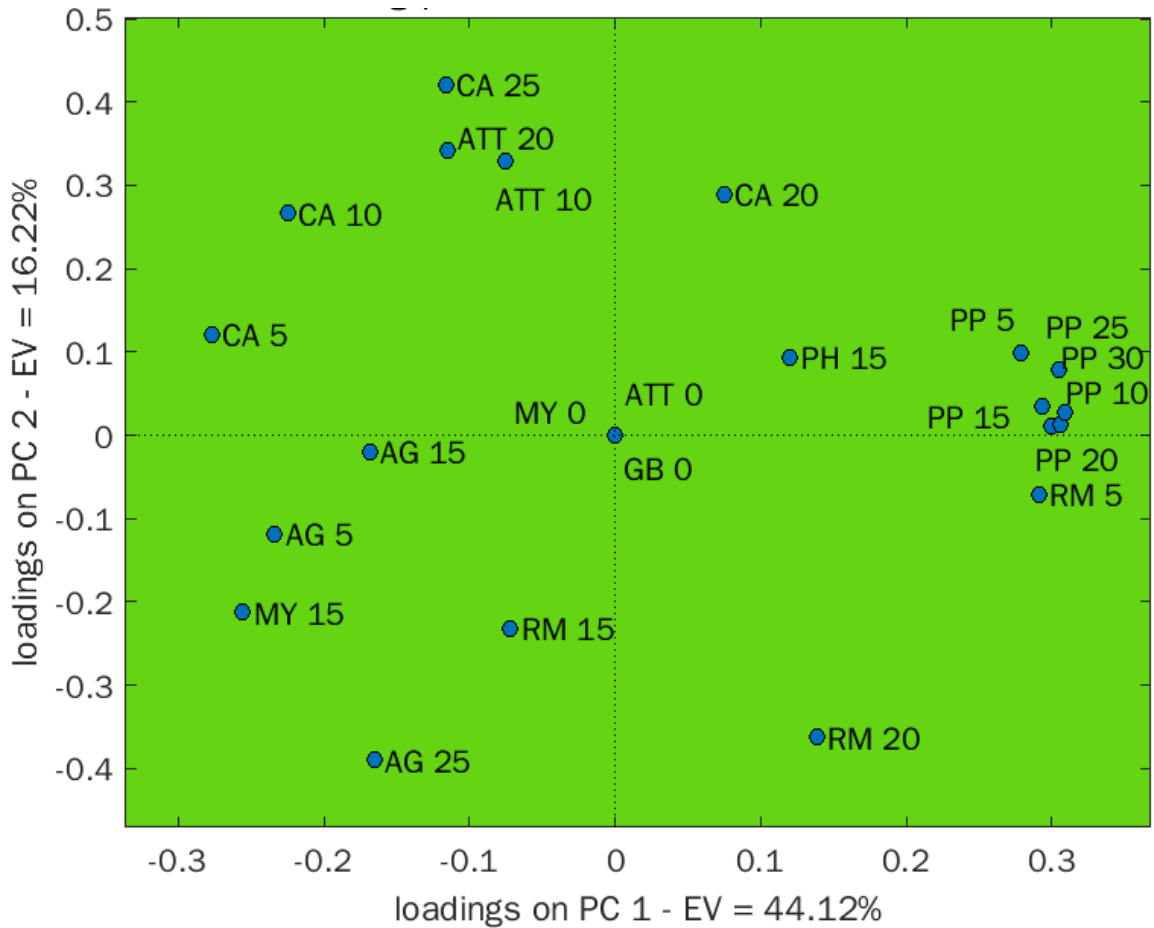


Figura 3-16: 'Loadings plot' de las veintitrés variables más influyentes en la diferenciación de los tratamientos

El reducir las variables implicadas disminuye significativamente el ruido y aumenta considerablemente la varianza explicada por el gráfico, alcanzando un valor de $(44,12 + 16,22 = 60,34\%)$, además de que se puede visualizar con facilidad aquellas variables que más distinguen a determinado tratamiento, por ejemplo, el tratamiento control se distingue por las pérdidas de peso a los 5, 10, 15, 20, 25, y 30 días, el de PLA + Rem 8g se distingue por la apariencia general a los 5, 15 y 25 días y el de PLA + Rem 4g y el de PLA por los valores en la coordenada a^* del espacio de color CIELAB* a los 5, 10 y 25 días y la acidez total titulable a los 10 y 20 días. Este panorama general nos permite identificar con mayor facilidad las variables con más relevancia en la distinción de tratamientos a partir de la matriz de datos de análisis de varianza de dos vías para cada una de las variables medidas presentada en la tabla 3-4.

Tabla. 3-4. Evolución de las propiedades de calidad de lulos y comparación de medias bajo diferentes condiciones de empaque a 12°C y 75% HR

Variable	Día	Control	PLA	PLA + Rem 4g	PLA + Rem 8g
Pérdida de peso	0	0 ± 0 Ad	0 ± 0 Aa	0 ± 0 Ab	0 ± 0 Ac
	5	2.6 ± 0.7 Bd	0.6 ± 0.3 Ba	1.1 ± 0.3 Bb	1.1 ± 0.1 Bc
	10	4.4 ± 0.3 Cd	0.9 ± 0.1 Ca	1.5 ± 0.2 Cb	2 ± 0.3 Cc
	15	5.3 ± 0.7 Dd	1.7 ± 0.2 Da	2 ± 0.3 Db	2.7 ± 0.3 Dc
	20	5.9 ± 0.4 Ed	1.9 ± 0.1 Ea	2.7 ± 0.4 Eb	3.1 ± 0.2 Ec
	25	8.1 ± 0.2 Fd	2.7 ± 0.4 Fa	3.3 ± 0.1 Fb	3.6 ± 0.2 Fc
	30	9.1 ± 0.2 Gd	3.1 ± 0.4 Ga	3.4 ± 0.1 Gb	4.3 ± 0.2 Gc
Apariencia General	0	5 ± 0 Ac	5 ± 0 Ab	5 ± 0 Aa	5 ± 0 Aa
	5	3 ± 0.4 Bc	4 ± 0.4 Bb	5 ± 0 Ba	5 ± 0.5 Ba
	10	3 ± 0.8 BCc	4 ± 0.9 BCb	5 ± 0.2 BCa	4 ± 0.2 BCa
	15	3 ± 0.4 Cc	3 ± 0.4 Cb	4 ± 0.5 Ca	4 ± 0.7 Ca
	20	2 ± 0.5 Dc	3 ± 0.7 Db	3 ± 0.2 Da	3 ± 0.7 Da
	25	2 ± 0.1 Dc	3 ± 0.5 Db	3 ± 0.8 Da	4 ± 0.3 Da
	30	2 ± 0.7 Dc	2 ± 0.6 Db	2 ± 0.6 Da	3 ± 0.4 Da
Coordenada a*	0	-0.9 ± 0 Cc	-0.9 ± 0 Cb	-0.9 ± 0 Ca	-0.9 ± 0 Cc
	5	13.2 ± 2 ABc	24.7 ± 1.5 ABb	25.8 ± 4.2 ABa	19.7 ± 2.1 ABc
	10	14 ± 3.3 ABc	21.4 ± 1.8 ABb	27.9 ± 4 ABa	16.8 ± 2 ABc
	15	15.8 ± 2 Bc	19.6 ± 6.3 Bb	22.1 ± 1.3 Ba	13.5 ± 4.2 Bc
	20	22.3 ± 2.3 ABc	18.2 ± 2.7 ABb	23.5 ± 1.7 ABa	17.8 ± 1.1 ABc
	25	21.4 ± 2.6 Ac	24.1 ± 0.2 Ab	25.8 ± 2.7 Aa	18.6 ± 2.6 Ac
	30	21.2 ± 2.2 Bc	16.5 ± 4.3 Bb	15.6 ± 4.2 Ba	17.9 ± 2.3 Bc
Acidez total titulable (%)	0	3.9 ± 0 ABbc	3.9 ± 0 Aba	3.9 ± 0 ABab	3.9 ± 0 ABc
	5	3.3 ± 0.5 ABbc	4.2 ± 0.5 ABa	4.4 ± 0.4 ABab	4.1 ± 0.7 ABC
	10	4.2 ± 0.5 ABbc	5.3 ± 0.6 ABa	4.6 ± 0.7 ABab	3.6 ± 0.1 ABC
	15	4.1 ± 0.4 ABbc	5.1 ± 0.8 ABa	4.3 ± 0.3 ABab	3.6 ± 0.4 ABC
	20	3.2 ± 0.4 BCbc	3.2 ± 0.5 BCa	4.4 ± 0.5 BCab	2.9 ± 0.4 BCc
	25	3 ± 0.4 BCbc	3.7 ± 0.7 BCa	3.4 ± 0.6 BCab	3.1 ± 0.4 BCc
	30	3.1 ± 0.3 CDbc	3.1 ± 1 CDa	2.7 ± 0.5 CDab	2.2 ± 0.2 CDc
Relación de Madurez	0	1 ± 0 Cab	1 ± 0 Cb	1 ± 0 Cab	1 ± 0 Ca
	5	1.2 ± 0.1 Cab	1 ± 0 Cb	1 ± 0 Cab	1.1 ± 0 Ca
	10	0.9 ± 0.2 Cab	0.8 ± 0.1 Cb	1.1 ± 0.2 Cab	1.2 ± 0.2 Ca
	15	1 ± 0 Cab	0.9 ± 0.1 Cb	1.2 ± 0.1 Cab	1.3 ± 0.2 Ca
	20	1.6 ± 0.2 Bab	1.6 ± 0.1 Bb	1.1 ± 0.1 Bab	1.7 ± 0.1 Ba
	25	1.6 ± 0.1 Bab	1.3 ± 0.3 Bb	1.4 ± 0.2 Bab	1.6 ± 0 Ba
	30	1.6 ± 0.4 Aab	1.8 ± 0.6 Ab	1.9 ± 0.3 Aab	2 ± 0.2 Aa

Tabla 3-4*: (Continuación)

Variable	Día	Control	PLA	PLA + Ads 4g	PLA + Ads 8g
Módulo de Young	0	5.3 ± 0 Ab	5.3 ± 0 Aa	5.3 ± 0 Aa	5.3 ± 0 Aa
	5	4.4 ± 0.4 ABb	5.3 ± 0.4 ABa	4.4 ± 0.3 ABa	4.9 ± 0.2 ABa
	10	4.4 ± 0.5 ABb	5.2 ± 0.8 ABa	5.3 ± 0.8 ABa	3.7 ± 0.7 ABa
	15	3.3 ± 0.1 Bb	4.5 ± 0.3 Ba	4.4 ± 0.3 Ba	4.8 ± 0.3 Ba
	20	3.4 ± 0.8 BCb	4.3 ± 0.4 BCa	3.4 ± 1 BCa	3.8 ± 0.4 BCa
	25	2.9 ± 0.4 BCb	4.2 ± 0.6 BCa	3.6 ± 0.6 BCa	4.2 ± 0.8 BCa
	30	2.8 ± 0.5Cb	3.3 ± 0.6Ca	4 ± 0.5Ca	2.8 ± 0.5Ca
	pH	0	3.4 ± 0 Ba	3.4 ± 0 Ba	3.4 ± 0 Ba
5		3.2 ± 0.02 Ca	3.3 ± 0.1 Ca	3.2 ± 0.18 Ca	3.2 ± 0.1 Ca
10		3.3 ± 0.18 ABa	3.4 ± 0.27 ABa	3.5 ± 0.17 ABa	3.4 ± 0.07 ABa
15		3.7 ± 0.04 Aa	3.7 ± 0.02 Aa	3.3 ± 0.18 Aa	3.4 ± 0.19 Aa
20		3 ± 0.04 CDa	3.1 ± 0.05 CDa	3.3 ± 0.2 CDa	3.2 ± 0.04 CDa
25		3.1 ± 0.04 Da	3.1 ± 0.06 Da	3.1 ± 0.08 Da	3.1 ± 0.04 Da
30		3.1 ± 0.04 CDa	3.1 ± 0.12 CDa	3.1 ± 0.05 CDa	3.2 ± 0.12 CDa
SST (%)		0	3.9 ± 0 Ca	3.9 ± 0 Ca	3.9 ± 0 Ca
	5	4 ± 0.3 BCa	4.2 ± 0.4 BCa	4.4 ± 0.4 BCa	4.4 ± 0.9 BCa
	10	3.8 ± 0.4 BCa	3.9 ± 0.2 BCa	5 ± 0.4 BCa	4.3 ± 0.6 BCa
	15	4.1 ± 0.4 ABa	4.5 ± 0.5 ABa	5.1 ± 0.2 ABa	4.6 ± 0.1 ABa
	20	5.1 ± 0.5 ABa	5 ± 0.4 Aba	4.8 ± 0.4 ABa	4.9 ± 0.4 ABa
	25	4.9 ± 0.6 ABa	4.7 ± 0.6 ABa	4.8 ± 0.2 ABa	4.9 ± 0.5 ABa
	30	5 ± 0.7 ABa	5.2 ± 0.4 ABa	5.1 ± 0.8 ABa	4.3 ± 0.2 ABa
	Luminosidad (L*)	0	47.1 ± 0 Bab	47.1 ± 0 Bb	47.1 ± 0 Ba
5		55.1 ± 3.5 Aab	57.8 ± 1.5 Ab	60.7 ± 2.5 Aa	59.9 ± 2.4 Aab
10		56.1 ± 4.3 Aab	56.7 ± 3 Ab	61 ± 2.3 Aa	56.8 ± 4.6 Aab
15		56.8 ± 4.4 Aab	54.2 ± 4.9 Ab	61.3 ± 1.7 Aa	56.4 ± 4.7 Aab
20		59.1 ± 2.2 Aab	55.4 ± 4.6 Ab	58.4 ± 1.3 Aa	58.7 ± 3.5 Aab
25		57.6 ± 3.7 Aab	56.2 ± 2.1 Ab	58.5 ± 2.6 Aa	59.3 ± 3.4 Aab
30		58 ± 0.9 Aab	56.5 ± 2.9 Ab	55 ± 0.5 Aa	59.3 ± 1.1 Aab
Coordenada b*		0	34.3 ± 0 Ca	34.3 ± 0 Ca	34.3 ± 0 Ca
	5	51.6 ± 5.8 ABa	56.3 ± 2.1 ABa	56.3 ± 2.7 ABa	61.3 ± 4.1 ABa
	10	53.1 ± 7.5 Ba	56.9 ± 4.1 Ba	52.2 ± 5 Ba	54.5 ± 6.7 Ba
	15	52.8 ± 1.8 ABa	54.1 ± 7.5 ABa	63.1 ± 4 ABa	54.2 ± 6.4 ABa
	20	58.5 ± 3.9 ABa	52.8 ± 1.3 ABa	59.4 ± 4 ABa	57.5 ± 5.4 ABa
	25	55.6 ± 5.2 Aa	62.6 ± 1.3 Aa	61.3 ± 3.7 Aa	60.6 ± 7 Aa
	30	53.8 ± 3.2 Ba	55.4 ± 4.9 Ba	49.5 ± 5.4 Ba	58.7 ± 4.9 Ba

Letras minúsculas diferentes en una misma fila indica diferencias significativas entre los tratamientos ($p < 0.05$) y letras mayúscula diferentes en una misma columna indica diferencias significativas entre los días de almacenamiento ($p < 0.05$) usando la prueba de tukey, desviación estándar para $n = 3$.

Una vez establecidas las diferencias en la tabla previa y con los gráficos bidimensionales de las variables se puede interpretar con mayor facilidad los resultados obtenidos:

3.4.1. Pérdida de peso

A partir del cuadro de diferencias y la Figura 3-17 se puede concluir que hay diferencias significativas entre todos los tratamientos, siendo el testigo el tratamiento que perdió más peso y el de empaque con película de PLA el que menos perdió, se visualiza que la implementación del empaque con atmósfera modificada pudo reducir en el transcurso de 15 días las pérdidas poscosecha promedio en 3%.

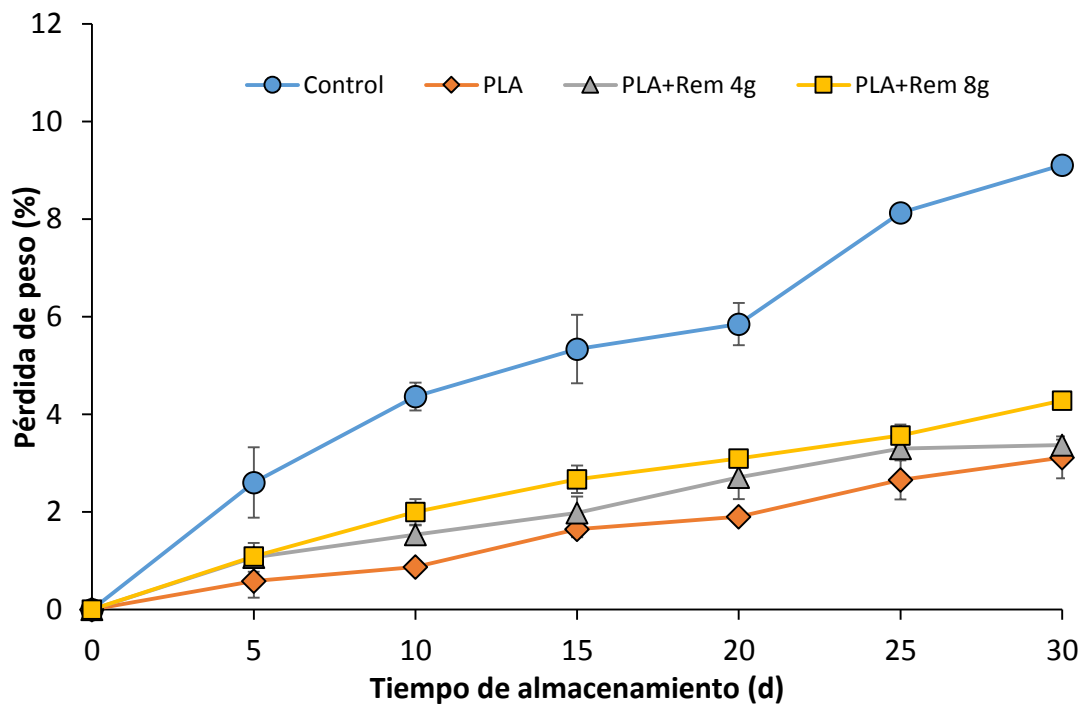


Figura 3-17: Dinámica de pérdida de peso de los frutos bajo el efecto de los tratamientos de empaque.

Las pérdidas de peso promedio a los 20 días de almacenamiento de los frutos empacados en atmósferas modificadas en la presente investigación son comparativamente menores a las pérdidas de peso de frutos de lulos frescos almacenados a 13,5°C de temperatura y 60±5% de HR, protegidos o no con hojas de banano, las cuales fueron alrededor de 11% para cestas en las que no se incluyeron las hojas de banano y de aproximadamente 9% para aquellas cestas en las que fueron incluidas (Forero-Cabrera, et al., 2017).

Mientras que las pérdidas de peso promedio a los 30 días de almacenamiento de los frutos empacados en atmósferas modificadas (3,6%) son similares a las reportadas por (Molano-Díaz et al., 2022) para lulos almacenados por 32 días a 2°C sometidos a dos diferentes dosis de 1-metilciclopropeno: 280 y 560 $\mu\text{g L}^{-1}$ los cuales tuvieron en promedio un porcentaje de pérdida de peso de 4,9%, es decir, la conservación de lulos bajo atmósferas modificadas puede lograr efectos similares y mejores en cuanto a la reducción de la pérdida de peso de frutos como el lulo con respecto al uso de refrigeración, la cual además suele ser mucho más costosa.

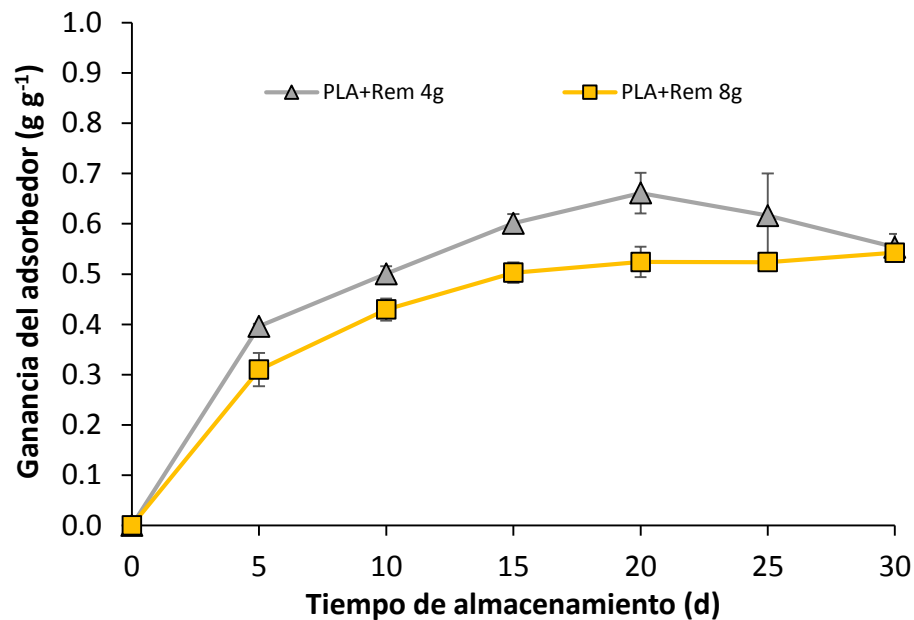


Figura 3-18: Dinámica de adsorción de humedad por parte del elemento activo a 12 °C

Relacionado con el tema tratado, en la Figura 3-18, se muestra la ganancia de humedad por parte del elemento activo configurado, se observa un aumento constante en la adsorción de humedad desde el inicio del almacenamiento hasta el día 20, tiempo a partir del cual se mantiene la cantidad de agua adsorbida por gramo de removedor en 0,61 g g^{-1} para el tratamiento PLA + Rem 4 g y 0,53 g g^{-1} para el tratamiento PLA + Rem 8 g, esto resultó de gran valor ya que evitó que en el primer tratamiento se condensaran 2,44 g de agua en la superficie del empaque y en el segundo 4,24 g de agua durante el tiempo de almacenamiento, lo cual tiende a mejorar la apariencia del empaque en general al haber menor cantidad de agua disponible para la condensación y la proliferación de microorganismos; sin embargo, en la presente investigación no se observaron diferencias visuales significativas en la cantidad de agua condensada entre los tratamientos de

empaques en los que se incluyó el elemento activo y el que no: PLA, posiblemente esto se debe a la alta permeabilidad al vapor de agua de la película de ácido poliláctico, lo cual permitió el escape del exceso de vapor de agua hacia el exterior y evitó la condensación del mismo en el interior de los empaques de atmósferas modificadas cubiertos con película de PLA.

Las capacidades de adsorción obtenidas en la presente investigación de $0,61 \text{ g g}^{-1}$ y $0,53 \text{ g g}^{-1}$ superan ligeramente a la capacidad de adsorción reportada por (Gaona-Forero et al., 2018) para mezcla de poliácido de sodio y algodón en proporción 70:30 (p/p) con un valor aproximado de $0,45 \text{ g g}^{-1}$ bajo condiciones de $12 \text{ }^\circ\text{C}$ y 80% de humedad relativa, y mantienen proporción y tendencia similar a la reportada por (Agudelo-Rodríguez et al., 2020) en cuanto a que una mayor cantidad de removedor por sachet está asociada a una menor cantidad de agua adsorbida por gramo de removedor ya que reportan que a 100% de HR un sachet de $18,2 \text{ g}$ con la misma proporción mencionada de 70:30 (p/p) se saturó con $0,58 \text{ g g}^{-1}$ y otro de $9,1 \text{ g}$ se saturó con $0,71 \text{ g g}^{-1}$, ambos alcanzaron su máxima capacidad de adsorción a los 17 días, mientras que en la presente investigación la alcanzaron a los 20 días.

3.4.2. Apariencia General

La Figura 3-19 describe un continuado y sostenido descenso de la apariencia general de los frutos independientemente del tratamiento aplicado, los principales signos de pérdida de calidad lo eran: daño por microorganismos y arrugamiento.

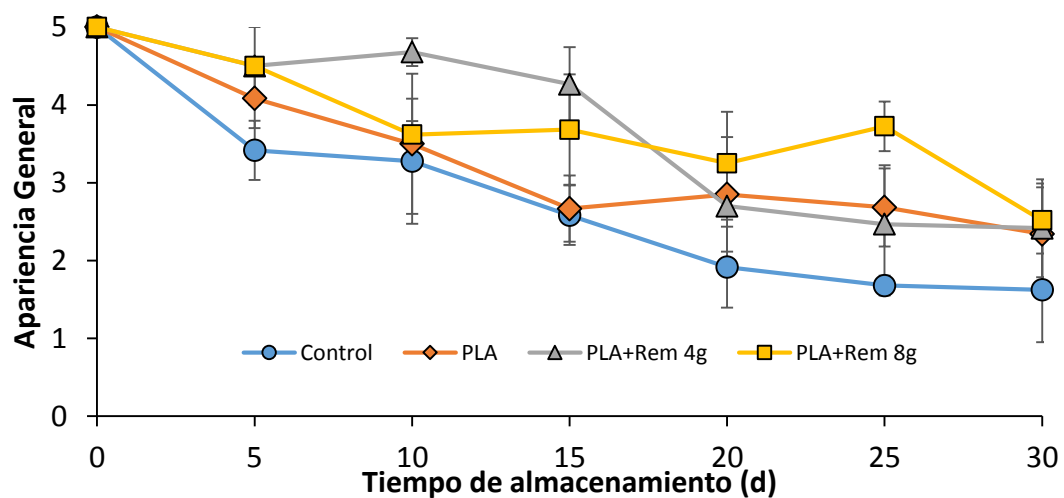


Figura 3-19: Dinámica de la apariencia general de los frutos bajo el efecto de los tratamientos de empaque

Sin embargo es notable el efecto de la inclusión del removedor de oxígeno sobre la apariencia general de los frutos ya que influyó en un menor desarrollo de microorganismos, lo cual conllevó a mejores puntuaciones con respecto a los otros tratamientos y a prolongar la vida útil dado que hasta los 15 días después de almacenamiento los tratamientos en los que se incluyó el removedor de oxígeno el puntaje obtenido fue de 4, que corresponde a frutos con daños ligeros mientras que para el mismo tiempo los frutos almacenados bajo la condición identificada como PLA y control tenían un puntaje de 3 que corresponde a frutos moderadamente dañados. También destaca que a los 25 días de almacenamiento el tratamiento de PLA + Rem 8g era el único que tenía un puntaje de 4 que corresponde a frutos ligeramente dañados con un área superficial afectada menor al 15%, además de obtener un alto puntaje, se observa en la gráfica que la barra de error correspondiente no se intercepta con las barras de error de los otros tratamiento lo cual marca una diferencia importante para los diferentes actores de la cadena de comercialización del lulo debido a que la apariencia general es con frecuencia el principal y único criterio de decisión de compra para el consumidor final.

En cuanto a la estabilidad de la apariencia general para cada uno de los tratamientos es notable el deterioro acelerado de los lulos almacenados en envases macroperforados ya que sólo alcanzaron un puntaje mayor o igual a 4 (área afectada de 1 a 15%) sólo en la evaluación inicial, los que estaban almacenados en empaque con atmósfera modificada pero sin la inclusión del elemento activo tuvieron un puntaje igual o superior a 4 hasta el décimo día de evaluación, mientras que los almacenados en atmósfera modificada y a la vez se incluyó los elementos activos en 4 y 8 gramos alcanzaron a mantener el mismo puntaje mencionado hasta los días 15 y 25 respectivamente.

Estos resultados son similares en tendencia a los reportados por (Castellanos et al., 2016 a) quienes evaluaron el grado de deterioro de frutos de feijoa (*Acca sellowiana* Berg cv. Quimba) bajo condiciones combinadas de ausencia de empaque, empaques con atmósfera modificada con 1, 2 ó 3 perforaciones o sin perforación y tres temperaturas: 6, 12 y 17 °C a humedad relativa constante de 85%, mostrando los datos que el primer tratamiento en deteriorarse fue aquel donde estaba ausente el empaque, luego aquellos almacenados a 17 °C independientemente de la combinación de empaque utilizado así como aquellos en los que no se realizó perforaciones, seguido por los almacenados a 12 y 6 °C, a estos últimos lograron prolongarle la vida útil hasta 28 días.

También son semejantes en tendencia a los hallazgos de (Pérez et al., 2021) quienes midieron el efecto de combinaciones de tres tipos de empaques: empaque perforado (no se logró formar una atmósfera modificada), y empaques herméticos de PET y PET con película de PLA y 3 tipos de recubrimientos: goma guar al 0,3%, 0,4% y sin recubrimiento en frutos de mora (*Rubus glaucus* Benth) almacenada a 5 °C. Encontrando que la vida poscosecha más corta (6-8 días) fue para aquellos que se conservaron en empaques sin atmósfera modificada y la más prolongada en aquellos que se recubrieron los frutos con una solución al 0,3% de goma guar, los investigadores destacan que fue mayor el efecto del recubrimiento con respecto a la atmósfera modificada para prolongar la vida útil poscosecha de la mora.

3.4.3. Coordenada a*

Como se observa en la Figura 3-20 y a partir del análisis de diferencias de medias entre tratamientos, el tratamiento PLA + Rem 4g mostró consistentemente valores más altos en la Coordenada a* del espacio CIELAB* a lo largo de todas las mediciones lo cual está asociado con tonos más rojizos en el fruto los cuales son más atractivos para el consumidor final al momento de la decisión de compra.

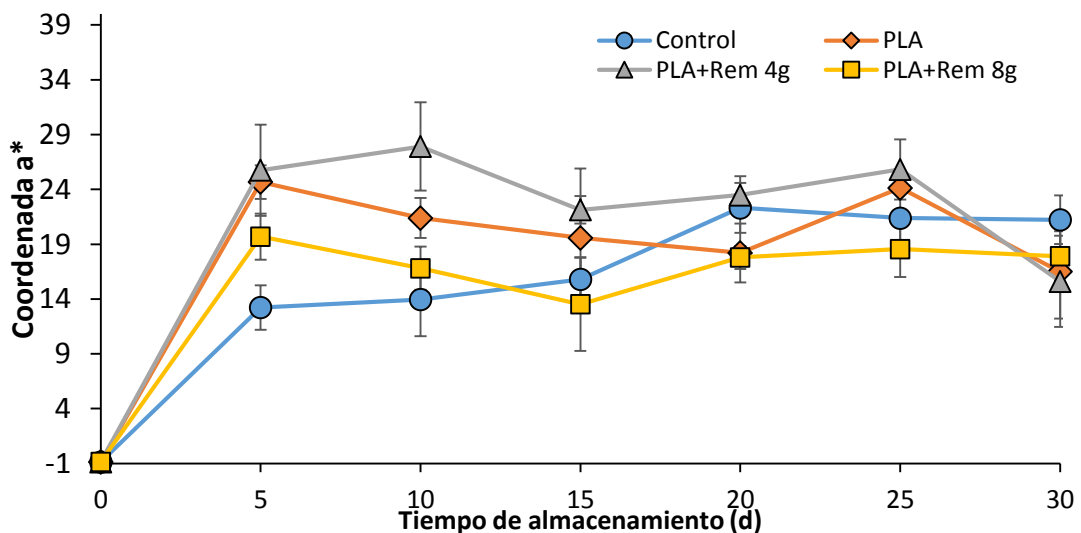


Figura 3-20: Dinámica de la coordenada a* de los frutos bajo el efecto de los tratamientos de empaque

La tendencia general en el tiempo es al incremento en los valores de la coordenada a*, independientemente del tratamiento aplicado, tendencia que es similar a la reportada por

(Molano-Díaz et al., 2022) quienes para el día inicial de almacenamiento registraron un valor de 7,2 para la coordenada a^* para frutos de lulos almacenados a 14 °C y entre los días 4 y 20 valores en la coordenada a^* entre 21,4 y 27. Similar comportamiento fue hallado por (Mejía et al., 2012) quienes expresan el cambio de valores negativos en la coordenada a^* en el primer estado de maduración del lulo con un valor de -10, a valores positivos a medida que avanza en los estados de maduración alcanzando un máximo en la coordenada a^* de aproximadamente 32, cambios que afirman están asociados a la degradación de la clorofila y al incremento en la concentración de carotenoides producto de una mayor producción de etileno.

Por otra parte en el presente trabajo no se logra visualizar la tendencia expresada por (Olveira-Bouzas et al., 2021) quienes afirman que el uso de atmósferas modificadas retrasa la evolución del color en tomates (*Lycopersicon esculentum* Mill.) miembro de la familia de las solanáceas y que en cierto sentido es muy parecido al lulo; lo observado en la presente investigación es que el tratamiento control, es decir, el empaque macroperforado no se diferenció significativamente del tratamiento PLA + Rem 8g que era la atmósfera modificada más acentuada.

3.4.4. Acidez Total Titulable

Luego de realizar el análisis de varianza y de interpretar la gráfica de la evolución de la acidez total titulable (ATT) con respecto al tiempo, Figura 3-21, se puede resaltar la prevalencia de valores mayores de ATT en el empaque de PLA seguido por el de PLA + Rem 4g, los cuales no se diferenciaron significativamente entre sí; el tratamiento que presentó los menores valores de ATT fue el de PLA + Rem 8g el cual no se distinguió significativamente del tratamiento control. La tendencia en todos los tratamientos fue a la disminución de la ATT ya que partió de un valor de 3,9% y terminó en un valor promedio de 2,78%, esta tendencia es similar a la representada por (Forero-Cabrera, et al., 2017) para lulos almacenados por 23 días a 13,5°C cayendo la ATT de aproximadamente 3,1% a 2,6%, y a la expresada por (Arango et al., 1999) para lulos almacenados por 50 días a 7,5°C pasando de 4,4% en el día cero a 3% de ácido cítrico en el último día de almacenamiento, esto se puede deber al incremento del metabolismo de los frutos y a la utilización de ácidos como compuestos orgánicos para la respiración y otros procesos fisiológicos, así como a cambios en los ácidos orgánicos durante la maduración mediante un aumento de la concentración de malato y la disminución de citrato (Jogappa, 2018).

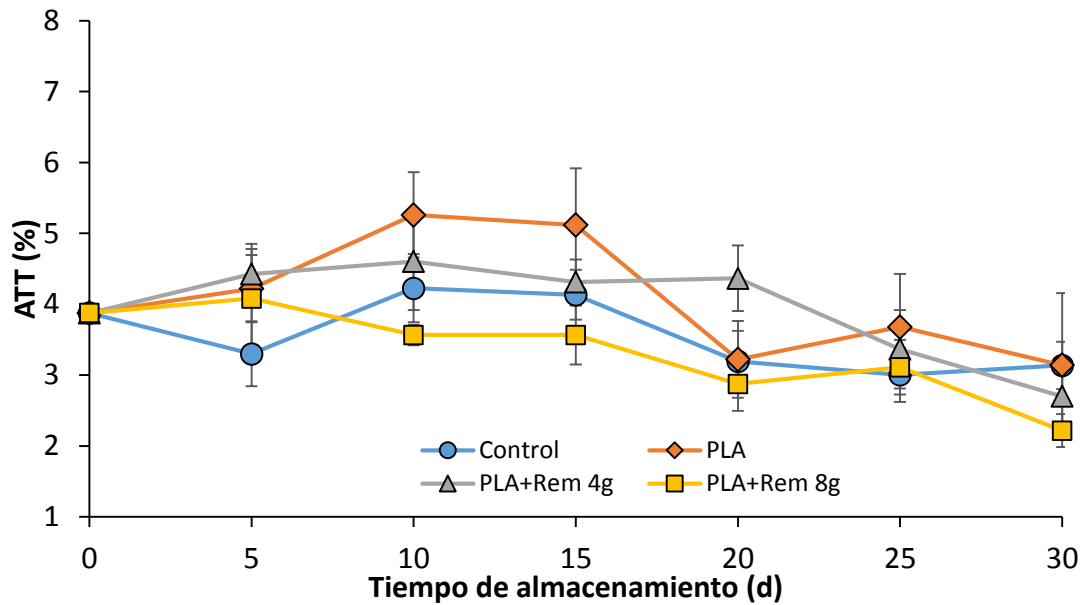


Figura 3-21: Dinámica de la acidez total titulable de los frutos bajo el efecto de los tratamientos de empaque

Por su parte (Molano-Díaz et al., 2022), en base a los datos reportados de ATT de frutos de lulos almacenados a 14°C por el transcurso de 24 días reportan lo opuesto a lo encontrado en la presente investigación y a los citados en el párrafo anterior, ya que los datos presentados por los mencionados investigadores muestran un ligero incremento en la ATT conforme avanza el tiempo subiendo los valores de 1,06% a 1,24%.

3.4.5. Relación de Madurez

Los frutos almacenados bajo el tratamiento de empaque PLA + Rem 8g destacan al tener mejor relación de madurez (RM) a lo largo del tiempo tal como se muestra en la Figura 3-22, sin embargo, no se diferenciaron significativamente de los almacenados bajo los tratamientos PLA + Rem 4g y tratamiento control. A nivel general se observa la tendencia al incremento de la RM conforme pasa el tiempo independientemente del tratamiento de empaque al que fueron sometidos, esta tendencia es similar a la reportada por (González et al., 2014) para frutos de lulos en tres estados de madurez M1: (75 -100%) verde con $RM = 1.83 \pm 0.32$, M2: 50% verde con $RM = 2.26 \pm 0.26$ y M3: (0-15%) verde con $RM = 2.84 \pm 0.38$.

Sin embargo, las relaciones de madurez encontradas en la presente investigación son muy inferiores a las reportadas por (Molano-Díaz et al., 2022) quienes utilizaron frutos en estado de madurez 3 (color de cáscara 75% naranja y 25% verde) según la Norma Técnica Colombiana 5093 (ICONTEC, 2002) y reportan relaciones de madurez para frutos almacenados durante 24 días a 14°C entre 6,94 y 10,71.

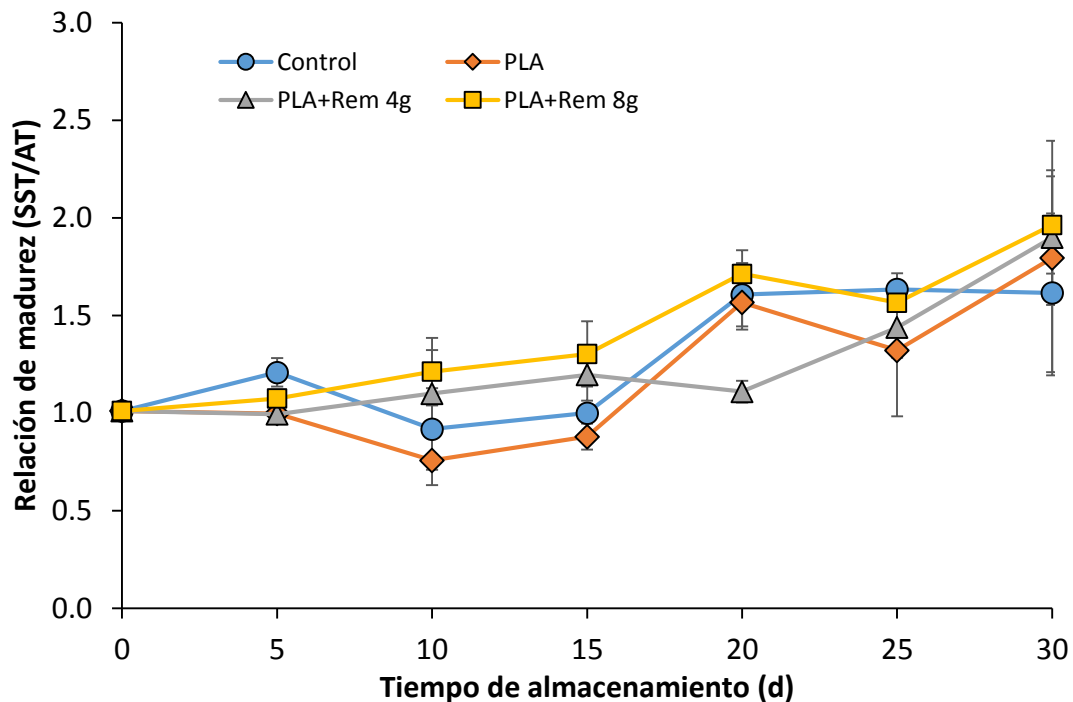


Figura 3-22: Dinámica de la relación de madurez de los frutos bajo el efecto de los tratamientos de empaque

Las otras variables evaluadas en la presente investigación: módulo de Young, grados Brix, pH, coordenada b^* , luminosidad, no presentaron diferencias notables y/o significativas entre los tratamientos, sin embargo a continuación se describe su comportamiento y se comparan con resultados obtenidos en otras investigaciones.

3.4.6. Módulo de Young

En la Figura 3-23 se muestra la evolución del módulo de Young (E) a lo largo del tiempo, en la misma se observa una disminución constante del mismo a medida que pasa el tiempo, independientemente del tratamiento de empaque al que hayan sido sometidos los lulos, bajando de un valor inicial de 5,3 MPa a un promedio final de 3,2 MPa, es decir, al principio del experimento

un fruto de lulo era capaz de resistir un peso menor de 54 kg por cm^2 sin fracturarse y al cabo de 30 días sólo era capaz de soportar 32,6 kg por cm^2 , esto nos indica que a medida que avanza la maduración del fruto debe tenerse más cuidado con la cantidad de fruto apilada ya que cada vez resistirá menos la compresión por parte del peso de la columna de frutos que pueda tener encima cuando los frutos sean almacenados, transportados y/o comercializados en presentaciones no individualizadas.

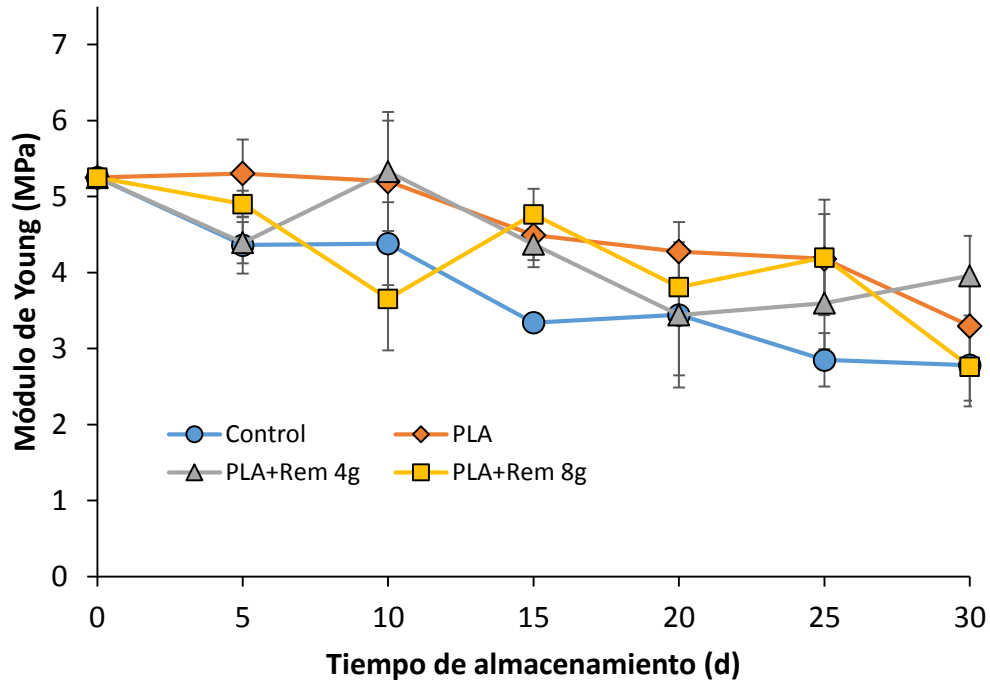


Figura 3-23: Dinámica del Módulo de Young de los frutos de lulo bajo el efecto de los tratamientos de empaque

Por otra parte es importante destacar que el tratamiento control quedó categorizado al momento de realizar el análisis de comparación de medias como el tratamiento que tuvo los valores más bajos de E diferenciándose significativamente de los otros tres tratamientos de atmósferas modificadas aplicados, esto puede ser debido a las mayores pérdidas de agua de estos frutos por efecto de transpiración, menor turgencia de las células y en consecuencia menor resistencia a la fractura cuando fueron sometidos a esfuerzos de compresión.

Este comportamiento también es señalado por (Forero-Cabrera et al., 2017) cuando midieron el módulo de Young para frutos empacados con o sin hojas de bananos bajo diferentes condiciones de temperaturas entre 7 y 20 °C y de humedades relativas entre 50 y 90 %,

encontrando que aquellos que fueron almacenados con mayor protección, es decir, donde se intercaló hojas de bananos entre capas de frutos tuvieron valores más altos de módulos de Young que aquellos empacados de forma tradicional, explican que este patrón de comportamiento se debe a una menor pérdida de humedad en aquellos frutos protegidos con hojas de banano. Por otra parte a diferencia de lo encontrado en la presente investigación el rango en que fluctuó E en la investigación desarrollada por (Forero-Cabrera et al., 2017) fue entre 6,18 y 34,55 MPa mientras que en la presente fue entre 2,8 y 5,3 MPa, sin embargo, coinciden con los reportados por (Grotte et al., 2002) para manzanas almacenadas por 186 días cuyo rango de fluctuación estuvo entre 2,00 y 3,33 MPa.

3.4.7. Sólidos solubles totales y pH

En cuanto a la evolución de los sólidos solubles totales (SST) y los pH mostrados en la Figura 3-24 se puede comentar que las gráficas muestran un ligero aumento de los SST a medida que avanzan los días de almacenamiento mientras que el pH tuvo un ligero descenso de 3,4 al inicio del experimento hasta 3,1 a los 30 días de almacenamiento.

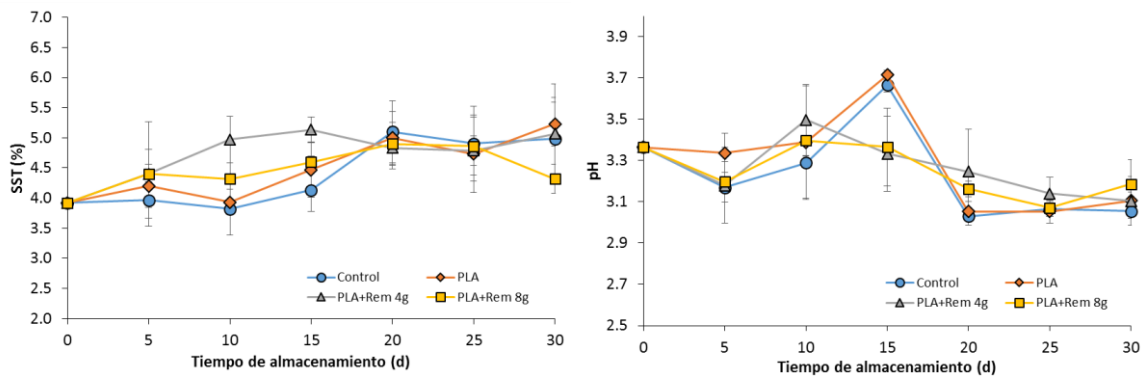


Figura 3-24: Dinámica de los sólidos solubles totales y el pH de los frutos de lulo bajo el efecto de los tratamientos de empaque

En términos generales los SST encontrados en los lulos evaluados están por debajo de los encontrados en otras investigaciones tales como (Arango et al., 1999) quienes muestran valor mínimo y máximo en SST independientemente del tratamiento evaluado entre 7,1 y 9,3 respectivamente; (González et al., 2014) entre 6,58 y 9,04, respectivamente; (Molano-Díaz et al., 2022) entre 8,51 y 11,13, mientras que con (Mejía et al., 2012) se coincide al menos con el límite inferior para el que reportan un valor de 4,2 pero no con el superior que es de 10,3. Esto se puede

deber a condiciones propias de manejo agronómico de los lulos utilizados en la presente investigación ya que los valores de SST siempre fueron bajos incluso al inicio de los experimentos con 3,9 % de SST.

Respecto a la evolución en los valores de pH, los rangos encontrados coinciden con los reportados por (González et al., 2014) quienes muestran valor mínimo y máximo de pH independientemente del tratamiento aplicado de 2,89 y 2,94, respectivamente; (Mejía et al., 2012) valores entre 3,67 y 3,90 y (Molano-Díaz et al., 2022) valores entre 2,66 y 2,98.

Los resultados muestran que las variables: SST y pH, son poco sensibles al uso de atmósferas modificadas para la preservación de lulos en fresco, posiblemente por tratarse de variables químicas que dependen mucho más de los constituyentes iniciales de los frutos que de los tratamientos físicos a los que sean sometidos los lulos.

3.4.8. Color: Luminosidad (L*) y coordenada b*

En cuanto a las variables de color: luminosidad (L*) y coordenada b* en el espacio CIELAB*, se nota un aumento significativo en sus valores entre el día inicial de almacenamiento y el día 5 para luego estabilizarse o incrementar ligeramente hasta el final del período de almacenamiento tal como se muestra en la Figura 3-25.

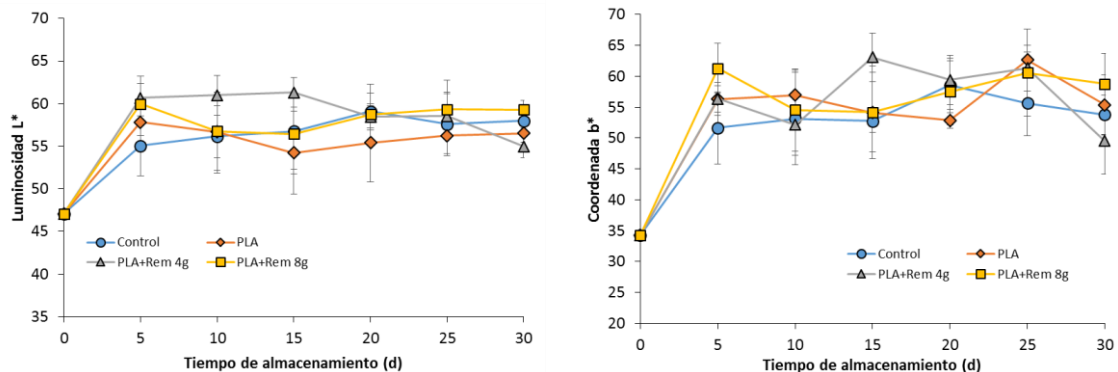


Figura 3-25: Dinámica del color: luminosidad y coordenada b* de los frutos de lulo bajo el efecto de los tratamientos de empaque

El rango de luminosidad encontrado en la presente investigación: 47,1 – 61,3, contiene al encontrado por (Molano-Díaz et al., 2022) que fue entre 54,9 y 59 y tiene tendencia similar a la

graficada por (Mejía et al., 2012). También es importante mencionar que se presentaron diferencias significativas entre el tratamiento PLA + Rem 4g y el de PLA a lo largo del tiempo, sin embargo, ambos no se diferenciaron de los tratamientos intermedios, tal diferencia aunque significativa no permite generar afirmaciones contundentes en cuanto a los factores que provocaron tal respuesta ya que el comportamiento mostrado por los otros dos tratamientos va en contrasentido, se necesita seguir evaluando el efecto de la concentración de gases de interés como el oxígeno y el dióxido de carbono para poder identificar la existencia o no de causalidad con respecto a las variaciones de luminosidad de los frutos de lulos.

En cuanto al rango de la coordenada b^* encontrado en la presente investigación: 34,3 – 63,1, el cual contiene al encontrado por (Molano-Díaz et al., 2022) que fue entre 43,6 y 52,9 y con tendencia similar a la graficada por (Mejía et al., 2012) se puede afirmar que no hay diferencias significativas entre los tratamientos evaluados, es decir, las diferentes concentraciones de oxígeno y dióxido de carbono a la que estuvieron expuestos los frutos no afectaron el grado en que el color de los mismos tendió hacia el tono amarillo.

3.4.9. Análisis integrado

Los resultados encontrados son un paso en la investigación y el desarrollo de la industria frutícola del lulo en Colombia ya que ponen de manifiesto las ventajas de utilizar empaques con atmósfera modificada y la utilización de removedor de oxígeno y humedad para prolongar la vida útil poscosecha de lulos, ya que logra reducir significativamente la pérdida de peso de los frutos mediante la disminución de la transpiración; conservar la apariencia general al momento de ser cosechados por más tiempo; alcanzar una vida útil de 25 días de almacenamiento bajo una condición de 12 °C mediante la reducción de la velocidad de respiración de los frutos y del crecimiento de microorganismos aerobios por haber menos oxígeno y agua libre disponible para el crecimiento y desarrollo de los mismos, así como para la condensación en las superficies internas del empaque lo cual también mejora la transparencia del mismo y el consumidor final puede visualizar con más facilidad el contenido. Estas mejoras fueron más acentuadas en los empaques que se incluyó 'sachets' con 8 g de removedor debido a que se formó la atmósfera modificada más acentuada, es decir, con menor concentración de oxígeno y mayor concentración de dióxido de carbono.

Por otra parte la presente investigación es un eslabón necesario si se desea trabajar en el empaçado, distribución y comercialización de lulos mínimamente procesados, valor agregado que sería muy apreciado por consumidores de la sociedad actual en la que se dispone cada vez de menos tiempo para labores relacionadas con el hogar, sin embargo, llevar adelante esta innovación requerirá sin lugar a dudas un manejo apropiado del oxígeno para evitar el pardeamiento enzimático de lulos mínimamente procesados.

Los actores de la cadena de comercialización del lulo por su parte pueden hacer uso en el corto plazo de los resultados encontrados mediante la configuración de empaques para lulos bajo los estándares estudiados para mejorar el manejo poscosecha del mismo y aprovechar en su favor las ventajas que el sistema de empaque propuesto ofrece, lo cual incrementará su poder de negociación por disponer de más tiempo para colocar en el mercado las cosechas. Esto puede ser ejecutado mediante:

- La selección de lulos de calidad extra conforme a la Norma Técnica Colombiana 5093 (ICONTEC, 2002), es decir, sin ningún tipo de deméritos ó con deméritos tales como: raspaduras ocasionadas por ácaros, golpe de sol, quemaduras (efecto lupa) y sombreadamiento (causado por el contacto entre frutos en la planta) en un área de la piel del fruto menor al 5% y de calibre 26, es decir, con diámetro superior a los 61 cm y peso promedio de 125 g.
- El empaçado en envases plásticos rígidos adecuados para los lulos, la perforación de los mismos con objeto punzante cuyo orificio realizado sea de 0,35 mm de diámetro, y la inclusión de un removedor de limadura de hierro y poliacrilato de sodio equivalente al volumen libre y al usado en la presente investigación de 8 gramos para un espacio de cabeza promedio de 622 cm³.
- La promoción y el mercadeo de las ventajas de la novedosa forma de presentación y empaçado de los lulos y
- La concreción de las ventas a grandes cadenas de ventas al detal a nivel nacional y a exportadores de frutas.

4. Conclusiones y recomendaciones

4.1. Conclusiones

De acuerdo con los estudios realizados la mezcla con la mejor capacidad de remoción de oxígeno para la constitución del elemento activo fue de 50 % de limadura de hierro en polvo y 50 % de poliacrilato de sodio en polvo. A partir de esta mezcla fue posible determinar la cinética y los parámetros de remoción de O_2 con un modelo de pseudo primer orden en donde el removedor de O_2 pierde capacidad de remoción conforme va removiendo O_2 del sistema.

La respiración de los frutos de lulo (velocidad de consumo de O_2 y de generación de CO_2) fue representada a partir de un modelo combinando la cinética enzimática de Michaelis-Menten con inhibición anticompetitiva por CO_2 y la ecuación de Arrhenius para la dependencia de los parámetros cinéticos respecto a la temperatura. De acuerdo con los resultados cinéticos obtenidos, el fruto de lulo puede caracterizarse como un vegetal de baja-moderada velocidad de respiración.

En el ensayo de empaque, la configuración de un sistema activo con película altamente permeable al vapor de agua como el ácido poliláctico, más la inclusión de un removedor activo de oxígeno compuesto de limadura de hierro y poliacrilato de sodio permitió mantener la apariencia general de los frutos, reducir la pérdida de peso de los frutos y sostener valores más altos en la relación de madurez. Los niveles de O_2 y de CO_2 generados en la atmósfera modificada dentro del empaque fueron adecuados para la preservación de los frutos de lulo frescos a la temperatura de anaquel evaluada.

Con la inclusión del elemento activo removedor de O₂ en las cantidades evaluadas de 4-8 g fue posible la reducción en el nivel de O₂ en valores del 1-2 % adicional a lo conseguido únicamente con atmósferas modificadas obteniendo niveles de O₂ de aproximadamente 16 % y de CO₂ de 5 %. La relación de elemento activo fue de 1 g por cada 33 g de fruto empacado siendo satisfactoria para el empacado de este producto.

4.2. Recomendaciones

A partir de los resultados alcanzados en la presente investigación se pueden derivar líneas de trabajo adicionales para desarrollar el conocimiento adquirido.

Por una parte, es interesante investigar el efecto de empaques activos configurados de forma similar a los evaluados en la presente investigación respecto a la calidad y deterioro de lulos mínimamente procesados ya que esto puede llegar a impactar significativamente la cadena de producción, procesamiento y comercialización del lulo.

En futuras investigaciones en las que se evalúe el impacto de configuraciones de empaques sobre características de calidad del lulo se debe medir principalmente las siguientes variables: pérdida de peso (%), apariencia general, acidez total titulable, sólidos solubles totales, y relación de madurez, debido a que son las más influenciadas por el empaque en el que se encuentren.

Es necesario evaluar sistemas de empaque con una menor área de perforación o de otro modo, una menor capacidad de permeación de gases, en combinación con el elemento activo para determinar el efecto de bajas concentraciones de O₂ (<10 %) y altas de CO₂ (>10 %) sobre la calidad del fruto empacado. Así mismo, también es necesario explorar materiales con capacidades más altas de remoción de O₂ que puedan ser aplicados en menores cantidades o en circunstancias donde el empaque tiene una alta transferencia de O₂.

Referencias

- Acosta, Ó., Pérez, A. M., y Vaillant, F. (2009). Chemical characterization, antioxidant properties, and volatile constituents of naranjilla (*Solanum quitoense* Lam.) cultivated in Costa Rica. *Archivos latinoamericanos de nutrición*, 59(1), 88.
- Aday, M. S., y Caner, C. (2011). The Applications of -active packaging and chlorine dioxide- for extended shelf life of fresh strawberries. *Packaging technology and science*, 3, 123
- Agudelo-Rodríguez, G., Moncayo-Martínez, D., y Castellanos, D. (2020). Evaluation of a predictive model to configure an active packaging with moisture adsorption for fresh tomato. *Food Packaging and Shelf Life*, 23.
- Al-Nasra, M., y Daoud, M. (2013). Investigating the use of super absorbent polymer in plain concrete. *International Journal of Emerging Technology and Advanced Engineering*, 3(8), 598-603.
- Arango, H., Vaillant, F., Vélez, V., y Millan, P. (1999). Evaluation of post-harvest performance of naranjilla (*Solanum quitoense* Lam.) fruits packed under modified atmosphere (MA). *Fruits*, 54(4), 261-270.
- Arias Vargas Francisco Javier (2015). Inteligencia de mercados para la cadena del lulo (*Solanum quitoense*). *Journal of Agriculture and Animal Sciences*, 3(2).
- Betoret, N., Hinestroza, L. I., Seguí, L., y Barrera, C. (2019). Probiotics and other bioactive compounds with proven effect against obesity and hypertension: food design opportunities from Lulo Fruit (*Solanum quitoense*). *Nutraceuticals-Past, Present and Future*, 59.
- Bhande, S. D., Ravindra, M. R., y Goswami, T. K. (2008). Respiration rate of banana fruit under aerobic conditions at different storage temperatures. *Journal of Food Engineering*, 87(1), 116-123.

- Braga, L. R., Sarantópoulos, C. I., Peres, L., y Braga, J. W. (2010). Evaluation of absorption kinetics of oxygen scavenger sachets using response surface methodology. *Packaging Technology and Science*, 23(6), 351-361.
- Briz, T., Sijtsema, S. J., Jasiulewicz, A., Kyriakidi, A., Guàrdia, M. D., van den Berg, I., y Van der Lans, I. (2008). Barriers to fruit consumption: Driving forces behind consumer behaviour. *Scripta Horticulturae*, 8(1), 7-18.
- Casierra-Posada, F. García, E. J. y Lüdders, P. (2004). Determinación del punto óptimo de cosecha en el lulo (*Solanum quitoense* Lam. var. *quitoense* y *septentrionale*). *Agronomía Colombiana*, 22(1), 32-39. <https://revistas.unal.edu.co/index.php/agrocol/article/view/17765/18591>
- Castellanos, D. A., Cerisuelo, J. P., Hernandez-Muñoz, P., Herrera, A. O., y Gavara, R. (2016). Modelling the evolution of O₂ and CO₂ concentrations in MAP of a fresh product: Application to tomato. *Journal of Food Engineering*, 168, 84-95.
- Castellanos, D. A., Polanía, W., y Herrera, A. O. (2016a). Development of an equilibrium modified atmosphere packaging (EMAP) for feijoa fruits and modeling firmness and color evolution. *Postharvest Biology and Technology*, 120, 193-203.
- Castellanos, D. A., y Herrera, A. O. (2017). Modified atmosphere packaging: Design and optimization strategies for fresh produce. *Postharvest handling*, 85.
- Castellanos, D. A., Mendoza, R., Gavara, R., y Herrera, A. O. (2017a). Respiration and ethylene generation modeling of “Hass” avocado and feijoa fruits and application in modified atmosphere packaging. *International Journal of Food Properties*, 20(2), 333-349.
- CBI, Centre for the promotion of imports from developing countries (2022). CBI Ministry of Foreign Affairs. Obtenido de CBI Ministry of Foreign Affairs: <https://www.cbi.eu/market-information/fresh-fruit-vegetables/exotic-tropical-fruit/market-potential>
- Cichello, S. A. (2015). Oxygen absorbers in food preservation: a review. *Journal of food science and technology*, 52(4), 1889-1895.
- Charles F., Sanchez J. and Gontard N. (2005). Modeling of active modified atmosphere packaging of endives exposed to several postharvest temperatures. *Journal of Food Science* 70: E443E449.
- Charles, F., Sanchez, J., y Gontard, N. (2006). Absorption kinetics of oxygen and carbon dioxide scavengers as part of active modified atmosphere packaging. *Journal of food Engineering*, 72(1), 1-7.

- Choi HY, Lee YS (2013) Characteristics of moisture-absorbing film impregnated with synthesized attapulgite with acrylamide and its effect on the quality of seasoned laver during storage. *J Food Eng* 116:829–839. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2013.01.023>
- Departamento Administrativo Nacional de Estadísticas (DANE). (2022). Cuentas departamentales, Producto interno bruto por departamento 2020 provisional. Bogotá D.C.: DANE.
- Dey, A., y Neogi, S. (2019). Oxygen scavengers for food packaging applications: A review. *Trends in Food Science and Technology*, 90, 26–34. <https://doi-org.ezproxy.unal.edu.co/10.1016/j.tifs.2019.05.013>
- Dos Santos, S. F., Cardoso, R. D. C. V., Borges, Í. M. P., e Almeida, A. C., Andrade, E. S., Ferreira, I. O., y do Carmo Ramos, L. (2020). Post-harvest losses of fruits and vegetables in supply centers in Salvador, Brazil: Analysis of determinants, volumes and reduction strategies. *Waste Management*, 101, 161-170.
- Drago, E., Campardelli, R., Pettinato, M., y Perego, P. (2020). Innovations in Smart Packaging Concepts for Food: An Extensive Review. *Foods*, 9(11), 1bd. <https://doi-org.ezproxy.unal.edu.co/10.3390/foods9111628>
- Dwi, A., Rebezov, M., Mironov, S., Thangavelu, I., Aravindhan, S., Aljeboree, A. M., y Kamal Abdelbasset, W. (2021). Fruit preservation packaging technology based on air adjustment packaging method. *Food Science and Technology*.
- Firouz, M. S., Mohi-Alden, K., y Omid, M. (2021). A critical review on intelligent and active packaging in the food industry: Research and development. *Food Research International*, 141, 110113.
- Floros, J. D., y Matsos, K. I. (2005). Introduction to modified atmosphere packaging. In J. H. Han. *Innovations in food packaging* (pp. 159-172). San Diego: Elsevier. <http://dx.doi.org/10.1016/B978-012311632-1/50042-5>.
- Foltynowicz, Z., Bardenshtein, A., Saengerlaub, S., Antvorskov, H., y Kozak, W. (2017). Nanoscale, Zero valent iron particles for application as oxygen scavenger in food packaging. *Food Packaging and Shelf Life*, 11, 74–83.
- Forero, D. P., Masatani, C., Fujimoto, Y., Coy-Barrera, E., Peterson, D. G., y Osorio, C. (2016). Spermidine derivatives in lulo (*Solanum quitoense* Lam.) fruit: Sensory (taste) versus biofunctional (ACE-inhibition) properties. *Journal of agricultural and food chemistry*, 64(26), 5375-5383.

- Forero-Cabrera, N. M., Gutiérrez-Pacheco, S., Rivera-Acosta, J., Silva-Dimaté, A. F., y Sánchez-Sáenz, C. M. (2017). Banana leaf as packaging of lulo for different storage temperatures and the effects on postharvest characteristics. *Agronomía Colombiana*, 35(1), 107-115.
- Gaikwad, K.K., Singh, S. y Lee, Y.S. (2018). Oxygen scavenging films in food packaging. *Environmental Chemistry Letters* 16, 523–538. <https://doi.org/10.1007/s10311-018-0705-z>
- Gaikwad, K. K., Singh, S., y Ajji, A. (2019). Moisture absorbers for food packaging applications. *Environmental Chemistry Letters*, 17(2), 609-628.
- Galotto, M. J., Anfossi, S. A., y Guarda, A. (2009). Oxygen absorption kinetics of sheets and films containing a commercial iron-based oxygen scavenger. *Food science and technology international*, 15(2), 159-168.
- Gaona-Forero, A., Agudelo-Rodríguez, G., Herrera, A., y Castellanos, D. (2018). Modeling and simulation of an active packaging system with moisture adsorption for fresh produce. Application in 'Hass' avocado. *Food Packaging and Shelf Life*, 17, 187-195.
- Garavito, J., Herrera, A. O., y Castellanos, D. A. (2021). A combined mathematical model to represent transpiration, respiration, and water activity changes in fresh cape gooseberry (*Physalis peruviana*) fruits. *Biosystems Engineering*, 208, 152-163.
- Garavito, J., Mendoza, S. M., y Castellanos, D. A. (2022). Configuration of biodegradable equilibrium modified atmosphere packages, including a moisture absorber for fresh cape gooseberry (*Physalis peruviana* L.) fruits. *Journal of Food Engineering*, 314, 110761.
- Gómez, J.M., Castellanos, D.A., y Herrera, A.O. (2019). Modeling respiration and transpiration rate of minimally processed pineapple (*Ananas comosus*) depending on temperature, gas concentrations and geometric Configuration. *Chemical Engineering Transactions*, 75: 547-552. <https://doi.org/10.3303/CET1975092>
- González, D. I., Ordóñez, L. E., Vanegas, P. y Vásquez, H. D. (2014). Cambios en las propiedades fisicoquímicas de frutos de lulo (*Solanum quitoense* Lam.) cosechados en tres grados de madurez. *Acta Agronómica*, 63(1), 11-17.
- Grosvenor A.P., Kobe V.A. and McIntyre N.S. (2005). Activation energies for the oxidation of iron by oxygen gas and water vapour. *Surface Science* 574: 317321
- Grotte, M., Duprat, F., Piétri, E., y Loonis, D. (2002). Young's modulus, Poisson's ratio, and Lamé's coefficients of golden delicious apple. *International Journal of Food Properties*, 5(2), 333-349.

- Herrera, A.O., Castellanos, D.A., Mendoza, R. and Patiño, L.S. (2020). Design of perforated packages to preserve fresh produce considering temperature, gas concentrations and moisture loss. *Acta Horticulturae*, 1275, 185-192. <https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2020.1275.26>
- Hubbe, M. A., y Koukoulas, A. A. (2016). Wet-laid nonwovens manufacture—chemical approaches using synthetic and cellulosic fibers. *BioResources*, 11(2), 5500-5552.
- Ho, P. L., Tran, D. T., Hertog, M. L., y Nicolaï, B. M. (2020). Modelling respiration rate of dragon fruit as a function of gas composition and temperature. *Scientia Horticulturae*, 263, 109138.
- ICONTEC Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación, (2002). Frutas frescas. Lulo de Castilla. Especificaciones. NTC 5093. <https://ecollection.icontec.org/normavw.aspx?ID=4291>
- Igual, M., Ramires, S., Mosquera, L. H. y Martínez-Navarrete, N. (2014). Optimization of spray drying conditions for lulo (*Solanum quitoense* L.) pulp. *Powder Technology*, 256, 233-238. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2014.02.003>
- Jaime-Guerrero, M., Álvarez-Herrera, J., Fischer, G. (2022). Aspectos de la fisiología y el cultivo del lulo (*Solanum quitoense* Lam.) en Colombia: Una revisión. *Revista de Investigación Agraria y Ambiental*, 13(1), 131 – 148. DOI: <https://doi.org/10.22490/21456453.4641>
- Jalali, A., Seiedlou, S., Linke, M., y Mahajan, P. (2017). A comprehensive simulation program for modified atmosphere and humidity packaging (MAHP) of fresh fruits and vegetables. *Journal of Food Engineering*, 206, 88-97. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2017.03.007>.
- Jogappa, J. (2018). Influence of modified atmosphere package on quality of cherry tomato (*Solanum lycopersicum* var. *cerasiforme*) fruits. *IJCS*, 6(6), 138-143.
- Kargwal, R., Garg, M. K., Singh, V. K., Garg, R., y Kumar, N. (2020). Principles of modified atmosphere packaging for shelf life extension of fruits and vegetables: an overview of storage conditions. *IJCS*, 8(3), 2245-2252.
- Kuswandi, B. (2020). Active and intelligent packaging, safety, and quality controls. *Fresh-cut fruits and vegetables*, 243-294.
- Liu, Y., Sun, Y., Sun, L., Rizwan-ur-Rehman, y Wang, Y. (2016). In vitro and in vivo study of sodium polyacrylate grafted alginate as microcapsule matrix for live probiotic delivery. *Journal of Functional Foods*, 24, 429–437. <https://doi-org.ezproxy.unal.edu.co/10.1016/j.jff.2016.03.034>

- Llerena Silva, W. M., Samaniego, I. R., Navarro Huidobro, M., Ortíz, J., y Angós, I. (2020). Effect of modified atmosphere packaging (MAP) in the antioxidant capacity of arazá (*Eugenia stipitata* McVaugh), naranjilla (*Solanum quitoense* Lam.), and tree tomato (*Solanum betaceum* Cav.) fruits from Ecuador. *Journal of Food Processing and Preservation*, 2020, 44 (10), e14757.
- Meherishi, L., Narayana, S. A., y Ranjani, K. S. (2019). Sustainable packaging for supply chain management in the circular economy: A review. *Journal of cleaner production*, 237, 117582.
- Mejía D, C. M., Gaviria A, D., Duque C, A. L., Rengifo R, I., Aguilar F, E., y Alegría S, A. H. (2012). Physicochemical characterization of the lulo (*Solanum quitoense* Lam.) castilla variety in six ripening stages. *Vitae*, 19(2), 157-165.
- Mendoza, R., Castellanos, D. A., García, J. C., Vargas, J. C., y Herrera, A. O. (2016). Ethylene production, respiration and gas exchange modelling in modified atmosphere packaging for banana fruits. *International Journal of Food Science y Technology*, 51(3), 777-788.
- Messinger, J., y Lauerer, M. (2015). *Solanum quitoense*, a new greenhouse crop for Central Europe: Flowering and fruiting respond to photoperiod. *Scientia horticulturae*, 183, 23-30.
- Molano-Díaz, Julián M.; Reyes M., Andrea, Johana; Álvarez H., Javier G. (2022). El 1-metilciclopropano y la temperatura de almacenamiento en la poscosecha de lulo (*Solanum quitoense* Lam.). *Revista Biotecnología en el Sector Agropecuario y Agroindustrial*, v. 20, n. 2.
- Morillo, A. C., Rodríguez, A. y Morillo, Y. (2019). Caracterización morfológica de lulo (*Solanum quitoense* Lam.) en el municipio de Pachavita, Boyacá. *Acta Biológica Colombiana*, 24(2), 291-298. <https://doi.org/10.15446/abc.v24n2.75832>
- Muñoz, J. C., Puentes, Á., y Villamizar, F. (1999). Evaluación de pérdidas poscosecha del lulo (*Solanum quitoense* lam.), comercializado en un empaque tradicional. *Ingeniería e Investigación*, (43), 46-50.
- Muñoz B, J., Rodríguez C, L. F., y Criollo, H. (2014). Technical-economic characterization of the lulo production system (*Solanum quitoense* Lam.) in the department of Nariño. *Agronomía Colombiana*, 32(2), 276-282.
- Ochoa-Vargas, L. M., Balaguera-López, H. E., Ardila-Roa, G., Pinzón-Sandoval, E. H., y Álvarez-Herrera, J. G. (2016). Crecimiento y desarrollo del fruto de lulo (*Solanum quitoense* Lam.)

- en el municipio de San Antonio del Tequendama (Colombia). *Ciencia y Tecnología Agropecuaria*, 17(3), 347-359. https://doi.org/10.21930/rcta.vol17_num3_art:512
- Olveira-Bouzas, V., Pita-Calvo, C., Vázquez-Odériz, M. L., y Romero-Rodríguez, M. Á. (2021). Evaluation of a modified atmosphere packaging system in pallets to extend the shelf-life of the stored tomato at cooling temperature. *Food Chemistry*, 364, 130309.
- Pérez, D. A., Gómez, J. M., y Castellanos, D. A. (2021). Combined modified atmosphere packaging and guar gum edible coatings to preserve blackberry (*Rubus glaucus* Benth). *Food Science and Technology International*, 27(4), 353-365.
- Rahayu, D., Bintoro, N., y Saputro, A.D. (2021). Modelling the respiration rate of mango (cv. Manalagi) during storage under various temperatures and gas compositions. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 653, 012018. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/653/1/012018>
- Ramírez, F., Kallarackal, J., y Davenport, T. L. (2018). Lulo (*Solanum quitoense* Lam.) reproductive physiology: A review. *Scientia horticultrae*, 238, 163-176.
- Royston, J. P. (1982). Algorithm AS 181: The W Test for Normality. *Applied Statistics*, 31(2), 176-180.
- Sabbe, S. y Van Damme, Patrick y Verbeke, Wim. (2013). European market environment for selected latin american tropical fruit species. *Acta Horticulturae*. 975. 615-623. [10.17660/ActaHortic.2013.975.78](https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2013.975.78).
- Sand, C. K. (2020). Active and Intelligent Packaging= Longer Shelf Life. *Food Technology*, 74(4), 128-130.
- Sousa-Gallagher, M. J., y Mahajan, P. V. (2013). Integrative mathematical modelling for MAP design of fresh-produce: theoretical analysis and experimental validation. *Food Control*, 29(2), 444-450. [http:// dx.doi.org/10.1016/j.foodcont.2012.05.072](http://dx.doi.org/10.1016/j.foodcont.2012.05.072).
- Viera, W., Díaz, A., Caicedo, C., Suárez, A., y Vargas, Y. (2021). Key Agronomic Fertilization Practices that Influence Yield of Naranjilla (*Solanum quitoense*) in the Ecuadorian Amazon. *Agronomy*, 11(2), 310.
- Yan, M. R., Hsieh, S., y Ricacho, N. (2022). Innovative food packaging, food quality and safety, and consumer perspectives. *Processes*, 10(4), 747.
- Yildirim, S., Röcker, B., Pettersen, M. K., Nilsen-Nygaard, J., Ayhan, Z., Rutkaite, R., y Coma, V. (2018). Active packaging applications for food. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 17(1), 165-199.

Yun, X., Wang, Y., Li, M., Jin, Y., Han, Y., y Dong, T. (2017). Application of permselective poly (ϵ -caprolactone) film for equilibrium-modified atmosphere packaging of strawberry in cold storage. *Journal of Food Processing and Preservation*, 41(6), e13247. <http://dx.doi.org/10.1111/jfpp.1324>