

## 7. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### 7.1 Características fisicoquímicas de la mora azul

Ambos lotes de mora azul se caracterizaron inmediatamente después de ser adquiridos, los datos de dicha caracterización se muestran en la tabla XII.

Tabla XII. Características fisicoquímicas de mora azul

Característica	Valor	
	Lote 1	Lote 2*
Humedad (%bh)	84.64 ± 0.19	85.81± 0.27
pH	3.13 ± 0.09	2.93±0.03
°Bx	12.82 ± 0.38	12.5± 0
aw	0.977 ± 0.001	0.992± 0.04
% acidez (ácido cítrico)	0.324 ± 0.05	0.39 ± 0.01
Índice de madurez		
(°Bx/ %acidez)	0.40 ± 0.06	0.32 ± 0.03
Textura (fuerza max.(g))	9 959 ± 2031	12 503 ± 572
color		
L	15.9 ± 1.59	10.75 ± 2.05
a	1.80 ± 0.44	-4.7 ± 1.38
b	- 0.79 ± 0.53	9.92 ± 2.13

Fruta usada para respiración y almacenamiento

Los lotes fueron adquiridos con diferentes proveedores. Los valores de humedad, pH, °Bx, % acidez e índice de madurez no presentan grandes diferencias entre ambos lotes. Los valores de textura (fuerza max ) según la tabla XII indican que la fruta del lote 2

(12 503 g ) es más firme que la del lote 1(9 959 g). El lote 1 se usó para pruebas preeliminares y el lote 2 para determinar la velocidad de respiración y el empaçado.

### 7.2 Determinación de la velocidad de transmisión de vapor de agua (VTVA) de las películas poliméricas plásticas

Previo a la determinación de VTVA, se midieron los valores de los espesores de cada película, los cuales se presentan en la tabla XIII.

Tabla XIII. Espesores de las películas semipermeables utilizadas

Película	Espesor	
	$\mu\text{m}^*$	mil**
Cryovac CP9250 (delgada)	44.45	1.75
Cryovac PC7225B (gruesa)	63.5	2.5
Nybar	88.9	3.5
Poliiolefina	35.05	1.38
Cryovac PC7235B	88.9	3.5
Biofresh	40.64	1.6

\* $\mu\text{m}$  = micrometros, \*\*mil= milésima de pulgada

Respecto a los valores de espesor manejados por los proveedores hay mucha variedad, cryovac maneja espesores de 2.5 – 5 mil, algunos reportan valores de 100  $\mu\text{m}$  (Labuza y Breene, 1989) y otros reportados como de alta barrera (nybar) manejan espesores de 300  $\mu\text{m}$  a > 550  $\mu\text{m}$ , así que las películas usadas en este trabajo son delgadas.

En la figura 7.1 se presentan los datos de ganancia en peso contra tiempo de las cinco películas a 5°C., en la figura 7.2 los datos correspondientes a 25°C a la primera variante de tiempo (cada 2 h durante 16 h, a las 22 y 24 h) donde se observa que para 5°C (figura 7.1) la película con mayor ganancia en peso es nybar y la menor es biofresh, sin embargo a 25°C (figura 7.2) tanto poliolefina como nybar presentan una ganancia en peso similar y la menor ganancia es para cryovac delgada. El efecto de la temperatura se hace evidente en que la ganancia en peso a 25°C es aproximadamente el doble que a 5°C.

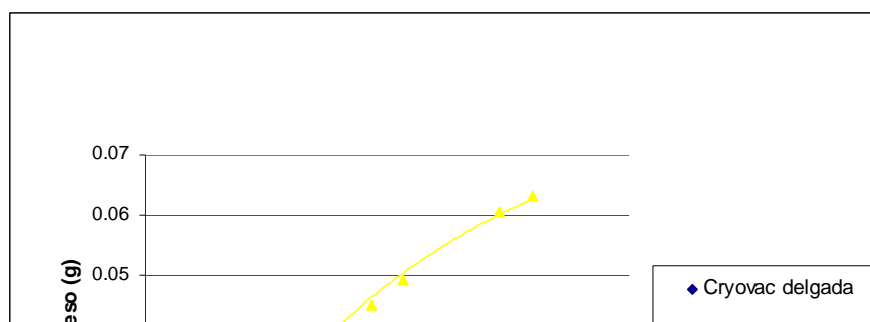


Figura 7.1 Gráfica de ganancia en peso respecto al tiempo de cinco películas a 5°C con la primera variante de tiempo (c/2 h).

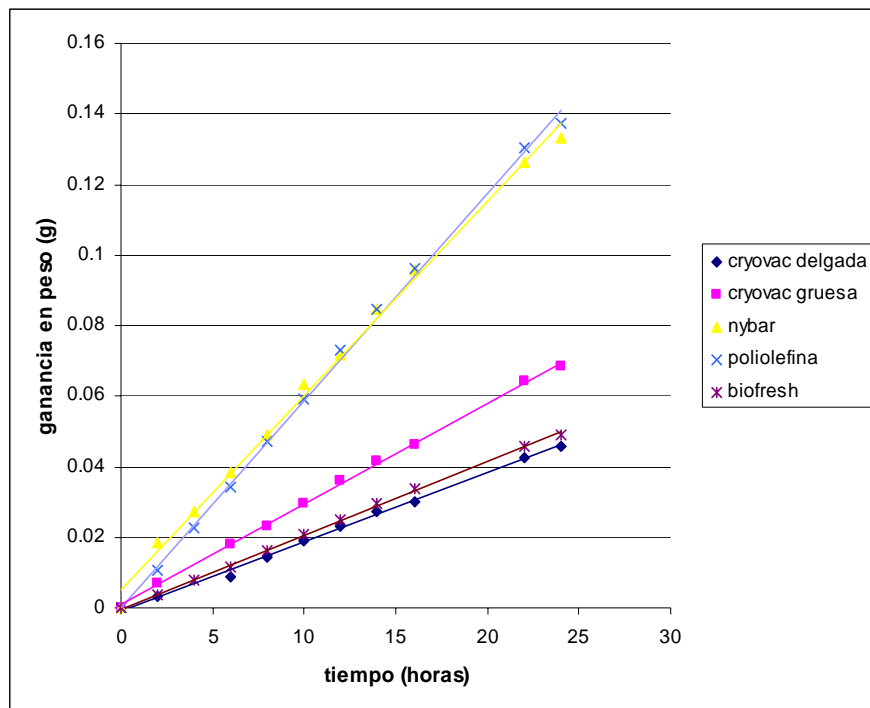


Figura 7.2 Gráfica de ganancia en peso respecto al tiempo de cinco películas a 25°C con la primera variante de tiempo (c/2 h).

La VTVase midió para cinco películas, los resultados para la primera variante de medición (cada 2 horas) se presentan en la tabla XIV.

Tabla XIV. Velocidad de transmisión de vapor de agua (VTVA) de películas poliméricas a 5 y 25 °C.

Película	Temperatura (°C)	VTVA (g/m <sup>2</sup> día)	R <sup>2</sup>
Cryovac CP9250 (delgada)	5	6.57	0.862
	25	19.87	0.992
Cryovac PC7225B (gruesa)	5	11.62	0.894
	25	28.62	0.999
Nybar	5	24.24	0.958
	25	55.90	0.995
Poliolefina	5	14.82	0.925
	25	59.60	0.998
Biofresh	5	6.06	0.7748
	25	21.21	0.999

<sup>1</sup> Medidas hechas cada 2 horas durante 16 h y a las 22 y 24 h.

De acuerdo a la tabla XIV los valores de VTVA a 25°C tienen un mejor ajuste lineal que los obtenidos a 5°C ya que los valores de R<sup>2</sup> son mayores. Además el mayor valor para VTVA a 5°C corresponde a la película nybar (24.24 g/m<sup>2</sup> día) y el menor a biofresh (6.06 g/m<sup>2</sup> día), y a 25°C el mayor valor es para poliolefina (59.6 g/m<sup>2</sup> día) y nybar (55.9 g/m<sup>2</sup> día) mientras que el menor es para cryovac CP9250 (19.87 g/m<sup>2</sup> día).

Los resultados de VTVA obtenidos para la 2ª variante (0, 6, 12, 24, 48 h) se presentan en la tabla XV y las gráficas de ganancia en peso a 5, 15 y 25°C en las figuras 7.3, 7.4 y 7.5 respectivamente.

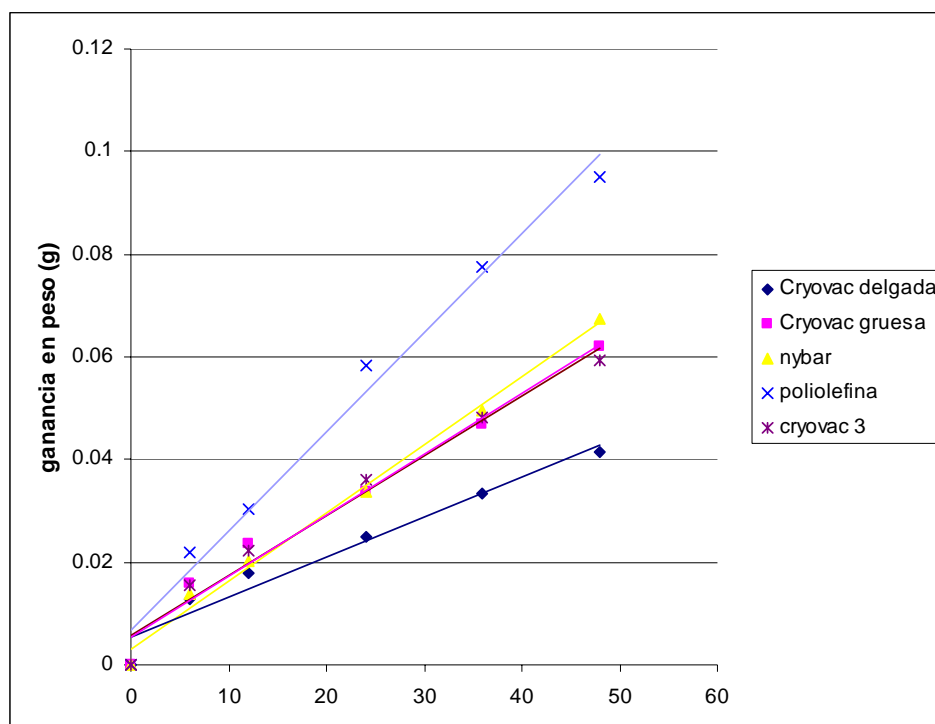


Figura 7.3 Gráfica de ganancia en peso respecto al tiempo de cinco películas a 5°C con la segunda variante de tiempo (0, 6, 12, 24, 48 h).

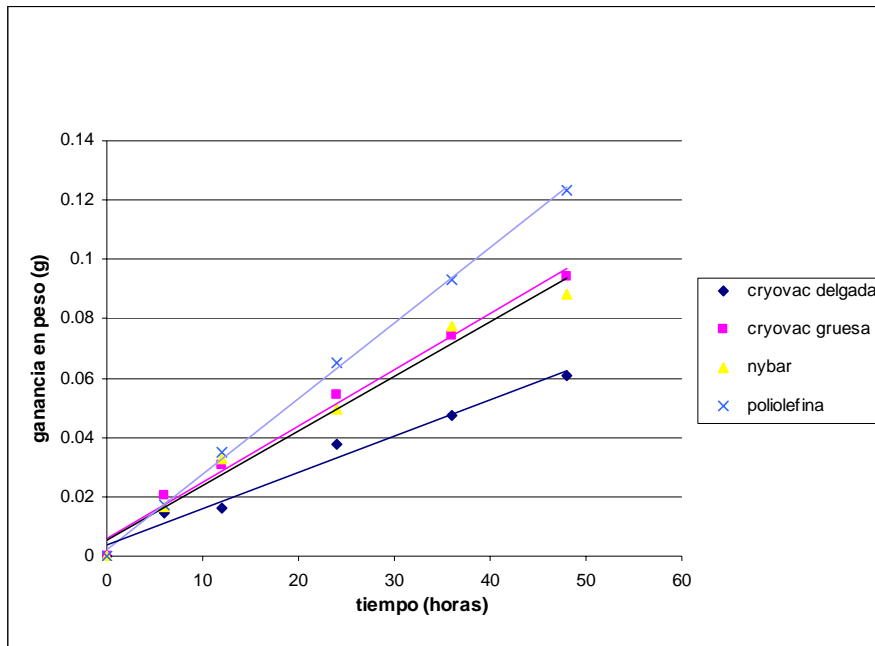


Figura 7.4 Gráfica de ganancia en peso respecto al tiempo de cinco películas a 15°C con la segunda variante de tiempo (0, 6, 12, 24,48 h)

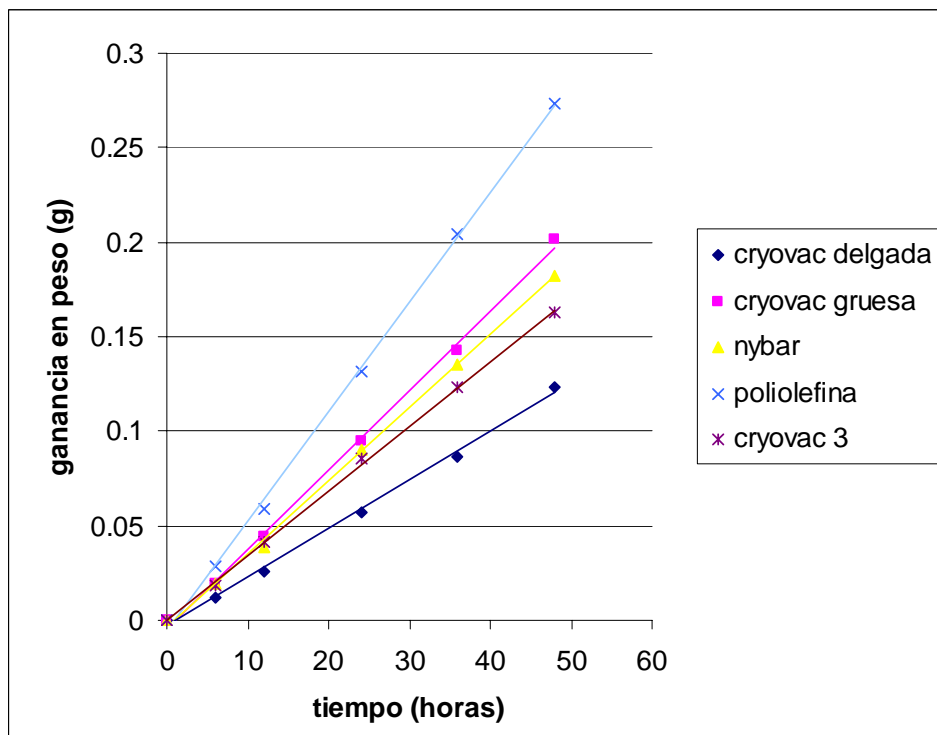


Figura 7.5 Gráfica de ganancia en peso respecto al tiempo de cinco películas a 25°C con la segunda variante de tiempo (0, 6, 12, 24, 48 h).

En las figuras 7.3, 7.4 y 7.5 se observa que la mayor ganancia en peso corresponde a la película poliolefina, la menor a cryovac delgada y valores intermedios y semejantes para cryovac gruesa, nybar y cryovac 3.

Tabla XV . Velocidad de transmisión de vapor de agua (VTVA) de películas poliméricas a 5,15 y 25°C <sup>2</sup>.

Película	Temperatura (°C)	VTVA (g/m <sup>2</sup> dia)	R <sup>2</sup>
Cryovac CP9250 (delgada)	5	9.09	0.991
	15	16.16	0.9974
	25	26.26	0.9973
Cryovac PC7225B (gruesa)	5	12.12	0.9768
	15	19.19	0.9896
	25	42.42	0.9997
Nybar	5	12.12	0.9925
	15	21.21	0.9789
	25	39.4	0.9988

Poliiolefina	5	19.19	0.9836
	15	25.25	0.9986
	25	58.59	0.9989
Cryovac PC7235B (Cryovac 3)	5	21.21	0.9748
	15	28.28	0.9484
	25	46.46	0.9992

<sup>2</sup> Medidas hechas a las 0, 6, 12, 24, 48 h

En la tabla XV se observa que las correlaciones lineales de ganancia en peso contra tiempo también son buenas ( $R^2$  mayor 0.970), la película Cryovac PC7235B tuvo los mayores valores de VTVA a 5 y 15°C (21.21 y 28.28 g/m<sup>2</sup> día), por su parte la película poliolefina tuvo el mayor valor de WVTR a 25°C (58.59 g/m<sup>2</sup> día). Los valores de VTVA más bajos a las tres temperaturas correspondieron a Cryovac PC9250 (9.09 g/m<sup>2</sup>día a 5°C, 16.16 g/m<sup>2</sup>día a 15°C y 26.26 g/m<sup>2</sup>día a 25°C).

La frecuencia de las mediciones tiene un efecto importante en el valor de VTVA, ya que a intervalos de tiempo más largos se obtienen valores más altos, debido a que se permite conservar el equilibrio dentro de las celdas, así que a la variante de intervalos de tiempo mayores (0, 6, 12, 24, 48 h) hay una menor ruptura del equilibrio dentro de la celda y la correlación lineal de ganancia en peso contra tiempo es mejor respecto a la primera variante (c/ 2 h). Así que los valores de VTVA correspondientes a la segunda variante se usaron para determinar el efecto de la temperatura con la ecuación de Arrhenius.

Para determinar el efecto de la temperatura sobre la VTVA se aplicó la ecuación de Arrhenius a los valores de VTVA obtenidos con la segunda variante de medición (0, 6, 12, 24, 48 h), obteniéndose los valores que se muestran en la figura 7.6 y en la tabla XVI.

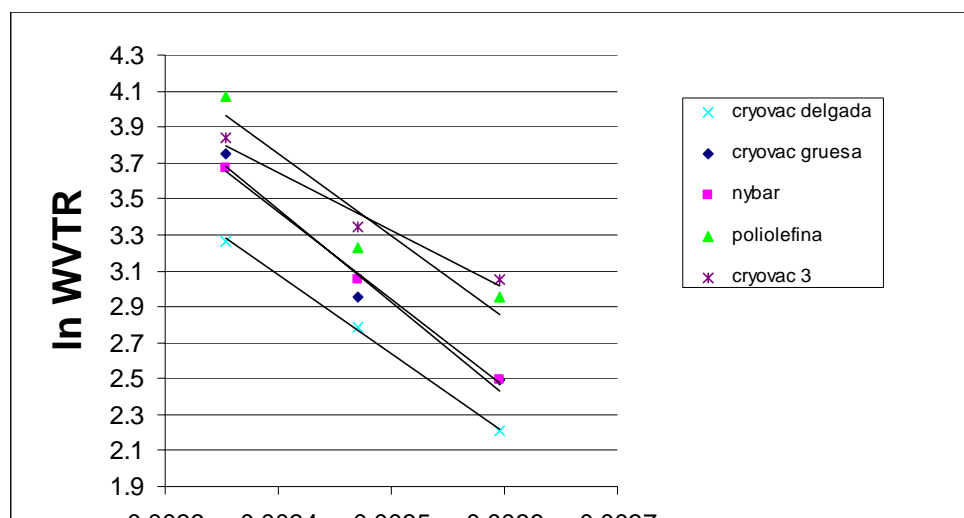


Figura 7.6 Gráfica de Arrhenius para VTVA de las películas semipermeables.

Tabla XVI. Parámetros de la ecuación de Arrhenius: energía de activación de VTVA ( $E_{VTVA}$ ) y constante de VTVA ( $VTVA^{\circ}$ ) de las películas poliméricas.

Película	$E_{VTVA}$ (kcal/mol)	$\ln VTVA$ (b)	$R^2$
Cryovac CP9250 (delgada)	7.83	16	0.9991
Cryovac PC7225B (gruesa)	10.23	21	0.9705
Nybar	9.65	20	0.9976
Poliolefina	9.09	19	0.9096
Cryovac PC7235B (cryovac 3)	6.4	14	0.9705

Según la figura 7.6 VTVA se incrementa conforme se incrementa la temperatura, además los coeficientes de correlación lineal ( $r^2$ ) de  $1/T$  contra  $\ln VTVA$  son mayores a 0.900, esto señala el comportamiento lineal de las películas respecto a la temperatura (Lozada, 2001) en este intervalo.

La energía de activación de VTVA ( $E_{VTVA}$ ) indica la sensibilidad de las películas a los cambios de temperatura, es decir, a mayor energía de activación mayor es la VTVA de la película conforme se incrementa la temperatura. La película que más incrementa su VTVA conforme se incrementa la temperatura (tabla XVI) es cryovac gruesa ( $E_{VTVA} = 10.23$ ), por el contrario la que menos incremento presenta es Cryovac PC7235B ( $E_{VTVA} = 6.4$ ).

Las películas nybar y poliolefina, tienen una sensibilidad al cambio de temperatura muy semejante ( $E_{VTVA} = 9.65$  y  $9.09$  respectivamente), pero la diferencia entre los valores de las cinco películas no es tan grande como sucede con los datos reportados por Lozada (2001) (tabla XVII) donde los valores de  $E_{VTVA}$  oscilaron entre



2.1 (Cryovac PD961) y 11.4 (PEBAX MV 3000), comparando las  $E_{VTVA}$  de este trabajo con los reportados por Lozada (2001) Cryovac gruesa, nybar y poliolefina presentan una alta sensibilidad a la temperatura al igual que PEBAX y LDPE; las películas cryovac delgada y y cryovac 3 tienen una sensibilidad intermedia al igual que HDPE y MDPE.

Tabla XVII. Valores de Energía de activación reportados en la bibliografía para diferentes películas.

Película	$E_{VTVA}$ (kcal/mol)
PEBAX MV3000	11.4 <sup>1</sup>
LDPE	10.4 <sup>1</sup>
HDPE	5.2 <sup>1</sup>
MDPE	7 <sup>1</sup>
Cryovac PD961	2.1 <sup>1</sup>

<sup>1</sup>Lozada, 2001

Teniendo las ecuaciones correspondientes a la gráfica de Arrhenius (apéndice y figura 7.6 ) se puede predecir la VTVA de las cinco películas estudiadas a la temperatura que los proveedores reportan que hicieron las determinaciones. En la tabla XVIII se presentan los valores obtenidos con este trabajo y los reportados por los proveedores, se observa que en todos excepto poliolefina los valores calculados en este trabajo son por mucho mayores que los reportados por los proveedores; en el caso de la poliolefina aunque el valor calculado es mayor que el reportado la diferencia no es tan grande (26 %), en las películas en las que las determinaciones se hicieron a diferente %HR puede atribuirse a esta diferencia las discrepancias en los valores de VTVA.

Tabla XVIII. Comparación de los valores de VTVA calculados a partir de la ecuación de Arrhenius y los reportados por proveedores a la misma temperatura.

Película	VTVA (g/m <sup>2</sup> dia) este trabajo	VTVA (g/m <sup>2</sup> dia) proveedor	Temperatura (°C)
Cryovac CP9250	47.07	10.075	38

(delgada)	(100% HR)	(100% HR)	
Cryovac PC7225B	83.44	14	38
(gruesa)	(100% HR)	(90% HR)	
Nybar	65.30	9.3	37.8
	(100% HR)	(90 %HR)	
Poliiolefina	98.79	72.85	37.8
	(100% HR)	(90% HR)	
Cryovac PC7235B	63.94	9	38
(cryovac 3)	(100% HR)	(100% HR)	

Los valores reportados por otros autores para VTVA de diferentes películas se listan en la tabla XIX con el fin de comparar con los obtenidos en este trabajo.

Tabla XIX. Velocidad de transmisión de vapor de agua (VTVA) reportadas en la bibliografía

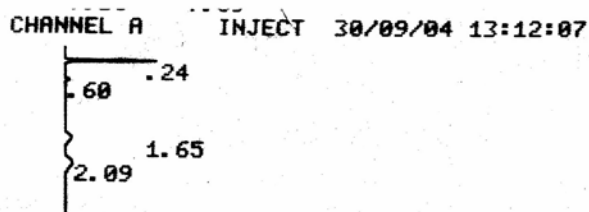
Película	Temperatura (°C)	VTVA (g/m <sup>2</sup> día)	Autor
PEBAX MV 3000	4	9.3	Lozada (2001)
	16	34.9	
CRYOVAC PD961	4	0.7	
	16	0.8	
LDPE	4	5.1	
	16	15.8	
HDPE	4	0.9	
	16	1	
MDPE	4	0.8	
	16	0.9	
PET biaxialmente orientado	38	16-20	ExxonMobil (2004)
EVOH	38	22-124	

Poliestireno orientado		38	109-155	
Nylon biaxialmente orientado	6	38	155-202	
Celofán		37.8	310-1549	Gontard et al.
LDPE		37.7	17.71	(1995)
Papel encerado		37.8	2.98 – 233.62	
Papel aluminio		37.7	0.1064	

Existen claras diferencias entre los valores de VTVA reportados debido tanto a las condiciones de determinación como a las propiedades de barrera del material, pero puede decirse que los valores de las películas estudiadas en este trabajo son comparables con los reportados en la bibliografía y podrían considerarse como de VTVA alta.

### 7.3 Curvas estándar de O<sub>2</sub> y CO<sub>2</sub>

A continuación se presenta un cromatograma (figura 7.7) obtenido en el integrador del cromatógrafo de gases, en dicha figura el tiempo de retención corresponde al tiempo en el cual aparece el pico correspondiente, así, al aire le corresponde un tiempo de 0.24 min, al CO<sub>2</sub> 0.6 min, al O<sub>2</sub> 1.65 min y al N<sub>2</sub> 2.09 min. El area bajo la curva (area bc) de cada pico es directamente proporcional a la concentración de los gases.



FILE	METHOD	RUN	INDEX
1.	0.	15	15
30/09/04 13:12:07			CH= "A" PS= 1.
PEAK#	AREA%	RT	AREA BC
1	49.18	0.24	4258 01
2	3.927	0.6	340 01
3	18.388	1.65	1592 01
4	28.505	2.09	2468 01
TOTAL	100.		8658

Figura 7.7. Cromatograma obtenido del integrador del cromatógrafo de gases

Se hicieron las curvas cromatográficas estándar de O<sub>2</sub> y CO<sub>2</sub> en las que se relacionan el área obtenida en el cromatógrafo de gases con la concentración correspondiente del gas (O<sub>2</sub> y CO<sub>2</sub>). En la figura 7.8 y 7.9 se presentan las gráficas y ecuaciones correspondientes.

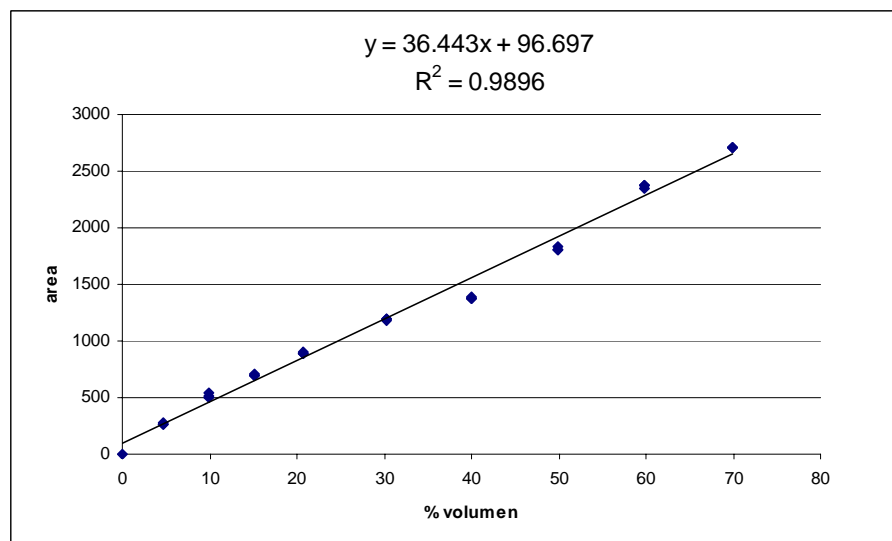


Figura 7.8 Curva estándar de O<sub>2</sub>

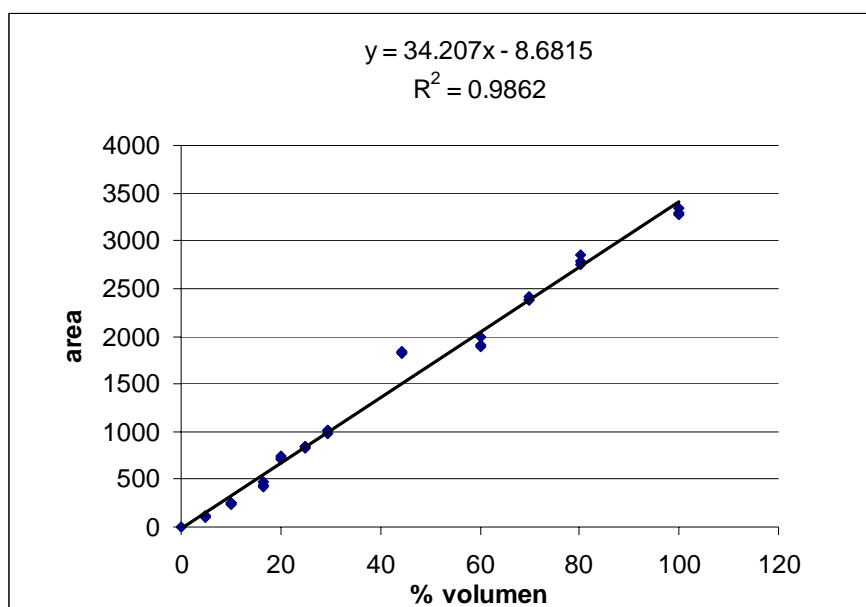


Figura 7.9 Curva estándar CO<sub>2</sub>

A partir de las curvas cromatográficas estándar, se determinó la concentración de O<sub>2</sub> y CO<sub>2</sub>, debido a que el ajuste de la curva de O<sub>2</sub> con el aire tenía una desviación de aprox. 2%, se uso un factor de corrección que consistió en restarle a todas las áreas un valor de 50 para partir de una concentración máxima de 21% O<sub>2</sub> (correspondiente al aire).

#### 7.4 Determinación de la permeabilidad al O<sub>2</sub> y CO<sub>2</sub>

Se determinó la permeabilidad al O<sub>2</sub> y CO<sub>2</sub> de la película poliolefina, que es la que se emplea para empacar mora azul (Cruz, 2004), a 5°C y 25°C. Los flujos usados fueron menores a 25 ml/min debido a que de acuerdo a las pruebas realizadas, a partir de ese valor no se detectó la presencia del gas permeante (O<sub>2</sub> o CO<sub>2</sub>) en el gas vector (N<sub>2</sub>).

En las tablas siguientes se presentan los valores de concentración en porcentaje durante el tiempo que duró cada experimento, para el cálculo de permeabilidad se tomaron los valores semejantes.

Tabla XX. Valores de concentración para el cálculo de permeabilidad a CO<sub>2</sub> de la película poliolefina a 5°C

flujo	4.6 ml/min	
tiempo (min)	area CO <sub>2</sub> en N <sub>2</sub>	%CO <sub>2</sub> en N <sub>2</sub>
13	61	2.037
66	245	7.42
125	470	13.99
171	628	18.61
193	694	20.54

flujo 5 ml/min		
tiempo (min)	area CO <sub>2</sub> en N <sub>2</sub>	%CO <sub>2</sub> en N <sub>2</sub>
41	384	11.48
81	348	10.43
131	703	20.81
180	456	13.58
199	452	13.47

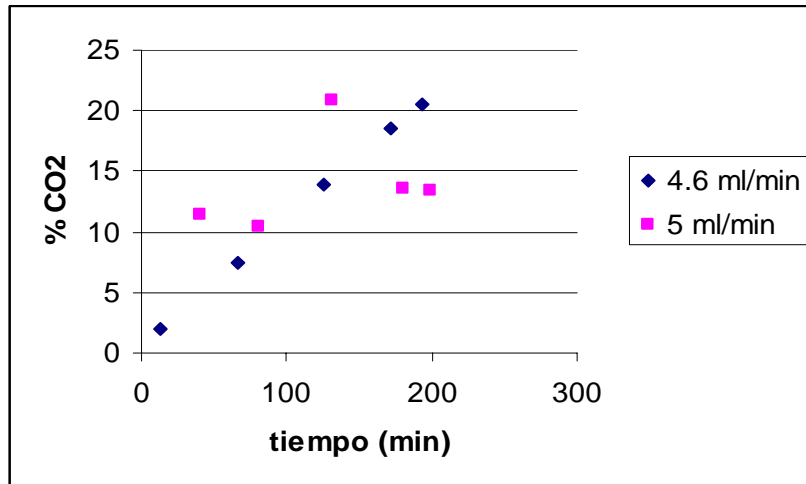


Figura 7.10. Gráfica de porcentaje de CO<sub>2</sub> respecto al tiempo para poliolefina a 5°C.

Tabla XXI. Valores de concentración para el cálculo de permeabilidad a CO<sub>2</sub> de la película poliolefina a 25°C

flujo 8.6 ml/min		
tiempo (min)	area CO <sub>2</sub> en N <sub>2</sub>	%CO <sub>2</sub> en N <sub>2</sub>
11	60	2.01
47	40	1.42
78	36	1.31
111	29	1.10

flujo 6 ml/min		
tiempo (min)	area CO <sub>2</sub> en N <sub>2</sub>	%CO <sub>2</sub> en N <sub>2</sub>
18	59	1.98
54	56	1.89
89	48	1.66
120	44	1.54

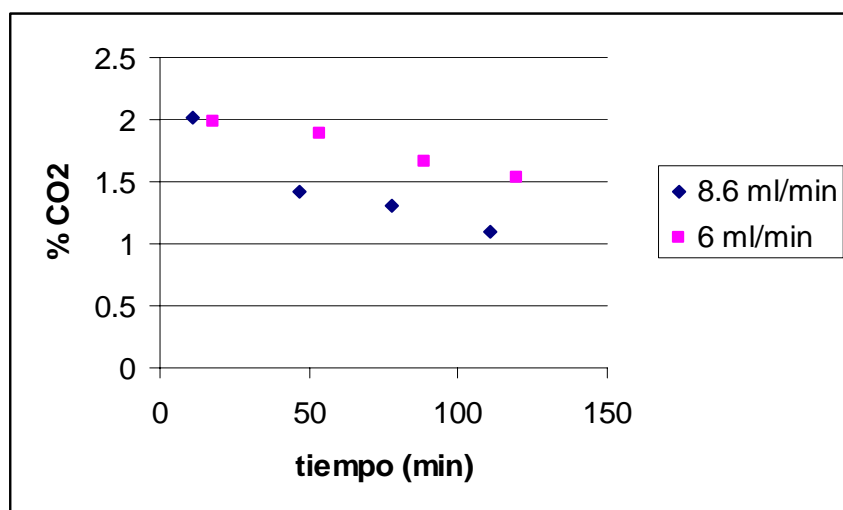


Figura 7.11. Gráfica de porcentaje de CO<sub>2</sub> respecto al tiempo para poliolefina a 25°C.

Tabla XXII. Valores de concentración para el cálculo de permeabilidad a O<sub>2</sub> de la película poliolefina a 5°C

flujo 9ml/min		
tiempo (min)	area O <sub>2</sub> en N <sub>2</sub>	%O <sub>2</sub> en N <sub>2</sub>
0	453	9.777
15	163	1.819
30	181	2.313
45	221	3.411
60	211	3.136
75	254	4.316
90	251	4.234
105	213	3.191
120	223	3.466



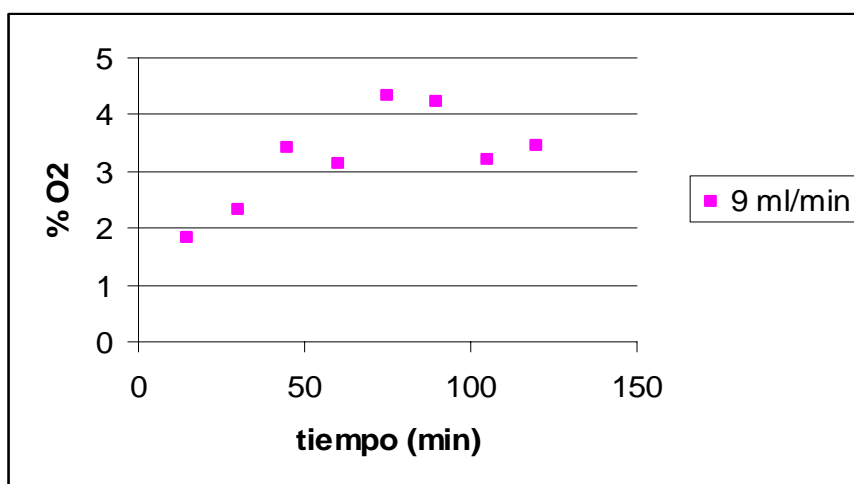


Figura 7.12. Gráfica de porcentaje de O<sub>2</sub> respecto al tiempo para poliolefina a 5°C.

Tabla XXIII. Valores de concentración para el cálculo de permeabilidad a O<sub>2</sub> de la película poliolefina a 25°C

flujo 6 ml/min			
tiempo (min)	area O <sub>2</sub> en N <sub>2</sub>	%O <sub>2</sub> en N <sub>2</sub>	Q (mol O <sub>2</sub> )
49	381	7.801	7.97E-07
81	121	0.667	6.82E-08
126	125	0.777	7.94E-08
180	112	0.420	4.29E-08

flujo 6' ml/min			
tiempo (min)	area O <sub>2</sub> en N <sub>2</sub>	%O <sub>2</sub> en N <sub>2</sub>	Q (mol O <sub>2</sub> )
56	145	1.325	1.35E-07
93	135	1.051	1.07E-07
141	286	5.194	5.31E-07
190	148	1.408	1.44E-07

flujo 14 ml/min			
tiempo (min)	area O <sub>2</sub> en N <sub>2</sub>	%O <sub>2</sub> en N <sub>2</sub>	Q (mol O <sub>2</sub> )
75	167	1.929	1.97E-07
106	108	0.310	3.17E-08
139	103	0.173	1.77E-08
166	106	0.255	2.61E-08

flujo 15 ml/min			
tiempo (min)	area O <sub>2</sub> en N <sub>2</sub>	%O <sub>2</sub> en N <sub>2</sub>	Q (mol O <sub>2</sub> )
69	132	0.969	9.90E-08
97	218	3.329	3.40E-07

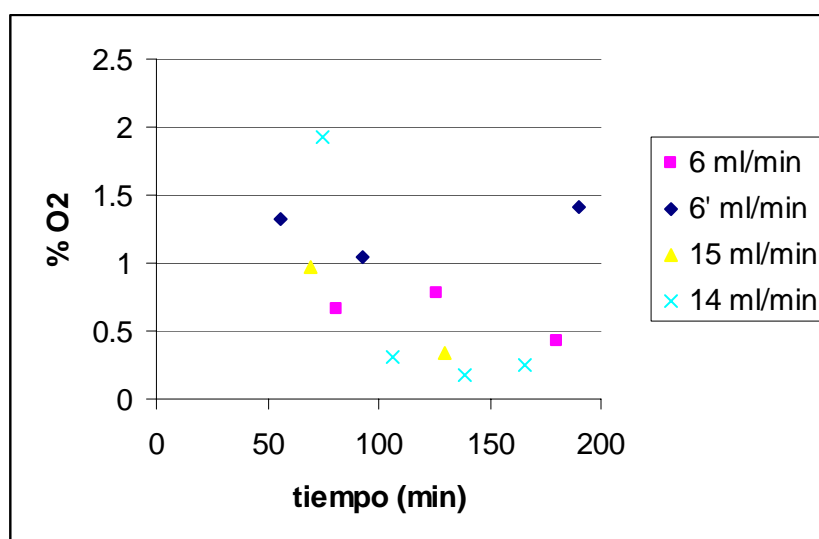


Figura 7.13. Gráfica de porcentaje de O<sub>2</sub> respecto al tiempo para poliolefina a 25°C.

Los valores de permeabilidad al CO<sub>2</sub> a ambas temperaturas, obtenidos en este trabajo para la película poliolefina se muestran en la tabla XXIV y para el O<sub>2</sub> en la tabla XXV, de acuerdo a estas tablas los resultados obtenidos a 5°C son mayores que los correspondientes a 25°C, cabe aclarar que esta no es la tendencia que se esperaba.

Tabla XXIV. Determinaciones de permeabilidad al CO<sub>2</sub> de la película poliolefina a 5 y 25°C.

Temp.	Flujo ml/min	% CO <sub>2</sub>	desv est. % CO <sub>2</sub>	Permeabilidad (ml CO <sub>2</sub> cm/ s cm <sup>2</sup> Pa)
5°C	5	13.5	0.08	<b>7.107E-12</b>
	4.6	19.6	1.36	<b>9.49E-12</b>
25°C	8.6	1.3	0.16	<b>1.177E-12</b>
	6	1.8	0.20	<b>1.137E-12</b>

Tabla XXV. Determinaciones de permeabilidad al O<sub>2</sub> de la película poliolefina a 5 y 25°C.

Temp.	Flujo ml/min	% O <sub>2</sub>	desv est. % O <sub>2</sub>	Permeabilidad (ml O <sub>2</sub> cm/ s cm <sup>2</sup> Pa)
-------	--------------	------------------	----------------------------	--

5°C	9	3.626	0.52	<b>3.436 E-12</b>
25°C	6	1.99	0.52	<b>1.257 E-12</b>
	14	1.07	0.07	<b>1.577 E-12</b>
	15	2.02	0.45	<b>3.190 E-12</b>

En la tabla XXVI se presentan los valores de permeación de la poliolefina (nombre reportado styrolux) al O<sub>2</sub>, CO<sub>2</sub> y N<sub>2</sub> reportados por el proveedor, en películas de 100 µm de espesor, a 23°C y 0% HR. A partir de la permeación y el espesor de la película, se calculó la permeabilidad de la misma, estos resultados aparecen en la misma tabla XXVI.

Tabla XXVI. Valores de permeabilidad de poliolefina al O<sub>2</sub>, CO<sub>2</sub> y N<sub>2</sub> reportados por el proveedor.

	Permeación		Permeabilidad	Permeabilidad
	cm <sup>3</sup> /m <sup>2</sup> día bar	ml /s cm <sup>2</sup> Pa	0.01cm espesor ml cm/s cm <sup>2</sup> Pa	0.0035 cm espesor ml cm/s cm <sup>2</sup> Pa
O2	2600	3.009E-11	3.009E-13	1.053E-13
CO2	15000	1.736E-10	1.736E-12	6.076E-13
N2	700	8.102E-12	8.102E-14	2.836E-14

Determinaciones realizadas a 23°C, 0% HR y 100 µm de espesor.

Los valores reportados por el proveedor (tabla XXVI) comparados con los obtenidos experimentalmente a 5°C para CO<sub>2</sub> y O<sub>2</sub> son por mucho menores aunque cabe considerar las diferencias de temperatura, HR y espesor de película en las determinaciones. En cuanto a los valores reportados en la bibliografía, Piringer (2000) (tabla XXVII) presenta para diferentes poliolefinas valores similares a los reportados por el proveedor.

Tabla XXVII. Valores de permeabilidad de diferentes películas al O<sub>2</sub>, CO<sub>2</sub> y N<sub>2</sub>

Gas	T (° C)	P*10 <sup>13</sup> ml cm/cm <sup>2</sup> sPa
-----	---------	---

---

**POLIOLEFINAS**

---

Polietileno de baja densidad (0.922 g/cm <sup>3</sup> )	O <sub>2</sub>	25	5.18
LDPE <sup>a</sup>	CO <sub>2</sub>	25	21
	H <sub>2</sub> O	25	93
Polietileno de alta densidad (0.954 g/cm <sup>3</sup> )	O <sub>2</sub>	25	0.825
HDPE <sup>a</sup>	CO <sub>2</sub>	25	3.225
	H <sub>2</sub> O	25	13.5
Polipropileno (0.907g/cm <sup>3</sup> ) PP 50 % cristalino <sup>a</sup>	O <sub>2</sub>	30	1.7
	CO <sub>2</sub>	30	6.9
	H <sub>2</sub> O	30	51
Poli-4 metilpenteno-1 <sup>a</sup>	N <sub>2</sub>	25	5.67
	O <sub>2</sub>	25	24.23
	CO <sub>2</sub>	25	69.45
Poliestireno biaxialmente orientado <sup>a</sup>	N <sub>2</sub>	25	0.59
	O <sub>2</sub>	25	2
	CO <sub>2</sub>	25	7.9
	H <sub>2</sub> O	25	840
PVC (no plastificado) <sup>a</sup>	N <sub>2</sub>	25	0.0089
	O <sub>2</sub>	25	0.034
	CO <sub>2</sub>	25	0.12
	H <sub>2</sub> O	25	840
Nylon 6 <sup>a</sup>	N <sub>2</sub>	30	0.00713
	O <sub>2</sub>	30	0.0285
	CO <sub>2</sub>	20	0.066
	H <sub>2</sub> O	25	0.139
Orega <sup>b</sup>	O <sub>2</sub>	25	2.55
	CO <sub>2</sub>	25	9.17
Clean-Plas <sup>b</sup>	O <sub>2</sub>	25	3.25
	CO <sub>2</sub>	25	10
Cryovac CP9250 <sup>c</sup>	O <sub>2</sub>	23	2.56
Cryovac PC7225B <sup>c</sup>	O <sub>2</sub>	23	28.82

---

Cryovac PC7235B <sup>c</sup>	O <sub>2</sub>	23	24.16
Nybar <sup>d</sup>	O <sub>2</sub>	23	1.06

<sup>a</sup>Piringer (2000), <sup>b</sup>Song (2002), <sup>c</sup>Cryovac (2004), <sup>d</sup>Neoplástica (2004)

## **7.5 Velocidad de respiración de mora azul**

### **7.5.1 Determinación de la velocidad de respiración de mora azul**

A partir de las curvas estándar cromatográficas (figura 7.8 y 7.9), se calculó el cambio en concentración respecto al tiempo dentro de las celdas de sellado hermético donde se realizaron las determinaciones, las figuras 7.14 y 7.15 presentan las gráficas de cambio en concentración a las tres temperaturas para O<sub>2</sub> y CO<sub>2</sub> respectivamente.

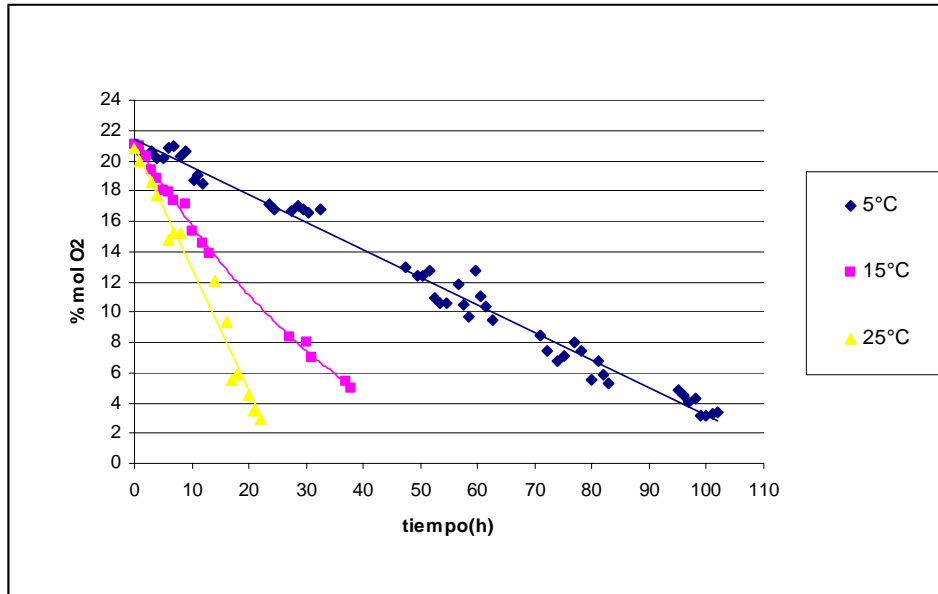


Figura 7.14. Cambio en concentración de O<sub>2</sub> a 5, 15 y 25°C de mora azul (var. rabbiteye)

Como se observa en la figura 7.14, la concentración de O<sub>2</sub> disminuye de 21% a 2%, debido a que el experimento se detuvo antes de agotar todo el O<sub>2</sub> dentro de la celda, siendo esta disminución más rápida conforme la temperatura se incrementa, tal y como se esperaba.

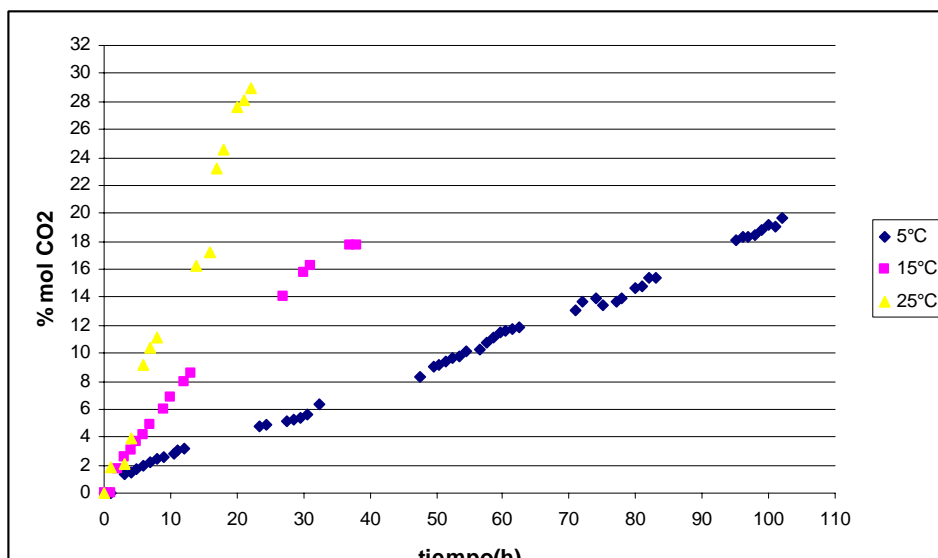


Figura 7.15. Cambio en concentración de CO<sub>2</sub> a 5, 15 y 25°C de mora azul (var. rabbiteye)

En el caso de CO<sub>2</sub> (figura 7.15) la concentración aumenta conforme transcurre el tiempo, debido al proceso de respiración, y nuevamente conforme la temperatura aumenta el aumento en la concentración es más rápido. Debido a que por cada mol de O<sub>2</sub> consumido se produce un mol de CO<sub>2</sub> y que los experimentos se hicieron partiendo de una atmósfera interna compuesta por aire (21% O<sub>2</sub> y 0% CO<sub>2</sub>), se esperaba que la concentración de CO<sub>2</sub> no aumentara a más de 21%, tal y como sucedió a 15 y 5°C pero no a 25°C. Una posible explicación es que a 25°C se haya dado un proceso fermentativo que hizo que la concentración de CO<sub>2</sub> aumentara mucho más rápido que la de O<sub>2</sub>.

Los valores graficados en las figuras 7.14 y 7.15 se compararon con los reportados por Song et al.(1992) para tres variedades diferentes de mora azul (blueray, jersey y coville) a las mismas temperaturas (5, 15 y 25°C), en general el cambio en concentración de O<sub>2</sub> y CO<sub>2</sub> para la variedad estudiada en este trabajo (rabbiteye), presenta una tendencia prácticamente lineal en cambio las reportadas en la literatura son curvas.

Para describir el cambio en concentración de O<sub>2</sub> y CO<sub>2</sub> respecto al tiempo se hizo una optimización en Matlab usando las ecuaciones 39 y 40. Los valores obtenidos para los coeficientes A, B y C se presentan en la tabla XXVIII y las gráficas correspondientes en las figuras 7.16 y 7.17.

Tabla XXVIII. Coeficientes de las ecuaciones 38 y 39 que describen el cambio en concentración de O<sub>2</sub> y CO<sub>2</sub> respecto al tiempo de mora azul (var. rabbit eye) a 5, 15 y 25 °C, determinados usando Matlab.

Temperatura (°C)	5	15	25
Coeficientes para O <sub>2</sub>			
A <sub>1</sub>	-0.0009	0.0122	-0.0066
B <sub>1</sub>	2.9603	1.5643	1.3668
C <sub>1</sub>	1.6370	1.2227	0.9348
resnorm	28.3715	2.0612	12.8308
Coeficientes para CO <sub>2</sub>			
A <sub>1</sub>	-0.0001	0.0198	-0.0041
B <sub>1</sub>	2.5847	1.2363	0.8162
C <sub>1</sub>	1.7699	1.0888	0.9047
resnorm	11.5209	1.3319	30.1228

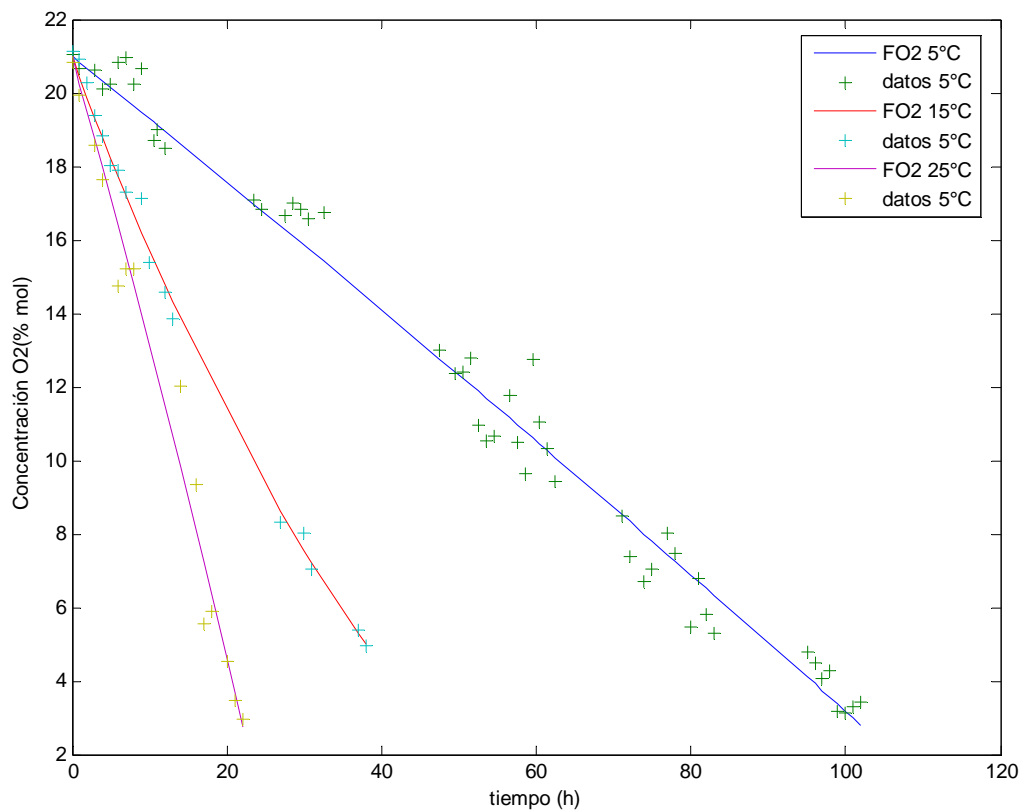


Figura 7.16. Gráfica de valores experimentales (datos) y predichos (FO2) para el cambio en concentración de O<sub>2</sub> a 5, 15 y 25°C de mora azul variedad rabbit eye.



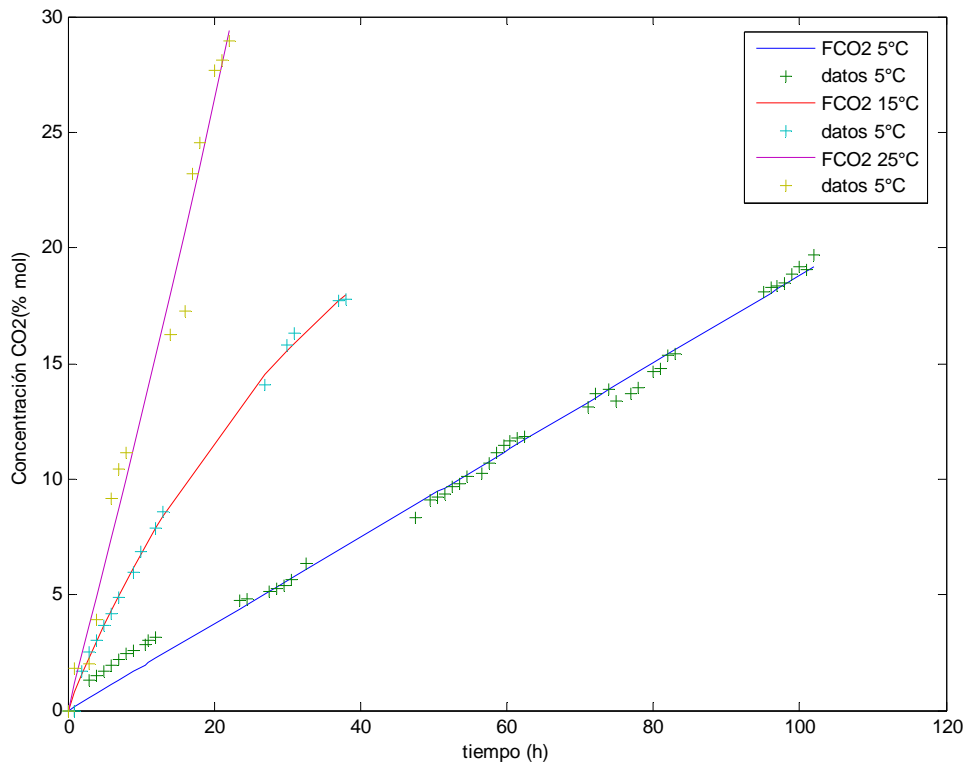


Figura 7.17. Gráfica de valores experimentales (datos) y predichos (FCO<sub>2</sub>) para el cambio en concentración de CO<sub>2</sub> a 5, 15 y 25°C de mora azul variedad rabbit eye.

De las gráficas 7.16 y 7.17 se nota que el cambio en concentración de O<sub>2</sub> y CO<sub>2</sub> a 5 y 25°C sigue una tendencia lineal como se había mencionado antes, sin embargo para CO<sub>2</sub> a 15°C la tendencia es curva.

Posteriormente se calculó la velocidad de respiración con las ecuaciones 43 y 44, usando los siguientes valores

- 590.5 mm Hg (presión atmosférica en Puebla)
- $R = 6.24 \times 10^4$  mm Hg ml/K mol (cte de los gases ideales)
- 250 g de mora azul
- Temperatura en K

Los valores correspondientes al consumo de O<sub>2</sub> y producción de CO<sub>2</sub> se muestran en la figura 7.16 y 7.17 respectivamente.

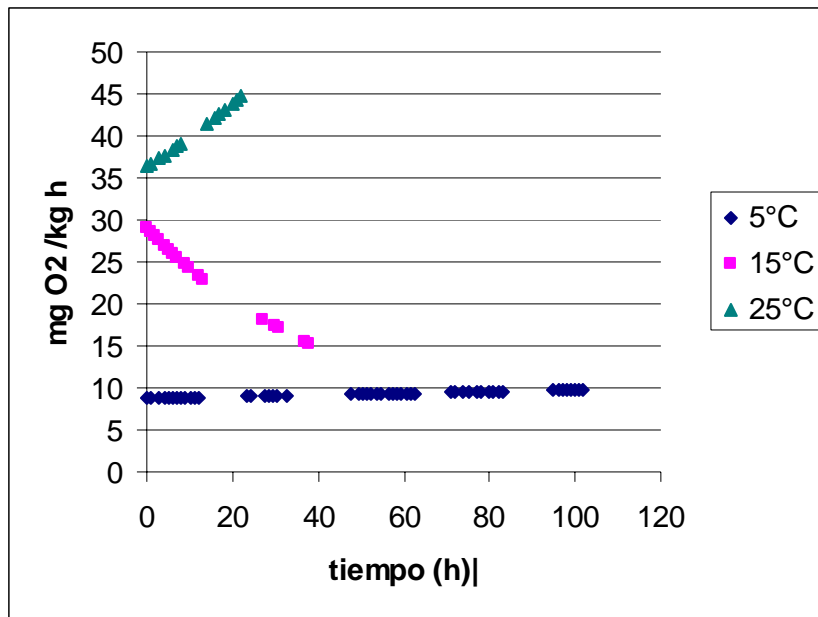


Figura. 7.16. Velocidad de consumo de O<sub>2</sub> de mora azul variedad rabbit eye a 5, 15 y 25°C

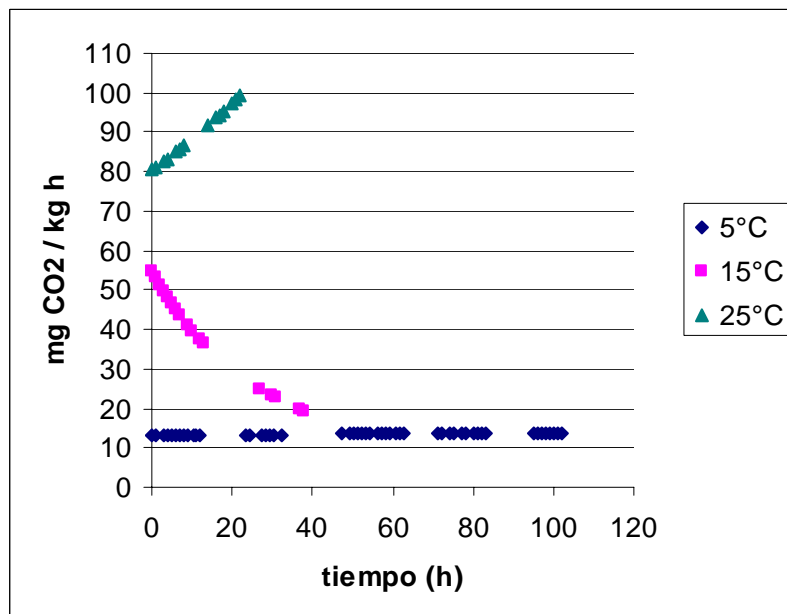


Figura. 7.17. Velocidad de producción de CO<sub>2</sub> de mora azul variedad rabbit eye a 5, 15 y 25°C

Se trataron de calcular las constantes de Michaelis – Menten con los valores de respiración de las figuras 7.16 y 7.17, en Matlab, los valores obtenidos se presentan en la tabla XXIX, pero el ajuste no es bueno ya que en el caso de la temperatura de 5 °C, aunque la desviación es pequeña los valores del coeficiente Km ( % O<sub>2</sub>) y Ki (% CO<sub>2</sub>) no son congruentes (negativos o mayores 100). A 25°C además de la incongruencia de los valores de los coeficientes, el error si es grande (resnorm mayor 100). Excepto para la producción de CO<sub>2</sub> a 15 °C donde el ajuste si fue posible.

Tabla XXIX. Valores calculados de las constantes de Michaelis – Menten para mora azul (var. rabbiteye) a tres temperaturas, usando Matlab.

Variedad	Temperatura (°C)	5	15	25
	Coeficientes para O <sub>2</sub>			
Rabbiteye	Vm	7.1	18.5234	29.8
	Km	-1.9	-0.8726	-2.4
	Ki	2018.7	941.6074	2099.3
	resnorm	26.1945	0.3463	339.6628
	Coeficientes para CO <sub>2</sub>			
Rabbiteye	Vm	13.3	124.9077	83.6
	Km	-0.1	28.94	-0.1
	Ki	1382.8	15.2899	3669.7
	resnorm	0.1375	1.4558	114.5483

Este problema de falta de ajuste se debe a que la ecuación de Michaelis – Menten supone que se alcanza una velocidad máxima de respiración donde la concentración de O<sub>2</sub> y CO<sub>2</sub> es prácticamente constante y en este trabajo no se llegó a este punto, es decir el experimento se detuvo antes de alcanzar la velocidad máxima de respiración, además el rápido incremento en la concentración de CO<sub>2</sub> hace suponer que puede haber respiración anaeróbica y fermentación microbiana ya que al determinar la carga microbiana inicial, esta fue de 6.8 E4 UFC/g bacterias mesofílicas, 50 UFC/g mohos y 6.35 E5 UFC/g. La alta carga microbiana se debe a que la fruta no fue lavada ni tratada previo al empaclado.

Por esta razón se calculó una velocidad de respiración promedio a partir de las ecuaciones 11 y 12, donde la velocidad de respiración es la pendiente de la gráfica de mg O<sub>2</sub> consumido/ kg fruta o mg CO<sub>2</sub> producido/ kg fruta vs tiempo (h) (figura 7.18 y 7.19). En la tabla XXX se reportan los valores de velocidad de respiración promedio.

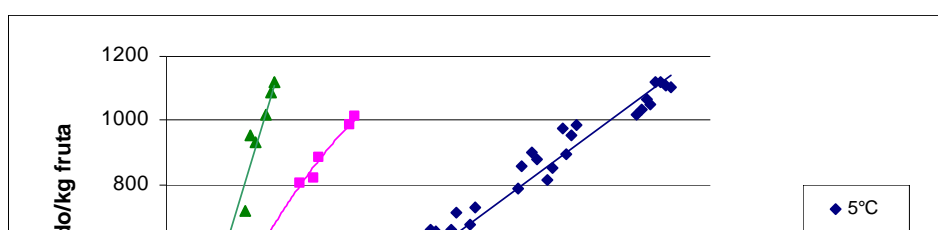


Figura 7.18. Velocidad de respiración promedio de mora azul (var. rabbiteye) en términos de O<sub>2</sub> consumido/kg a 5, 15 y 25°C

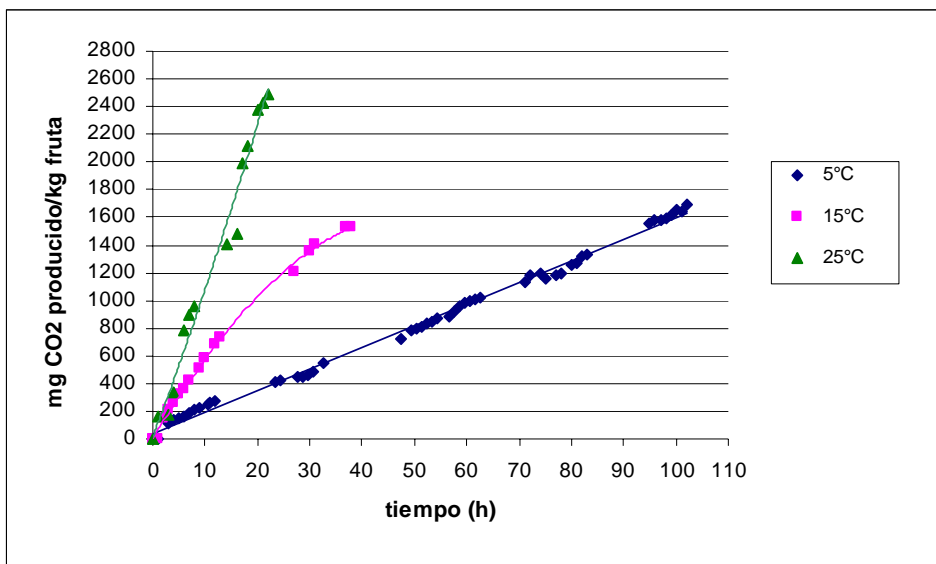


Figura 7.19. Velocidad de respiración promedio de mora azul (var. rabbiteye) en términos de CO<sub>2</sub> producido/kg a 5, 15 y 25°C

Tabla XXX. Velocidad de respiración promedio de mora azul (var. rabbiteye) a 5, 15 y 25°C

	5°C	15°C	25°C
mg O <sub>2</sub> consumido/ kg h	11.394	26.637	50.658
mg CO <sub>2</sub> producido/ kg h	15.597	40.425	114.37

Se observa (tabla XXX) que la velocidad promedio de producción de CO<sub>2</sub> a las tres temperaturas es mayor que la correspondiente al consumo de O<sub>2</sub>, esto indica que posiblemente hay un proceso fermentativo (respiración anaeróbica) y el modelo de Michaelis – Menten sólo describe procesos de respiración aerobia por eso no ajusta a los resultados experimentales.

Otro parámetro importante es  $\alpha$  (cociente respiratorio), su valor generalmente se supone como uno, en este trabajo los valores obtenidos se muestran en la tabla XXXI

Tabla XXXI. Cocientes respiratorios ( $\alpha$ ) para mora azul (var. rabbiteye)

	5°C	15°C	25°C
$\alpha$	1.37	1.52	2.26

Del Valle y Palma (2002) reportan que los arándanos tienen una tasa respiratoria de 10 – 20 mg CO<sub>2</sub>/kg h) a 5°C y los resultados obtenidos en este trabajo quedan dentro del intervalo, además mencionan que  $\alpha$  es mayor a 1 cuando se usan ácidos orgánicos como sustrato o si ocurre respiración anaeróbica, y de acuerdo a la tabla XXXI  $\alpha$  es mayor a uno confirmando que ocurre un proceso de respiración anaeróbica en la fruta. Sin embargo Beaudry et al (1992) observaron un valor de  $\alpha$  de 1.3 para mora azul debido a su alto contenido de ácido cítrico y azúcares, considerando este dato el valor de  $\alpha$  a 5°C obtenido en este trabajo (tabla XXXI) parece ser normal al igual que el correspondiente a 15°C, sin embargo a 25°C el valor es demasiado alto y puede que este si se deba a la presencia de fermentación.

Para conocer el efecto de la temperatura sobre la respiración se usa la ecuación de Arrhenius para obtener la energía de activación (Er) que indica la sensibilidad de la respiración al cambio de temperatura, en la figura 7.20 se grafica el inverso de la temperatura vs. el ln de la respiración para O<sub>2</sub> y CO<sub>2</sub>, la pendiente de esta gráfica está relacionada con la energía de activación.

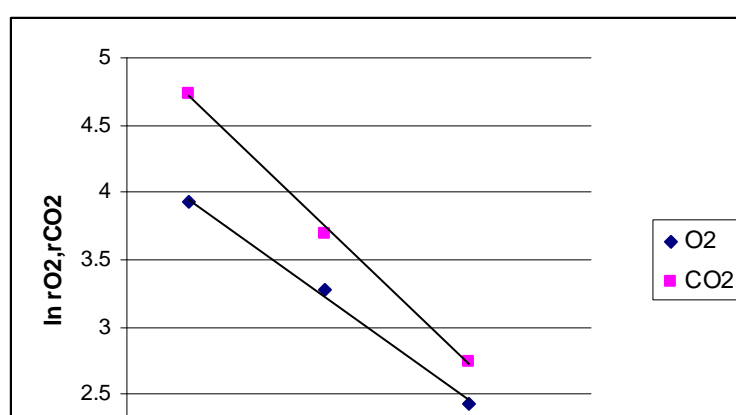


Figura 7.20. Gráfica de Arrhenius para la respiración de mora azul (var. rabbiteye)

Tabla XXXII. Energía de activación (Er) y constante de Arrhenius (ln r°) de la respiración de mora azul (var. rabbiteye)

	Er (kcal/mol)	ln r°	r <sup>2</sup>
O <sub>2</sub>	12.26	25	0.996
CO <sub>2</sub>	16.33	32	0.998

La variación de la velocidad de respiración en función de la temperatura indica según la figura 7.20 que aumenta conforme esta última aumenta.

Song et al.(1992) obtuvo una Er para el consumo de O<sub>2</sub> de  $35.2 \pm 1.2$  kcal/mol y para la producción de CO<sub>2</sub> de  $39 \pm 1.6$  kcal/mol de tres variedades de mora azul a diferentes mezclas de gases, estos valores son más del doble que los reportados en este trabajo, al parecer la mora azul es más sensible a la temperatura cuando se usan mezclas de gases diferentes a la atmosférica.

Lozada (2001) reporta una Er para brócoli de 14.4 kcal/mol para CO<sub>2</sub> y 14.1 para O<sub>2</sub>, valores que se ubican entre los valores obtenidos para mora azul (tabla XXXII), posiblemente ambos productos tienen una sensibilidad a la temperatura semejante.

### 7.5.2 Modelación de la respiración de mora azul con la ecuación de Michaelis - Menten

Debido a que el experimento no se llevo a cabo hasta alcanzar una velocidad de respiración máxima, se usaron los datos reportados por Song et al. (1992) para modelar la velocidad de respiración en base a la ecuación de Michaelis – Menten.

Esto se hizo comparando los valores de concentración de O<sub>2</sub> y CO<sub>2</sub> de las tres variedades (blueray, jersey y coville) de Song et al. (1992) con los de la variedad (rabbiteye) estudiada en este trabajo, se calcularon los coeficientes A, B y C con Matlab, los valores de los coeficientes obtenidos para las variedades de Song et al.(1992) a las tres temperaturas aparecen en la tabla XXXIII y en las figuras 7.21, 7.22 y 7.23 se grafican los valores experimentales (+) y predichos (-) de cambio en concentración de O<sub>2</sub> y CO<sub>2</sub> para las cuatro variedades (blueray, jersey, coville y rabbiteye) de mora azul a las tres temperaturas (5, 15 y 25°C).

Tabla XXXIII. Coeficientes de las ecuaciones 38 y 39 que describen el cambio en concentración de O<sub>2</sub> y CO<sub>2</sub> respecto al tiempo de tres variedades de mora azul a 5, 15 y 25°C, usando Matlab.

Variedad	Temperatura (°C)	5	15	25
Blueray	Coeficientes para O <sub>2</sub>			
	A <sub>1</sub>	0.0113	0.0990	0.0146
	B <sub>1</sub>	3.0031	1.3589	0.8294
	C <sub>1</sub>	1.3274	0.5694	1.5232
	resnorm	4.5267	0.6489	1.4961
Jersey	Coeficientes para O <sub>2</sub>			
	A <sub>1</sub>	0.0173	0.1197	0.0182
	B <sub>1</sub>	2.8708	1.0001	0.5756
	C <sub>1</sub>	1.1060	0.4179	1.3321
	resnorm	2.5805	0.5515	2.5111
Coville	Coeficientes para O <sub>2</sub>			
	A <sub>1</sub>	0.0193	0.038	0.0206
	B <sub>1</sub>	2.3916	0.7628	0.5504
	C <sub>1</sub>	1.0695	0.8216	1.5525
	resnorm	2.3854	0.4140	1.1991
Blueray	Coeficientes para CO <sub>2</sub>			
	A <sub>1</sub>	0.0036	0.0560	0.0138
	B <sub>1</sub>	2.8502	2.3624	1.078
	C <sub>1</sub>	1.9571	0.8558	1.2633
	resnorm	0.8018	0.5216	0.5004
Jersey	Coeficientes para CO <sub>2</sub>			
	A <sub>1</sub>	0.0053	0.0222	0.0181

	B <sub>1</sub>	2.6676	1.8463	0.6719
	C <sub>1</sub>	1.8231	1.0471	0.9064
	resnorm	0.2586	0.7185	0.0930
Coville	Coeficientes para CO <sub>2</sub>			
	A <sub>1</sub>	0.0063	0.1274	0.0242
	B <sub>1</sub>	2.4318	1.2932	0.5009
	C <sub>1</sub>	1.6498	0.5002	0.8908
	resnorm	0.6752	0.3296	0.0914

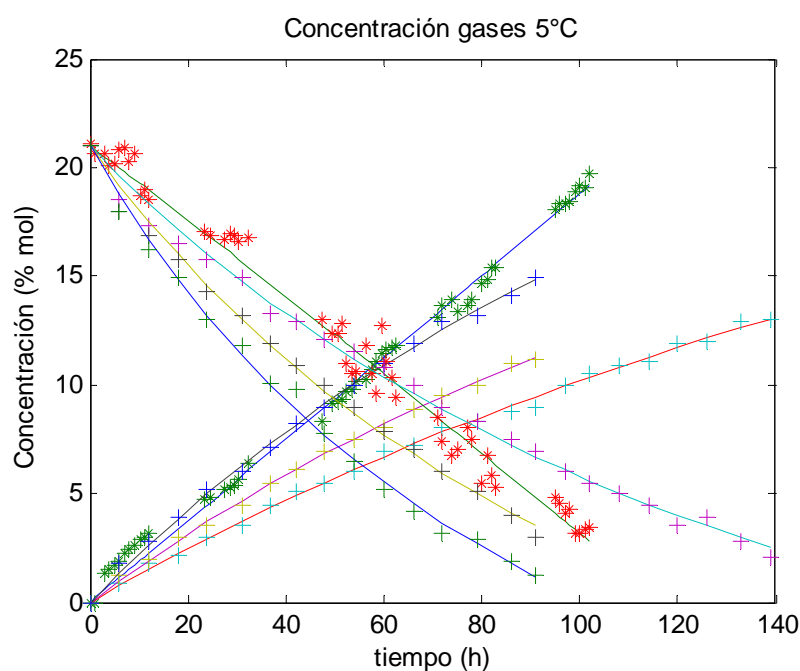


Figura 7.21. Gráfica de comparación de valores experimentales (+) y predichos (-) de cambio en concentración de O<sub>2</sub> y CO<sub>2</sub> a 5°C para cuatro variedades de mora azul (producción CO<sub>2</sub>: \* var. rabbiteye, + var. blueray, + var. jersey, + var. coville; consumo O<sub>2</sub>: \* var. rabbiteye, + var. blueray, + var. jersey, + var. coville).

De acuerdo a la figura 7.21 los valores de producción de CO<sub>2</sub> de la variedad rabbit eye, estudiada en este trabajo, a 5°C son mayores que los de las variedades jersey y blueray, aunque muy semejante a la variedad coville. Por otro lado el consumo de O<sub>2</sub> de esta misma variedad (rabbit eye) es tan bajo como la variedad blueray, que es la que presenta el consumo más lento respecto a las otras dos variedades (jersey y coville).



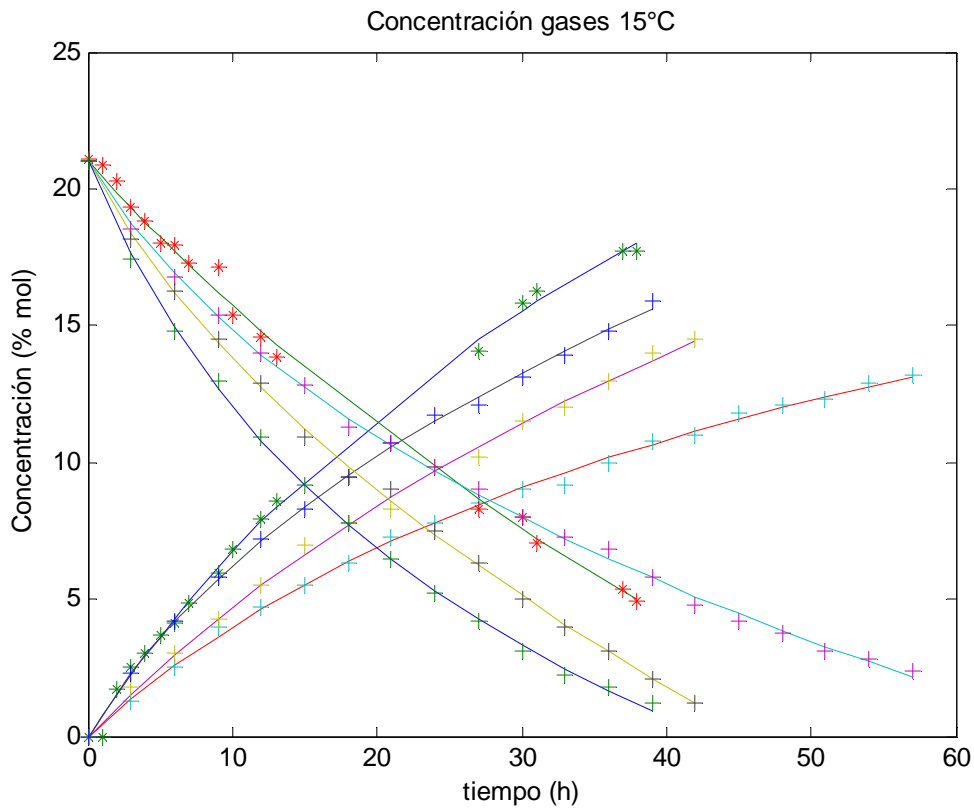


Figura 7.22. Gráfica de comparación de valores experimentales (+) y predichos (-) de cambio en concentración de O<sub>2</sub> y CO<sub>2</sub> a 15°C para cuatro variedades de mora azul (producción CO<sub>2</sub>: \* var. rabbiteye, + var. blueray, + var. jersey, + var. coville; consumo O<sub>2</sub>: \* var. rabbiteye, + var. blueray, + var. jersey, + var. coville).

Según se observa en la figura 7.22 a 15°C la producción de CO<sub>2</sub> de rabbit eye es la mayor y el consumo de O<sub>2</sub> es el menor de las 4 variedades que se presentan, y en este caso la tendencia es más curva que la correspondiente a 5°C y más semejante a la que presentan las otras variedades.

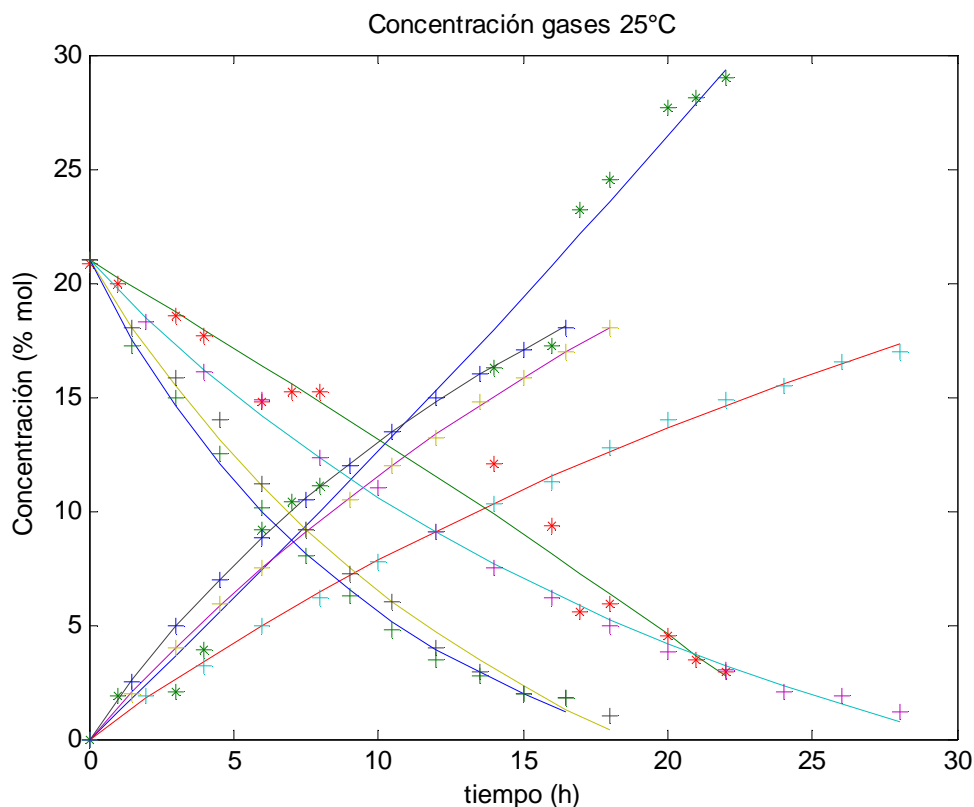


Figura 7.23. Gráfica de comparación de valores experimentales (+) y predichos (-) de cambio en concentración de  $O_2$  y  $CO_2$  a  $25^\circ C$  para cuatro variedades de mora azul (producción  $CO_2$ : \* var. rabbiteye, + var. blue ray, + var. jersey, + var. coville; consumo  $O_2$ : \* var. rabbiteye, + var. blue ray, + var. jersey, + var. coville):

A  $25^\circ C$  (figura 7.23) la proporción de producción de  $CO_2$  y consumo de  $O_2$  para la variedad rabbit eye respecto a las otras variedades es la misma que a  $5$  y  $15^\circ C$ , la tendencia es nuevamente lineal y no curva como la que presentan las otras variedades, y la producción de  $CO_2$  se dispara hasta  $29\%$ . Este aumento en la producción de  $CO_2$  puede deberse a un fenómeno fermentativo que es favorecido por el aumento en temperatura.

A partir del cambio en concentración de  $O_2$  y  $CO_2$ , se calcularon las constantes de Michaelis – Menten con la ecuación 34. En el caso de la variedad rabbit eye que como ya se había mencionado antes el ajuste es pobre, por tal motivo se tomaron las constantes de la variedad cuyo cambio en concentración de  $O_2$  y  $CO_2$  es parecido al de rabbit eye para obtener la correspondiente curva de respiración, así se ajustaron los datos de cambio en concentración de  $O_2$  con las constantes Michaelis – Menten de la

variedad blueray y los datos de CO<sub>2</sub> con las constantes de la variedad coville obteniéndose las siguientes gráficas para cada temperatura:

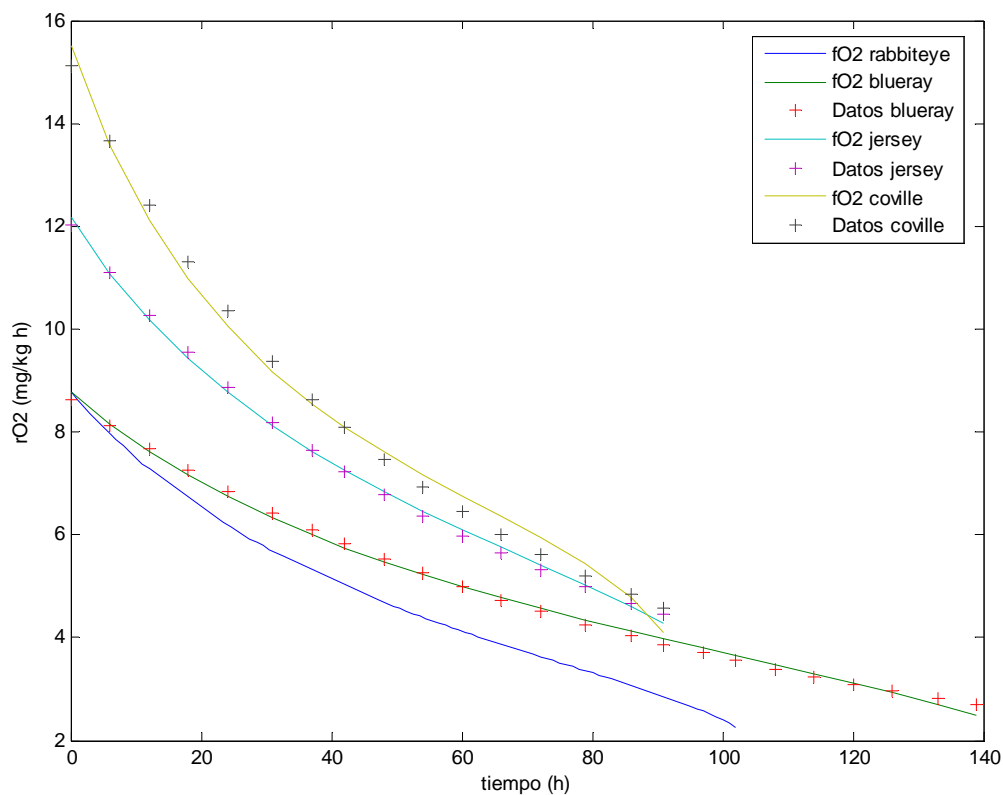


Figura 7.24. Gráfica de velocidad de respiración (consumo de O<sub>2</sub>) calculada de acuerdo a Hagger et al. (1992) (+) y predicha con las constantes de Michaelis – Menten (-) a 5°C, para cuatro variedades de mora azul (rabbiteye, blueray, jersey, coville).

La variedad de mora azul con menor velocidad de respiración expresada como consumo de O<sub>2</sub> a la temperatura de 5°C (figura 7.24) es rabbit eye (8.78 – 2.27 mg O<sub>2</sub>/kg h) seguida de blueray, jersey y coville, siendo esta última la que respira más rápido.

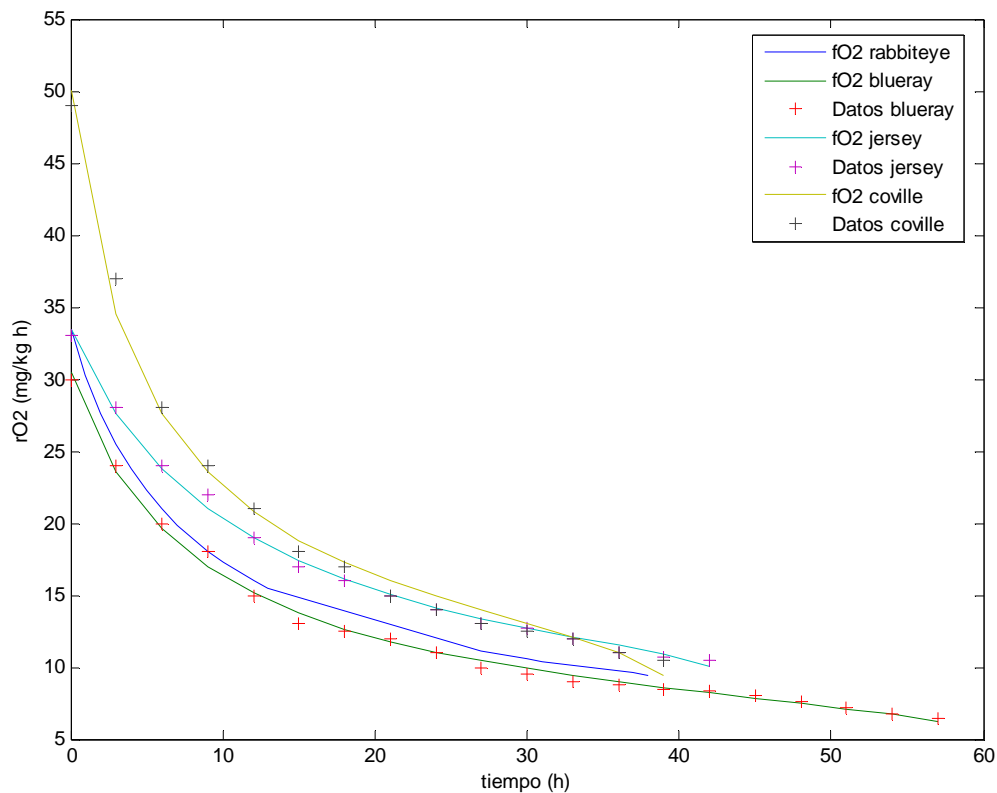


Figura 7.25. Gráfica de velocidad de respiración (consumo de  $O_2$ ) calculada de acuerdo a Hagger et al. (1992) (+) y predicha con las constantes de Michaelis – Menten (-) a  $15^\circ C$ , para cuatro variedades de mora azul (rabbiteye, blueray, jersey, coville).

En la figura 7.25 se muestra la velocidad de respiración a  $15^\circ C$  de las cuatro variedades, se observa que en este caso la menor velocidad de respiración (consumo de  $O_2$ ) correspondió a la variedad blueray, coville sigue siendo la más rápida y rabbit eye es ligeramente mayor a blueray.

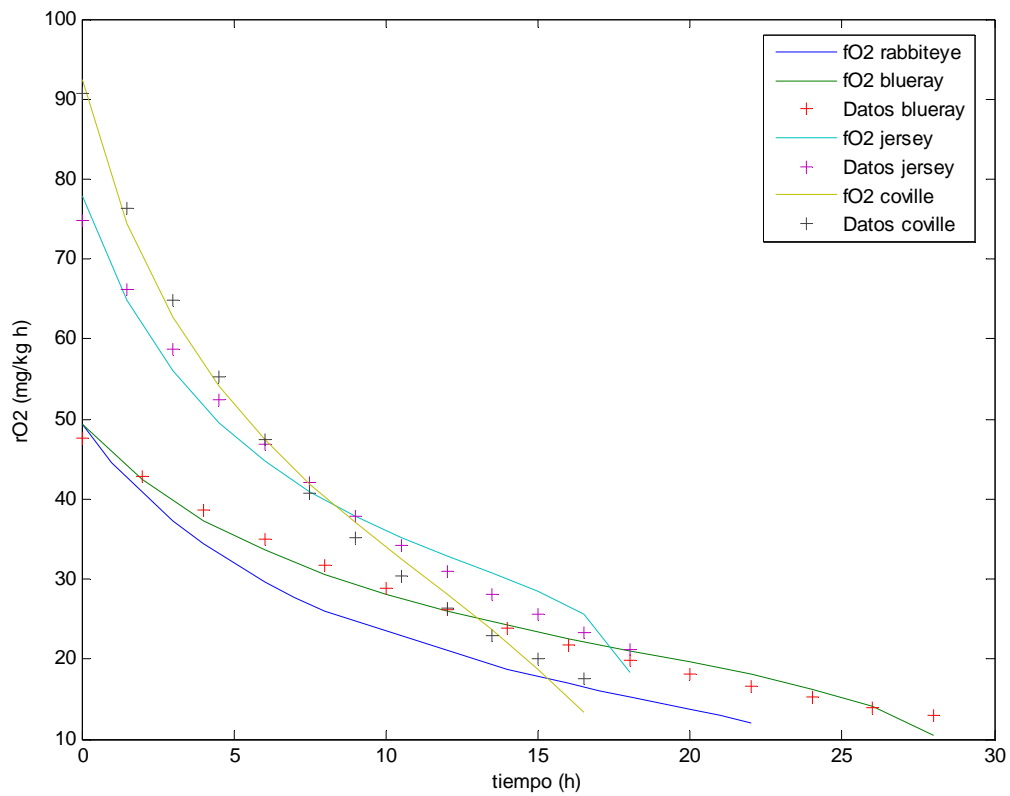


Figura 7.26. Gráfica de velocidad de respiración (consumo de  $O_2$ ) calculada de acuerdo a Hagger et al. (1992) (+) y predicha con las constantes de Michaelis – Menten (-) a  $25^\circ C$ , para cuatro variedades de mora azul (rabbiteye, blueray, jersey, coville).

A  $25^\circ C$  (figura 7.26) la respiración (consumo de  $O_2$ ) de las cuatro variedades es de mayor a menor: coville, jersey, blueray y rabbit eye.

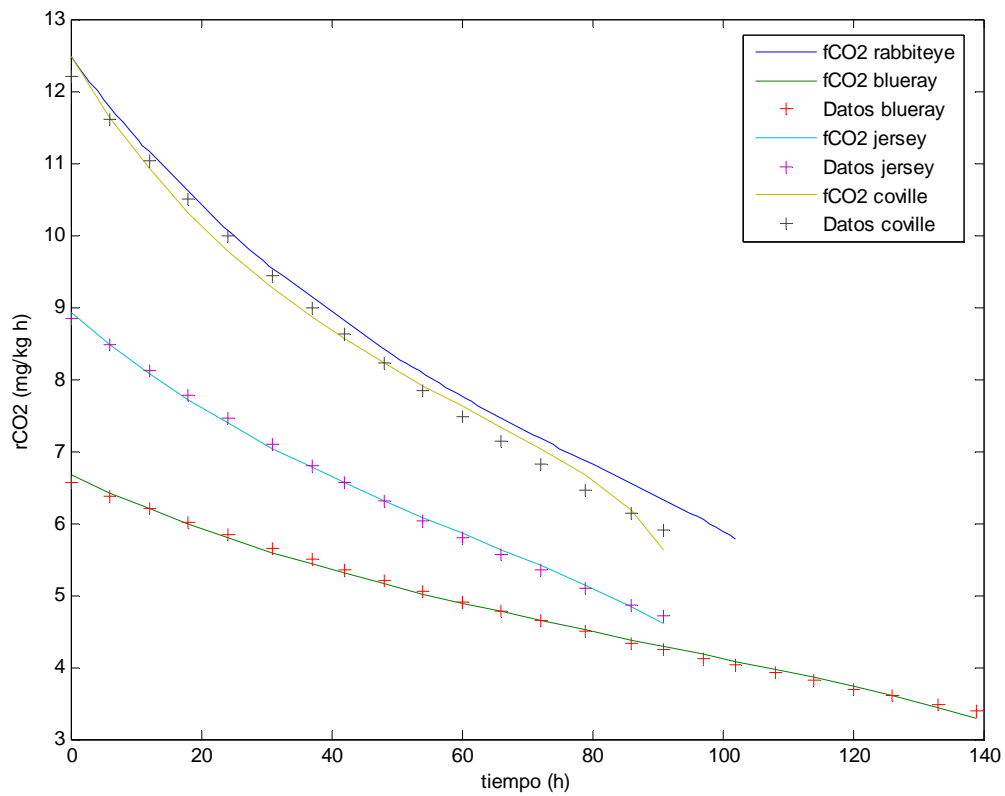


Figura 7.27. Gráfica de velocidad de respiración (producción de  $\text{CO}_2$ ) calculada de acuerdo a Hagger et al. (1992) (+) y predicha con las constantes de Michaelis – Menten (-) a  $5^\circ\text{C}$ , para cuatro variedades de mora azul (rabbiteye, blueray, jersey, coville).

Respecto a la respiración expresada en términos de producción de  $\text{CO}_2$ , a  $5^\circ\text{C}$  (figura 7.27) la variedad rabbiteye presenta los valores mayores (12.48 – 5.77  $\text{mg CO}_2$  / $\text{kg h}$ ) de las cuatro variedades después coville, jersey y blueray en orden descendente.

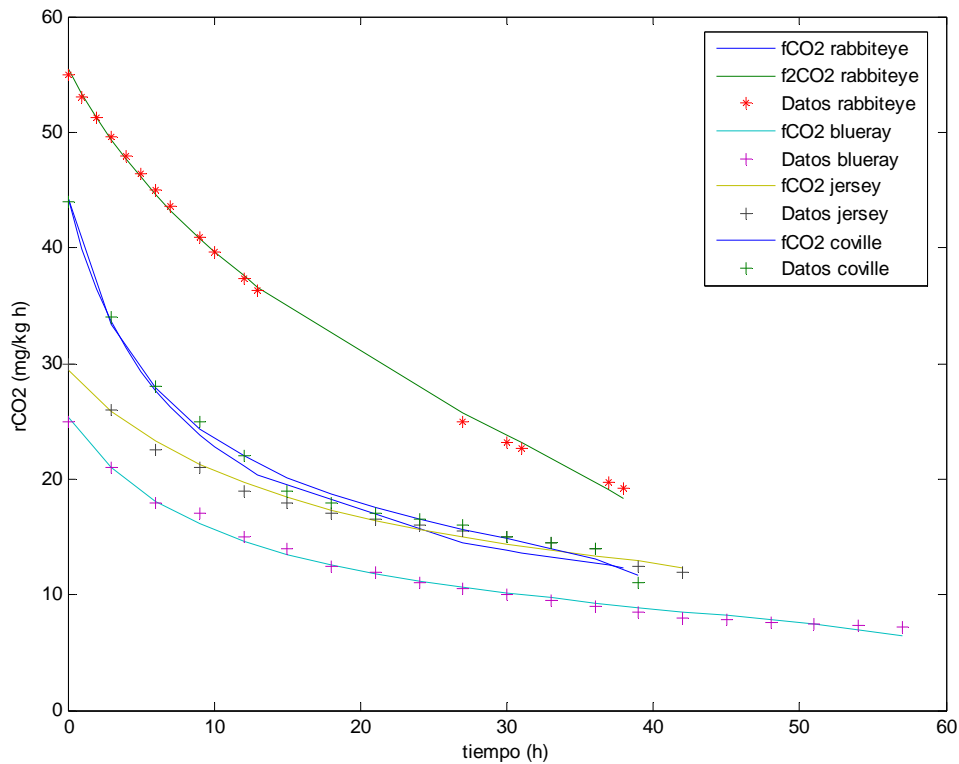


Figura 7.28. Gráfica de velocidad de respiración (producción de CO<sub>2</sub>) calculada de acuerdo a Hagger et al. (1992) (+) y predicha con las constantes de Michaelis – Menten (-) a 15°C, para cuatro variedades de mora azul (rabbiteye, blueray, jersey, coville).

Los valores de respiración (producción de CO<sub>2</sub>) de rabbit eye a 15°C fueron los únicos que permitieron hacer un buen ajuste con la ecuación de Michaelis – Menten, se presentan junto con las otras tres variedades en la figura 7.28, nuevamente es la variedad con la mayor respiración (54.9 – 19.25 mg CO<sub>2</sub>/ kg h).

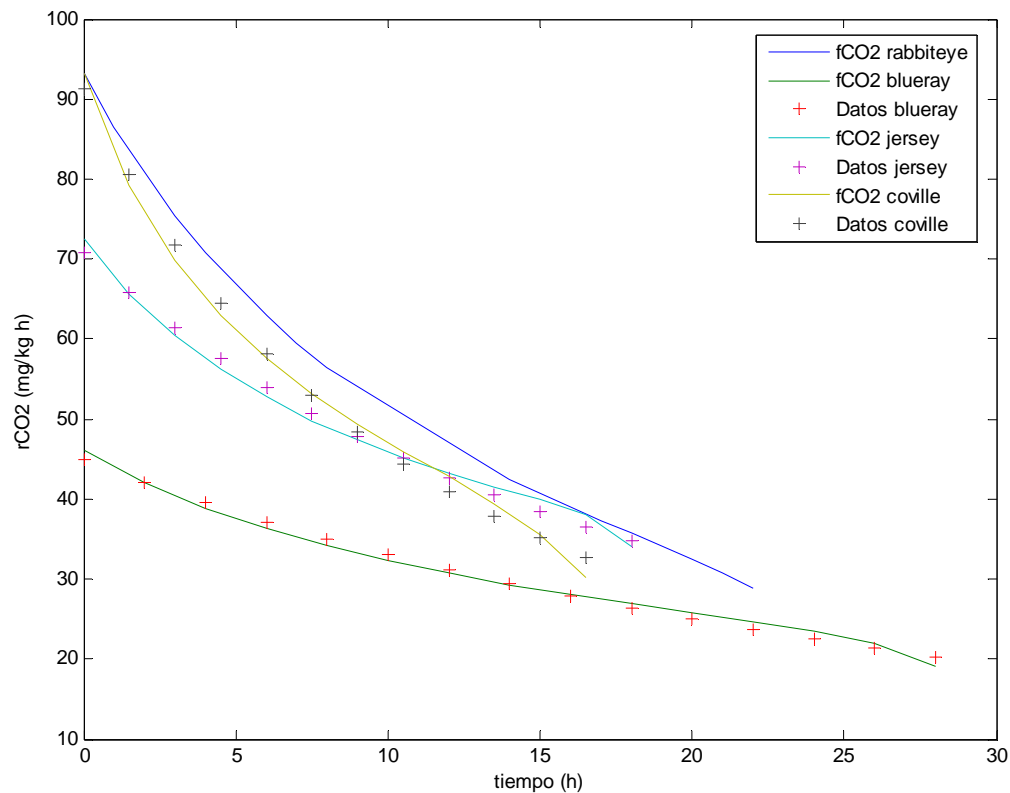


Figura 7.29. Gráfica de velocidad de respiración (producción de  $\text{CO}_2$ ) calculada de acuerdo a Hagger et al. (1992) (+) y predicha con las constantes de Michaelis – Menten (-) a  $25^\circ\text{C}$ , para cuatro variedades de mora azul (rabbiteye, blueray, jersey, coville).

En cuanto a  $25^\circ\text{C}$  (figura 7.29) la variedad rabbiteye presenta la mayor velocidad de respiración ( $93.23 - 28.86 \text{ mg CO}_2/\text{kg h}$ ) como sucede a  $5^\circ\text{C}$ .

Los valores calculados de las constantes de Michaelis – Menten para las cuatro variedades de mora azul usando Matlab se condensan en la tabla XXXIV.



Tabla XXXIV. Valores calculados de las constantes de Michaelis – Menten para las cuatro variedades de mora azul, a tres temperaturas, usando Matlab.

Variedad	Temperatura (°C)	5	15	25
	Coeficientes para O <sub>2</sub>			
Rabbiteye	Vm	7.1	18.5234	29.8
	Km	-1.9	-0.8726	-2.4
	Ki	2018.7	941.6074	2099.3
	resnorm	26.1945	0.3463	339.6628
Blueray	Coeficientes para O <sub>2</sub>			
	Vm	10.9510	35.1649	53.918
	Km	5.1784	3.2658	1.967
	Ki	9.6871	4.2249	10.649
	resnorm	0.2076	2.7564	21.805
Jersey	Coeficientes para O <sub>2</sub>			
	Vm	14.5986	34.2366	80.0838
	Km	4.1523	0.4704	0.6189
	Ki	9.5728	7.1383	10.2623
	resnorm	0.1639	2.1762	66.0757
Coville	Coeficientes para O <sub>2</sub>			
	Vm	16.7767	53.5388	129.5583
	Km	1.7079	1.4670	8.4225
	Ki	9.2896	4.9699	10.1209
	resnorm	1.1785	12.6413	44.1439
Rabbiteye	Coeficientes para CO <sub>2</sub>			
	Vm	13.3	124.9077	83.6
	Km	-0.1	28.94	-0.1
	Ki	1382.8	15.2899	3669.7
	resnorm	0.1375	1.4558	114.5483
Blueray	Coeficientes para CO <sub>2</sub>			
	Vm	7.0935	28.5071	46.9448
	Km	1.3549	2.666	0.4056
	Ki	20.942	6.1389	18.8010
	resnorm	0.0557	2.5202	8.4062
Jersey	Coeficientes para CO <sub>2</sub>			
	Vm	9.7342	29.5881	72.7738
	Km	1.8984	0.13	0.0961
	Ki	19.6859	11.1307	20.2296
	resnorm	0.0441	3.5125	15.0554
Coville	Coeficientes para CO <sub>2</sub>			
	Vm	12.8084	45.634	98.9864
	Km	0.5551	0.6285	1.2961
	Ki	18.8042	7.0094	14.9806
	resnorm	0.4352	4.9215	28.2238

En la tabla XXXV se presentan los valores reportados por Song et al. (1992) para las constantes de Michaelis – Menten.

Tabla XXXV. Valores reportados por Song et al. (1992) para Vm, Km, Ki a 5, 15 y 25°C para tres variedades de mora azul.

Variedad	Temperatura (°C)	5	15	25
Blueray	Coeficientes para O <sub>2</sub>			
	Vm	11.802	34.670	76.274
	Km	1.593	0.130	0.1
	Ki	11.725	6.783	11.044
	r <sup>2</sup>	0.998	0.999	0.999
Jersey	Coeficientes para O <sub>2</sub>			
	Vm	9.863	35.868	51.285
	Km	2.106	0.678	0.411
	Ki	7.606	3.296	9.361
	r <sup>2</sup>	0.994	0.996	0.996
Coville	Coeficientes para O <sub>2</sub>			
	Vm	16.602	68.006	127.356
	Km	1.488	0.444	5.2
	Ki	7.417	2.914	6.684
	r <sup>2</sup>	0.996	0.991	0.990
Blueray	Coeficientes para CO <sub>2</sub>			
	Vm	8.956	30.203	76.049
	Km	0.705	-0.104	0.125
	Ki	19.648	9.441	19.057
	r <sup>2</sup>	0.999	0.999	0.997
Jersey	Coeficientes para CO <sub>2</sub>			
	Vm	7.347	29.942	48.234
	Km	0.797	0.784	0.101
	Ki	12.693	4.449	16.701
	r <sup>2</sup>	0.995	0.998	0.999
Coville	Coeficientes para CO <sub>2</sub>			
	Vm	12.539	51.046	99.032
	Km	0.429	0.177	0.520
	Ki	15.486	4.896	13.502
	r <sup>2</sup>	0.998	0.995	0.996

Comparando los valores de la tabla XXXIV y XXV se puede decir que los coeficientes predichos con Matlab y los reportados por Song et al. (1992) son parecidos excepto en los siguientes casos donde hay una notable diferencia entre los valores de Vm tanto para O<sub>2</sub> como para CO<sub>2</sub> :

- Variedad blueray a 25°C - el valor de Song et al. (1992) es mayor que el de Matlab.
- Variedad Jersey a 25° C - el valor de Song et al. (1992) es menor que el de Matlab.

- Variedad Coville a 15°C - el valor de Song et al. (1992) es mayor que el de Matlab.

## **7.6 Modelado del empaqueo en atmósfera modificada para mora azul**

En cuanto a la modelación primero se definieron el producto, el tipo de empaque y las condiciones ambientales:

- Producto - mora azul (*var. rabbiteye*).
- Empaque - charolas plásticas de 5 cm de alto y 10 x 6.5 cm de base, selladas con la película poliolefina de una cierta permeabilidad al O<sub>2</sub>, CO<sub>2</sub> y H<sub>2</sub>O.

- Condiciones ambientales – 5°C y 25°C, aire (21 % O<sub>2</sub> y 0% CO<sub>2</sub>).

Los valores usados para la modelación se presentan en la tabla XXXVI

Tabla XXXVI. Variables consideradas en la modelación de EAM de mora azul (var. rabbiteye) a 5 y 25°C.

Relacionados con la fruta (mora azul)	Peso fruta (M)	0.170 kg
	rO <sub>2</sub> (5°C)*	11.393 mg O <sub>2</sub> /kg h
	rCO <sub>2</sub> (5°C)*	15.597 mg CO <sub>2</sub> /kg h
	Coeficiente respiratorio( $\alpha$ ) (5°C)	1.369
	rO <sub>2</sub> (25°C)*	50.4 mg O <sub>2</sub> /kg h
	rCO <sub>2</sub> (25°C)*	115.21 mg CO <sub>2</sub> /kg h
	Coeficiente respiratorio( $\alpha$ ) (25°C)	2.286
Relacionadas con el empaque (poliolefina)	Volumen libre (V)	174.54 ml
	Area (A)	98 cm <sup>2</sup>
	Presión (P)	1 atm
	Espesor película (L)	3.5 e <sup>-3</sup> cm
	PO <sub>2</sub> (5°C)	1.62e-3 mg O <sub>2</sub> / h cm atm
	PCO <sub>2</sub> (5°C)	5.2e-3 mg CO <sub>2</sub> / h cm atm
	Coeficiente de permeabilidades ( $\beta$ )	5.34
	PO <sub>2</sub> (25°C)	9.4e-4 mg O <sub>2</sub> / h cm atm
	PCO <sub>2</sub> (25°C)	7.5e-4 mg CO <sub>2</sub> /h cm atm
	Coeficiente de permeabilidades ( $\beta$ )	1.04
	$\rho$ O <sub>2</sub>	1.308 mg/ml
	$\rho$ CO <sub>2</sub>	1.799 mg/ml

\* velocidad de respiración promedio.

A partir de despejar (O<sub>2</sub>)<sub>o</sub> y (CO<sub>2</sub>)<sub>o</sub> de las ecuaciones 22 y 23 respectivamente y usando los valores de respiración y permeabilidad de la tabla XXXVI, es posible determinar las concentraciones que se alcanzarán en el sistema al equilibrio:

5°C

- (O<sub>2</sub>)<sub>o</sub> = 16.7 %
- (CO<sub>2</sub>)<sub>o</sub> = 1.8 %

25°C

- $(O_2)_o = - 11.5 \%$
- $(CO_2)_o = 92.6 \%$

De acuerdo a FDA (2001) las condiciones óptimas de almacenamiento de mora azul en atmósfera modificada son

- 0 – 5°C
- 2 - 5% O<sub>2</sub>
- 12 – 20% CO<sub>2</sub>

Comparando los valores de FDA (2001) con los obtenidos de las ecuaciones 22 y 23, las concentraciones de equilibrio a 5°C quedan fuera del rango óptimo para el almacenamiento de mora azul a esa temperatura, en cuanto a la temperatura de 25°C el valor negativo de la concentración de O<sub>2</sub> indica que la fruta y la película no alcanzan el equilibrio en ningún momento ya que el proceso de respiración de la fruta y la permeabilidad de la película no son compatibles a esta temperatura.

Siguiendo el planteamiento de Labuza y Breene (1989) se buscaron las condiciones de equilibrio entre la mora azul y la película poliolefina, la curva de respiración expresada en consumo de O<sub>2</sub> y producción de CO<sub>2</sub> respectivamente, se calculó con las constantes de la ecuación de Michaelis – Menten (tabla XXXVII).

Se graficó además la curva de respiración expresada en términos de producción de agua (rH<sub>2</sub>O) cuyo cálculo se hizo a partir de los valores de consumo de O<sub>2</sub> y producción de CO<sub>2</sub>, convirtiendo los mg de O<sub>2</sub> y CO<sub>2</sub> a mg de agua usando los pesos moleculares correspondientes. En cuanto a la curva de permeabilidad tanto para O<sub>2</sub> como para CO<sub>2</sub> se usaron las siguientes ecuaciones

$$RO_2 = PO_2 * \frac{A}{L} * (0.21 - Pint) \quad (66)$$

$$RCO_2 = PCO_2 * \frac{A}{L} * (Pint - 0) \quad (67)$$

Donde

$RO_2, RCO_2$  = vel de permeación (mg  $O_2$  o  $CO_2$ /h)

$PO_2, PCO_2$  = permeabilidad (mg  $O_2$  o  $CO_2$  cm/ h  $cm^2$  atm)

A = area de película ( $cm^2$ )

L = espesor de película (cm)

Pint = presión parcial de  $O_2$  dentro del empaque

Tabla XXXVII. Valores de las constantes de Michaelis – Menten para la respiración de mora azul a 5°C

	$O_2$	$CO_2$
Vm	10.951 mg/kg h	12.808 mg/kg h
Km	5.178 (% $O_2$ )	0.555 (% $O_2$ )
Ki	9.687 (% $CO_2$ )	18.804 (% $CO_2$ )

Se graficó además la velocidad de pérdida de vapor de agua a través de la película poliolefina, que se consideró constante y se calculó con la ecuación

$$\frac{dW}{dt} = \frac{VTVA}{\Delta P} * A * \Delta P \quad (68)$$

Donde

$dW/dt$  es la pérdida de agua respecto al tiempo

VTVA es la velocidad de transmisión de vapor de agua ( $mg/cm^2 h$ )

A es el area de transferencia en el empaque ( $cm^2$ )

$\Delta P$  es la diferencia de presión entre el ambiente y el alimento, es decir a ambos lados de la película

( $P_{ambiente} = (\%HR/100) * P_{vapH2O}$  y  $P_{alimento} = aw * P_{vapH2O}$ )

En la figura 7.30 se muestra la gráfica correspondiente a  $O_2$  y en la 7.31 la gráfica correspondiente a  $CO_2$  a  $5^\circ$ .

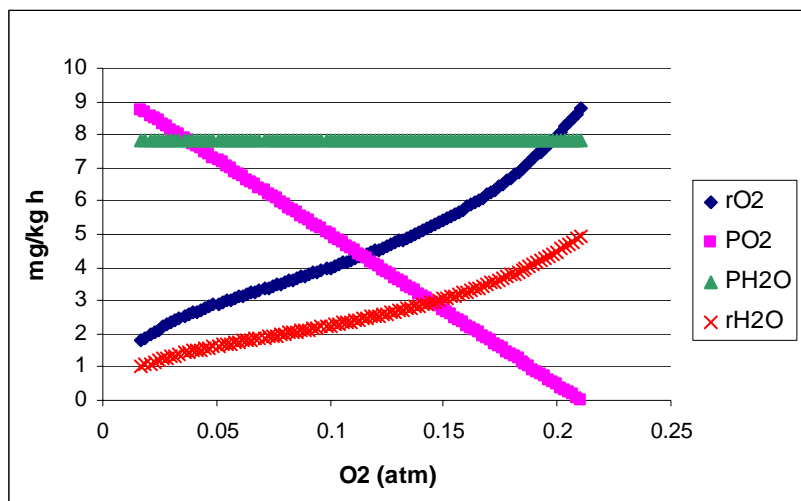


Figura 7.30. Comparación de la velocidad de respiración de mora azul con la permeabilidad de poliolefina al  $O_2$  y  $H_2O$  a  $5^\circ C$  en función del  $O_2$ .

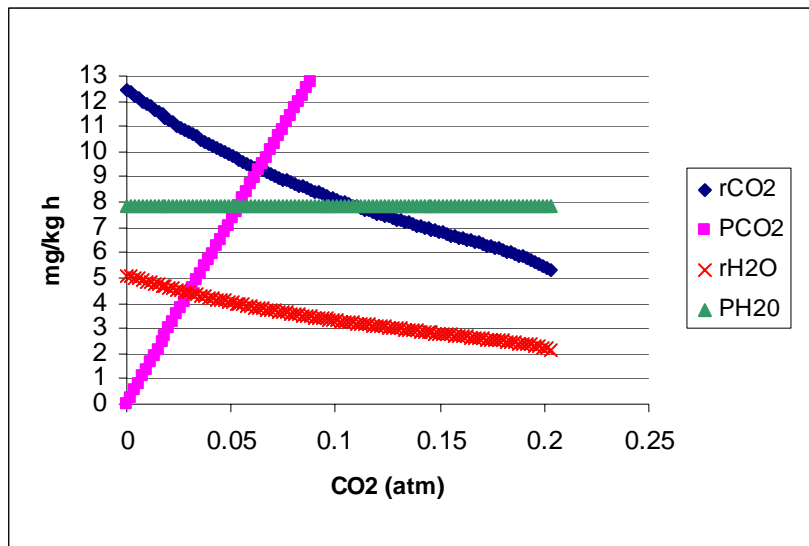


Figura 7.31. Comparación de la velocidad de respiración de mora azul con la permeabilidad de poliolefina a CO<sub>2</sub> y H<sub>2</sub>O a 5°C en función del CO<sub>2</sub>.

De acuerdo a las figuras 7.30 y 7.31 las condiciones de equilibrio, es decir el punto donde se intersectan la curva de respiración y la de permeabilidad al O<sub>2</sub> y CO<sub>2</sub> son

- (O<sub>2</sub>) = 11.1 %
- (CO<sub>2</sub>)<sub>0</sub> = 6.3 %

Mientras que la línea de permeabilidad al vapor de agua queda muy por arriba de la intersección de las curvas de respiración y permeabilidad al O<sub>2</sub> y CO<sub>2</sub>.

Las gráficas correspondientes a 25°C se representan en las figuras 7.32 y 7.33.

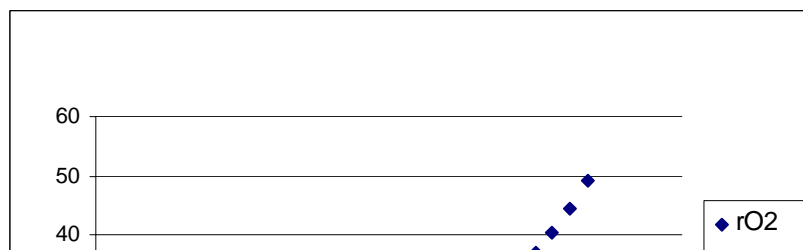




Figura 7.32. Comparación de la velocidad de respiración de mora azul con la permeabilidad de poliolefina a 25°C en función del O<sub>2</sub>.

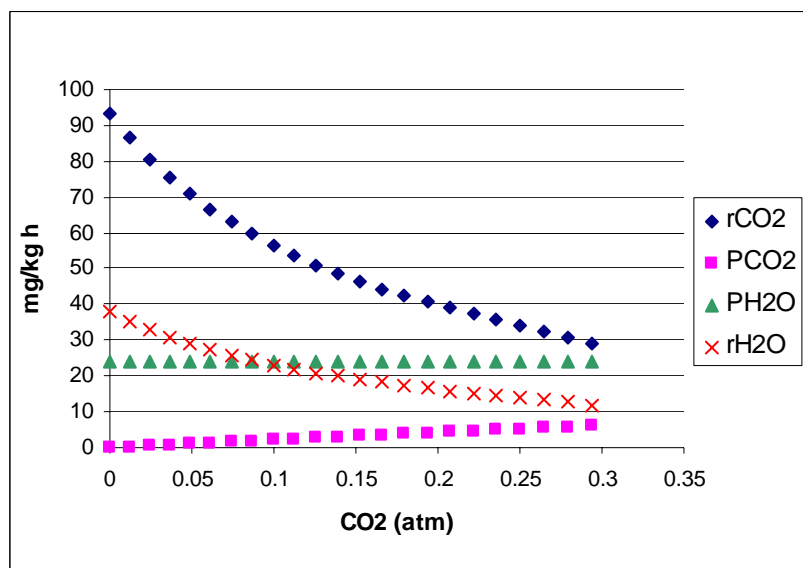


Figura 7.33. Comparación de la velocidad de respiración de mora azul con la permeabilidad de poliolefina a 25°C en función del CO<sub>2</sub>.

De acuerdo a las figuras 7.32 y 7.33, a 25°C no se alcanza el equilibrio entre la mora azul y la película ya que la velocidad de respiración es alta respecto a la permeabilidad al O<sub>2</sub> y CO<sub>2</sub> de la película, respecto a la

permeabilidad al vapor de agua si se alcanza el equilibrio a 19.5% O<sub>2</sub> (figura 7.32) pero no respecto al CO<sub>2</sub> (figura 7.33).

Posteriormente se calcularon los valores de permeabilidad al O<sub>2</sub>, CO<sub>2</sub> y H<sub>2</sub>O que permiten alcanzar el equilibrio en el empaque a las condiciones óptimas de almacenamiento (2 - 5% O<sub>2</sub> y 12 - 20% CO<sub>2</sub>), es decir cuando la respiración y la permeabilidad se igualan, usando las ecuaciones siguientes

$$PO_2 = \frac{V_m * (O_2)}{K_m + (1 + (CO_2/K_i)) * (O_2)} * \frac{L * M}{A * (0.21 - (O_2)_o)} \quad (69)$$

$$PCO_2 = \frac{V_m * (O_2)}{K_m + (1 + (CO_2/K_i)) * (O_2)} * \frac{L * M}{A * ((CO_2)_o - 0)} \quad (70)$$

$$VTVA_{O_2} = \frac{V_m * (O_2)}{K_m + (1 + (CO_2/K_i)) * (O_2)} * \frac{18 * M}{32 * A} \quad (71)$$

$$VTVA_{CO_2} = \frac{V_m * (O_2)}{K_m + (1 + (CO_2/K_i)) * (O_2)} * \frac{18 * M}{44 * A} \quad (72)$$

V<sub>m</sub>, K<sub>m</sub> y K<sub>i</sub> son las constantes de Michaelis – Menten; (O<sub>2</sub>) y (CO<sub>2</sub>) son las concentraciones de oxígeno y dióxido de carbono obtenidas de la curva de cambio en concentración predicha con matlab usando las constantes A, B y C (tabla XXVII): se fija una concentración dependiendo de la permeabilidad (O<sub>2</sub> o CO<sub>2</sub>) que se quiere calcular, se encuentra el tiempo con la ecuación 39 o 40 y a partir de este tiempo se encuentra la concentración del otro gas; L es el espesor de la película (cm), M es el peso de mora azul dentro del empaque (kg), A es el área de la película (cm<sup>2</sup>), (O<sub>2</sub>)<sub>o</sub> y (CO<sub>2</sub>)<sub>o</sub> son las concentraciones óptimas de almacenamiento (2 - 5% O<sub>2</sub> y 12 - 20% CO<sub>2</sub>), 18, 32 y 44 son los pesos moleculares de agua, oxígeno y dióxido de carbono respectivamente. Los valores obtenidos de las ecuaciones 69 – 72 son los siguientes:

Tabla XXXVIII. Valores de permeabilidad de la película óptima para el empaçado de mora azul a 5°C.

Propiedad de la película	Valores óptimos		Intervalo de concentración óptima
	mg / cm h atm	ml / cm s Pa	
PO <sub>2</sub>	6.19e-5 – 7.35e-5	1.31e-13 – 1.56e-13	2 – 5 % O <sub>2</sub>
PCO <sub>2</sub>	3.824e-4 – 2.29e-4	5.92e-13 – 3.5e-13	12 – 20 % CO <sub>2</sub>
VTVAO <sub>2</sub>	0.45 – 0.68 g H <sub>2</sub> O/m <sup>2</sup> día		2 – 5 % O <sub>2</sub>
VTVACO <sub>2</sub>	1.29 – 0.93 g H <sub>2</sub> O/m <sup>2</sup> día		12 – 20 % CO <sub>2</sub>

Si se comparan los valores de permeabilidad de la película poliolefina con los anteriormente calculados (tabla XXXVIII) se observa que el valor de VTVA óptimo (1.29 g H<sub>2</sub>O/m<sup>2</sup> día) es el 6.7% del VTVA obtenido experimentalmente para poliolefina (19.19 g H<sub>2</sub>O/m<sup>2</sup> día), la permeabilidad óptima al O<sub>2</sub> (7.35e-5 mg O<sub>2</sub> / cm h atm) es 100 veces menor que la experimental (1.62e-3 mg O<sub>2</sub> / cm h atm) y la permeabilidad óptima al CO<sub>2</sub> (2.29e-4 mg CO<sub>2</sub> / cm h atm) es 10 veces menor que la experimental (5.2e-3 mg CO<sub>2</sub> / cm h atm).

Posteriormente de la tabla XXVII se seleccionaron las películas: LDPE, HDPE, PP 50% cristalino, orega, y cryovac CP9250 cuyos valores de permeabilidad al O<sub>2</sub> y CO<sub>2</sub> son cercanos a los óptimos, las curvas de permeabilidad correspondientes y las de poliolefina reportadas por el proveedor se graficaron de acuerdo a Labuza y Breene (1989), estas graficas aparecen en las figura 7.34 (O<sub>2</sub>) y 7.35 (CO<sub>2</sub>).

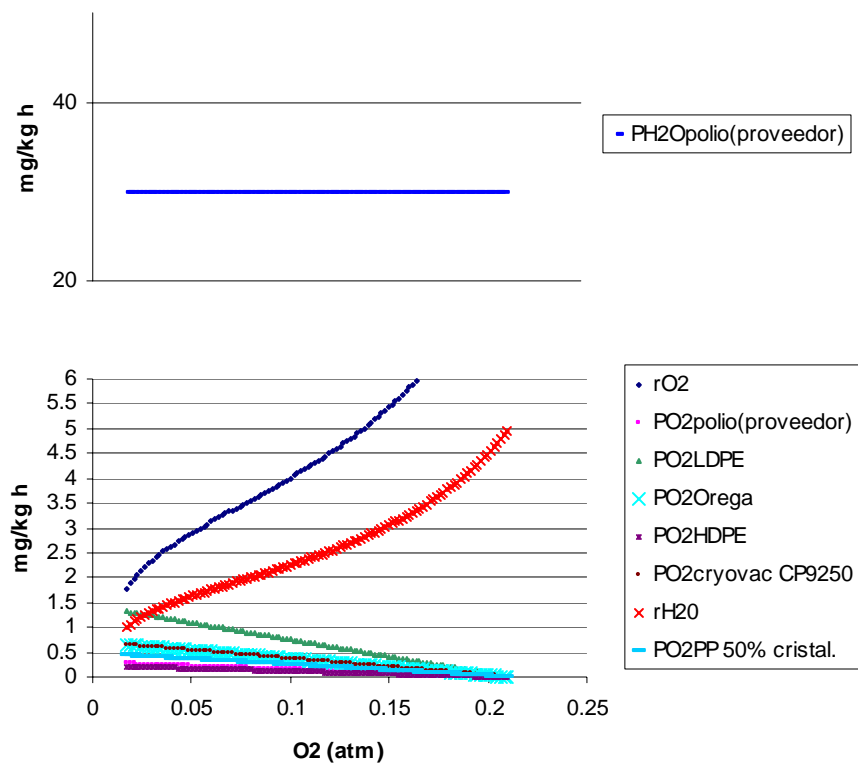


Figura 7.32. Comparación de la velocidad de respiración de mora azul con la permeabilidad al O<sub>2</sub> y al vapor de agua de 5 películas diferentes a 5°C en función del O<sub>2</sub>.

De acuerdo a la figura 7.32 ninguna de las películas seleccionadas alcanza el equilibrio con la fruta, ya que no se intersectan la curva de respiración expresada como consumo de O<sub>2</sub> y la de permeabilidad al O<sub>2</sub>.

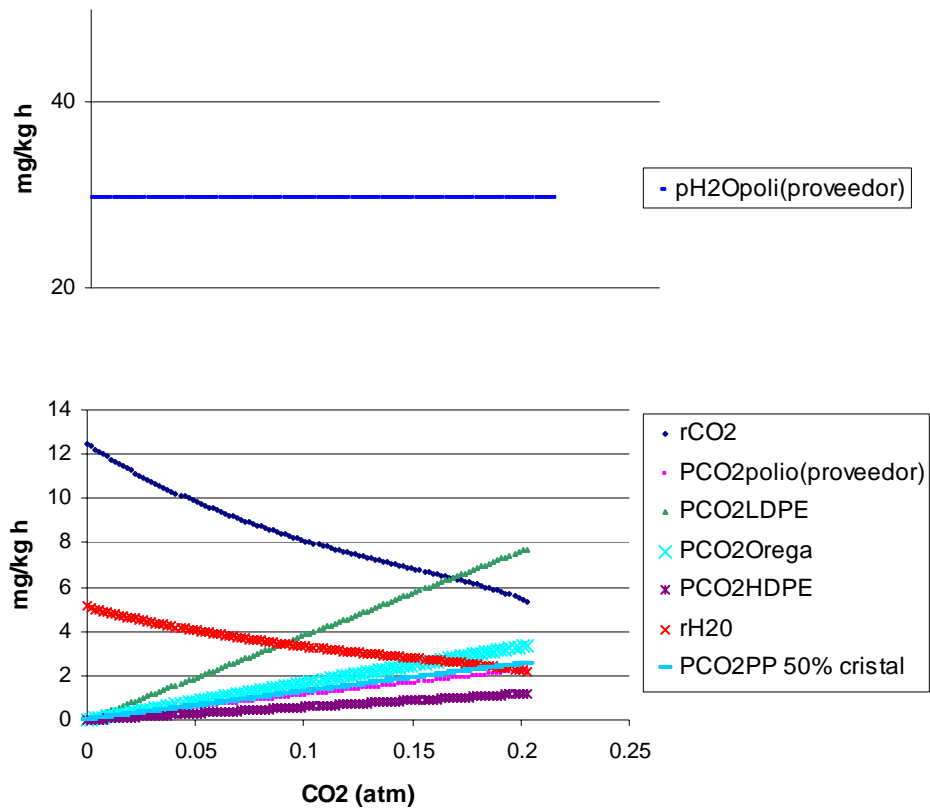


Figura 7.33. Comparación de la velocidad de respiración de mora azul con la permeabilidad de 4 películas diferentes a 5°C en función del CO<sub>2</sub>.

En el caso de la figura 7.33 la única película que alcanza el equilibrio con la fruta es LDPE al 17% de CO<sub>2</sub>.

Respecto a la permeabilidad al vapor de agua (figuras 7.32 y 7.33) esta es por mucho mayor a la velocidad de respiración ( $r_{H_2O}$ ).

Debe considerarse que los valores de permeabilidad de las películas probadas en las figuras 7.32 - 7.33 fueron determinados a temperaturas mayores a las que se pretenden utilizar por lo que es necesario hacer las correcciones correspondientes a la temperatura y volver a graficar para verificar que efectivamente son útiles para esas condiciones de empaçado.

A partir de las ecuaciones 20 y 21 se graficó el cambio de concentración de  $O_2$  y  $CO_2$  dentro de los empaques respecto al tiempo, usando las permeabilidades del proveedor, esto consistió en evaluar dichas ecuaciones en intervalos de 0.5 % de  $O_2$  o  $CO_2$  según el caso y la velocidad de respiración correspondiente, para así obtener los incrementos de tiempo ( $dt$ ) y a partir de la suma de los mismos obtener la variación del tiempo a las diferentes concentraciones (apéndice E), esta gráfica aparece en la figura 7.34 .

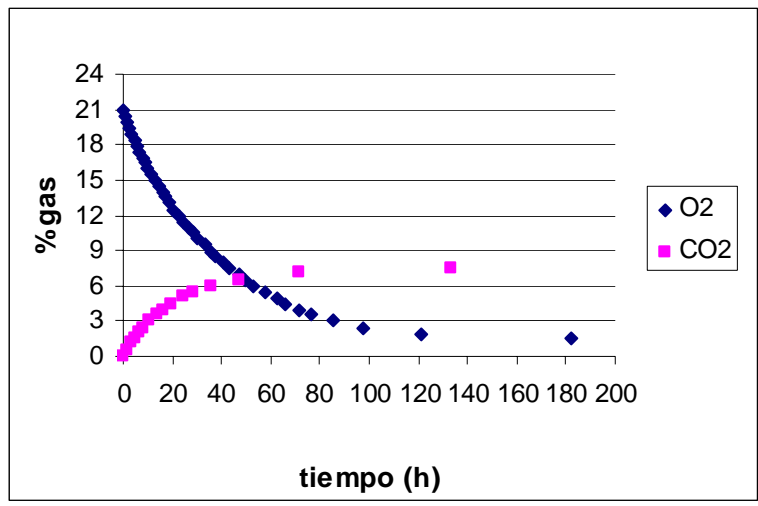


Figura 7.34. Cambio de concentración de O<sub>2</sub> y CO<sub>2</sub> respecto al tiempo dentro del empaque en atmósfera modificada de mora azul a 5°C

De acuerdo a la figura 7.34, a las 100 hs (4 días) la concentración de O<sub>2</sub> es de 1.8% y disminuye lentamente a partir de este tiempo, la concentración de CO<sub>2</sub> por su parte se mantiene prácticamente constante al 7.1% que corresponde a un tiempo de 70 hs (3 días).

## 7.7 Almacenamiento bajo atmósfera modificada

### 7.7.1 Cambio en composición gaseosa dentro de los empaques

Se realizó el almacenamiento de mora azul a 5°C durante 38 días y a 25°C por 17 días, se monitoreo el cambio en concentración dentro de los diferentes empaques así como los cambios en color, textura, °Brix, pH, acidez, aw, humedad y calidad microbiológica. Debido a que la película nybar es impermeable al CO<sub>2</sub>, las muestras empacadas con esta película a 25°C sin inyección de gases se perdieron y a 5°C solo duraron 7 días ya que el sello se botó debido a la gran cantidad de CO<sub>2</sub> acumulado. Las figura 7.35 –7.40 presentan el cambio en composición gaseosa dentro de los empaques durante el almacenamiento.

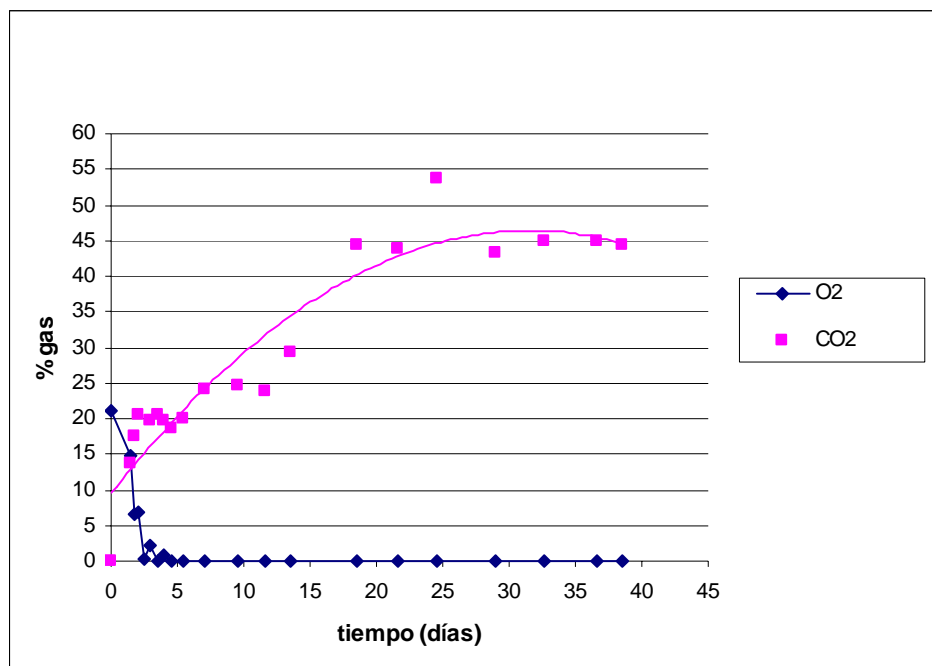


Figura 7.35. Cambio en composición gaseosa durante 38 días de almacenamiento de empaques con película poliolefina sin inyección de gases a 5°C.



De acuerdo a la modelación de cambio de concentración respecto al tiempo (figura 7.34) la concentración de  $O_2$  es muy baja (1.8 %) a partir de los 4 días, experimentalmente se observó que la concentración de  $O_2$  es muy cercana a 0% entre los días 3 y 4, se puede decir entonces que los valores de tiempo de la modelación y experimental coinciden en que a los 4 días la concentración de  $O_2$  es muy baja.

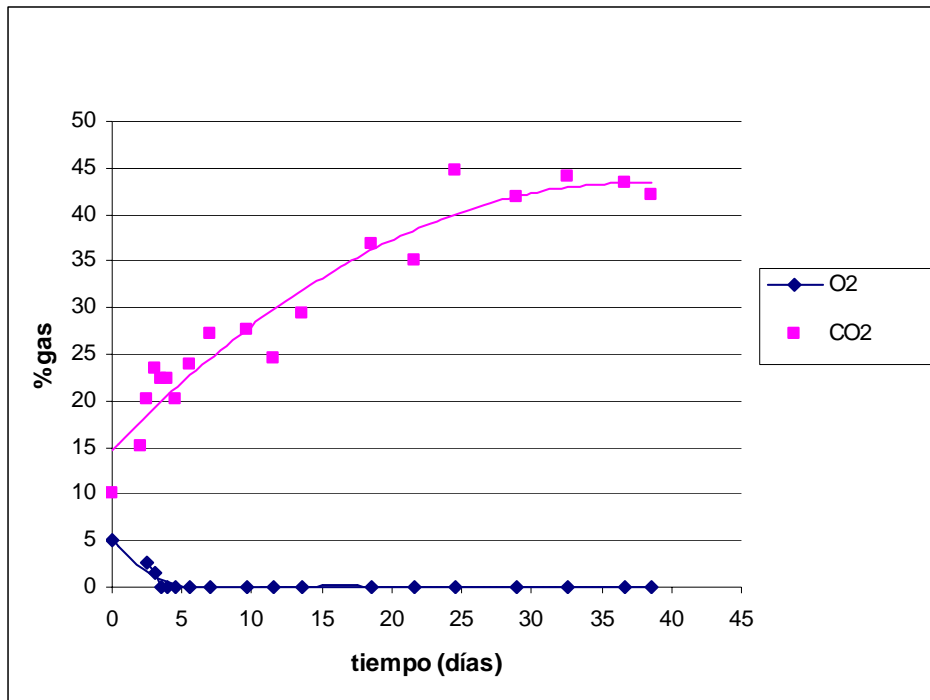


Figura 7.36. Cambio en composición gaseosa durante 38 días de almacenamiento de empaques con película poliolefina con inyección de gases a 5°C.

En el caso del empaque con la película poliolefina se observa que al inyectar una mezcla de gases (figura 7.40) se disminuye la concentración inicial de  $O_2$  respecto a las muestras empacadas en aire (figura 7.39), ya que en el primer caso al día 2 se tiene una composición del 11% y en el segundo se tiene 15% de  $O_2$  aunque en ambos casos el  $O_2$  se agota entre los días 3 y 4, promoviendo la respiración anaerobia. En cuanto al  $CO_2$  en los empaques con inyección de gases se incrementa de 0 a 45% y en los empaques sin inyección de gases (aire) de 14 a 45%, alcanzándose el equilibrio a la máxima concentración al día 25 y 19 respectivamente, observándose el efecto de la atmósfera modificada para disminuir la velocidad de producción de  $CO_2$ .

Bourke y O'Beirne (2004) siguieron el cambio en concentración de  $O_2$  y  $CO_2$  de zanahoria picada, lechuga picada y una mezcla de ambas (1:4) empacadas en bolsas de

polipropileno orientado (35  $\mu\text{m}$  grosor, dimensiones de 20 x 14 cm, permeabilidad de 1200 y 3000 ml/m<sup>2</sup> día atm a 35°C a O<sub>2</sub> y CO<sub>2</sub> respectivamente ) y aire a 3 y 8°C, de acuerdo a sus gráficas a la misma temperatura (3°C), la concentración de O<sub>2</sub> disminuye más rápido en la mezcla de zanahoria y lechuga (3% día 2) respecto a la zanahoria (10% día 2) y la lechuga (8% día 2) empacadas por separado y a 8°C la concentración de O<sub>2</sub> en los empaques disminuye a la mitad respecto a 3°C (1.5% mezcla, 5% zanahoria, 4% lechuga) en la mezcla a ambas temperaturas la concentración de O<sub>2</sub> se mantiene constante a partir del día 2 hasta el día 12 que se hizo el estudio, a 8°C la concentración de O<sub>2</sub> disminuye claramente para la lechuga y zanahoria empacadas por separado; la concentración de CO<sub>2</sub> tiende a incrementarse en todos los empaques más rápidamente a 8°C que a 3°C hasta llegar a una acumulación máxima a partir de la cual la concentración disminuye.

Se compararon los resultados obtenidos en este trabajo para la fruta empacada en poliolefina sin inyección de gases (figura 7.39) con los reportados por estos autores bajo la consideración de que ambas películas son de alta permeabilidad y que se parte de una composición gaseosa como la del aire (21% O<sub>2</sub> y 0% CO<sub>2</sub>), se puede decir que aunque al día 2 se tiene una mayor concentración de O<sub>2</sub> (6%) para la mora azul respecto a la mezcla de zanahoria y lechuga (3%), el O<sub>2</sub> se agota muy pronto (día 3) en comparación a los 12 días que se mantiene la concentración de O<sub>2</sub> en la mezcla zanahoria: lechuga, sin embargo se esperaría que sucediera lo contrario considerando que el tejido de zanahoria y lechuga ha sido dañado con el corte y esto acelera la respiración del producto.

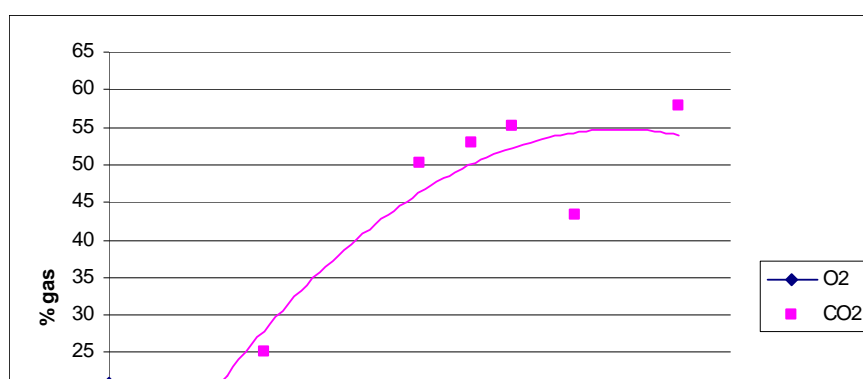


Figura 7.37. Cambio en composición gaseosa durante 6 días de almacenamiento de empaques con película nybar sin inyección de gases a 5°C.

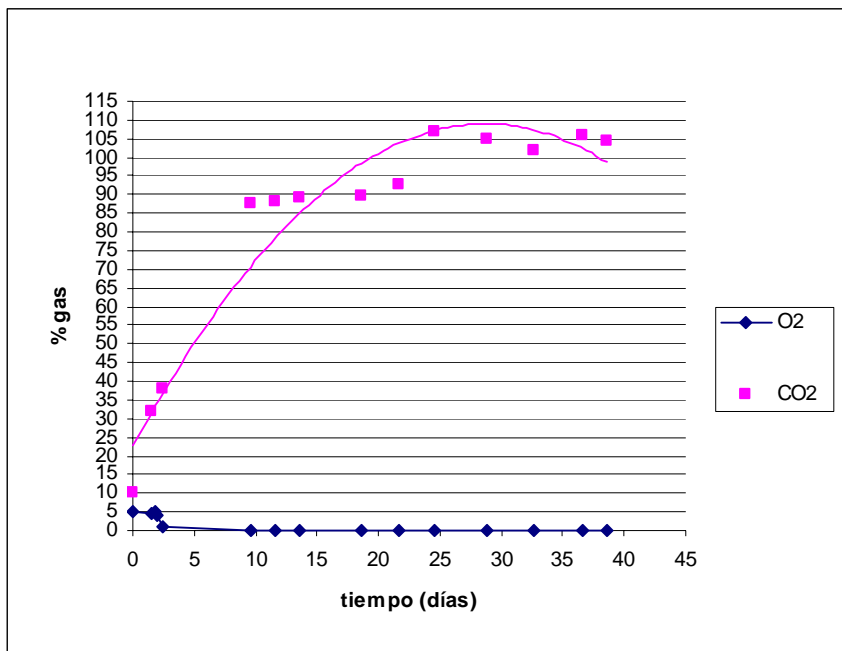


Figura 7.38. Cambio en composición gaseosa durante 38 días de almacenamiento de empaques con película nybar con inyección de gases a 5°C.

Para el caso de los empaques con la película nybar con y sin inyección de gases (figura 7.38 y 7.37) el O<sub>2</sub> se agota rápidamente, la concentración inicial es baja y parecida (5 y 4 % respectivamente) entre ambas variantes. En cuanto a CO<sub>2</sub> en los empaques con gas la concentración inicial es menor (32%) respecto a los que no se les inyectó gas (44%) pero no es posible comparar la evolución del gas entre ambas variantes debido a que las muestras sin inyección de gases se perdieron a los 5.5 días

debido a que se botó el sello, la muestra con inyección de gases se perdió a los 2.5 días pero si fue posible reponerla. Sin embargo debido a que la película nybar es impermeable al CO<sub>2</sub> se alcanza una concentración de 100% de este gas a partir del día 25.

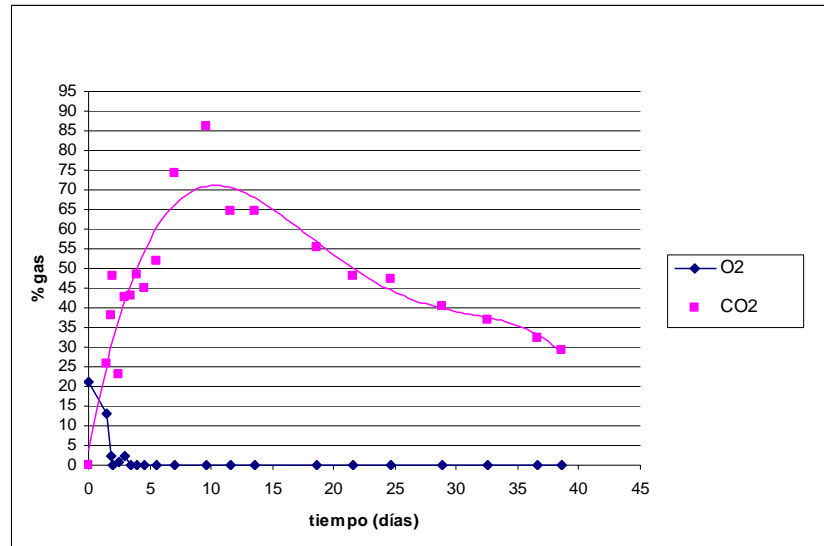


Figura 7.39. Cambio en composición gaseosa durante 38 días de almacenamiento de empaques con película poliolefina sin inyección de gases a 25°C.

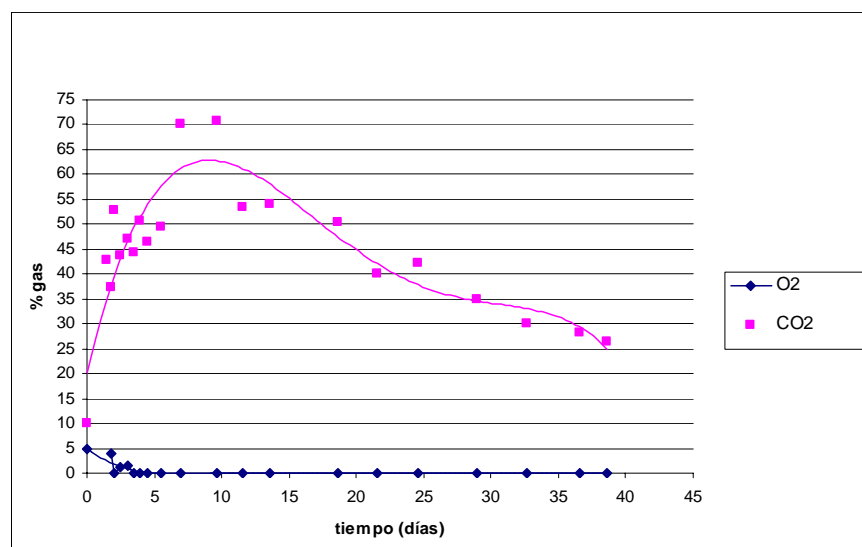


Figura 7.40. Cambio en composición gaseosa durante 38 días de almacenamiento de empaques con película poliolefina con inyección de gases a 25°C.

A 25°C la concentración de O<sub>2</sub> en los empaques con la película poliolefina con inyección de gases (figura 7.40) es menor (4%) que aquellos en los que no se inyectaron (13%) (figura 7.39) y se agota entre los días 3 y 4 igual que a 5°C. La evolución de CO<sub>2</sub> a esta temperatura es aumentar hasta alcanzar una máxima concentración al día 10 (71% y 86% respectivamente) para después disminuir hasta alcanzar una concentración mínima (26% y 29% respectivamente) al final del almacenamiento (día 38). Para los empaques con la película nybar con inyección de gases a 25°C (figura 7.41) el O<sub>2</sub> se agota a los 3.5 días igual que los empaques con poliolefina, pero el CO<sub>2</sub> se acumula desde el inicio incrementándose de 59% a 100%.

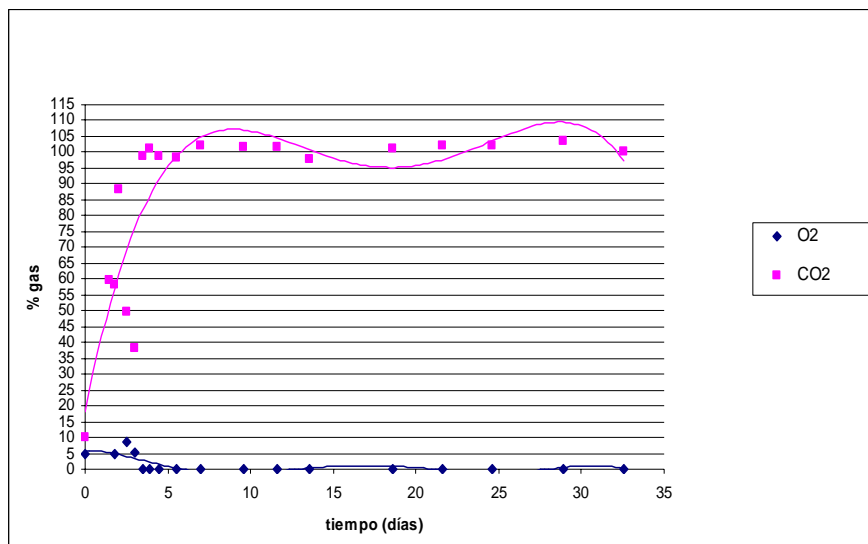


Figura 7.41. Cambio en composición gaseosa durante 38 días de almacenamiento de empaques con película nybar con inyección de gases a 25°C.

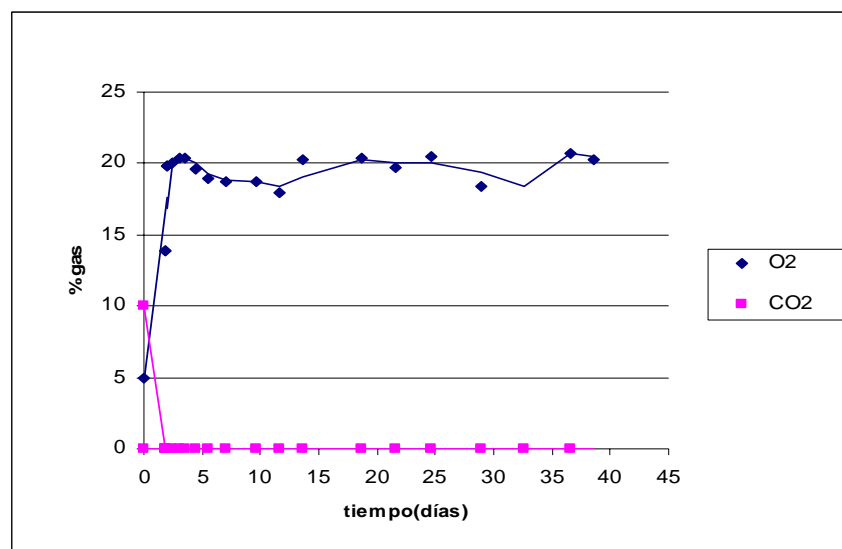


Figura 7.42. Cambio en composición gaseosa durante 38 días de almacenamiento de empaques sin fruta con película poliolefina con inyección de gases a 25°C

Paralelo al análisis de los empaques con fruta, se monitoreo la composición gaseosa de empaques vacíos de la película poliolefina a 25°C, se observa de la figura 7.42 que aunque se inyectó en los empaques una mezcla de 10% CO<sub>2</sub> y 5% O<sub>2</sub> esta se pierde rápidamente debido a la alta permeabilidad de la película tanto al O<sub>2</sub> como al CO<sub>2</sub> y a que alcanza rápidamente el equilibrio con el ambiente (21% O<sub>2</sub> y 0% CO<sub>2</sub>).

### 7.7.2 Cambios en las propiedades fisicoquímicas de mora azul durante el almacenamiento

Se monitorearon las propiedades fisicoquímicas de mora azul durante los 17 días de almacenamiento a 25°C y los 38 días a 5°C, sin embargo las muestras empacadas en la película nybar se perdieron en su mayoría y sólo fue posible en el caso del empaque sin gas tener dos mediciones iniciales y para el empaque con gas una al inicio y otra al final del almacenamiento, por esta razón es difícil en la mayoría de las propiedades concluir respecto al comportamiento de las mismas. Se realizó además un análisis estadístico a la fruta sin empacar a 5°C, la fruta empacada en poliolefina con y sin inyección de gases a ambas temperaturas (5 y 25°C).

### 7.7.2.1 Cambio en la carga microbiana

Se determinó la carga microbiana de la fruta empacada cuantificando bacterias mesofílicas aerobias, mohos y levaduras, las figuras 7.43 – 7.45 presentan la carga microbiana a 5°C y las figuras 7.50 – 7.52 a 25°C.

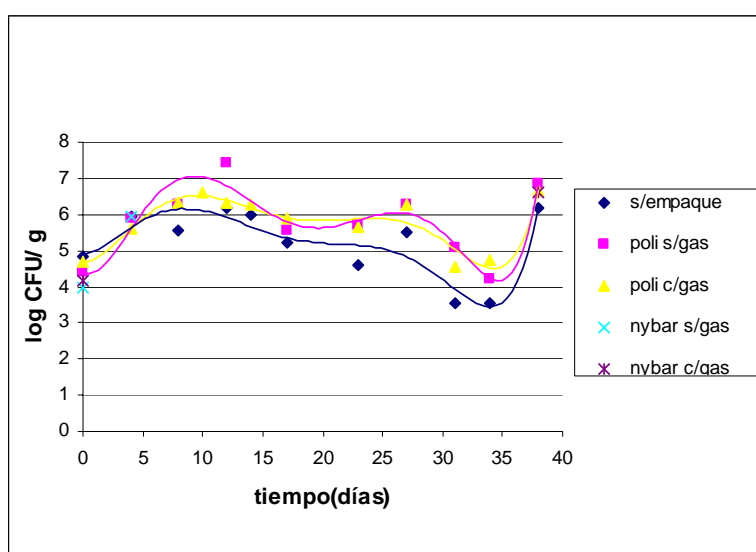


Figura 7.43. – Crecimiento de bacterias mesofílicas en mora azul (var.rabbiteye) almacenada a 5°C

Respecto a las bacterias mesofílicas (figura 7.43) a 5°C se tiene una carga inicial de entre 4 y 5 log CFU/g , valor considerablemente alto en comparación con 2 log CFU/g para manzana cortada en cubos (1 cm lado) reportado por Soliva - Fortuny et al. (2004), esto puede deberse a que la fruta no fue lavada antes de empacarla y debido a que el tamaño y la calidad no eran homogéneos tuvo que ser seleccionada manualmente, estos factores sumados al hecho de que la fruta fue empacada 2 días después de haber sido cosechada y que fue transportada durante varias horas sin un buen control de temperatura hacen que se tenga una carga inicial alta. La carga de bacterias mesofílicas aumenta de 4 – 5 log a 6 – 7 log, notándose ligeramente mayor en la fruta empacada respecto a la no empacada, esto indica que aunque la fruta sin empaque tenía la mayor carga inicial conforme transcurrió el almacenamiento la carga de bacterias mesofílicas creció ligeramente más rápido que en la fruta sin empacar. Zagory y Kader (1988) mencionan que los empaques plásticos son una barrera al vapor de agua que mantiene una alta humedad relativa (HR) dentro del empaque que tiene la ventaja de mantener el turgor en la frutas y hortalizas pero también puede provocar condensación dentro del empaque promoviendo el crecimiento de microorganismos, esto último parece ser la razón del incremento en bacterias mesofílicas en mora azul en este trabajo.

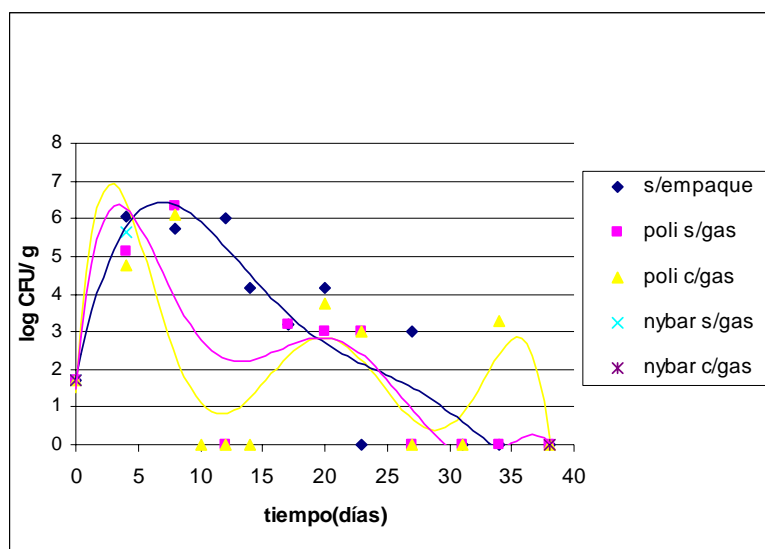




Figura 7.44. – Crecimiento de mohos en mora azul (var. rabbiteye) almacenada a 5°C

En cuanto a los mohos en mora azul a 5°C (figura 7.44) la carga inicial fue baja para todos los casos, 1- 2 log CFU/g, este dato coincide con el reportado por Soliva – Fortuny et al.(2004) de 1.7 – 2 log CFU/g para manzana cortada en cubos (1 cm lado), las tendencias en cuanto a la evolución respecto al tiempo de almacenamiento son a aumentar hasta una carga máxima de 6.5 – 7 log CFU/g hacía el día 4 para las muestras empacadas en poliolefina y hacia el día 6 para la muestra sin empacar para posteriormente disminuir a 0 log CFU/g a partir del día 31.

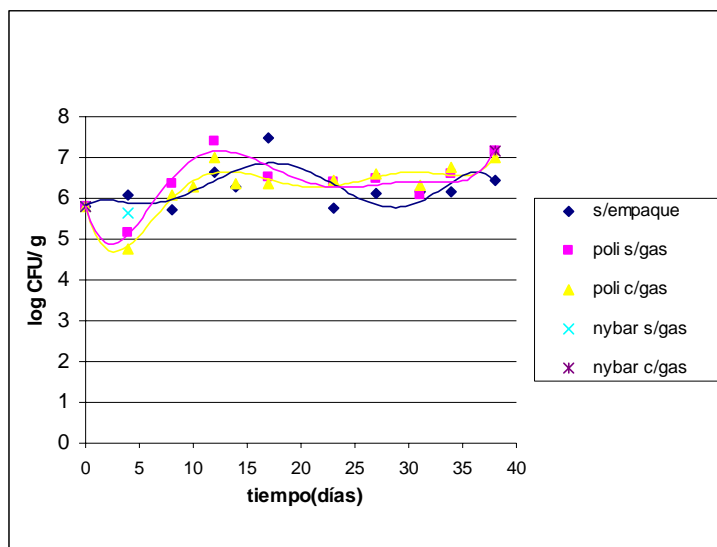


Figura 7.45. – Crecimiento de levaduras en mora azul (var. rabbiteye) almacenada a 5°C

Según la figura 7.45 la población inicial de levaduras (5.5 – 6 log CFU/g ) es más alta que la de bacterias mesofílicas (4 – 5 log CFU/g), debido a que la fruta no se lavo y la microflora predominante en fruta esta compuesta principalmente por mohos y levaduras (Soliva – Fortuny et al. 2004). El número de bacterias aumentó durante el almacenamiento hasta 7 log CFU/g de manera constante y paralela entre las muestras empacadas (polilefina) y la no empacada. Soliva – Fortuny et al. (2004) cuantificaron la

evolución de mohos y levaduras conjuntamente para manzana cortada en cubos (1 cm lado) durante 52 días y la tendencia que observaron fue que la carga aumentaba de 2 a 3-3.5 log CFU/g, valores por mucho bajos respecto a los obtenidos en este trabajo.

De acuerdo a los resultados antes analizados de carga microbiana, se puede decir que la carga microbiana en general es alta durante el almacenamiento ya que se esta partiendo de una carga inicial alta, la disminución de mohos puede deberse a una inhibición competitiva en su crecimiento, por parte de las levaduras.

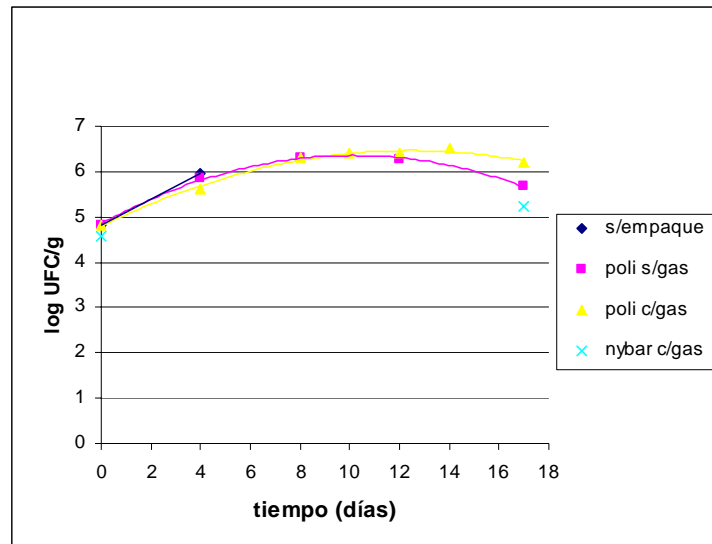


Figura 7.46. – Crecimiento de bacterias mesofílicas en mora azul (var. rabbiteye) almacenada a 25°C

Las muestras almacenadas a 25°C se monitorearon hasta el día 17 debido a que en ese momento era observable a simple vista la contaminación microbiana (manchas blancas sobre la fruta). Sin embargo a 5°C esta contaminación fue evidente sólo para algunas muestras y en menor cantidad. La muestra de mora azul sin empaque a 25°C fue eliminada a los 4 días debido a la presencia de mosquitos, la muestra empacada con nybar sin gas se perdió al principio del almacenamiento y la correspondiente a nybar con gas sólo se monitoreó al inicio y al final de los 17 días debido a que la mayoría de las muestras se perdieron al botarse el sello por la acumulación de CO<sub>2</sub>.

A 25°C (figura 7.46) el crecimiento de bacterias mesofílicas se incrementa de 5 a 6 log CFU/g durante los 17 días que se monitorea, comparando con el crecimiento a 5°C al día 17 la población microbiana es aproximadamente igual (figura 7.43) lo que hace pensar que a pesar de que a 25°C se parte de una población inicial mayor el incremento es menor respecto a la temperatura de 5°C, quizá a 5°C predomine un efecto negativo de la película al promover una alta humedad relativa dentro del empaque favoreciendo el crecimiento de microorganismos.

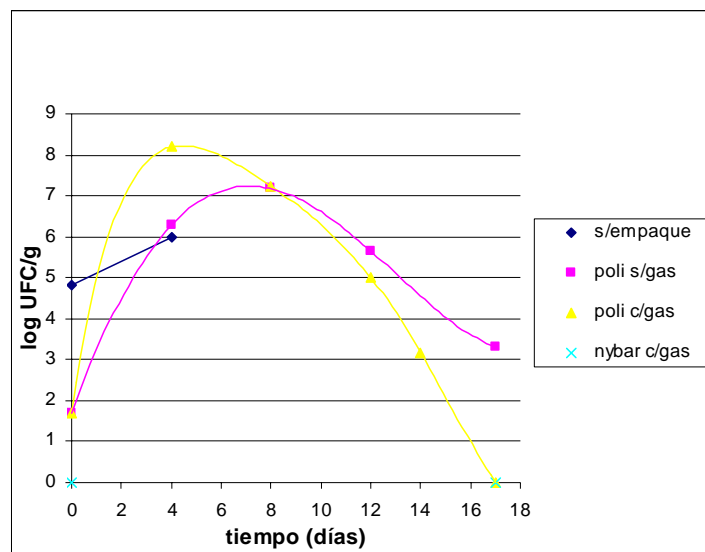


Figura 7.47. – Crecimiento de mohos en mora azul (var. rabbiteye) almacenada a 25°C

Existe gran diferencia en carga inicial de mohos a 25°C entre las diferentes muestras (figura 7.47) siendo de 1 log UFC/g para la fruta empacada con poliolefina sin gas, 3 log UFC/g para poliolefina con gas, 5 log UFC/g para la fruta sin empacar y ausencia de mohos en la fruta empacada en nybar con inyección de gases, para la fruta empacada en poliolefina sin inyección de gases hacia el final del tiempo de monitoreo en comparación con la carga de mohos al mismo tiempo (día 17) a 5°C, la carga es similar.

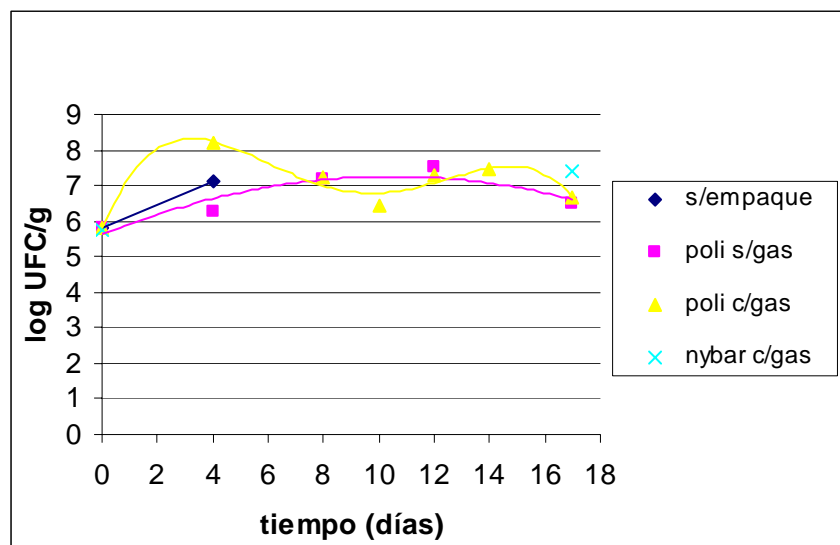


Figura 7.48. – Crecimiento de levaduras en mora azul (var. rabbiteye) almacenada a 25°C

Las levaduras a 25°C (figura 7.48) al igual que a 5 °C presentan una población de 6 log UFC/g para todas las variantes de empaque, en el caso de la fruta sin empaque el incremento es de 1 log UFC/g en 2 días, la fruta empacada en poliolefina con inyección de gases presenta un incremento inicial hasta 8 log UFC/g para después mantenerse alrededor de 7 log UFC/g, la fruta empacada en poliolefina sin gas se mantiene constante alrededor de 7 log UFC/g y la fruta en nybar con inyección de gases presenta una población final de 7.5 log UFC/g.

### 7.7.2.2 Cambio en textura

Se determinó la textura de la fruta a ambas temperaturas en términos de fuerza máxima, que es la resistencia máxima a la compresión y que en horticultura se usa para definir la firmeza de frutas y hortalizas (Abbott, 1999), los resultados se muestran en las figuras 7.49 y 7.50 a 5 y 25°C respectivamente.

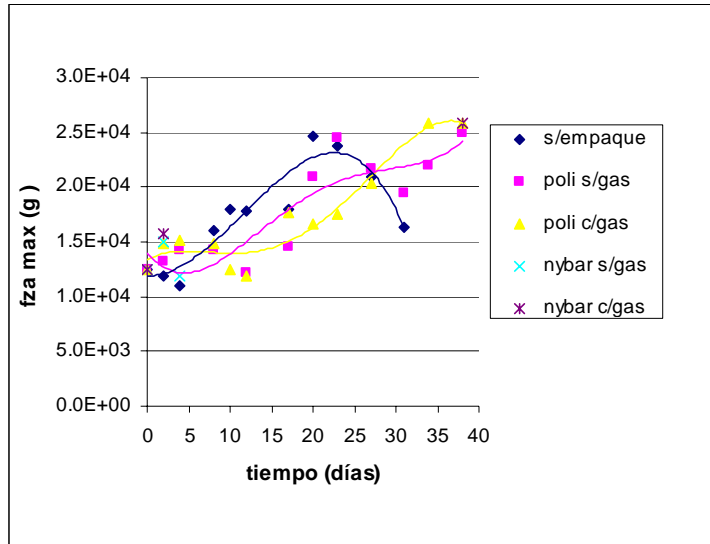


Figura 7.49. Cambio en fuerza máxima de mora azul (var. rabbiteye) almacenada a 5°C.

En las muestras a 5°C (figura 7.49) la fuerza máxima inicial aplicada sobre la fruta varía de 10000 a 15000 g para las 4 variedades de empaque y la muestra sin empacar, conforme transcurre el tiempo en la muestra sin empacar la textura aumenta hasta llegar a un valor máximo de 2500 g al día 20 a partir del cual disminuye, esto sucede debido a que la fruta se deshidrata y pierde turgor más rápido que la fruta empacada después la firmeza disminuye debido al proceso normal de senescencia. En las muestras empacadas en la película poliolefina la firmeza se mantiene aproximadamente a 15000 g hasta el día 17 que se incrementa a 25000 g y se vuelve a mantener constante entre 20000 y 25000 g, esto para el empaque en poliolefina sin gas, para el empaque de poliolefina con gas la textura se incrementa gradualmente a partir del día 17 llegando a 2500g al día 38, esto implica que la fruta empacada pierde humedad y consecuentemente turgor, al igual que la fruta no empacada pero de una manera más lenta ya que la máxima firmeza (25000 g) la alcanza hasta el día 38, retardándose la pérdida de textura debida a la senescencia. De acuerdo al análisis estadístico si hubo una diferencia significativa en la textura de las muestras a 5°C durante el almacenamiento.

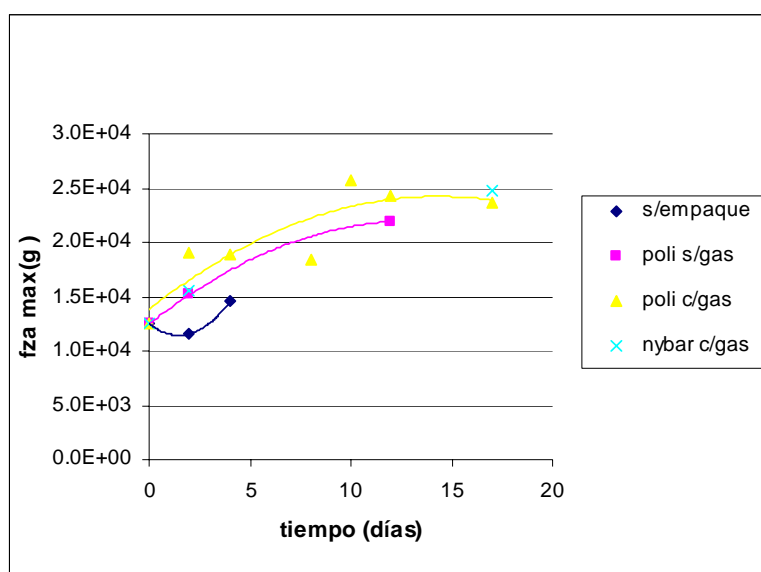


Figura 7.50. Cambio en fuerza máxima de mora azul (var. rabbiteye) almacenada a 25°C.

A 25°C (figura 7.50) respecto a la fruta empacada, el valor de fuerza máxima se incrementa conforme el tiempo y aunque el valor inicial para la fruta empacada en poliolefina con inyección de gases (19 000 g) es mayor que el de la fruta empacada en poliolefina sin inyección de gases (15 000 g) el valor final es menor implicando que al modificar la composición gaseosa dentro del empaque se mejora la retención de firmeza ya que el análisis estadístico indica que no hay diferencia significativa entre los valores de fuerza máxima ( $p < 0.05$ ).

### 7.7.2.3 Cambio en color

Se midieron los parámetros L, a, b de Hunter para determinar el cambio en color de la fruta durante el almacenamiento, a partir de estos parámetros se calculó el cambio neto en color ( $\Delta E$ ). Por observación directa se notó que la fruta se tornó roja conforme transcurrió el almacenamiento. De acuerdo al análisis estadístico realizado a los parámetros de color si hay diferencia significativa de las muestras empacadas en poliolefina a 5°C (con y sin inyección de gases).

A continuación se presentan los valores de cambio neto en color ( $\Delta E$ ) a 5°C (figura 7.51) y 25°C (figura 7.52).

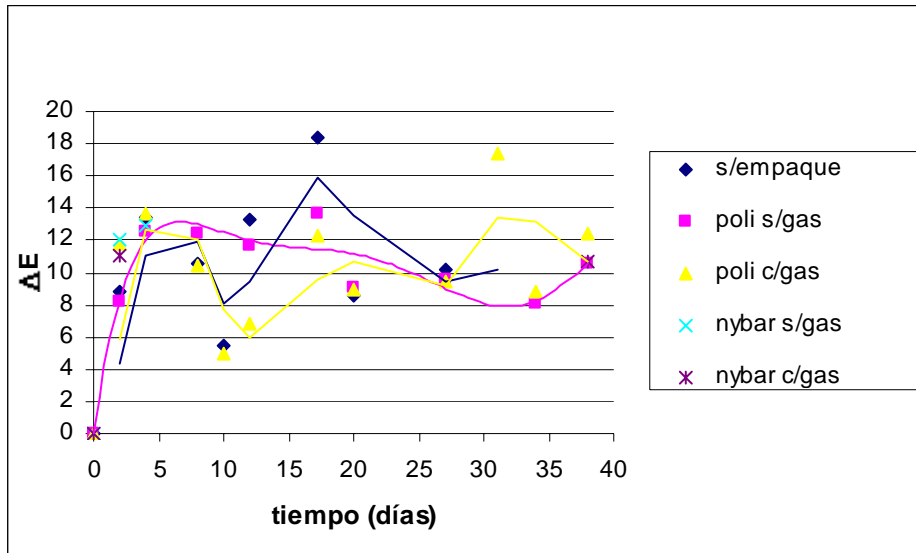


Figura 7.51. cambio neto en color ( $\Delta E$ ) para mora azul a 5°C.

A 5 °C (figura 7.51) la fruta sin empaque y la empacada en poliolefina con gas presentan gran variación en los valores de cambio en color, no así la fruta empacada en poliolefina sin gas, no se puede concluir mucho respecto a las muestras empacadas en nybar ya que sólo se tienen dos valores para cada una y la variación entre ambos es pequeña.



Figura 7.52. Cambio neto en color ( $\Delta E$ ) para mora azul a 25°C.

A 25°C (figura 7.52) no se observa una variación importante en el cambio neto en color ( $\Delta E$ ) de la fruta empacada en poliolefina respecto al tiempo ni en cuanto a la inyección o no inyección de gases, sin embargo el análisis estadístico indica que si hay una diferencia significativa conforme transcurre el tiempo.

#### **7.5.2.4 Cambio en pH**

En las figuras 7.53 (5°C) y 7.54 (25°C) se presentan los valores de pH durante el almacenamiento de mora azul. A 5°C la tendencia de la fruta empacada en poliolefina y sin empacar es a disminuir, de manera más marcada en la fruta sin empacar.

La disminución de pH en la fruta sin empacar puede deberse a la carga microbiana inicial de la mora azul (levaduras  $5.8 \log$  CFU/g) que al parecer provoca fermentación de la fruta y consecuentemente una disminución del pH. La disminución de pH en la fruta empacada puede deberse a la propiedad antimicrobiana del CO<sub>2</sub> cuando se encuentra presente a altas concentraciones que consiste en la disminución del pH del producto y la interferencia con el metabolismo celular (Brackett, 1997).



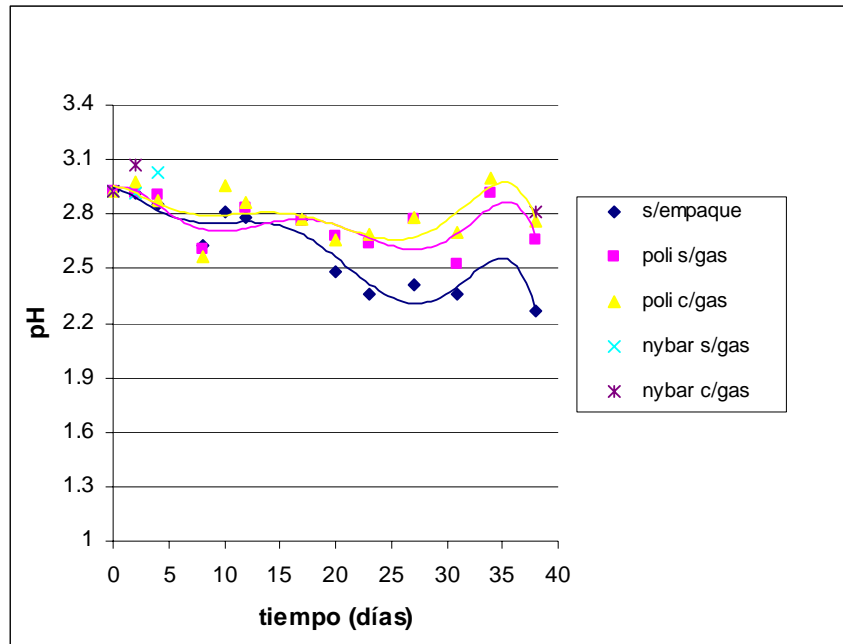


Figura 7.53. Cambio en pH durante el almacenamiento de mora azul a 5°C

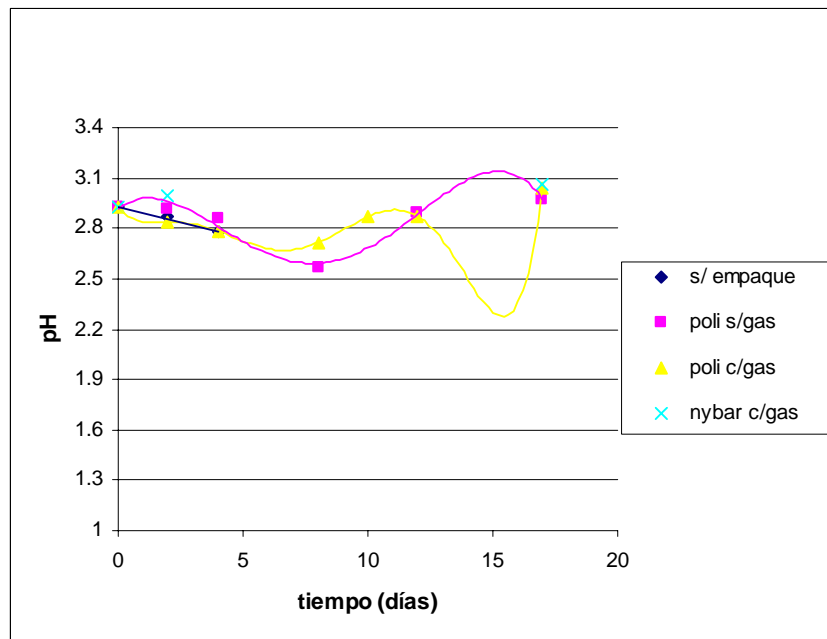


Figura 7.54. Cambio en pH durante el almacenamiento de mora azul a 25°C

De acuerdo a la figura 7.54 el pH en las muestras almacenadas en poliolefina a 25°C se mantiene alrededor de 2.9 – 3 durante los 17 días de estudio para la fruta empacada en poliolefina sin inyección de gases y de 2.8 – 3 para la fruta empacada en poliolefina con inyección de gases.

### 7.6.2.5 Cambio en acidez

Las gráficas correspondientes a acidez a 5 y 25°C se presentan en las figuras 7.55 y 7.56 respectivamente.

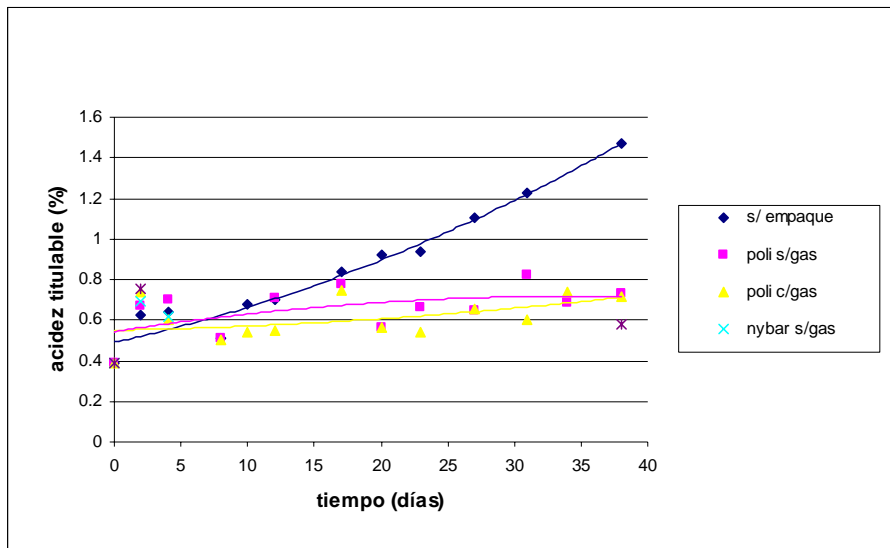


Figura 7.55. Cambio en acidez titulable (% ácido cítrico) durante el almacenamiento de mora azul a 5°C

El marcado incremento de acidez titulable en la fruta sin empacar a 5°C (figura 7.55) coincide con la disminución de pH antes mencionada, esto implica que el ácido que se está produciendo causa esta disminución y este incremento en acidez puede deberse al proceso de senescencia de la fruta. Mientras que para la fruta almacenada con poliolefina el valor de acidez para ambas variante (sin y con inyección de gases) se mantiene alrededor de 0.7.

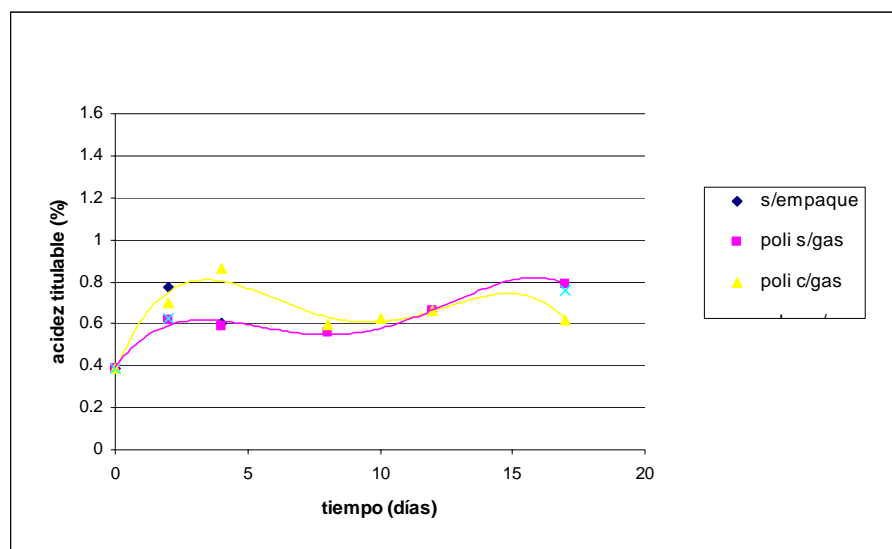


Figura 7.56. Cambio en acidez titulable (% ácido cítrico) durante el almacenamiento de mora azul a 25°C

La acidez titulable a 25°C (figura 7.56) en mora azul almacenada en la película poliolefina se mantiene alrededor de 0.6 – 0.8, al igual que a 5°C, esto hace pensar que la acidez de la fruta empacada se mantiene durante el almacenamiento.

#### 7.6.2.6 Cambio en °Bx

Los ° brix aumentan en la fruta sin empaque a 5°C (figura 7.57) de manera significativa ( $p < 0.05$ ) debido a que la fruta sigue su proceso normal de maduración, sin embargo en la fruta empacada en poliolefina el valor de °brix disminuye, también significativamente, pero en menor proporción, esto indica que el empaque mantiene el contenido de °brix al retardar el proceso de maduración de la fruta y ligeramente más en

la fruta en el empaque con inyección de gases en el que debido a la modificación de la atmósfera inicial se retarda aún mas el proceso de maduración.

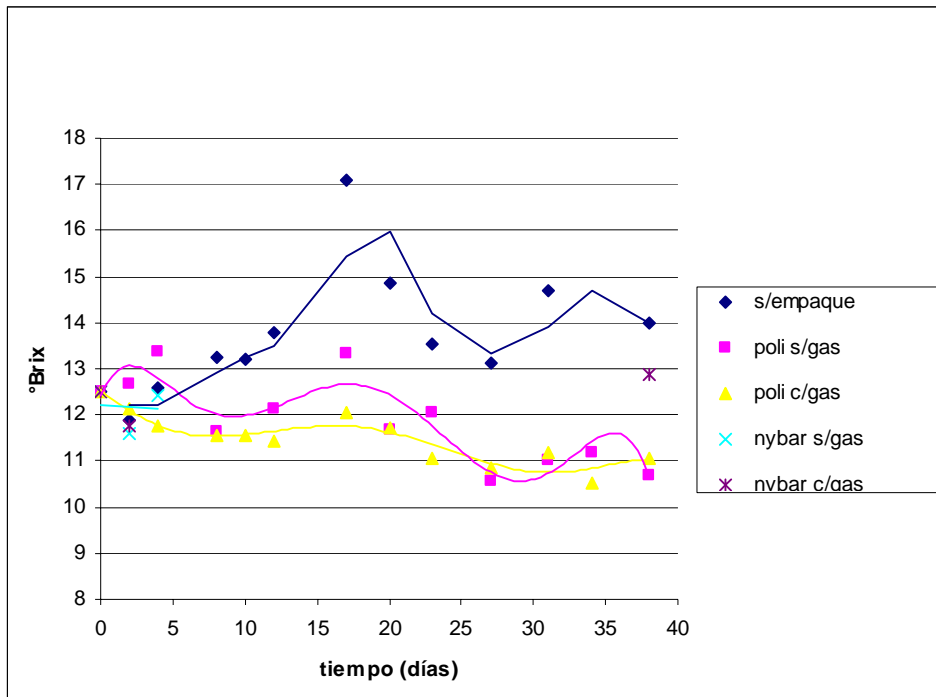


Figura 7.57. Cambio en °Brix durante el almacenamiento de mora azul a 5°C

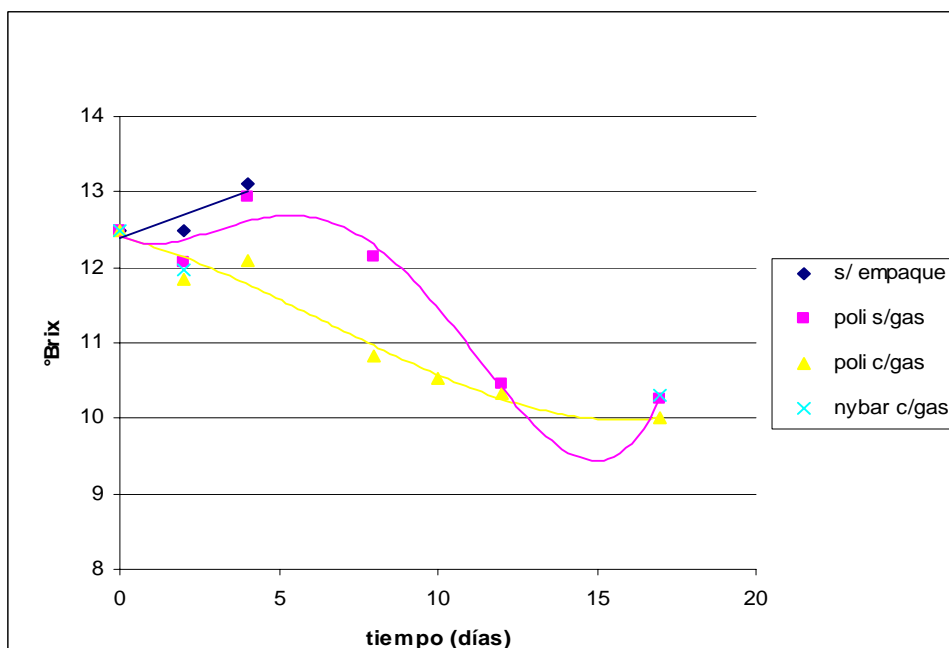


Figura 7.58. Cambio en °Brix durante el almacenamiento de mora azul a 25°C

Por efecto de la temperatura, a 25°C (figura 7.58) en la fruta empacada en poliolefina los °brix disminuyen más rápido que a 5°C, esto es a los 17 días el valor (10.3) es similar al que presenta la fruta a 5°C a los 38 días (10 °Bx), indicando que la maduración de la fruta se ve favorecida por el incremento en temperatura, respecto a la fruta sin empacar a la misma temperatura (25°C), aunque sólo se tienen dos valores, la tendencia es de incremento, igual que a 5°C.

#### **7.6.2.7 Cambio en humedad**

En cuanto a la humedad el análisis estadístico indica una diferencia significativa para la fruta sin empacar a 5°C pero no para el resto. En la figura 7.59 se presentan las muestras almacenadas a 5°C, para la fruta sin empaque la humedad disminuye de 86 a 84% mientras que para la fruta empacada en poliolefina los valores se mantienen entre 88 – 86 %, a excepción del valor inicial de poliolefina sin gas que debido a la gran diferencia que presenta con el resto hace pensar que hubo un error en su determinación. Al parecer el empacado en atmósfera modificada si fue efectivo para mantener constante la humedad de la fruta, aunque se favoreció el crecimiento microbiano.

La humedad de la fruta empacada en poliolefina y almacenada a 25°C (figura 7.60) se mantuvo constante (86 – 88%) durante los 17 días de almacenamiento, al igual que sucede a 5°C.

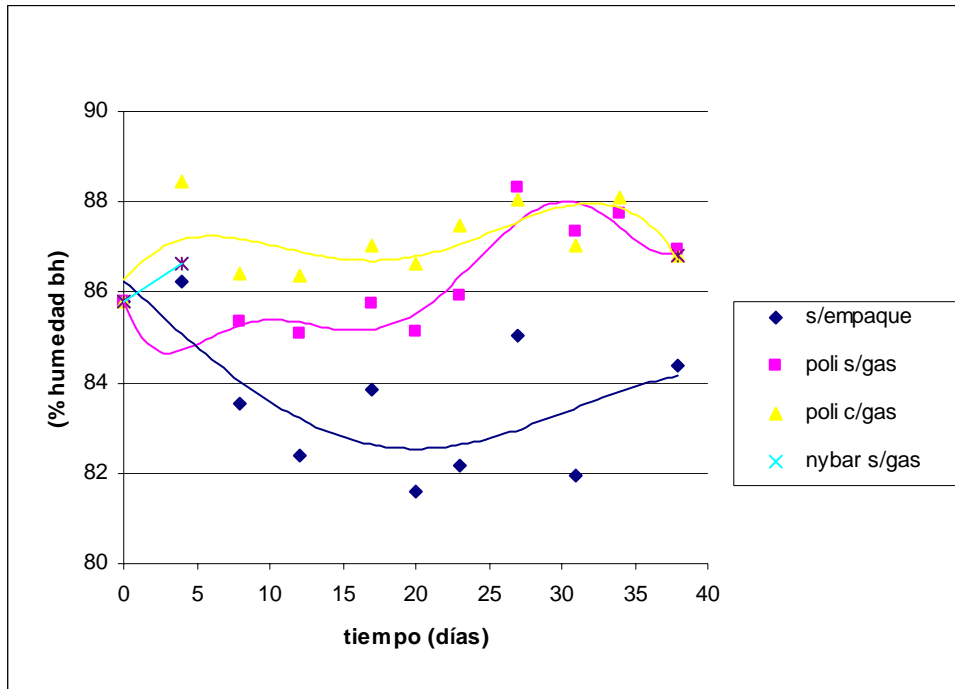


Figura 7.59. Cambio en humedad durante el almacenamiento de mora azul a 5°C

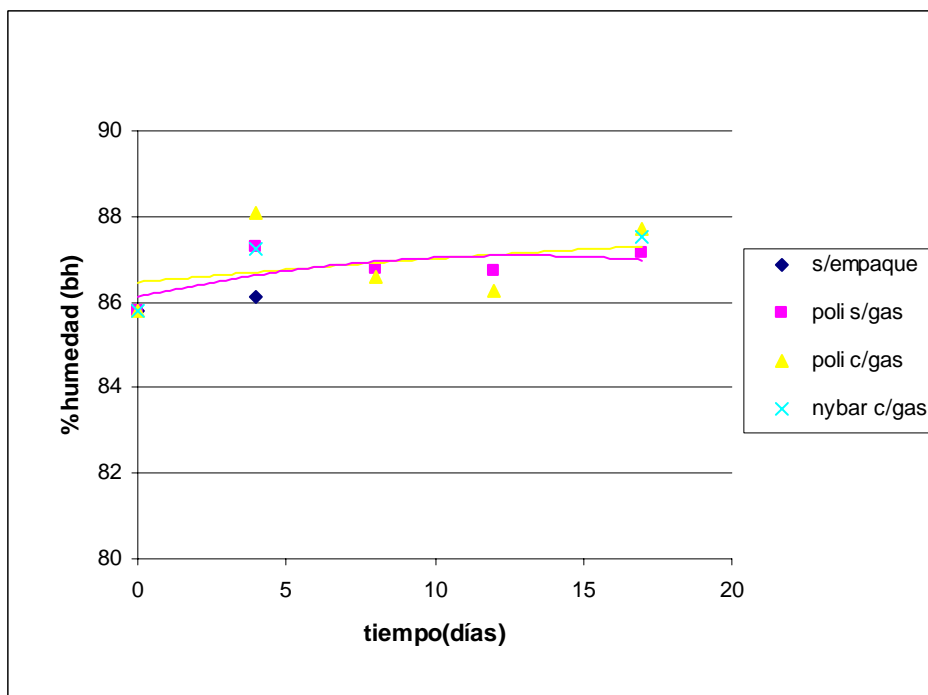


Figura 7.60. Cambio en humedad durante el almacenamiento de mora azul a 25°C

### 7.7.2.8 Cambio en aw

Welti y Vergara (2002) comentan que la humedad no es suficiente para determinar la percibibilidad de un alimento ya que aunque es una medida de la cantidad de agua en el alimento, no considera las interacciones con los otros componentes del mismo, por lo que se usa la aw que si considera estas interacciones.

Respecto a la aw en la fruta almacenada, se observa en la figura 7.61 que a 5°C la fruta sin empaque presenta una clara tendencia a disminuir debido a que al estar en contacto directo con el ambiente (aire) se deshidrata conforme transcurre el tiempo de almacenamiento hasta alcanzar una aw mínima de 0.991. Sin embargo para la fruta almacenada en empaque poliolefina con y sin inyección de gases la aw se mantiene constante (0.993).

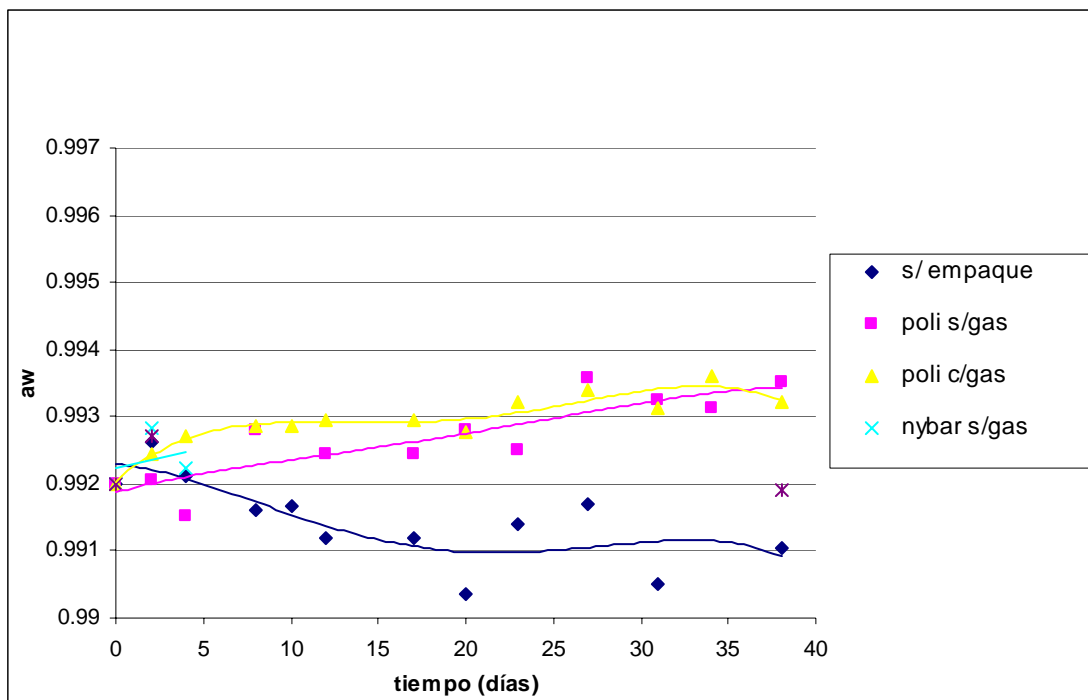


Figura 7.61. Cambio en aw durante el almacenamiento de mora azul a 5°C

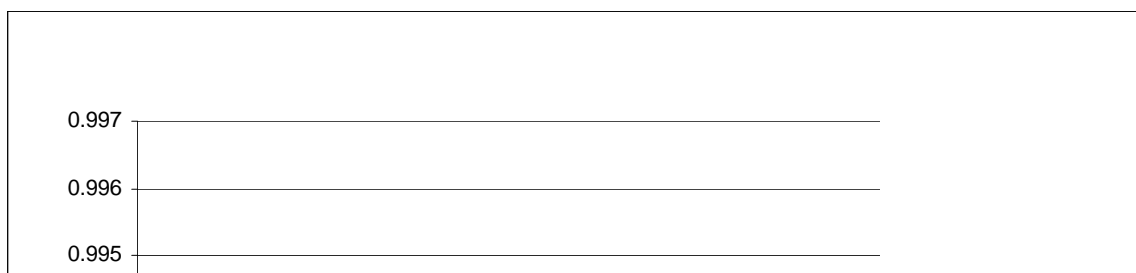


Figura 7.62. Cambio en aw durante el almacenamiento de mora azul a 25°C

A 25°C (figura 7.62) la aw para la fruta empacada en la película poliolefina con y sin inyección de gases se mantiene prácticamente constante (0.992 – 0.994).

A partir de la ecuación 68 se determinó la pérdida de agua durante el almacenamiento de mora azul empacada en la película poliolefina, considerando que la VTVA y A son constantes se obtiene un valor k constante que se iguala a  $dW/dt$ , a partir de esta igualdad se calcula la pérdida de agua multiplicando k por el tiempo y restando estos valores a la cantidad de agua en el alimento obtenida a partir de la humedad inicial. Las graficas correspondientes a 5 y 25°C son la 7.63 y 7.64 respectivamente.

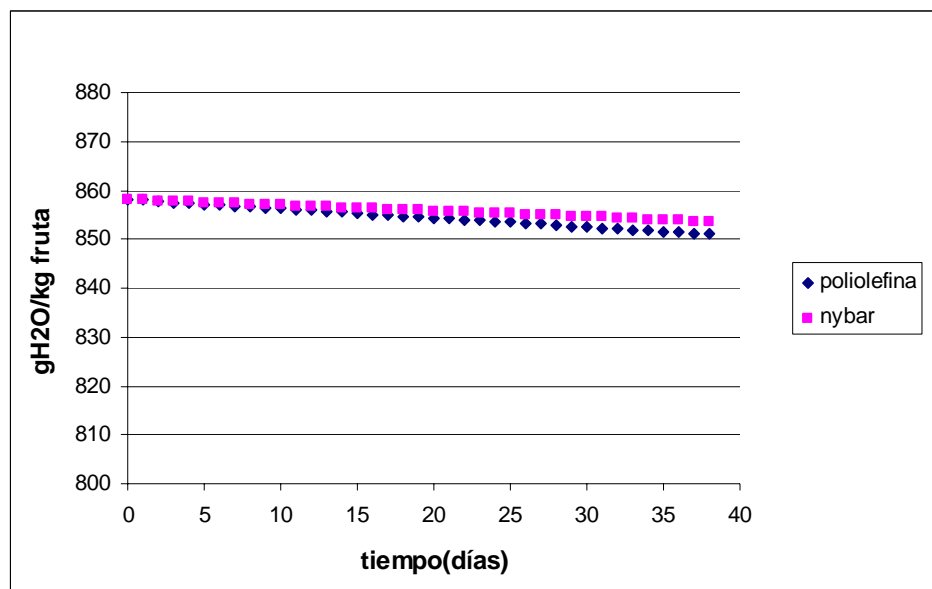




Figura 7.63. Pérdida de agua de mora azul durante el tiempo de almacenamiento a 5°C.

De acuerdo a la figura 7.63 se pierde aprox. 7 g de agua/kg fruta durante los 38 días de almacenamiento en la película poliolefina y 4 g de agua/kg fruta en la película nybar, esto coincide con los datos de humedad (figura 7.59 y 7.60) que prácticamente se mantienen constantes durante el almacenamiento.

En la figura 7.64 se presenta el cambio en g agua/kg fruta para la fruta empacada en poliolefina y nybar a 25°C, a esta temperatura la fruta pierde más agua que a 5°C (22 g agua/kg fruta para poliolefina y 15 g agua/kg fruta para nybar)

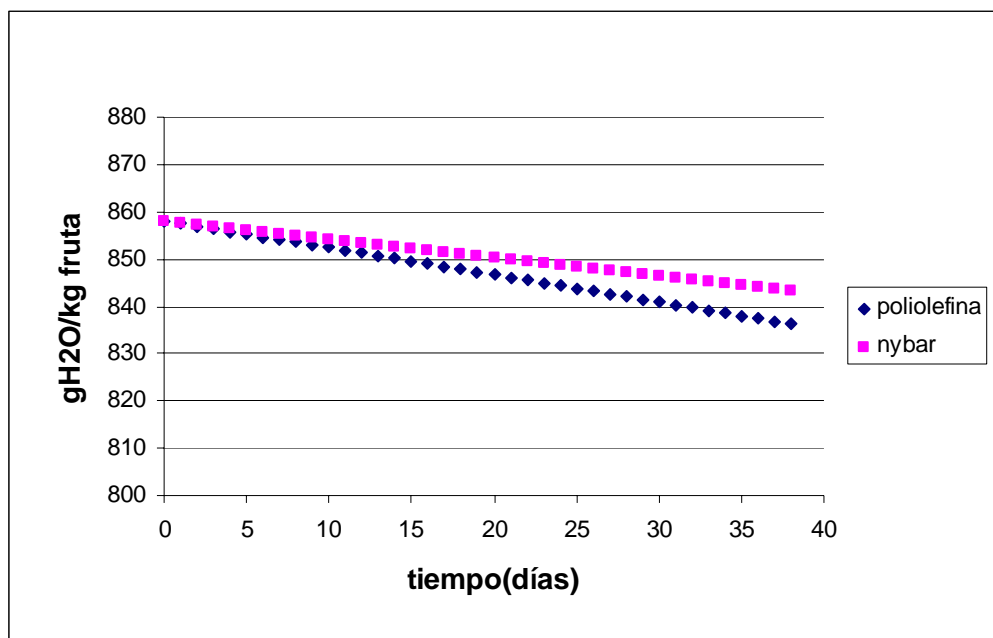


Figura 7.64. Pérdida de agua de mora azul durante el tiempo de almacenamiento a 25°C