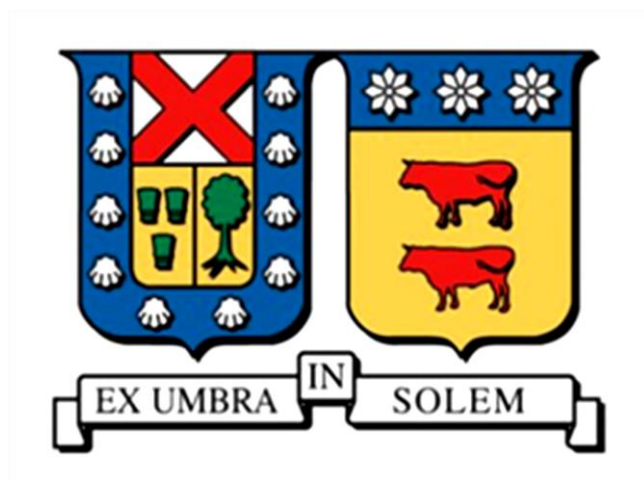


# UNIVERSIDAD TÉCNICA FEDERICO SANTA MARÍA

DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA QUÍMICA Y AMBIENTAL

VALPARAÍSO- CHILE



“ESTUDIO DE LA APLICACIÓN DE PULSOS ELÉCTRICOS PARA ACELERAR EL PROCESO DE DESHIDRATACIÓN MEDIANTE LA TÉCNICA DE VENTANA REFRACTIVA”

Tesis presentada por:

**SEBASTIÁN ALEJANDRO FRANCO PEÑA**

Como requisito para optar al grado de:

**MAGISTER EN CIENCIAS DE LA INGENIERÍA QUÍMICA**

Profesor Guía	Ricardo Simpson Rivera
Profesor Co-referente	Cristian Ramírez Bustos
Profesor Co-referente	Helena Núñez Andrade
Profesor Co-referente externo	Marcela Escobar

Valparaíso, junio de 2017



# Resumen

La deshidratación de alimentos mediante aire caliente, congelación a baja presión, o la inmersión en soluciones hipertónicas, es un proceso donde los productos pierden humedad. La deshidratación reduce la actividad de agua de los alimentos, minimizando el potencial crecimiento de microorganismos y extendiendo la vida útil del producto. Las principales desventajas de los procesos de deshidratación, son que la calidad nutricional es disminuida, debido a la degradación de compuestos sensibles a la temperatura, y que se requieren altos tiempos de tratamiento. La ventana refractiva (RW) es una nueva técnica de secado, que necesita un menor tiempo de tratamiento y mantiene la calidad inicial del producto.

El objetivo de la presente investigación es evaluar el uso de pretratamientos (pulsos eléctricos (PEF) y congelación- descongelación (C-D)) acoplados a un proceso de deshidratación en RW, para disminuir los tiempos de tratamiento y mantener la calidad del producto inicial; y a un proceso de deshidratación por aire caliente (EC), para evaluar la calidad final entre métodos de secado. Además, modelos fenomenológicos son utilizados para determinar los mecanismos de difusión, en tres tipos de tejidos: salmón (salmón atlántico), vacuno (posta rosada) y manzana (Granny Smith).

Láminas de 50x35x5 mm de salmón, vacuno y manzana fueron deshidratadas usando RW y EC, a 55 y 95 °C. Se utilizó como pretratamiento PEF (10 kVcm<sup>-1</sup>, 40 Hz, 990 pulsos) y C-D (congelación: -5 °C, descongelación: 5 °C por 24 h), para acelerar el proceso de transferencia de masa; donde se evaluó la pérdida de humedad (MR), la actividad de agua (Aw); el cambio de color ( $\Delta E$ ) y textura del producto final. Para evaluar los mecanismos de difusión, dos modelos fueron usados: 2° ley de Fick y modelo de difusión anómala.

El uso de PEF y C-D no mejoro la transferencia de masa, en tejido de salmón y vacuno, ya que los coeficientes de difusión ( $D_{\text{eff}}$ ) no presente diferencia significativa ( $p > 0.05$ ), tanto en RW y EC a 55 y 95 °C. Sin embargo, láminas de manzana deshidratadas en RW a 95 °C si se ven afectadas por C-D, ya que  $D_{\text{eff}}$  fue desde 12.77 a 17.04 (10<sup>-10</sup>) m<sup>2</sup>s<sup>-1</sup> ( $p < 0.05$ ); por tanto, el uso de C-D no es efectivo en tejidos que se afectan por la temperatura como el salmón y el vacuno, a diferencia de la manzana que presenta una estructura rígida. Para láminas de salmón y vacuno, se observa que presentan un mecanismo sub-difusivo, mientras que láminas de manzana presentan un mecanismo súper-difusivo, siendo el modelo de difusión anómala el que presenta mejor ajuste experimental. En láminas de manzana, el  $\Delta E$  no presentó diferencia significativa ( $p > 0.05$ ) entre muestras frescas y C-D, por tanto RW es una técnica que permite deshidratar matrices vegetales en forma rápida a 95 °C, obteniendo igual degradación del color que a 55 °C.

# Abstract

Food dehydration with hot air, low pressure freezing or immersion in an aqueous hypertonic solutions are processes wherein products loss moisture. Dehydration reduces food's water activity, minimizing the potential growth of microorganisms and extending the shelf life of food products. The major disadvantages of the dehydration processes are that the final nutritional quality is reduced, due to degradation of thermal sensible compounds, and the long periods of time required in the processes. Refractive window (RW) is a new drying technique, that requires a smaller time of treatment, and the quality of the product is maintained.

The aim of the present investigation is to study the effect of Pulsed Electric Fields (PEF) and freezing-thawing (C-D) as pre-treatments for RW dehydration, to decrease the treatment time and maintain the quality of the products. This will be compared with the traditional dehydration process convective drying (EC) with the same pre-treatments. Phenomenological models are used to determine the diffusion mechanisms in three types of tissue: salmon (Atlantic salmon), beef (lean meat) and apple (granny smith).

50x35x5 mm slices of salmon, beef and apple where dehydrated using RW and EC at 55 and 95 °C. A PEF of (10 kVcm<sup>-1</sup>, 40 Hz, 990 pulses) were applied as pre-treatment and freezing at -5 °C and thawing at 5 °C for 24 h, to enhance the mass transfer process, measuring the moisture loss (MR), water activity (Aw), color change(ΔE) and the texture of the dried samples. To evaluate de diffusion mechanism, two models were used: 2° Fick's law and anomalous diffusion model.

The use of PEF and C-D as pre-treatment did not improve the mass transfer in salmon and beef, because the diffusion coefficient ( $D_{\text{eff}}$ ) does not present significant differences ( $p>0.05$ ), for RW and EC at 55 and 95 °C. However, for apple slices dehydrated in RW at 95 °C, the mass transfer is affected by C-D ( $D_{\text{eff}}$  between 12.77- 17.04 (10<sup>-10</sup>) m<sup>2</sup>s<sup>-1</sup> ( $p<0.05$ ); it can be concluded that the C-D pre-treatment is not effective in tissues that are affected by temperature, like salmon and beef, and not like apple that has a rigid structure. For salmon and beef slices, a sub-diffusive mechanism is observed, as for apple slices a hyper-diffusive mechanism, being the anomalous diffusion model the one that has the better experimental adjustment. In apple slices the ΔE did not present significate differences between fresh samples and C-D, from which is concluded that RW is a drying technique that allows to dehydrate vegetables in a faster way at 95 °C, and obtaining the same color change that at 55 °C.

# Agradecimientos

En el final de esta aventura, mis más profunda gratitud a todos quienes han aportado en la consecución de este trabajo, a mis padres: Irma y Arturo; y hermanas: Natalia y Catalina, por su constante amor y cariño, con eso, todo es más fácil. A mi compañera de vida: Jimena. Finalmente, a todos los que de una u otra manera han aportado en esta etapa.

Mi especial gratitud a mis profesores: Cristian, Helena y Ricardo, por todo el apoyo, ayuda y consejos en la realización de este trabajo; por recibirme en su laboratorio y prestarme todos los medios disponibles para la investigación.

Finalmente, agradecer el soporte económico del FONDECYT N° 1151380, y al programa de incentivo a la iniciación científica, PIIC, de la UTFSM, piezas fundamentales en este periodo.

# Índice

Resumen	III
Abstract	IV
Agradecimientos	V
Índice	VI
Índice de Figuras	VIII
Índice de Tablas	XII
Nomenclatura	XIII
1. Introducción	14
2. Antecedentes	16
2.1 Métodos de deshidratación	16
2.2 Deshidratación por medio de ventana refractiva (RW)	18
2.3 Pretratamientos	22
2.3.1 Pulsos eléctricos (PEF)	22
2.3.1.1 Etapas de electroporación	22
2.3.1.2 Principales variables que afectan al tratamiento PEF	26
2.3.1.3 Otros parámetros PEF	26
2.3.1.4 Principales aplicaciones de la tecnología PEF	29
2.3.1.5 PEF aplicado en alimentos sólidos	30
2.3.2 Congelación- Descongelación	34
2.4 Segunda ley de Fick y modelo de difusión anómala	35
2.4.1 Segunda ley de Fick de difusión	36
2.4.2 Modelo de difusión anómala	36
3. Materiales y métodos	38
3.1 Preparación muestras	38
3.2 Pretratamientos	38

3.2.1	Pulsos eléctricos (PEF)	38
3.2.2	Congelación- Descongelación (C-D)	39
3.3	Secador Ventana Refractiva (RW)	39
3.4	Secador por aire caliente (EC)	40
3.5	Mediciones experimentales	40
3.5.1	Humedad	40
3.5.2	Actividad de agua	40
3.5.3	Color	40
3.5.4	Textura	41
3.6	Modelos matemáticos	41
3.7	Análisis estadístico	41
4.	Resultados y discusión	42
4.1	Métodos de deshidratación: Ventana refractiva y Estufa Convectiva	42
4.2	Ajuste de datos experimentales a modelo de difusión (segunda ley de Fick), y modelo de difusión anómala	55
4.3	Análisis de calidad final	67
4.3.1	Color	67
4.3.2	Textura	70
5.	Conclusiones	73
6.	Referencias	74
7.	Anexos	78
Anexo A	Métodos de deshidratación: Ventana Refractiva y Estufa Convectiva	78
Anexo B	Modelo de segunda ley de Fick	86
Anexo C	Modelo de difusión anómala	96
Anexo D	Color	108

# Índice de Figuras

Figura 2.1 Funcionamiento Ventana Refractiva. Adaptación de (Ortiz-Jerez et al., 2015).....	19
Figura 2.2 Casos extremos RW: (a) RW interface agua- plástico- aire, y (b) RW interface agua- plástico- alimento. Adaptación de (Ortiz-Jerez et al., 2015).....	21
Figura 2.3 Formación de canal hidrofílico por efecto Joule. Fuente: (Toepfl et al., 2014b).....	24
Figura 2.4 Descripción esquemática (a) mecanismo de permeabilización por fuerzas electromecánicas (deformación viscoelástica), y (b) daño reversible o permanente de la membrana celular, según intensidad del campo eléctrico externo aplicado. Adaptación de (Toepfl et al., 2006).....	25
Figura 2.5 Imagen simplificada de pulso de decaimiento exponencial y onda cuadrada (Toepfl et al., 2014b).....	27
Figura 2.6 Efecto del tamaño y orientación celular con la aplicación de un campo eléctrico externo (Toepfl et al., 2007) .....	28
Figura 3.1 Instalación experimental generador de pulsos eléctricos. ....	38
Figura 3.2 Montaje experimental secador de ventana refractiva.....	39
Figura 4.1 Curva de secado (a) y actividad de agua (b), para proceso de deshidratación tejido de salmón en ventana refractiva.....	43
Figura 4.2 Curva de secado (a) y actividad de agua (b), para proceso de deshidratación tejido de salmón en ventana refractiva a 55 [°C]. Pretratamiento PEF (E [kVcm <sup>-1</sup> ], f [Hz], P [-]), y Congelado- Descongelado (TC -5 [°C] TD 5 [°C]). ....	44
Figura 4.3 Curva de secado (a) y actividad de agua (b), muestra control y con pretratamiento de congelación- descongelación, para proceso de deshidratación de tejido de salmón en ventana refractiva a 55 y 95 °C. ....	45
Figura 4.4 Curva de secado (a) y actividad de agua (b), muestra control y con pretratamiento de congelación- descongelación, para proceso de deshidratación de tejido de vacuno en ventana refractiva a 55 y 95 °C. ....	47
Figura 4.5 Curva de secado (a) y actividad de agua (b), muestra control y con pretratamiento de congelación- descongelación para proceso de deshidratación tejido de manzana en ventana refractiva (RW) a 55 y 95 °C.....	48
Figura 4.6 Curva de secado (a) y actividad de agua (b), muestra control y con pretratamiento de congelación- descongelación para proceso de deshidratación de tejido de vacuno en estufa convectiva (EC) a 55 y 95 °C. ....	50
Figura 4.7 Curva de secado (a, c) y actividad de agua (b, d), muestra control y con pretratamiento de congelación- descongelación (TC -5 [°C] TD 5 [°C]) para proceso de deshidratación en láminas de manzanas en ventana refractiva (RW) y estufa convectiva (EC).52	
Figura 4.8 Comparación actividad de agua tejido de salmón (SAL), vacuno (CV), y manzana (MAN), en tejido fresco (C0), y tratado por congelación- descongelación (C-D), a 55 °C; deshidratados por ventana refractiva (RW).....	54

Figura 4.9 Modelo de difusión segunda ley de Fick (a) y distribución del error (b) en tejido sin tratar de salmón, deshidratado en RW a 55 y 95 °C. ....	56
Figura 4.10 Modelo de difusión segunda ley de Fick (a) y distribución del error (b) en tejido sin tratar de vacuno, deshidratado en RW a 55 y 95 °C. ....	57
Figura 4.11 Modelo de segunda ley de Fick y distribución del error, en tejido de manzana sin tratar (a) y (c), y tratado (b) y (d); deshidratado en RW.....	59
Figura 4.12 Modelo de difusión anómala con $\alpha$ constante (a), en tejido de salmón sin tratamiento, y distribución del error (b); deshidratados en RW a 55 y 95 °C. ....	62
Figura 4.13 Modelo de difusión anómala con $\alpha$ constante (a), en tejido de vacuno sin tratamiento, y distribución del error (b); deshidratados en RW a 55 y 95 °C. ....	63
Figura 4.14 Modelo de difusión anómala con $\alpha$ constante (a), en tejido de manzana sin tratamiento, y distribución del error (b); deshidratados en RW a 55 y 95 °C. ....	64
Figura 4.15 Cambio de color, $\Delta E$ , en tejido de salmón, vacuno y manzana, en muestras frescas y congeladas- descongela das, deshidratadas en RW y EC. ....	69
Figura 4.16 Análisis de textura $Nmm^{-1}$ , en tejido de salmón, vacuno y manzana, en muestras frescas y congeladas- descongela das, deshidratadas en RW y EC, a 55 y 95 °C.....	71
Figura 7.1 Curva de secado (a) y actividad de agua (b), muestra control y con pretratamiento de congelación- descongela ción para proceso de deshidrata ción de tejido de salmón en estufa convectiva (EC) a 55 y 95 °C. ....	78
Figura 7.2 Curva de secado (a) y actividad de agua (b), muestra control y con pretratamiento de congelación- descongela ción para proceso de deshidrata ción de tejido de salmón en ventana refractiva (RW) y estufa convectiva (EC) a 55 °C.....	79
Figura 7.3 Curva de secado (a) y actividad de agua (b), muestra control y con pretratamiento de congelación- descongela ción para proceso de deshidrata ción de tejido de salmón en ventana refractiva (RW) y estufa convectiva (EC) a 95 °C.....	80
Figura 7.4 Curva de secado (a) y actividad de agua (b), muestra control y con pretratamiento de congelación- descongela ción para proceso de deshidrata ción de tejido de vacuno en ventana refractiva (RW) y estufa convectiva (EC) a 55 °C.....	81
Figura 7.5 Curva de secado (a) y actividad de agua (b), muestra control y con pretratamiento de congelación- descongela ción para proceso de deshidrata ción de tejido de vacuno en ventana refractiva (RW) y estufa convectiva (EC) a 95 °C.....	82
Figura 7.6 Curva de secado (a) y actividad de agua (b), muestra control y con pretratamiento de congelación- descongela ción para proceso de deshidrata ción de tejido de manzana en ventana refractiva (RW) y estufa convectiva (EC) a 55 °C.....	83
Figura 7.7 Curva de secado (a) y actividad de agua (b), muestra control y con pretratamiento de congelación- descongela ción para proceso de deshidrata ción de tejido de manzana en estufa convectiva (EC) a 55 y 95 °C. ....	84
Figura 7.8 Comparación actividad de agua tejido de salmón (SAL), vacuno (CV), y manzana (MAN), en tejido fresco (C0), y tratado por congelación- descongela ción (C-D), a 55 °C; deshidratados por ventana refractiva (RW).....	85

Figura 7.9 Modelo de difusión (segunda ley de Fick (a)) y distribución del error (b), en tejido con tratamiento de salmón; deshidratado en RW. ....	86
Figura 7.10 Modelo de difusión (segunda ley de Fick (a)) y distribución del error (b), en tejido con tratamiento de vacuno; deshidratado en RW. ....	87
Figura 7.11 Modelo de difusión (segunda ley de Fick (a)) y distribución del error (b), en tejido con tratamiento de manzana; deshidratado en RW. ....	88
Figura 7.12 Modelo de difusión (segunda ley de Fick (a)) y distribución del error (b), en tejido de salmón sin tratamiento; deshidratado en EC. ....	89
Figura 7.13 Modelo de difusión (segunda ley de Fick (a)) y distribución del error (b), en tejido de salmón tratado por congelación- descongelación; deshidratado en EC. ....	90
Figura 7.14 Modelo de difusión (segunda ley de Fick (a)) y distribución del error (b), en tejido de vacuno sin tratamiento; deshidratado en EC. ....	91
Figura 7.15 Modelo de difusión (segunda ley de Fick (a)) y distribución del error (b), en tejido de vacuno tratado por congelación- descongelación; deshidratado en EC. ....	92
Figura 7.16 Modelo de difusión (segunda ley de Fick (a)) y distribución del error (b), en tejido de manzana sin pretratamiento; deshidratado en EC. ....	93
Figura 7.17 Modelo de difusión (segunda ley de Fick (a)) y distribución del error (b), en tejido de salmón tratado por congelación- descongelación; deshidratado en EC. ....	94
Figura 7.18 Modelo de difusión anómala (a) y distribución del error (b), en tejido de salmón tratado por congelación- descongelación; deshidratado en RW. ....	96
Figura 7.19 Modelo de difusión anómala (a) y distribución del error (b), en tejido de vacuno tratado por congelación- descongelación; deshidratado en RW. ....	97
Figura 7.20 Modelo de difusión anómala (a) y distribución del error (b), en tejido de manzana tratado por congelación- descongelación; deshidratado en RW. ....	98
Figura 7.21 Modelo de difusión anómala (a) y distribución del error (b), en tejido de salmón sin pretratamiento; deshidratado en EC. ....	99
Figura 7.22 Modelo de difusión anómala (a) y distribución del error (b), en tejido de vacuno sin pretratamiento; deshidratado en EC. ....	100
Figura 7.23 Modelo de difusión anómala (a) y distribución del error (b), en tejido de manzana sin pretratamiento; deshidratado en EC. ....	101
Figura 7.24 Modelo de difusión anómala (a) y distribución del error (b), en tejido de salmón tratado por congelación- descongelación; deshidratado en EC. ....	102
Figura 7.25 Modelo de difusión anómala (a) y distribución del error (b), en tejido de vacuno tratado por congelación- descongelación; deshidratado en EC. ....	103
Figura 7.26 Modelo de difusión anómala (a) y distribución del error (b), en tejido de manzana tratado por congelación- descongelación; deshidratado en EC. ....	104
Figura 7.27 Coordenadas colorimétricas tejido salmón (tejido fresco y tratado) en ventana refractiva (RW) y estufa convectiva (EC). ....	108

Figura 7.28 Coordenadas colorimétricas tejido vacuno (tejido fresco y tratado) en ventana refractiva (RW) y estufa convectiva (EC).....109

Figura 7.29 Coordenadas colorimétricas tejido de manzana (tejido fresco y tratado) en ventana refractiva (RW) y estufa convectiva (EC).....110

# Índice de Tablas

Tabla 2.1 Resumen principales investigaciones de deshidratación de pescado .....	18
Tabla 2.2 Principales investigaciones de deshidratación con uso de Ventana Refractiva (RW).20	
Tabla 2.3 Resumen principales investigaciones de tecnología PEF sobre alimentos sólidos (tejido animal y vegetal). E, campo eléctrico [ $\text{kVcm}^{-1}$ ]; P, número de pulsos; Q, energía específica [ $\text{kJkg}^{-1}$ ]; f, frecuencia [Hz], y otros, especificaciones adicionales informadas. ....	32
Tabla 3.1 Tiempo de tratamiento muestras para tejido fresco y tratado, para análisis de calidad .....	41
Tabla 4.1 Coeficiente de determinación ( $R^2$ ), suma del error cuadrático (SSE), y coeficiente de difusión efectivo ( $D_{\text{eff}}$ ); segunda ley de Fick en método de deshidratación por ventana refractiva (RW). ....	66
Tabla 4.2 Coeficiente de determinación ( $R^2$ ), suma del error cuadrático (SSE), coeficiente de difusión efectivo ( $D_{\text{eff}}$ ), y parámetro alpha ( $\alpha$ ); modelo de difusión anómala en método de deshidratación por ventana refractiva (RW). ....	66
Tabla 4.3 Cambio de color, $\Delta E$ , en tejido de salmón, vacuno y manzana, en muestras frescas y congeladas- descongelaadas, deshidratadas en RW y EC. ....	70
Tabla 4.4 Análisis de textura [ $\text{Nmm}^{-1}$ ], en tejido de salmón, vacuno y manzana, en muestras frescas y congeladas- descongelaadas, deshidratadas en RW y EC. ....	72
Tabla 7.1 Coeficiente de determinación ( $R^2$ ), suma del error cuadrático (SSE), y coeficiente de difusión efectivo ( $D_{\text{eff}}$ ); 2º ley de Fick en método de deshidratación por estufa convectiva (EC).....	95
Tabla 7.2 Coeficiente de determinación ( $R^2$ ), suma del error cuadrático (SSE), coeficiente de difusión efectivo ( $D_{\text{eff}}$ ), y parámetro alpha ( $\alpha$ ); modelo de difusión anómala ( $\alpha$ constante) en método de deshidratación por estufa convectiva (EC). ....	105
Tabla 7.3 Coeficiente de determinación ( $R^2$ ), suma del error cuadrático (SSE), coeficiente de difusión efectivo ( $D_{\text{eff}}$ ), y parámetro alpha ( $\alpha$ ); modelo de difusión anómala ( $\alpha$ variable) en método de deshidratación por ventana refractiva (RW). ....	106
Tabla 7.4 Coeficiente de determinación ( $R^2$ ), suma del error cuadrático (SSE), coeficiente de difusión efectivo ( $D_{\text{eff}}$ ), y parámetro alpha ( $\alpha$ ); modelo de difusión anómala ( $\alpha$ variable) en método de deshidratación por estufa convectiva (EC). ....	107
Tabla 7.5 Parámetros colorimétricos en tejido de salmón, vacuno y manzana deshidratado en RW y EC .....	111

# Nomenclatura

RW	Ventana Refractiva
EC	Estufa Convectiva
SAL	Tejido de Salmón
CV	Tejido de Vacuno
MAN	Tejido de Manzana
C0	Muestra control (sin pretratamiento)
C-D	Muestra con pretratamiento de Congelación/ Descongelación
PEF	Muestra con pretratamiento de pulsos eléctricos
E	Campo eléctrico [ $\text{kVcm}^{-1}$ ]
f	Frecuencia [Hz]
P	Cantidad de pulsos aplicados [--]
TS	Temperatura de secado [ $^{\circ}\text{C}$ ]
TC	Temperatura de congelación [ $^{\circ}\text{C}$ ]
TD	Temperatura de descongelación [ $^{\circ}\text{C}$ ]
Tamb	Temperatura ambiente

La nomenclatura utilizada en las figuras, a modo de ejemplo:

## **RW95SAL C0**

Lo anterior, indica la técnica utilizada (**RW, Ventana Refractiva**), la temperatura de secado (**95 [ $^{\circ}\text{C}$ ]**), el tejido deshidratado (**SAL, Salmón**), y, finalmente, el pretratamiento usado (**C0, muestra sin pretratamiento**).

# 1. Introducción

La deshidratación es un método usado en la industria de los alimentos para dar estabilidad microbiana, reducir el deterioro del producto debido a reacciones químicas, facilitar el almacenamiento, y disminuir los costos de transporte. Mantener la calidad del producto, como aroma, color, y nutrientes, siempre es un desafío en la deshidratación de productos termo-sensibles, como frutas, vegetales y carnes. Actualmente, los consumidores demandan por productos de alto valor nutricional, y con el menor procesamiento o adición de otros productos para su preservación; por tanto esta nueva brecha ha llevado a la industria a avanzar en la búsqueda de nuevos métodos de deshidratación.

Métodos tradicionales de deshidratación, como la liofilización, o el uso de aire caliente, no presentan, simultáneamente, alta calidad final y bajos costos; pues los tiempos de tratamientos, utilizando altas/bajas temperaturas, pueden ir de 3 a 5 h, y de 18 a 24 h, respectivamente (Ochoa-Martínez et al., 2012). Una nueva técnica de deshidratación llamada Ventana Refractiva™, desarrollada por MCD Technologies Inc., es una técnica que se caracteriza por necesitar bajos tiempos de tratamientos y el producto a secar es expuesto a temperaturas medias (60 a 75 °C), con un producto final de calidad superior a los métodos tradicionales. Esta técnica utiliza una superficie plástica (Mylar) y agua a 95 °C para llevar a cabo la deshidratación (Nindo et al., 2003). El uso de pretratamientos, como los pulsos eléctricos, a través del fenómeno de electroporación, y el uso de la congelación-descongelación, a través de la ruptura de la pared celular; son técnicas utilizadas para acelerar los procesos de transferencia de masa y exponer a un menor tiempo de tratamiento al producto. Sin embargo, pese a que estas técnicas reducen los tiempos de tratamiento, pueden afectar la calidad final del producto. En músculo de salmón y de vacuno, la preservación a bajas temperaturas o congelación, son las técnicas más utilizadas en la preservación; así como en tejido de manzana, donde la deshidratación por aire caliente o deshidratación osmótica, son las técnicas comúnmente utilizadas para la preservación; sin embargo estas técnicas afectan la calidad del producto.

Otro importante tópico en la deshidratación, es la difusión de agua desde el interior de los tejidos hacia el exterior. Los procesos usualmente son representados por la segunda ley de

Fick a través de la solución propuesta por Crank J. (1975); sin embargo la complejidad de la matriz vegetal y animal, la estructura celular heterogénea, los cambios de volumen, durante la deshidratación, no son considerados en la 2° ley de Fick. Simpson et al. (2013) propone un modelo de difusión anómala, que considera los movimientos más rápidos o lentos de los difusantes, debido a la microestructura celular, y que la 2° ley de Fick no considera.

La hipótesis de la presente investigación, sostiene que: “La aplicación de pretratamientos (pulsos eléctricos y congelación- descongelación) seguidos de un proceso de deshidratación en ventana refractiva, disminuye los tiempos de proceso en comparación a muestras no tratadas, y métodos tradicionales de secado; manteniendo la calidad inicial del producto”.

Por otro lado, los objetivos de la presente investigación son: 1) Determinar las condiciones operacionales del pretratamiento (pulsos eléctricos y congelación- descongelación) y del proceso de secado (temperatura y tiempo de tratamiento), para mejorar la calidad final del producto, y 2) Evaluar el efecto de la aplicación del pretratamiento en el proceso de difusión de agua durante el secado por ventana refractiva y estufa convectiva, mediante el uso de modelos fenomenológicos (segunda ley de Fick y modelo de difusión anómala) para determinar los mecanismos de difusión.

## 2. Antecedentes

La disminución del contenido de humedad de los diversos tipos de alimentos, permite minimizar sustancialmente la actividad microbiana y el deterioro por reacciones químicas, prolongando la vida útil de estos (Lebovka et al., 2007).

En el caso de pescados y productos marinos, la descomposición, debido a diferentes tipos de reacciones posterior a la muerte, ocurren rápidamente (Jain and Pathare, 2007). Pescado fresco contiene alrededor de un 80% de humedad, por tanto, es un producto altamente perecedero sino no es tratado para remover su humedad inicial o algún otro método de preservación como la congelación o almacenamiento a bajas temperaturas (Corzo and Bracho, 2007; Jain and Pathare, 2007; Kilic, 2009; Vega-Gálvez et al., 2011). De igual forma, diversos tipos de frutos pueden ser dañados en un corto periodo de tiempo, debido a reacciones enzimáticas, con resultado de daños físicos y pérdida de calidad (Ochoa-Martínez et al., 2012). El parámetro ampliamente aceptado para indicar inocuidad alimentaria es la actividad de agua, pues un bajo contenido de humedad no necesariamente indica seguridad alimentaria, ya que muchos biomateriales difieren en su microestructura (Fennema et al., 2017).

La deshidratación es el método más eficiente para preservar alimentos, ya que reduce la actividad de agua de los alimentos, otorga estabilidad microbiana, reduce el deterioro del producto debido a reacciones químicas, facilita el almacenamiento, y disminuye los costos de transporte (Ochoa-Martínez et al., 2012; Pavan et al., 2012). Alimentos como frutas o vegetales, con componentes sensitivos al calor, la elección del método de deshidratación es un desafío, pues bajos costos y alta calidad final, no son dos propiedades simultaneas en los métodos tradicionales de secado (Pavan et al., 2012). En el caso de tejidos sólidos como el pescado, durante el proceso de deshidratación, reacciones químicas provocan un incremento de la digestibilidad de las proteínas, debido a la desnaturalización, también, componentes sensibles al calor y grasas polinsaturadas son reducidas (Ortiz et al., 2013).

### 2.1 Métodos de deshidratación

Secado con aire caliente es uno de los métodos más comunes de deshidratación utilizados, sin embargo, posee la limitante de requerir altos consumos específicos de energía y

un largo tiempo de procesamiento (Ortiz et al., 2013). Investigaciones en deshidratación de músculo de pescado, han reportado largos tiempos de tratamiento (ver Tabla 2.1). Vega-Gálvez et al. (2011) ha informado en la deshidratación de calamar un tiempo de tratamiento de 600 y 120 min, para 50 y 90 °C, respectivamente; además, que al aumentar la temperatura de tratamiento de 50 a 90 °C la decoloración del producto es notoriamente más alta, debido al pardeamiento no enzimático y desnaturalización de las proteínas. Similar resultado ha reportado Ortiz et al. (2013), aumentando la temperatura de tratamiento (60 °C), aumenta la decoloración del producto final, sin embargo otras características no fueron afectadas por la temperatura, como lo es el caso del ácido palmítico.

Otras investigaciones han utilizado la deshidratación osmótica para reducir el contenido de humedad en músculos de pescado (ver Tabla 2.1), reportando altos tiempos de tratamiento y altas actividades de agua. Gallart-Jornet et al. (2007) ha reportado un tiempos de tratamiento de hasta 14 día con actividades de agua superior a 0.7.

Deshidratación osmótica también ha sido investigada en la preservación de matrices vegetales. Simpson et al. (2015) ha investigado el efecto del tratamiento combinado con la aplicación de un campo eléctrico moderado, concluyendo que el tiempo de tratamiento requerido se disminuye al aplicar un campo eléctrico de 17 [kVcm<sup>-1</sup>]. Velickova et al. (2014) ha trabajado en la deshidratación de manzana combinando la deshidratación osmótica y el uso de aire caliente, concluyendo que la combinación de ambos métodos generan un producto con mejor retención de color, respecto al tratamiento de aire caliente por sí sólo. También se ha estudiado el efecto de distintos pretratamientos sobre el tejido de manzana, informando que la congelación- descongelación es un método que provoca un gran daño estructural facilitando la deshidratación por uso de aire caliente a 65 [°C] en un tubo convectivo (Ramírez et al., 2011).

En músculos de vacuno, hay pocas investigaciones relacionadas a la deshidratación de este tejido. La mayoría de las investigaciones realizan un tratamiento térmico para evaluar la pérdida de agua por efectos de la cocción (“cooking loss”) o la capacidad de retención de agua (“WHC”) (Faridnia et al., 2015; Leygonie et al., 2012; Vieira et al., 2009). Trujillo et al. (2007) ha estudiado el proceso de deshidratación de tejido de vacuno y la aplicación de modelos, concluyendo que para 40 [°C] se obtiene un coeficiente de difusión de 4.84 [10<sup>-10</sup> m<sup>2</sup>s<sup>-1</sup>].

Tabla 2.1 Resumen principales investigaciones de deshidratación de pescado

Músculo	Tipo de secado	Características	$D_{\text{eff}} 10^{-10}$ , [ $\text{m}^2\text{s}^{-1}$ ]	Referencia
Secados por temperatura y aire				
Salmón atlántico	Horno convectivo	Secado a 40, 50, y 60 [°C] hasta peso constante. Velocidad de aire 2.0 [ $\text{ms}^{-1}$ ]	1.90 para 60 [°C]	(Ortiz et al., 2013)
Calamar gigante	Horno convectivo	Secado a 50, 60, 70, 80 y 90 [°C] hasta peso constante. Velocidad de aire 2.1 [ $\text{ms}^{-1}$ ]	32.0 para 90 [°C]	(Vega-Gálvez et al., 2011)
Sardina	Horno convectivo	Secado a 40, 50, 60, 70 y 80 [°C] hasta peso constante. Velocidad de aire 1.5 [ $\text{ms}^{-1}$ ]	0.21 para 80 °C	(Djendoubi et al., 2009)
Trucha arcoíris	Secado a baja temperatura y alta velocidad	Secado a 4, 10, 15 y 20 [°C]. Velocidad de aire 7.0 [ $\text{ms}^{-1}$ ]	No informado	(Kilic, 2009)
Sardina	Horno	Secado a 25, 35, y 50 [°C] en sales de actividad de agua conocidas	No informado	(Hadrich et al., 2008)
Carpa India	Secado a sol abierto	Secado a sol abierto con temperaturas de 32.5 a 42.5 [°C]. Humedad relativa de 15% al 32%	0.87	(Jain and Pathare, 2007)
Otros métodos de deshidratación				
Sardina	Deshidratación osmótica con pulsos de vacío	Secado a 32, 34, 36, y 38 [°C], en salmueras de NaCl de 0.15 a 0.27 [ $\text{gg}^{-1}$ ]. Vacío de 11 [kPa]	2.41 para 38 [°C] y 0.27 [ $\text{gg}^{-1}$ ]	(Corzo and Bracho, 2007)
Salmón atlántico	Deshidratación osmótica	Secado con salmuera al 4%, 10%, 15%, 18%, y 25% a 4 [°C] por 14 días	9.9 para salmueras de 4% al 18%	(Gallart-Jornet et al., 2007)

## 2.2 Deshidratación por medio de ventana refractiva (RW)

La ventana refractiva (RW) es una técnica deshidratación desarrollada en 1986 por *MCD technology inc*; (Ortiz-Jerez et al., 2015), y se caracteriza por generar productos, sensitivos a los tratamientos térmicos, de mejor calidad; aumentando la retención de color, sabor, aroma, vitaminas, antioxidantes, entre otros (Abonyi et al., 2002). Trabajos previos, han empleado RW para la deshidratación de láminas y puré de zapallo (Ortiz-Jerez et al., 2015), deshidratación de

frutillas y zanahorias, evaluando su calidad final (Abonyi et al., 2002); en la concentración de zumos de berries (Nindo et al., 2007), en la concentración de zumo de granada (Baeghballi et al., 2016) y zumo de acaí (Pavan et al., 2012); también ha sido comparada con otras técnicas de secados, como: liofilización y secador convectivo; en la deshidratación de purés de frutilla, zanahoria y espárragos verdes (Nindo and Tang, 2007). Todas las investigaciones reportan mejores resultados en parámetros de calidad final (color, textura), y tiempos menores de tratamientos, con respecto a métodos tradicionales de deshidratación.

Celli et al. (2016) ha reportado sobre un 90% de retención de componentes bioactivos como las antocianinas, en concentración de zumos de Berry, demostrando que la Ventana Refractiva es una técnica noble de secado. Otra matriz vegetal estudiada, es el mango. Caparino et al. (2012) y Caparino et al. (2013) han demostrado obtener concentrado de mango con características similares al tratamiento de liofilización, y con mejor calidad que otros métodos, como el secador spray y secador rotatorio. Otras investigaciones en deshidratación de matrices vegetales y/o concentración de zumos se muestran en la Tabla 2.2; cabe destacar que no se han reportado investigaciones en deshidratación de alimentos sólidos, tales como carnes o pescados.

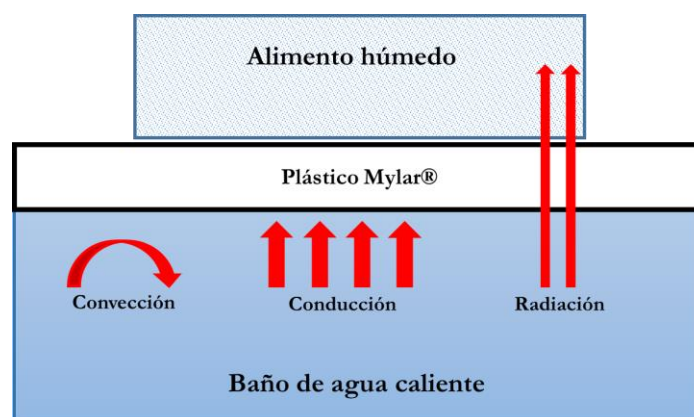


Figura 2.1 Funcionamiento Ventana Refractiva. Adaptación de (Ortiz-Jerez et al., 2015)

La Figura 2.1 muestra los principios de funcionamiento de la técnica de ventana refractiva. Ésta utiliza un fluido a alta temperatura, como fuente de energía; un film plástico (transparente a la radiación infrarroja), medio que separa la fuente de energía y el alimento; y, finalmente, el alimento a deshidratar, que se encuentra en el lado opuesto al fluido, evitando el

contacto directo con el medio deshidratante y la contaminación cruzada (Nindo and Tang, 2007).

**Tabla 2.2 Principales investigaciones de deshidratación con uso de Ventana Refractiva (RW).**

Producto	Condiciones operación RW	Principales resultados	Referencia
Hakap Berry	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Temperatura agua 95 [°C].</li> <li>• Tiempo residencia 9.5 [min].</li> <li>• Velocidad aire NI.</li> <li>• Espesor puré 0.2 [mm].</li> </ul>	Alta recuperación de antocianinas (>90%). Cerca de un 76% del polvo es soluble en agua.	(Celli et al., 2016)
Mango (variedad "Philippine Carabao")	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Temperatura agua 95-97 [°C].</li> <li>• Tiempo residencia 3.0 [min].</li> <li>• Velocidad aire 0.7 [ms<sup>-1</sup>].</li> <li>• Espesor puré NI.</li> <li>• Humedad 6.52 [kg<sub>agua</sub>kg<sub>sólido</sub><sup>-1</sup>].</li> </ul>	La humedad inicial fue reducida a 0.05 [kg <sub>agua</sub> kg <sub>sólido</sub> <sup>-1</sup> ], en 3 minutos, mientras que para la técnica de liofilización, tomó cerca de 31 [h] alcanzar la misma humedad final	(Caparino et al., 2013)
Mango (variedad "Tommy")	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Temperatura agua 90 [°C].</li> <li>• Operación discontinua.</li> <li>• Láminas de 1 [mm] de espesor.</li> <li>• Humedad 4.9- 6.1 [kg<sub>agua</sub>kg<sub>sólido</sub><sup>-1</sup>].</li> </ul>	Para 60 [min] de tratamiento, el contenido de agua ([kg <sub>agua</sub> kg <sub>sólido</sub> <sup>-1</sup> ) fue de 0.02 para RW, y 0.4 para secado en estufa a 90 [°C]. Actividad de agua inferior a 0.5, se alcanzan a tiempos de 60 [min]. Mientras que la diferencia total de color ( $\Delta E$ ), RW muestra un inferior cambio.	(Ochoa-Martínez et al., 2012)
Mango (variedad "Philippine Carabao")	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Temperatura agua 95- 97 [°C].</li> <li>• Tiempo residencia 3.0 [min].</li> <li>• Velocidad aire 0.7 [ms<sup>-1</sup>].</li> <li>• Espesor puré 0.5- 0.7 [mm].</li> <li>• Humedad 6.52 [kg<sub>agua</sub>kg<sub>sólido</sub><sup>-1</sup>].</li> </ul>	Para obtener contenido de agua inferior a 0.05 [kg <sub>agua</sub> kg <sub>sólido</sub> <sup>-1</sup> ], el tiempo de residencia fue de 3, 1, y 1,860 [min]; para RW, DD, y FD, respectivamente. El color es severamente dañado por altas temperaturas (DD), mientras que RW presenta una leve desviación del valor inicial.	(Caparino et al., 2012)
Paprika (Jalapeño)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Temperatura agua 94 [°C].</li> <li>• Tiempo residencia 3.0 [min].</li> <li>• Velocidad aire NI.</li> <li>• Espesor puré NI.</li> <li>• Humedad 87 [g 100<sup>-1</sup> g<sup>-1</sup>] (wb).</li> </ul>	RW y otras técnicas estudiadas, no retienen carotenoides y capsaicinoides, debido la sensibilidad, provocada por reacciones catalíticas, a las altas temperaturas.	(Topuz et al., 2011)

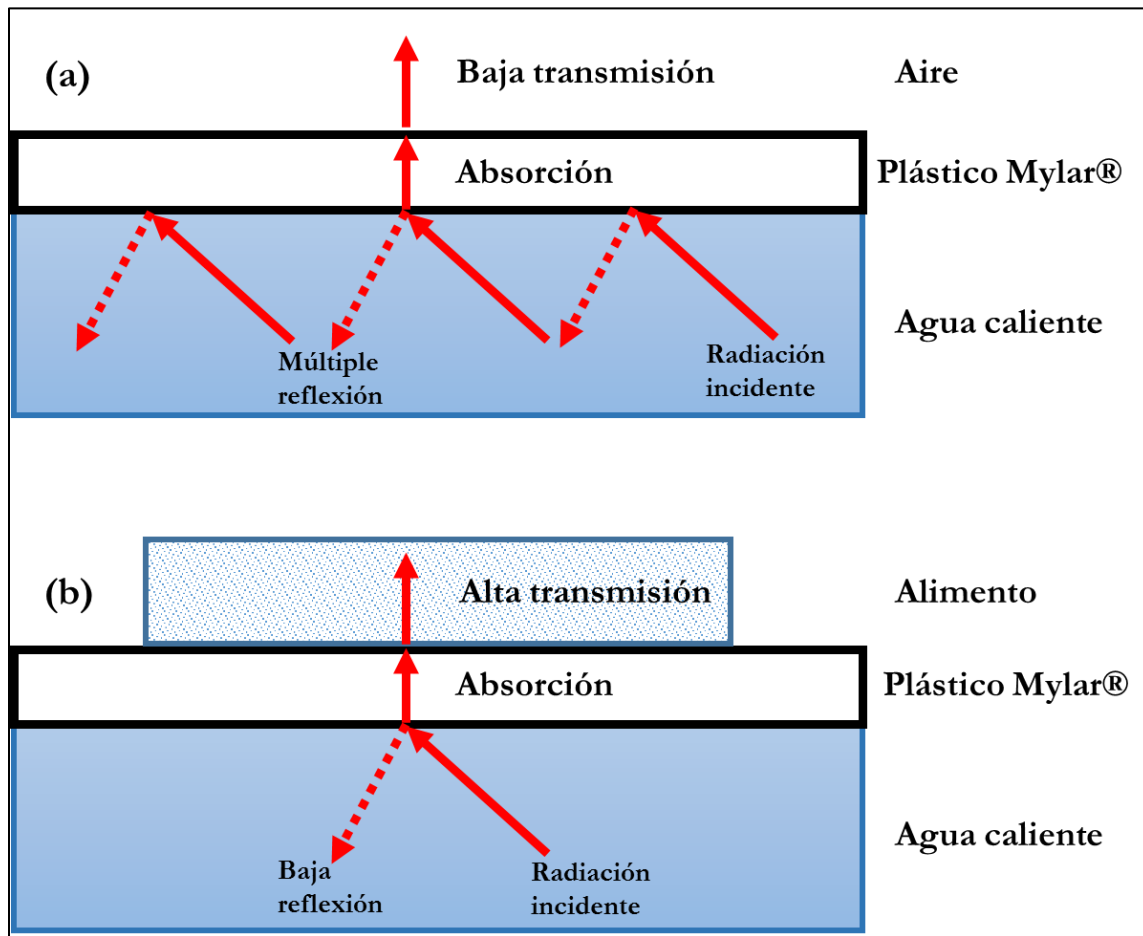


Figura 2.2 Casos extremos RW: (a) RW interface agua- plástico- aire, y (b) RW interface agua- plástico- alimento. Adaptación de (Ortiz-Jerez et al., 2015)

Cuando no hay producto alimenticio a secar (ver Figura 2.2 (a)), existe un alto desajuste en el índice de refracción entre el agua y el aire, lo que provoca que la energía incidente por radiación proveniente desde el fluido caliente (agua), en la interfase plástico- agua, sea, mayormente, reflejada hacia el agua, con una baja transmisión de energía hacia el aire por este mecanismo (Ortiz-Jerez et al., 2015). Por otro lado, cuando hay un producto a secar (ver Figura 2.2 (b)), el índice de refracción entre el agua y el alimento, en la interfase agua- plástico, es ampliamente reducido (Ortiz-Jerez et al., 2015), por lo que la energía es transferida desde el agua caliente hacia el producto húmedo por la interfase plástica, que es transparente a la radiación infrarroja, aumenta. Éste aumento de transferencia de energía por el mecanismo de radiación, cuando se encuentra en contacto la superficie plástica y un alimento húmedo, es lo que se denomina ventana refractiva (Nindo and Tang, 2007; Ortiz-Jerez et al., 2015). Sin

embargo, durante el proceso de deshidratación y a medida que el producto pierde humedad, los mecanismos de transferencia de calor por conducción se tornan predominantes por sobre los mecanismos por radiación (término de la ventana refractiva); lo cual puede provocar un sobrecalentamiento generando una degradación del color y el sabor del producto final (Ortiz-Jerez et al., 2015). De las investigaciones referenciadas, no se muestra evidencia efectiva sobre la formación de la ventana refractiva, cuando se presentan las condiciones requeridas. Solo se plantea la hipótesis de su existencia.

## **2.3 Pretratamientos**

### **2.3.1 Pulsos eléctricos (PEF)**

Los pulsos de campos eléctricos (PEF, por sus siglas en inglés), es una técnica considerada como no térmica (Faridnia et al., 2015; O'Dowd et al., 2013; Toepfl et al., 2014b) aplicada como tratamiento para la estabilización microbiana; aceleración de procesos de transferencia de masa, y como pretratamiento de otros procesos de deshidratación, tales como la deshidratación osmótica.

El uso de un campo eléctrico externo, por algunos microsegundos, induce cambios estructurales en la membrana celular, provocando el fenómeno conocido como electroporación (McDonnell et al., 2014; Sun, 2005; Toepfl et al., 2014b).

#### **2.3.1.1 Etapas de electroporación**

La electroporación, es generada en varias etapas. 4 etapas en el mecanismo de acción, son propuestas por (Toepfl et al., 2014b):

- I. Incremento del potencial transmembranal.
- II. Inicio de la formación de poros.
- III. Evolución en el número y tamaño de los poros.
- IV. Recuperación o daño permanente de la membrana.

➤ ***Incremento del potencial transmembrana***

La membrana celular es considerada como un capacitor llena de material dieléctrico de baja conductancia. De forma natural, existe una acumulación de cargas en ambos lados de la membrana, generando un potencial de 10 mV. Sin embargo, al aplicar un campo eléctrico externo, en máximo valor de éste potencial puede ser estimado por la ecuación ( 2.1) (asumiendo geometría esférica) (Toepfl et al., 2014b).

$$\Delta\varphi = f_s E_0 a \cos\theta - \Delta\varphi_0 \quad (2.1)$$

Otros factores que afectan en esta etapa son: 1) parámetros del proceso (forma, duración y frecuencia de los pulsos) (Toepfl et al., 2007; Toepfl et al., 2014b), 2) parámetros del medio (composición, concentración celular, presión osmótica), y 3) otras características celulares, como canales en la membrana (Toepfl et al., 2014a; Toepfl et al., 2014b).

➤ ***Inicio de la formación de poros***

La permeabilización de la membrana (formación de poros), es generada cuando se excede el valor crítico del potencial transmembranal (valor máximo estimado por la ecuación ( 2.1 )). Varios autores han reportado que el potencial crítico (mínimo para la electroporación) es de alrededor de un  $1 \text{ Vcm}^{-1}$  (Sun, 2005; Toepfl et al., 2007) para tejido vegetal y estabilización microbiana.

Se han propuesto dos teorías para explicar la formación de los poros: 1) Modelo electromecánico, y 2) Modelo estático (Toepfl et al., 2014b).

El modelo electromecánico (ver Figura 2.4), cuando se aplica un campo eléctrico, las cargas a ambos lados de la membrana celular son reorganizadas, incrementando el potencial transmembranal y provocando una deformación viscoelástica (incremento de la permeabilidad). Este modelo presenta la desventaja de no explicar por qué las células no son electroporadas al mismo tiempo.

Por otro lado, la membrana celular presenta poros hidrofóbicos de forma natural. Cuando el radio del poro excede un valor crítico ( $r_p$ ), el canal se torna hidrofílico. Lo anterior,

se debe al efecto Joule (aumento de la temperatura), durante la aplicación de un campo eléctrico externo. Éste mecanismo es explicado por el modelo estático en la Figura 2.3.

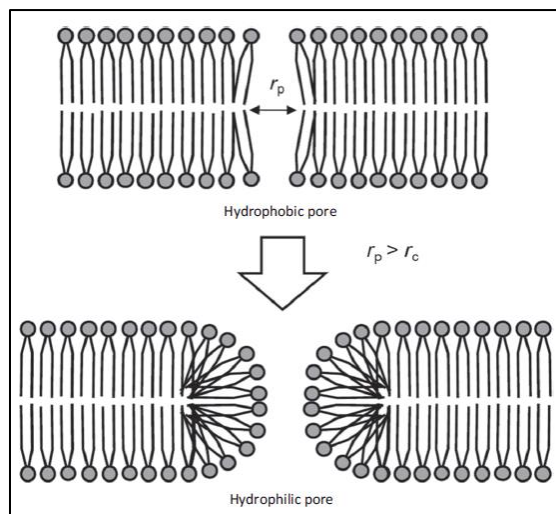


Figura 2.3 Formación de canal hidrofílico por efecto Joule. Fuente: (Toepfl et al., 2014b)

#### ➤ *Evolución en el número y tamaño de los poros*

Diversas investigaciones han relacionado que la cantidad de poros y el tamaño de éstos (daño a la membrana celular), está directamente relacionado con los parámetros operacionales del PEF (campo eléctrico, número de pulsos, tiempo de tratamiento, frecuencia), siendo la variable más importante el campo eléctrico externo aplicado (Ade-Omowaye et al., 2001; McDonnell et al., 2014; O'Dowd et al., 2013; Simpson et al., 2015; Toepfl et al., 2014a; Toepfl et al., 2014b).

Sin embargo, independiente de la intensidad del campo eléctrico aplicado, la electroporación tan sólo ocupará una fracción del área disponible de la membrana celular (Ade-Omowaye et al., 2001; Sun, 2005). La permeabilización o electroporación puede ser estimada de manera indirecta por el cambio de conductividad ( $\sigma$ ) del tejido en estudio, definiendo el índice de desintegración celular ( $Z_p$ ) (ver ecuación ( 2.2 )) (Lebovka et al., 2007; Toepfl et al., 2014a).

$$Z_p = \frac{\sigma - \sigma_{min}}{\sigma_{max} - \sigma_{min}} \quad (2.2)$$

El índice de desintegración celular, toma el valor 0 cuando no se ha aplicado el tratamiento PEF, es decir presenta la mínima conductividad eléctrica ( $\sigma_{min}$ ), y 1 cuando el musculo presenta un gran daño celular (conductividad máxima,  $\sigma_{max}$ ). Estudios previos han reportado que la máxima conductividad (daño celular) se presenta a los  $0,5 \text{ kVcm}^{-1}$ , para el tratamiento de láminas de papa (Lebovka et al., 2007); y entre los  $1,7$  a  $2 \text{ kVcm}^{-1}$ , para el tratamiento de cubos de carne de vacuno (Faridnia et al., 2015).

➤ **Recuperación o daño permanente de la membrana**

La electroporación puede ser un proceso reversible (la célula recupera su integridad inicial) o irreversible (daño celular permanente), y depende de varios factores: espesor de la membrana, tamaño y forma de la célula (Toepfl et al., 2014b), y de la intensidad del campo eléctrico aplicado (Toepfl et al., 2006; Toepfl et al., 2014b), siendo éste último el factor más importante. La Figura 2.4 muestra, en forma esquemática, la electroporación según el campo eléctrico aplicado siguiendo el modelo electromecánico.

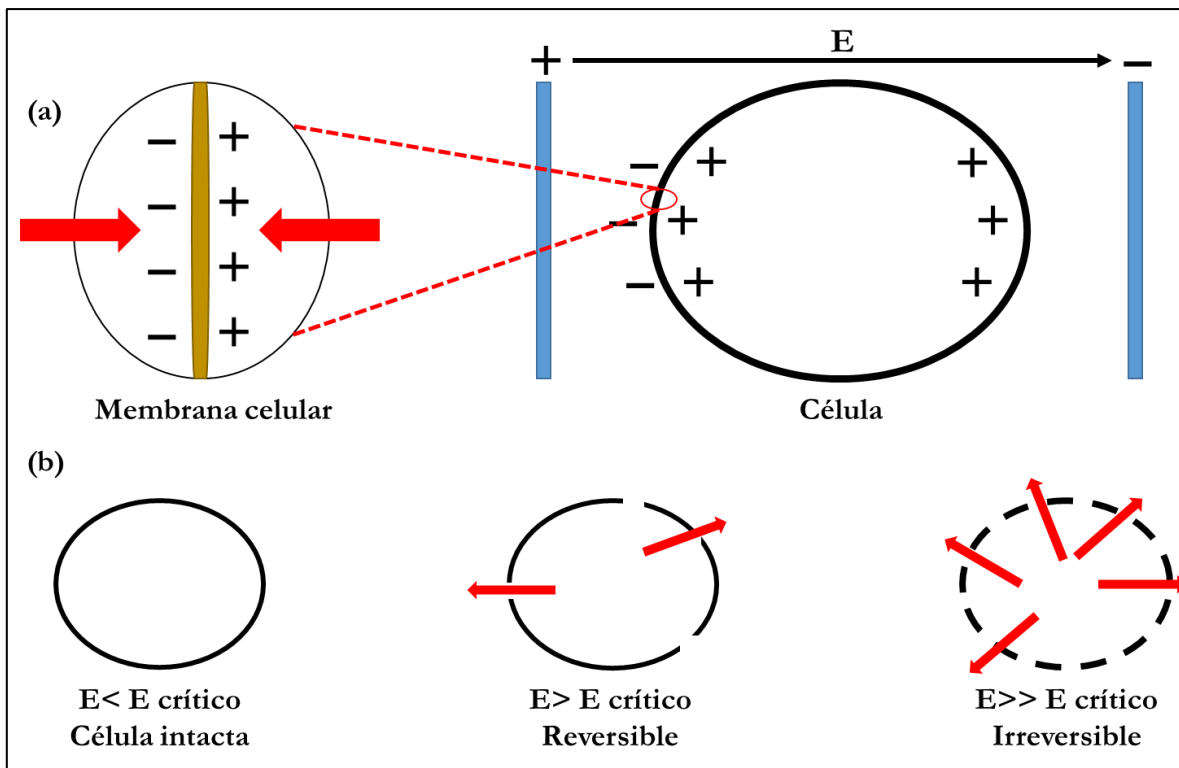


Figura 2.4 Descripción esquemática (a) mecanismo de permeabilización por fuerzas electromecánicas (deformación viscoelástica), y (b) daño reversible o permanente de la membrana celular, según intensidad del campo eléctrico externo aplicado. Adaptación de (Toepfl et al., 2006).

Investigaciones sobre el comportamiento de tejido animal (pollo y salmón), tratado con PEF, considera que la aplicación de un campo eléctrico bajo (inferior a  $0,20 \text{ kVcm}^{-1}$ ), la célula puede recuperar su integridad inicial; con la aplicación de un campo eléctrico moderado (entre  $0,50- 2 \text{ kVcm}^{-1}$ ) la célula pierde su permeabilidad parcialmente y el fenómeno de electroporación puede persistir; y, finalmente, para campos eléctricos de alta intensidad (entre  $10- 50 \text{ kVcm}^{-1}$ ), se causa a la célula un daño permanente (Sun, 2005).

### 2.3.1.2 Principales variables que afectan al tratamiento PEF

La electroporación, fenómeno que mejora la transferencia de masa, es dependiente de factores operacionales del PEF (número y amplitud de pulso, intensidad de campo eléctrico), parámetros de la celda utilizada para la aplicación de la tecnología PEF, y parámetros propios del tejido a tratar (fuerza iónica, origen del tejido) (McDonnell et al., 2014).

#### ➤ *Intensidad del campo eléctrico*

Varios autores han reportado que la intensidad del campo eléctrico aplicado es la variable más importante, pues de ésta depende el daño provocado a la membrana celular y/o el aumento en la formación de poros (Ade-Omowaye et al., 2001; McDonnell et al., 2014; O'Dowd et al., 2013; Toepfl et al., 2014b). Por otro lado, otros factores biológicos, como el tamaño celular, conductividad del medio, entre otros; condicionarán el valor del campo eléctrico mínimo o crítico a aplicar (ver sección □ más adelante).

Para electrodos ubicados en forma paralela en la cámara de tratamiento, el campo eléctrico se calcula como el potencial aplicado por unidad de distancia (entre electrodos), tal como muestra la ecuación (2.3). Generalmente, se informa en  $\text{kVcm}^{-1}$  o en  $\text{kVm}^{-1}$ .

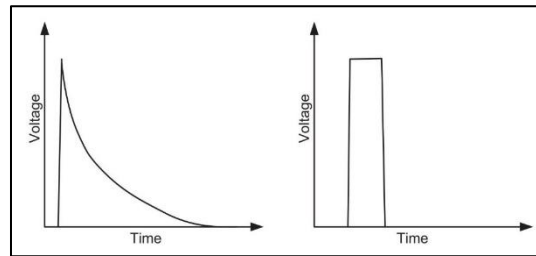
$$E = \frac{V}{d} \quad (2.3)$$

### 2.3.1.3 Otros parámetros PEF

Otras variables asociadas a la tecnología PEF son los pulsos de campo eléctrico (decaimiento exponencial o cuadrado), el tiempo de tratamiento o frecuencia con el que se aplican los pulsos y la temperatura de tratamiento.

➤ **Geometría del pulso, tiempo de tratamiento y energía específica**

La cantidad de pulsos corresponde a las veces que se aplica el campo eléctrico de manera discontinua al material a tratar. Existen dos tipos de pulsos: de onda cuadrada y de decaimiento exponencial. Para pulsos de onda cuadrada, su ancho es definido (ver Figura 2.5) como el tiempo que es mantenido el valor máximo de campo eléctrico, mientras que, para pulsos de decaimiento exponencial, el ancho corresponde al tiempo que se produce un decaimiento del 37% del valor inicial (Toepfl et al., 2014b). En cuanto al tiempo de tratamiento, éste está relacionado con la frecuencia, el tipo y número de pulsos aplicados, siendo el tiempo total de tratamiento la multiplicación del ancho del pulso por la cantidad.



**Figura 2.5** Imagen simplificada de pulso de decaimiento exponencial y onda cuadrada (Toepfl et al., 2014b)

La energía aplicada con la tecnología PEF puede ser estimada en base al campo eléctrico aplicado y la conductividad del material a tratar. Dependiendo del tipo de pulso aplicado, la energía específica para pulso cuadrado o decaimiento exponencial puede ser calculado (ecuación ( 2.4 en  $\text{kJkg}^{-1}$  (Martín-Belloso et al., 2014b; Toepfl et al., 2014b).

$$Q = \frac{f}{m} \int_0^t \sigma(T) E(t)^2 dt \quad (2.4)$$

La conductividad del material,  $\sigma(T)$ , puede ser estimada como el inverso de la resistencia ( $R$  [ $\Omega$ ]) efectiva de éste, mientras que, el campo eléctrico puede ser estimado por el voltaje aplicado entre los electrodos por unidad de distancia. Por tanto, la energía específica se puede estimar por medio de la ecuación ( 2.5) (Faridnia et al., 2015; McDonnell et al., 2014):

$$Q = \frac{V_0^2 t}{Rm} \quad (2.5)$$

### ➤ *Temperatura*

Estudios de seguridad alimentario, han expuesto que al aumentar la temperatura del medio a tratar con la tecnología PEF, reduce la intensidad del campo eléctrico a aplicar para alcanzar un mismo grado de letalidad o inactivación (Martín-Belloso et al., 2014a; Toepfl et al., 2014b). Faridnia et al. (2015) ha reportado similares resultados, al observar una menor electroporación a bajas temperaturas al aplicar PEF sobre músculo de vacuno.

Por otro lado, la tecnología PEF es considerada como una herramienta no térmica (debido a la aplicación de un campo eléctrico en forma de pulsos) (Faridnia et al., 2015), sin embargo, su aplicación puede elevar la temperatura del medio tratado entre 5 a 30 [°C] por efecto de calentamiento óhmico (conversión de la energía eléctrica en térmica) (McDonnell et al., 2014; O'Dowd et al., 2013).

### ➤ *Factores del medio a tratar por PEF*

Otros factores que inciden en los parámetros de la tecnología PEF, son de tipo biológicos, como lo es el tamaño celular, conductividad del medio, pH, entre otros.

#### **Tamaño celular**

Toepfl et al. (2007), ha estudiado, en inactivación microbiana, el efecto del tamaño celular y la orientación de las células con respecto la aplicación del campo eléctrico. La Figura 2.6, compara a tres tipos de microorganismos con diferente forma y tamaño, caracterizando las células, con forma de elipse, con tres ejes ( $A_1$ ,  $A_2$ ,  $A_3$ ).

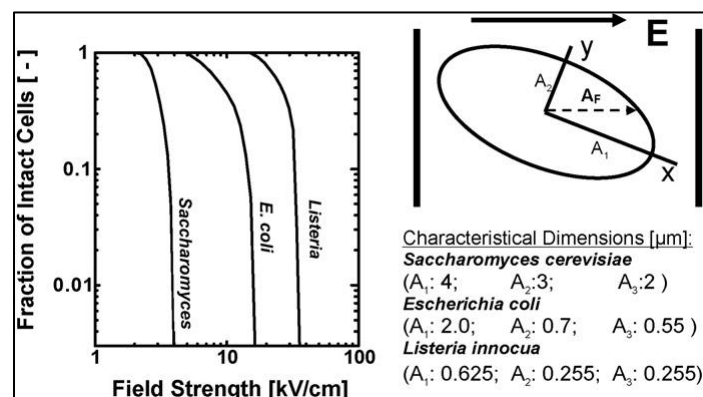


Figura 2.6 Efecto del tamaño y orientación celular con la aplicación de un campo eléctrico externo (Toepfl et al., 2007)

Desde la Figura 2.6 se observa que células de mayor tamaño son más susceptibles a la aplicación un campo eléctrico. Las células de levaduras (*saccharomyces cerevisiae*) al ser expuestas a un campo eléctrico de  $2 \text{ kVcm}^{-1}$  son afectadas severamente, en contraste, células de menor tamaño, como: *Listeria innocua* y *Escherichia Coli*, requieren un campo eléctrico de 15 y  $35 \text{ kVcm}^{-1}$ , para sufrir daño celular, respectivamente. Por tanto, a medida que disminuye el tamaño celular, el campo eléctrico crítico requerido aumenta (Toepfl et al., 2014b).

Sun (2005) compara el efecto de la tecnología PEF sobre músculos de salmón y pollo, observando una mayor separación celular y una reducción de tamaño de un 34% en el músculo de salmón con respecto el de pollo, debido a que éste presenta un mayor tamaño celular y una menor cantidad de músculo conectivo.

### **Conductividad**

La conductividad de los alimentos depende de propiedades intrínsecas de éstos, y puede afectar la distribución del voltaje al aplicar un campo eléctrico externo (Toepfl et al., 2014b). La aplicación de la tecnología PEF provoca un cambio en la conductividad de los alimentos, debido al efecto de electroporación y transporte de sustancias iónicas hacia el medio extracelular, por tanto, la medición de ésta variable da una noción del daño celular provocado por el tratamiento PEF (Faridnia et al., 2015; Toepfl et al., 2014a).

Faridnia et al. (2015) ha reportado que la aplicación de un campo eléctrico de  $1.7 \text{ kVcm}^{-1}$  sobre músculo de vacuno, provoca un cambio de conductividad de 10 a  $13 \text{ mScm}^{-1}$ . En la sección 2.3.1.1 (Evolución en el número y tamaño de los poros) se describe el índice de desintegración celular, medido en base al cambio de conductividad que presenta los alimentos sólidos al aplicar la tecnología PEF.

#### **2.3.1.4 Principales aplicaciones de la tecnología PEF**

La tecnología PEF ha sido ampliamente estudiada para la inactivación microbiana en alimentos líquidos. La recopilación de Martín-Belloso et al. (2014a) resume las principales bacterias reducidas, tales como: *Escherichia coli*, *Listeria*, *Salmonella* y sus distintas variantes, *Staphylococcus*, entre otras; en distintos tipos de alimentos líquidos, que van desde el jugo de manzana, naranja, hasta la cerveza y leche. Destaca, adicionalmente, los principales parámetros

operacionales, tales como el campo eléctrico aplicado, que va desde los 20  $\text{kVcm}^{-1}$  hasta los 60  $\text{kVcm}^{-1}$ . De igual forma, la inactivación enzimática, para seguridad alimentaria, se encuentra ampliamente detallada para enzimas, tales como: Pectin Metil Esterasa, Poligalacturonasa, Polifenol Oxidasa, entre otras; en alimentos líquidos que van desde los zumos de sandía, melón, frutilla hasta la leche (Martín-Belloso et al., 2014b).

Sin embargo, hay poca información en la literatura acerca de la tecnología PEF, en el procesamiento de alimentos sólidos, y, particularmente, en alimentos de origen animal (O'Dowd et al., 2013). Más aun, no existe un consenso entre las diferentes investigaciones relacionadas con la tecnología PEF, en cuanto a sus parámetros operacionales utilizados, tales como: campo eléctrico óptimo, número y frecuencia de los pulsos óptimos, tiempo de tratamiento, entre otros (Faridnia et al., 2015). Estas diferencias, se pueden observar en los trabajos recopilatorios de Martín-Belloso et al. (2014b; 2014a), mencionado anteriormente.

#### **2.3.1.5 PEF aplicado en alimentos sólidos**

Diversas investigaciones han estudiado el efecto de la tecnología PEF sobre alimentos sólidos de origen animal y vegetal, con la finalidad de verificar cambios estructurales, deshidratación o salado, entre otros. Por ejemplo, el trabajo de McDonnell et al. (2014) ha estudiado el proceso de salado en la carne de cerdo con pretratamiento PEF (2,3  $\text{kVcm}^{-1}$ , 200 pulsos y 100 Hz), concluyendo que el tratamiento acelera la pérdida de agua (o ganancia de sólidos), a menor número de pulsos y mayor frecuencia. Por otro lado, Faridnia et al. (2015) y O'Dowd et al. (2013) han estudiado la tecnología PEF sobre músculo de vacuno, informando significativos cambios microestructurales, especialmente daño a las miofibrillas del músculo, con la aplicación de un campo eléctrico de 1,4 y 1,9  $\text{kVcm}^{-1}$ , respectivamente.

En cuanto al tratamiento de músculos de pescado con tecnología PEF, la investigación de Toepfl et al. (2006) ha estudiado la pérdida de agua sobre músculo de bacalao y eglefino, previo al marinado, concluyendo que la aplicación de éste pretratamiento genera una menor pérdida de agua, que las muestras no tratadas, antes del marinado manual. Sun (2005), comparó el efecto de aplicar la tecnología PEF a músculos de salmón y pollo, encontrando una reducción del tamaño celular del 34% y 61%, respectivamente.

La Tabla 2.3 muestra los principales resultados y variables operacionales empleadas en las investigaciones nombradas anteriormente. Como se puede apreciar en ella, la intensidad del campo eléctrico aplicado va desde los 1,4 a 2,3  $\text{kVcm}^{-1}$ , sin embargo, cada investigación difiere notoriamente en la cantidad de pulsos y ancho de pulso aplicado, frecuencia y tiempo de tratamiento, lo que se traduce en distintas energías específicas aportadas al tratamiento (entre los 90 y 250  $\text{kJkg}^{-1}$ ). Por tanto, no se observa un consenso o estandarización de los valores óptimos a utilizar, según el propósito de la investigación.

De igual forma, la Tabla 2.3 muestra las principales variables y resultados para el tratamiento de tejido vegetal con tecnología PEF. Al igual que para el tratamiento de tejido animal, las principales variables del PEF, se encuentran en distintos rangos y valores.

Tabla 2.3 Resumen principales investigaciones de tecnología PEF sobre alimentos sólidos (tejido animal y vegetal). E, campo eléctrico [kVcm<sup>-1</sup>]; P, número de pulsos; Q, energía específica [kJkg<sup>-1</sup>]; f, frecuencia [Hz], y otros, especificaciones adicionales informadas.

Aplicación	Producto	E	P	f	Q	Otro	Observación	Referencia
Tejido Animal								
Efecto PEF en tejido	músculo de vacuno	1,4	1032	50	250	Ancho pulso 20 [us].	Cambios microestructurales significativos, en comparación a carne descongelada y no tratada	(Faridnia et al., 2015)
Efecto PEF en tejido	músculo de vacuno	1,9	250	65	83,6	Incremento temperatura 22 [°C]	Pérdida de peso post tratamiento. Daño a las miofibrillas del músculo	(O'Dowd et al., 2013)
Efecto PEF en tejido	músculo de pollo y salmón	1,4	60	N.I.*	N.I.	Ancho pulso 2 [us].	Tamaño celular fue reducido un 34% y 61%, en salmón y pollo, respectivamente	(Toepfl et al., 2014a)
PEF (pretratamiento) en salado	músculo de cerdo	2,3	150	200	90	Incremento temperatura 6 [°C]	Pretratamiento causa pérdida de peso. Menor contenido de agua a mayor frecuencia	(McDonnell et al., 2014)
PEF (pretratamiento) en salado	músculo de bacalao y eglefino	2,0	90	4	N.I.	N.I.	PEF genera menor pérdida de agua que muestras no tratadas.	(Barbosa-Cánovas et al., 2006)
Inactivación microbiana	músculo de pollo	3,8	N.I.	5	N.I.	Ancho pulso 10 [us]. Tiempo tratamiento 30 [s]	No hubo una reducción significativa en la cantidad de microorganismos inoculados al músculo de pollo	(Haughton et al., 2012)
Tejido Vegetal								

Aplicación	Producto	E	P	f	Q	Otro	Observación	Referencia
Deshidratación osmótica	Tejido de manzana	0,9	750	100	14,5	Ancho pulso 100 [us]. Tiempo tratamiento 0,75 [s]	La cantidad de sólidos ganados y agua pérdida total, fue mejorada con el pretratamiento PEF, en comparación a muestras no tratadas	(Amami et al., 2006)
Secado convectivo	Tejido de papa	0,4	50	N.I.	N.I.	Ancho pulso 1000 [us]. Tiempo tratamiento 0,5 [s]	PEF acelera el proceso de deshidratación, sin embargo, muestras congeladas (pretratamiento), presentan menores tiempos.	(Lebovka et al., 2007)
Deshidratación osmótica	Tejido de manzana	1,0	10	N.I.	N.I.	N.I.	Al aumentar E a 2 [kVcm <sup>-1</sup> ], no mejora la pérdida de agua. Aumentar el número de pulsos no se encuentra una diferencia significativa	(Ade-Omowaye et al., 2001)

\*N.I.= no informado. Variable o parámetro no informado directamente en la investigación aludida.

*Tabla 1-3 continuación.*

### 2.3.2 Congelación- Descongelación

El tratamiento de congelación- descongelación se ha aplicado para prolongar la vida útil de alimentos, especialmente sólidos, como carnes y pescados; sin embargo, la aplicación de este tratamiento genera daños microestructurales que modifican el color y textura y la capacidad de retención de agua (Cheng et al., 2014).

Investigaciones sobre el impacto del proceso de congelado en la microestructura de músculos de salmón, han reportado que un proceso de congelación lento (alta temperatura: -5 a -20 °C) provoca un mayor daño estructural, con un aumento del espacio extracelular y encogimiento de fibras, en comparación a una congelación rápida (baja temperatura: -30 a -80 °C), es decir, una congelación lenta o estática, reduce la temperatura del tejido a una velocidad de 0.5 a 1.0 °Cs<sup>-1</sup>, mientras que una congelación rápida, la velocidad de congelación está en el orden de 20 °Cs<sup>-1</sup> (Alizadeh et al., 2007; Alizadeh et al., 2009). Una congelación rápida (aire a alta velocidad 6 ms<sup>-1</sup> o el uso de altas presiones 200 MPa), preservan de mejor manera el tejido, debido a la formación de números y pequeños cristales de hielo dentro y fuera de la célula.

Alizadeh et al. (2009) también ha estudiado el impacto de la congelación- descongelación en procesos de transferencia de masa. Deshidratación osmótica de salmón en salmuera de NaCl (3% [pp<sup>-1</sup>]) a 20 °C, ha mostrado que el coeficiente de difusión ( $D_{\text{eff}}$ , modelo 2° ley de Fick) aumenta ligeramente de 2.19 a 2.57 (10<sup>-10</sup>) m<sup>2</sup>s<sup>-1</sup>, entre muestra sin congelación, y congelación estática; sin embargo se informa de un coeficiente de difusión de 3.38 10<sup>-10</sup> m<sup>2</sup>s<sup>-1</sup> para congelación a alta presión (200 MPa), tratamiento que preserva mejor la microestructura del salmón. En tejido de vacuno, al igual que en salmón, se han reportado resultados donde una congelación rápida tiene una mayor pérdida de agua (“drip loss”), que una congelación lenta, después de ser descongeladas las muestras (Vieira et al., 2009). El 85% de la humedad del músculo se encuentra en las miofibrillas y estas, después del tratamiento congelación- descongelación, pierden la capacidad de retención de líquido, generando una mayor pérdida de agua (Faridnia et al., 2015; Vieira et al., 2009). Pruebas de pérdida de agua por cocción (“Cooking loss”), en tejido no tratado y, congelado y descongelado, muestra que no hay diferencia significativa en el porcentaje de pérdida ( $p > 0.05$ ) (Faridnia et al., 2015). Leygonie et

al. (2012) en carne de avestruz, también ha demostrado un resultado similar al no encontrar diferencia en el porcentaje de pérdida de agua por cocción entre muestras tratadas y frescas.

El efecto de congelar y descongelar ha sido estudiado en procesos de transferencia de masa para matrices vegetales. Ramírez et al. (2011) ha investigado el efecto de congelar-descongelar muestras de manzana, y el efecto en la transferencia de masa en procesos de secado; concluyendo que se provoca un gran daño en la membrana y pared celular, lo que facilita la liberación de agua desde la matriz hacia el exterior debido a que aumenta el espacio intracelular, la formación de canales intercelulares y otras rutas, que facilitan el movimiento del agua hacia el exterior.

## 2.4 Segunda ley de Fick y modelo de difusión anómala

La segunda ley de Fick, y la solución propuesta por Crank J. (1975), ha sido usada extensamente en diversas investigaciones para dar representación fenomenológica a los procesos de deshidratación. Ha sido empleada en la deshidratación de tejido de pescado por aire caliente (Djendoubi et al., 2009; Jain and Pathare, 2007; Ortiz et al., 2013; Vega-Gálvez et al., 2011) y deshidratación osmótica (Gallart-Jornet et al., 2007; Uribe et al., 2011); en deshidratación de tejido de vacuno (Trujillo et al., 2007); y en deshidratación por aire caliente y deshidratación osmótica de matrices vegetales, como manzanas (Ben Haj Said et al., 2015; Ramírez et al., 2011; Simpson et al., 2015).

En los procesos de difusión en tejido vegetal o animal, generalmente no son bien representado por la segunda ley de Fick, pues la alta heterogeneidad debido a la estructura celular, el encogimiento y cambio de volumen de la estructura durante la pérdida de humedad, hacen que el camino de los difusantes sea impedido o tomen rutas más largas de lo esperado (con respecto a una distribución normal), resultando en procesos de difusión anómalos (Simpson et al., 2013; Simpson et al., 2015).

Simpson et al. (2013) propone la herramienta de cálculo fraccional para representar el fenómeno de difusión anómala, donde los difusantes pueden tener movimientos más rápidos (proceso súper-difusivo), o movimientos más lentos (sub-difusivos), que los propuestos por la segunda ley de Fick. El modelo de difusión anómalo propuesto (ver sección 2.4.2), introduce el

parámetro de orden fraccional sobre el tiempo,  $\alpha$ , que tiene relación con la microestructura del tejido en estudio (Ramírez et al., 2017; Simpson et al., 2013; Simpson et al., 2015; Simpson et al., 2017); dónde si  $0 < \alpha < 1$ , el proceso es sub-difusivo, si  $\alpha > 1$ , es proceso es súper-difusivo, y, finalmente, si  $\alpha$  es cercano a la unidad, el modelo de difusión anómalo convergerá a la solución propuesta por Crank J. (1975), a través de la segunda ley de Fick. El modelo de difusión anómalo ha mostrado tener representación fenomenológica de datos experimentales ajustados a este modelo, pues  $D_{eff}$  tiene un relación con la temperatura (ley de Arrhenius), el parámetro  $\alpha$  una relación con la microestructura del tejido; a diferencia de modelos empíricos, como el de Page (Simpson et al., 2017).

### 2.4.1 Segunda ley de Fick de difusión

Para el desarrollo del modelo, los siguientes supuestos fueron considerados: (a) las láminas de tejido, son consideradas como láminas infinitas; (b) el proceso de deshidratación es isotérmico (55 o 95 °C), (c) otros mecanismos de transferencia de materia y el encogimiento de la muestra, son descartados. Por tanto, la solución analítica a la segunda ley de Fick propuesta por Crank J. (1975) en una dimensión, está dada por la ecuación ( 2.6 ):

$$MR = \frac{C(t) - C_e}{C_0 - C_e} = \frac{8}{\pi^2} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{1}{(2n + 1)^2} \exp\left(-D_{eff} \left(\frac{(2n + 1)\pi}{L}\right)^2 t\right) \quad (2.6)$$

En el caso que el análisis sea realizado para tiempo largo ( $Fo > 0.6$ ), la ecuación ( 2.6 ) puede ser simplificada usando el primer término de la serie, como muestra la ecuación ( 2.7 ).

$$MR = \frac{C(t) - C_e}{C_0 - C_e} = \frac{8}{\pi^2} \exp\left(-D_{eff} \left(\frac{\pi}{L}\right)^2 t\right) \quad (2.7)$$

### 2.4.2 Modelo de difusión anómala

El modelo de difusión anómala, la ecuación de difusión puede ser representada como muestra la ecuación ( 2.8 ) (Simpson et al., 2013; Simpson et al., 2015; Simpson et al., 2017):

$$\frac{\partial^\alpha C}{\partial t^\alpha} = D_{eff} \frac{\partial^\beta C}{\partial t^\beta} \quad (2.8)$$

Considerando un orden fraccional para la derivada temporal ( $\alpha$ ), y de segundo orden la derivada espacial, la ecuación ( 2.8 ) puede ser expresada como se muestra en la ecuación ( 2.9 ):

$$\frac{\partial^\alpha C}{\partial t^\alpha} = D_{eff} \frac{\partial^2 C}{\partial t^2} \quad (2.9)$$

El uso de derivadas temporales fraccionales, ha demostrado ser una buena representación, en medios porosos (Simpson et al., 2013; Simpson et al., 2015; Simpson et al., 2017). La solución a la ecuación ( 2.9 ), es presentada en la ecuación ( 2.10 ):

$$MR = \frac{C(t) - C_e}{C_0 - C_e} = \frac{8}{\pi^2} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{1}{(2n+1)^2} E_\alpha \left( -D_{eff} \left( \frac{(2n+1)\pi}{L} \right)^2 t^\alpha \right) \quad (2.10)$$

Donde  $E_\alpha$  corresponde a la función de Mittag-Leffler:

$$E_\alpha(x) = \sum_{k=0}^{\infty} \frac{x^k}{\Gamma(1 + \alpha k)} \quad (2.11)$$

Considerando tiempo largo en el proceso de deshidratación ( $Fo > 0.6$ ) (Simpson et al., 2015; Simpson et al., 2017), la ecuación ( 2.10 ) puede ser simplificada en la ecuación ( 2.12 ):

$$MR = \frac{C(t) - C_e}{C_0 - C_e} = \frac{8}{\pi^2} E_\alpha \left( -D_{eff} \left( \frac{\pi}{L} \right)^2 t^\alpha \right) \quad (2.12)$$

Cuando  $\alpha$  converge a 1, la función de Mittag-Leffler (ecuación ( 2.11 )) converge a la función exponencial. Esto transforma el modelo fraccional en la segunda ley de Fick, en la solución analítica propuesta por Crank J. (1975). Por tanto, cuando las condiciones para tiempo largo son conocidas, el modelo de difusión anómala puede ser expresado como:

$$MR = \frac{C(t) - C_e}{C_0 - C_e} = \frac{8}{\pi^2} \exp \left( -D_{eff} \left( \frac{\pi}{L} \right)^2 t^\alpha \right) \quad (2.13)$$

El valor del parámetro  $\alpha$  puede determinar el tipo de transporte anómalo en el proceso. Si  $0 < \alpha < 1$ , el proceso es sub-difusivo; si  $\alpha > 1$ , el proceso es súper-difusivo (Simpson et al., 2017).

## 3. Materiales y métodos

### 3.1 Preparación muestras

El salmón (salmón atlántico), la carne de vacuno (posta rosada), y la manzana (variedad Granny Smith); fueron adquiridos en un supermercado local. Todos los tejidos fueron cortados en láminas de 50x35x5 mm, para simular una placa de dimensiones infinitas (ancho con respecto otras dimensiones). Inmediatamente después de ser cortados, eran utilizados en los procesos de deshidratación. Para el caso de la Manzana, estas eran sumergidas en una solución de ácido ascórbico y salicílico (1% y 2%, respectivamente), para evitar el pardeamiento enzimático, previamente a ser deshidratadas.

### 3.2 Pretratamientos

#### 3.2.1 Pulsos eléctricos (PEF)

El generador de pulsos eléctricos (PEF) fue diseñado y construido en el laboratorio de Física de la Universidad Técnica Federico Santa María. Características: voltaje máximo de 10 kV, frecuencia de 0- 40 Hz, y número de pulsos de 1- 990; generando pulsos monopolar de decaimiento exponencial. La cámara de tratamiento es de teflón, con electrodos planos de acero inoxidable de 60 mm de diámetro, y separación de electrodos de 10 mm. La Figura 3.1 muestra la instalación experimental.



Figura 3.1 Instalación experimental generador de pulsos eléctricos.

### 3.2.2 Congelación- Descongelación (C-D)

Para el pretratamiento de Congelación- Descongelación (C-D), se utilizó el congelador General Electric, modelo RGE1436. Las muestras fueron congeladas a  $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$ , y posteriormente descongeladas a  $5\text{ }^{\circ}\text{C}$  por 24 h. La congelación de las muestras fue realizada 48 h antes de ser descongeladas.

### 3.3 Secador Ventana Refractiva (RW)

El secador por ventana refractiva fue instalado en un baño termorregulador de acero inoxidable marca MEMMERT (WNB22, Alemania), de 60 L de capacidad. Se utilizó una película plástica marca MYLAR<sup>®</sup> (Polietileno Teraftalato) de 2 mm de espesor, con una superficie de secado de  $150 \times 470\text{ mm}^2$ , donde se colocaron 45 muestras por tratamiento. La temperatura del baño termorregulador fue de  $95 \pm 1\text{ }^{\circ}\text{C}$  y  $55 \pm 1\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Para controlar el nivel del baño de agua, se utilizó un control de nivel de sonda y una bomba peristáltica conectada a un tanque de agua de 20 L. Se utilizó una separación de 4 cm, entre la superficie de secado y el borde del baño termorregulador, para poder purgar las burbujas de aire que se producen cuando se utiliza una alta temperatura, y estas no interfieran en el proceso de deshidratación (Ochoa-Martínez et al., 2012). La instalación experimental se muestra en la Figura 3.2.

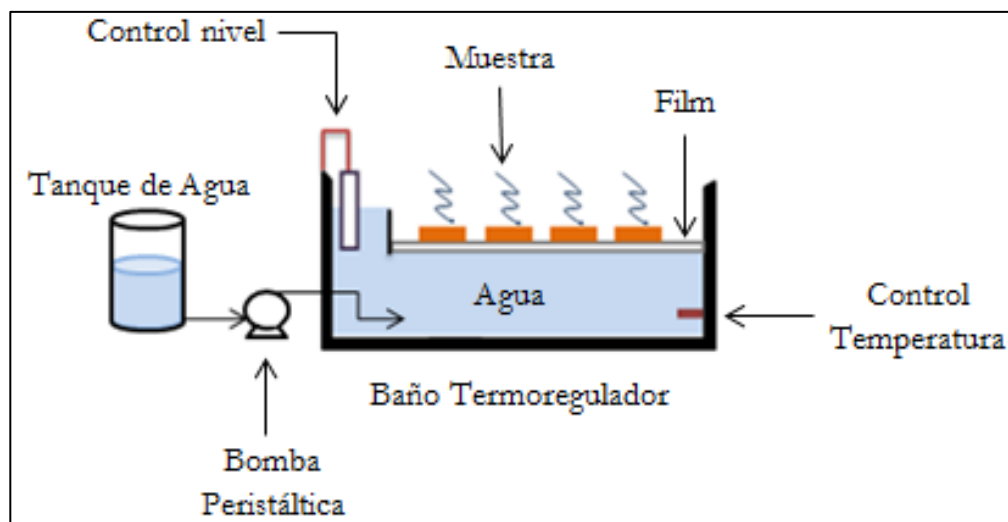


Figura 3.2 Montaje experimental secador de ventana refractiva.

### 3.4 Secador por aire caliente (EC)

La estufa de aire caliente marca MEMMERT (UF, Alemania) de aire forzado, fue utilizada como equipo deshidratador. Las muestras fueron colocadas en su interior en placas de vidrio de 6 cm de diámetro, y su peso fue registrado antes y después del tratamiento.

## 3.5 Mediciones experimentales

### 3.5.1 Humedad

La humedad inicial fue determinada de acuerdo por AOAC, en el método oficial 934.06. Para el salmón y vacuno se utilizó secado al vacío a 104 °C por 24 h, mientras que para la manzana fue usado secado al vacío a 60 °C por 24 h. La humedad durante el proceso de secado fue determinada por diferencia de peso de la muestra inicial y después de haber sido deshidratada a un tiempo dado. Se utilizó la balanza marca PRECISA, modelo XB 620M, precisión  $\pm 0.0001$  g.

### 3.5.2 Actividad de agua

La actividad de agua fue medida con un higrómetro marca AQUALAB, modelo 4T (Decagon Devices Inc., Pullman Washington USA), con una precisión de  $\pm 0.003$ , y una resolución de 0.0001.

### 3.5.3 Color

La medición del color fue realizada con el colorímetro marca MINOLTA, modelo CR-400 (Tokio, Japón), basado en el espacio colorimétrico CIELab, después de la calibración al blanco estándar. 20 muestras fueron medidas para cada experimento, en tejido de manzana, salmón y vacuno, respectivamente (tiempo de tratamiento que alcanzan  $A_w < 0.6$ ). El cambio de color fue determinado por la evaluación de los tres parámetros del CIE: Luminosidad ( $L^*$ ), parámetro del verde al rojo ( $a^*$ ), y parámetro del azul al amarillo ( $b^*$ ). El cambio de color es evaluado según la ecuación (3.1), evaluando el cambio antes y después del tratamiento:

$$\Delta E = (\Delta L^2 + \Delta a^2 + \Delta b^2)^{0.5} \quad (3.1)$$

### 3.5.4 Textura

La medición de textura, fue realizada con el texturómetro marca BROOKFIELD, modelo CT3 (EE.UU.), junto con el software de adquisición de datos TEXTURE PRO CT.

Para el salmón y el vacuno, el ensayo de firmeza fue utilizado como indicador de textura en  $\text{Nmm}^{-1}$ . Un ensayo de compresión, con un 40% de objetivo, velocidad de test de  $1.7 \text{ mms}^{-1}$ , carga de activación de 0.1 N, y una probeta de 2 mm de diámetro, fueron usadas. En el test, se registró la máxima fuerza al penetrar un set de 10 láminas deshidratadas (Ortiz et al., 2013). Para la manzana, el ensayo de firmeza fue utilizado como indicador de textura en  $\text{Nmm}^{-1}$ . Un ensayo de compresión, con un 50% de objetivo, velocidad de test de  $1.0 \text{ mms}^{-1}$ , carga de activación de 0.1 N, y una probeta de 5 mm de diámetro, fueron usadas. En el test, se registró la máxima fuerza al penetrar un set de 5 láminas deshidratadas (Huang et al., 2012; Velickova et al., 2014).

El análisis de textura y de color, fue realizado una vez que los tejidos alcanzaban actividades de agua inferiores a 0.6 (inocuidad alimentaria). Los tiempos de tratamientos se destacan en la Tabla 3.1.

**Tabla 3.1 Tiempo de tratamiento muestras para tejido fresco y tratado, para análisis de calidad**

Tejido	Tiempo de tratamiento [h]	
	55 [°C]	95 [°C]
Salmón (SAL)	8	4
Vacuno (CV)	15	10
Manzana (MAN)	4	2

### 3.6 Modelos matemáticos

Los modelos matemáticos fueron ajustados, por minimización del error cuadrático medio; y los parámetros más los intervalos de confianza, fueron calculados con el uso del software MatLab 2013.

### 3.7 Análisis estadístico

Test de significancia de los resultados fue realizado con el análisis de varianza (ANOVA). Significancia estadística fue determinada con un nivel de probabilidad de 0.05 ( $p < 0.05$ ), y con un nivel de confianza del 95%. Fue determinado con el software MatLab 2013.

## 4. Resultados y discusión

### 4.1 Métodos de deshidratación: Ventana refractiva y Estufa Convectiva

#### ➤ *Tejido de salmón*

La deshidratación de músculo de salmón por medio de la técnica de ventana refractiva a 55 y 95 °C, se muestra en la Figura 4.1. Un incremento en la temperatura de secado de 55 a 95 °C disminuye el tiempo de secado, pues para alcanzar actividad de agua de 0.40 se requieren 7 y 24 h de tratamiento, respectivamente. Lo anterior, se evidencia en los coeficientes de difusión efectivos ( $D_{\text{eff}}$ ) obtenidos de 1.553 y 3.553 (orden  $10^{-10}$ )  $\text{m}^2\text{s}^{-1}$ , para 55 y 95 °C, respectivamente. Ortiz et al. (2013) ha reportado que para la deshidratación de láminas de salmón a 60 [°C] en un tubo de aire caliente o convectivo, se requieren cerca de 60 h de tratamiento, mientras que RW a 55 °C, se requieren 24 h de tratamiento para alcanzar valores de equilibrio.

El uso de pulsos eléctricos (PEF) y congelación- descongelación, como pretratamiento, fueron aplicados a láminas de salmón, y deshidratadas en RW a 55 °C (ver Figura 4.2). Los resultados muestran que la aplicación de un campo eléctrico de  $10 \text{ kVcm}^{-1}$ , no aceleró el proceso de deshidratación, ni tampoco se alcanzaron niveles de seguridad alimentaria más rápidos sobre el músculo de salmón, dado que  $D_{\text{eff}}$  van desde los 1.553 a 1.631 (orden  $10^{-10}$ )  $\text{m}^2\text{s}^{-1}$  ( $p > 0.05$ ) para los pretratamientos usados. La energía específica aplicada va desde los 6 a 35 [ $\text{kJkg}^{-1}$ ] (ecuación ( 2.5 )), valor inferior al utilizado por otras investigaciones de PEF sobre alimentos sólidos (ver Tabla 2.3, sección 2.3.1.4), donde se aplican energías específicas entre los 90 y 250  $\text{kJkg}^{-1}$ , incluso, informando campos eléctricos menores al utilizado (entre 1.4 a 2.3  $\text{kVcm}^{-1}$ ). Pocas investigaciones informan la corriente utilizada en el proceso, como parámetro relevante. Lebovka et al. (2007) informa la utilización de un campo eléctrico de 1.5  $\text{kVcm}^{-1}$  y 20 A de corriente, para el tratamiento de láminas de patatas; Amami et al. (2006), de igual forma, informa un campo eléctrico de 1.5  $\text{kVcm}^{-1}$  y 20 A, para el tratamiento de cilindros de manzana. Por tanto, el uso de distintos parámetros del PEF, celdas de tratamiento, tipo de músculos y tamaño, incluso, preparación de las muestras; puede complicar la interpretación de

la información entregada por investigaciones previas, en la aplicación de nuevas investigaciones (Faridnia et al., 2015)

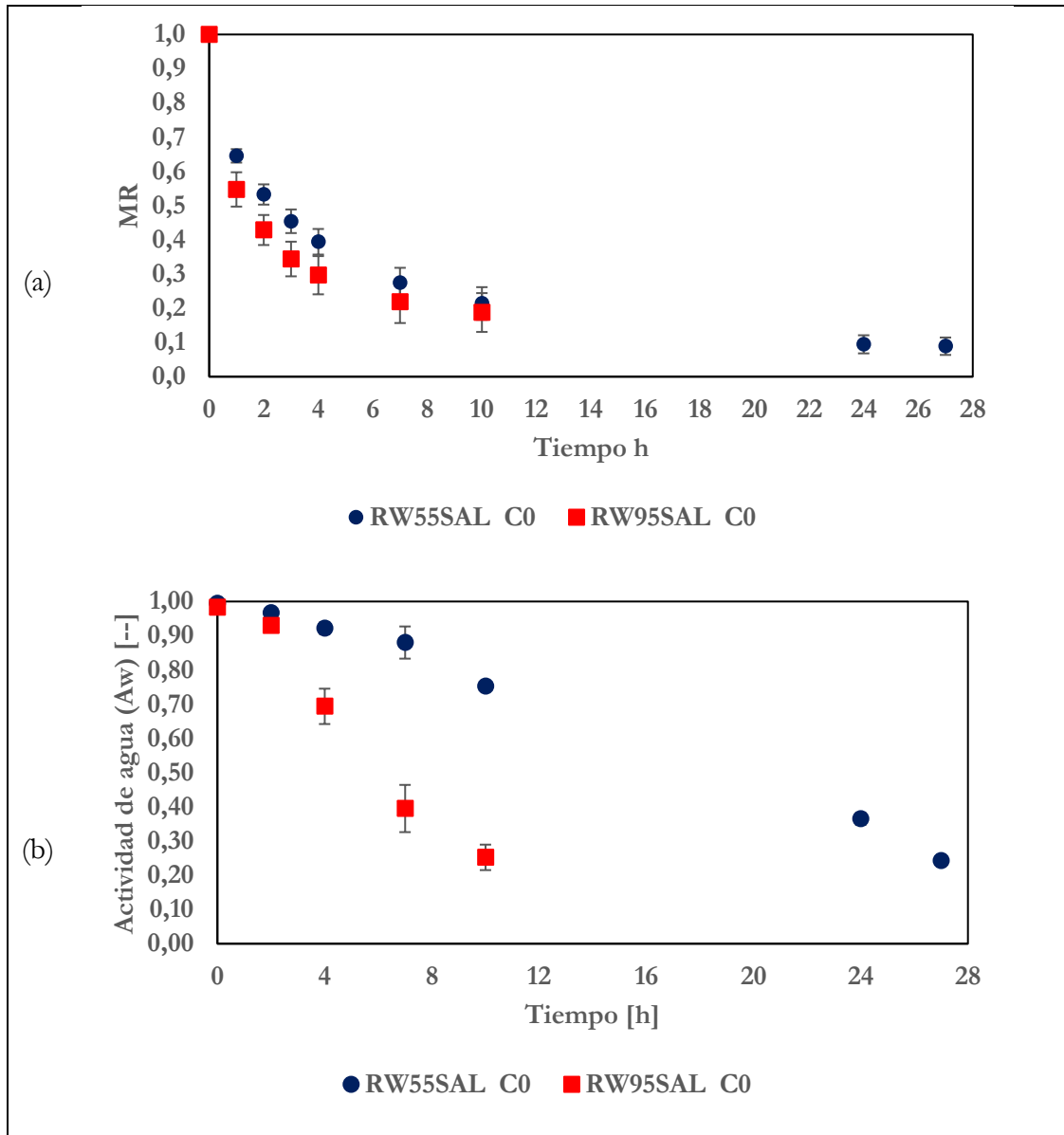


Figura 4.1 Curva de secado (a) y actividad de agua (b), para proceso de deshidratación tejido de salmón en ventana refractiva

. La Figura 4.3 muestra el pretratamiento de congelación y descongelación aplicado a láminas de salmón, deshidratadas a 55 y 95 [°C] en RW.

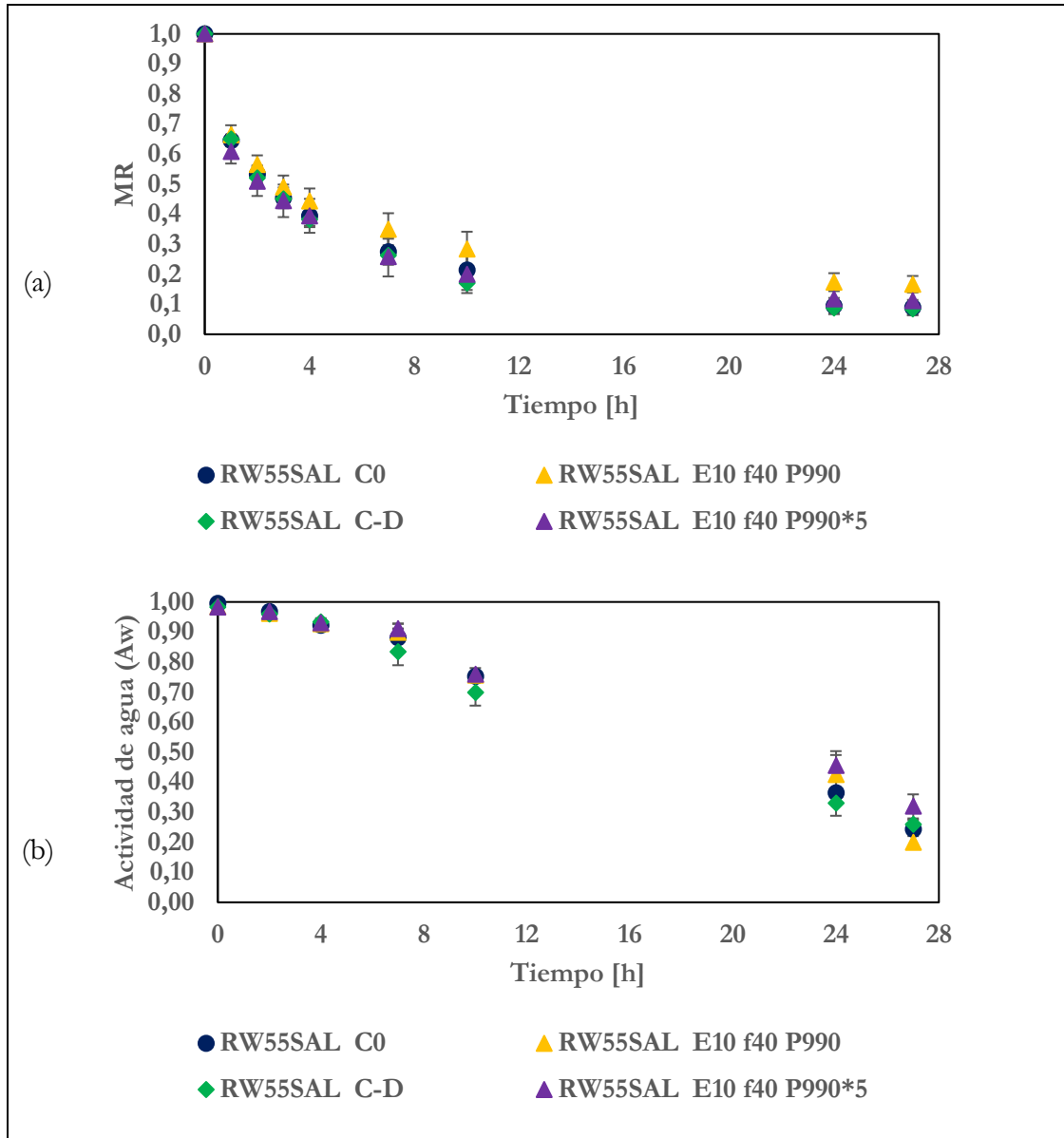


Figura 4.2 Curva de secado (a) y actividad de agua (b), para proceso de deshidratación tejido de salmón en ventana refractiva a 55 [°C]. Pretratamiento PEF (E [kVcm<sup>-1</sup>], f [Hz], P [--]), y Congelado-Descongelado (TC -5 [°C] TD 5 [°C]).

Los resultados obtenidos en la deshidratación de tejido de salmón a 55 °C (Figura 4.3 (a)), entre muestras frescas y tratadas por congelación- descongelación, muestran un aumento del coeficiente de difusión efectivo, de 1.55 a 1.63 [10<sup>-10</sup> m<sup>2</sup>s<sup>-1</sup>] sin diferencia significativa entre ambos valores ( $p > 0.05$ ); caso similar para 95 [°C] (ver Tabla 4.1). Lo anterior es concordante con los resultados de Alizadeh et al. (2009), donde un proceso de congelación lento aumenta el proceso de transferencia de masa ligeramente, debido al gran espacio intracelular formado por la cristalización de hielo de mayor tamaño, con respecto a otras técnicas. Sin embargo,

investigaciones sobre el efecto de congelar y descongelar el tejido de salmón indica que la mayor formación de cristales de hielo de gran tamaño es el espacio extracelular, y que posiblemente provoque la deformación de las células y daño mecánico (aumento del espacio extracelular), más que la ruptura o permeabilización de la mismas (Alizadeh et al., 2007; Alizadeh et al., 2009; Kaale and Eikevik, 2013), no mejorando el proceso de transferencia de masa sustancialmente.

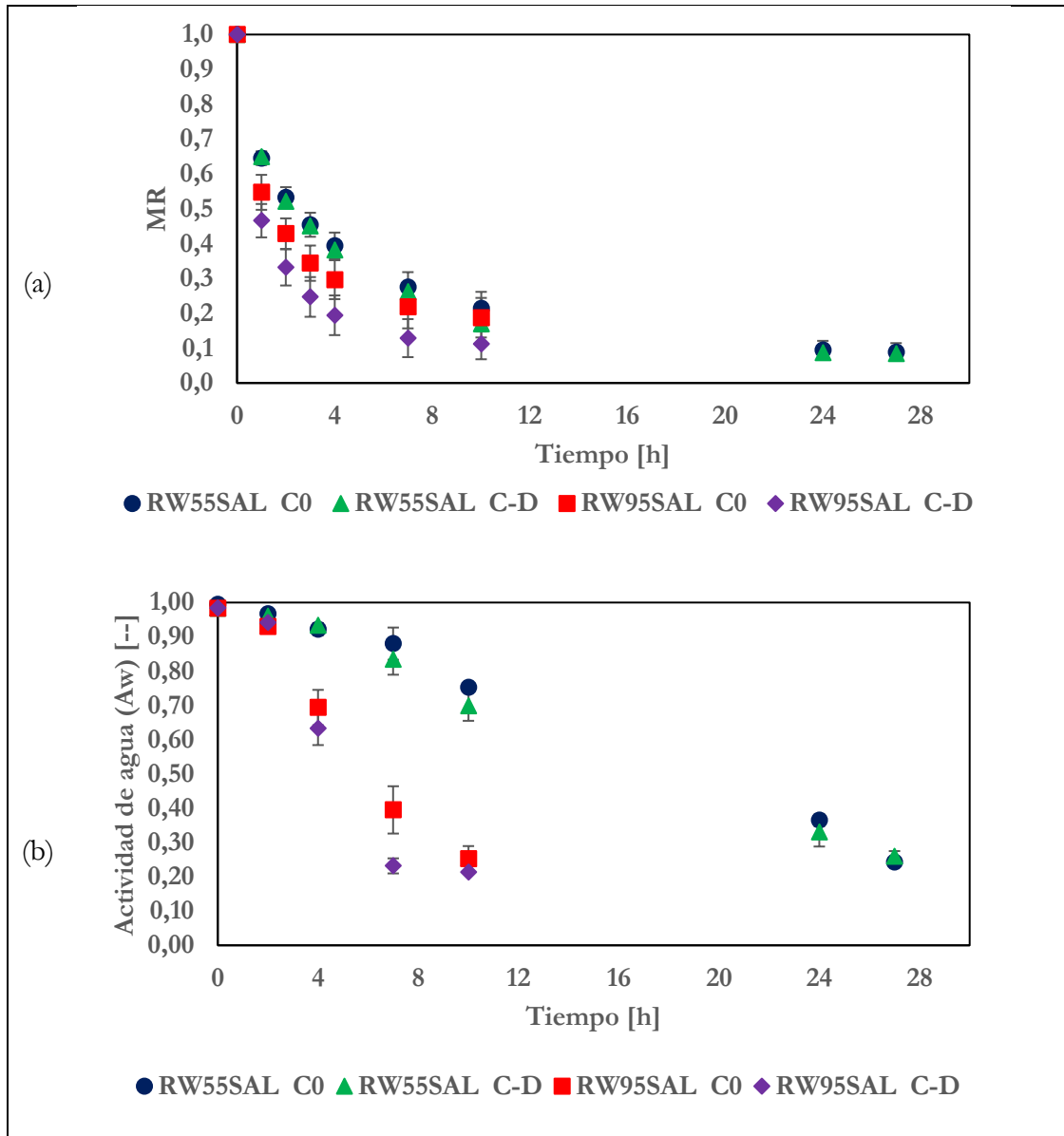


Figura 4.3 Curva de secado (a) y actividad de agua (b), muestra control y con pretratamiento de congelación- descongelación, para proceso de deshidratación de tejido de salmón en ventana refractiva a 55 y 95 °C.

Otra razón que podría afectar la transferencia de masa, es que el salmón atlántico es un pescado graso, y el contenido y distribución de aceites y grasas pueden representar un rol importante como barrera en la pérdida de agua (Alizadeh et al., 2009). Resultados similares han reportado estudios sobre deshidratación de sardina, mostrando que a medida que decrece el contenido de humedad, la energía necesaria para remover agua aumenta, debido a interacciones energéticas entre moléculas de agua y sitios altamente polares (Djendoubi et al., 2009; Hadrich et al., 2008).

### ➤ *Tejido de vacuno*

Los resultados obtenidos en la deshidratación de tejido de vacuno a 55 y 95 °C con la aplicación de congelación- descongelaación, se muestran en la Figura 4.4. Al igual que en el tejido de salmón, un aumento de la temperatura de secado de 55 a 95 °C, produce una disminución en los tiempos de tratamiento, ya que para alcanzar una actividad de agua inferior a 0.60, se requieren 10 y 21 h de secado para 55 y 95 °C, respectivamente.

Por otro lado en el tejido de vacuno, al aplicar el pretratamiento, no se observa una aceleración en el proceso de transferencia de masa (pérdida de agua) entre muestras frescas y tratadas con congelación- descongelaación, pues no hay diferencia significativa en los coeficientes de difusión ( $p > 0.05$ ); por ejemplo a 55 °C RW55CV C0 y RW55CV C-D presentan un  $D_{\text{eff}}$  de 1.540 y 1.642 ( $10^{-10}$ )  $\text{m}^2\text{s}^{-1}$ , respectivamente; caso similar ocurre a 95 °C (ver Tabla 4.1). Trabajos previos han informado que la pérdida de agua por cocción (“cooking loss”), no presenta diferencias significativas ( $p > 0.05$ ), entre tejido fresco y tratado por congelación- descongelaación (Faridnia et al., 2015; Vieira et al., 2009), debido a que la pérdida de líquido, durante la cocción, corresponde a agua constitutiva y proveniente de la fundición de grasas durante el tratamiento térmico, las cuales no son afectadas por el tratamiento de congelación y descongelaación (Leygonie et al., 2012; Vieira et al., 2009). Otro factor importante, es la temperatura. Se ha informado que la desnaturalización de las proteínas, modifica el punto isoeléctrico del tejido, disminuyendo la capacidad de retención de agua constitutiva o asociada (“water binding capacity”) (Delgado and Sun, 2002; Leygonie et al., 2012), por otro lado, Hughes et al. (2014) ha mostrado que las miofibrillas reducen severamente su diámetro con la temperatura del tratamiento, llegando a reducciones entre un 50 a 60% a 90 °C, disminuyendo la capacidad de retención de agua. Por tanto, como se

observa en la Figura 4.4, al no haber aceleración en la deshidratación, ni en la reducción de la actividad de agua; se podría establecer que el pretratamiento de congelación- descongela- ción no es un factor importante, y sí lo es la temperatura de tratamiento.

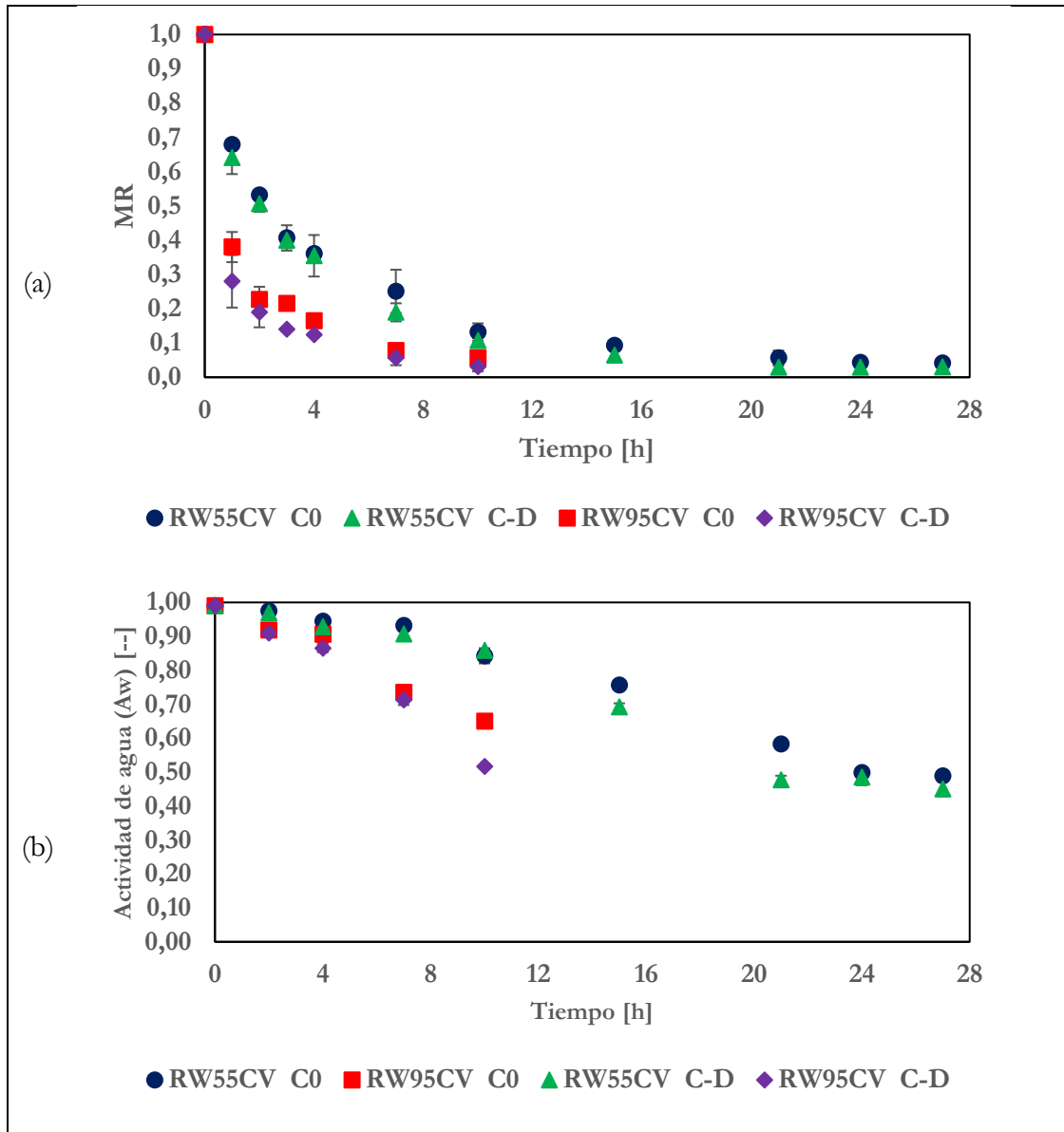


Figura 4.4 Curva de secado (a) y actividad de agua (b), muestra control y con pretratamiento de congelación- descongela- ción, para proceso de deshidratación de tejido de vacuno en ventana refractiva a 55 y 95 °C.

➤ *Tejido de manzana*

La Figura 4.5 muestra el proceso de deshidratación en láminas de manzana sobre muestras frescas y tratadas, mediante ventana refractiva a 55 y 95 °C. Se observa que para 95

°C hay diferencia significativa en los coeficientes de difusión ( $p < 0.05$ ); pues en RW95MAN C0 y RW95MAN C-D, el  $D_{\text{eff}}$  va desde 12.779 a 17.042 ( $10^{-10}$ )  $\text{m}^2\text{s}^{-1}$ , respectivamente; estos es concordante con lo informado por Ramírez et al. (2011), donde la estructura de la manzana es severamente dañada por el proceso de congelación, facilitando la migración de agua hacia el exterior.

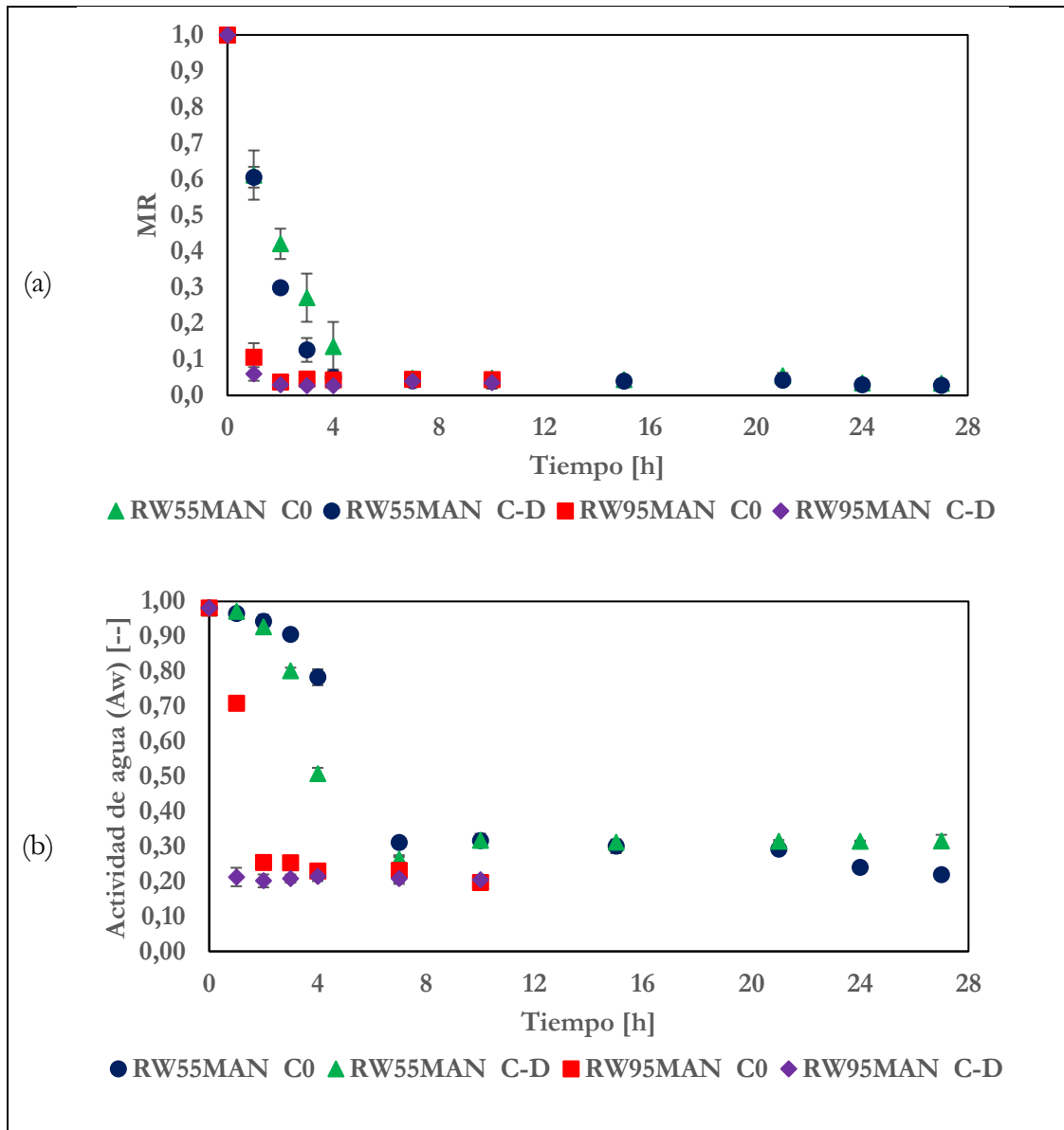


Figura 4.5 Curva de secado (a) y actividad de agua (b), muestra control y con pretratamiento de congelación- descongelaación para proceso de deshidratación tejido de manzana en ventana refractiva (RW) a 55 y 95 °C.

Finalmente, el tratamiento de congelación- descongelación, mostró ser efectivo para láminas de manzana, por sobre otros tejidos, como salmón y vacuno. Smith (2011), ha informado que el daño provocado por la congelación- descongelación es minimizado en estructuras celulares elásticas, como lo son los tejidos de pescados y carne (salmón y vacuno); razón por la cual posiblemente no se observaron diferencias significativas en los procesos de deshidratación. La manzana, a diferencia de los tejidos anteriores, posee una estructura rígida debido a la pared celular, donde el proceso de congelación, efectivamente, genera un daño (Ramírez et al., 2011).

### ➤ *Comparación estufa convectiva (EC) y ventana refractiva (RW)*

En cuanto a la deshidratación en estufa convectiva (EC), la Figura 4.6 muestra la deshidratación de láminas frescas y tratadas por congelación- descongelación, de vacuno a 55 y 95 [°C]. Se observa que al aumentar la temperatura, decrece el tiempo de tratamiento, pues el coeficiente de difusión efectivo es de 1.735 y 5.148 ( $10^{-10}$ )  $m^2s^{-1}$  ( $p < 0.05$ ); sin embargo, no se observa diferencia significativa por efectos del pretratamientos a un mismo nivel de temperatura (ver Tabla 7.1, Anexo B), posiblemente por las razones argumentadas anteriormente. Situación similar ocurre con la deshidratación de tejido de salmón (ver Figura 7.1, Anexo A), donde el difusión efectivo entre muestras frescas y tratadas es de 1.694 y 1.817 ( $10^{-10}$ )  $m^2s^{-1}$  ( $p > 0.05$ ), respectivamente.

Estudios sobre deshidratación de ventana refractiva que han comparado esta técnica con otros métodos, como secador convectivo, secador spray, liofilizador, entre otros; han concluido que la RW es un técnica que requiere menos tiempo de tratamiento, y genera productos de mejor calidad, en comparación a estas técnicas (Caparino et al., 2012; Caparino et al., 2013; Nindo and Tang, 2007; Pavan et al., 2012). Al comparar el método de deshidratación (RW y EC) en tejido de salmón y vacuno (ver Figura 7.2 a la Figura 7.5, Anexo A), no se observa diferencia significativa en los coeficientes de difusión (ver Tabla 4.1 y Tabla 7.1) tanto en muestras frescas como en muestras tratadas por congelación- descongelación, a 55 y 95 [°C], respectivamente. Lo anterior, posiblemente a que el método de deshidratación no es influyente en tejidos que se afectan por la temperatura, como lo es el tejido de vacuno y la disminución en la capacidad de retención de agua debido al encogimiento de las miofibrillas (Faridnia et al., 2015; Hughes et al., 2014); o como el salmón, en que el contenido de ácidos

grasos y grasas afectan la migración de agua al exterior (Alizadeh et al., 2009; Djendoubi et al., 2009; Hadrich et al., 2008).

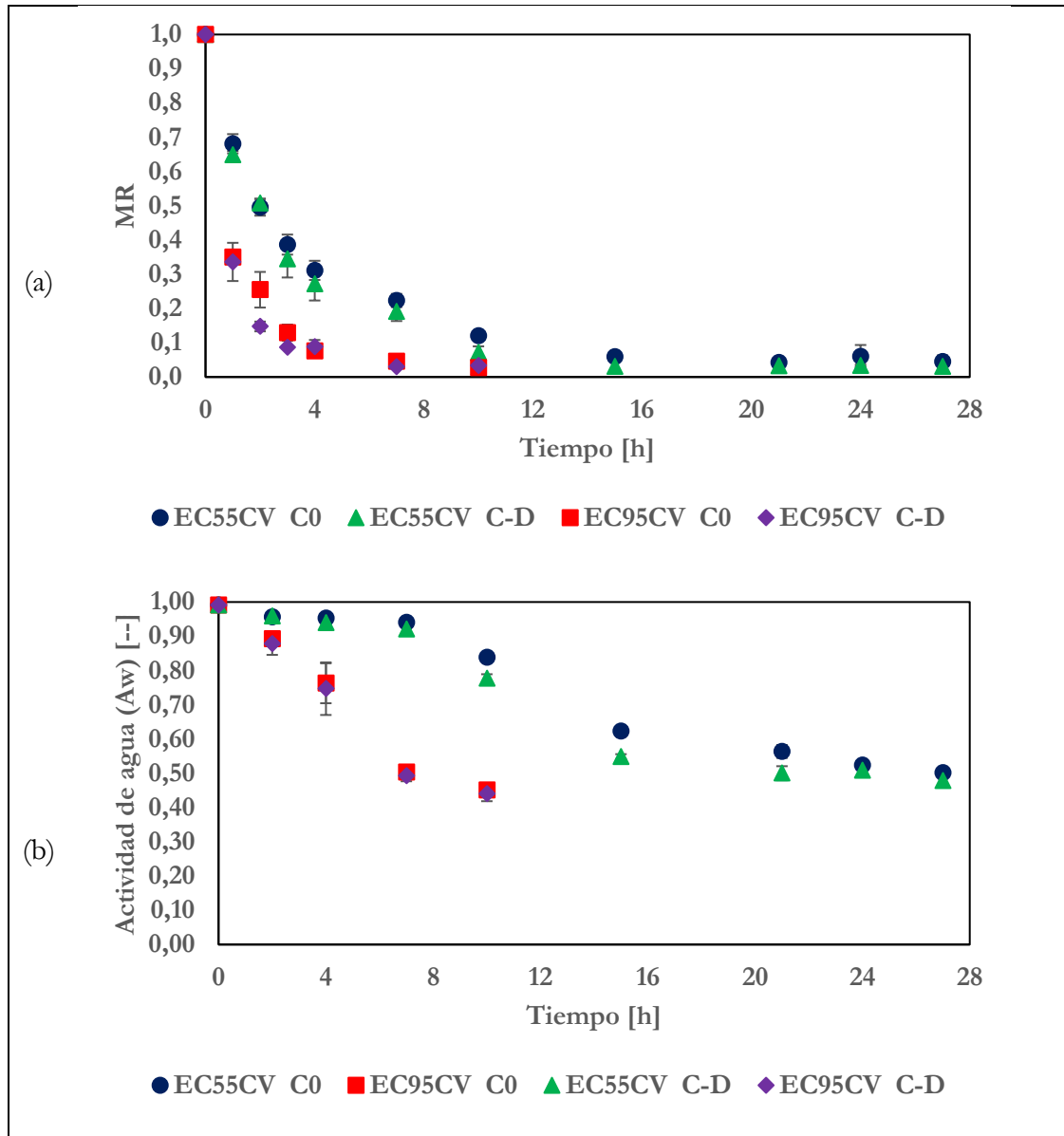


Figura 4.6 Curva de secado (a) y actividad de agua (b), muestra control y con pretratamiento de congelación- descongelación para proceso de deshidratación de tejido de vacuno en estufa convectiva (EC) a 55 y 95 °C.

De igual forma, láminas de manzana fueron deshidratación en estufa convectiva (EC). La Figura 7.7 (Anexo A), muestra, al igual que para RW, el tratamiento de congelación- descongelación fue efectivo a 95 [°C], acelerando el proceso de secado, ya que el coeficientes de difusión efectivo es de 5.177 y 8.783 ( $10^{-10}$ )  $m^2s^{-1}$  ( $p < 0.05$ ), para muestras frescas y

congeladas- descongeladas, respectivamente (ver Tabla 7.1). Sin embargo, a diferencia de lo sucedido con los tejidos de salmón y vacuno, la manzana presentó diferencia significativa entre métodos de deshidratación (RW y EC). Por ejemplo, tejido de manzana sin tratar deshidratado a 95 °C, presenta un coeficiente de difusión efectivo de 12.779 y 5.177 ( $10^{-10}$ )  $m^2s^{-1}$  ( $p < 0.05$ ), para RW y EC, respectivamente; evidenciando que la temperatura afecta la deshidratación de tejidos de salmón y vacuno, independientemente del método de secado usado.

Nindo et al. (2003) describe a la venta refractiva como una técnica noble de deshidratación, permitiendo una rápida deshidratación por la radiación proveniente del agua caliente, cuando hay un alimento de alta humedad. Esta hipótesis explicaría la diferencia en la deshidratación a 95 °C de láminas de manzana, alimento con un 92% de humedad, entre métodos de RW y EC (ver Figura 4.7); situación que se acentúa cuando la lámina es congelada-descongelada, debido a que la estructura de la manzana se torna homogénea, permitiendo la migración de agua en forma más expedita hacia el exterior (Ramírez et al., 2011; Simpson et al., 2015). Sin embargo, a 55 °C el agua no se comporta como un cuerpo negro, como cuando el agua está a altas temperaturas (95 °C) (Ortiz-Jerez et al., 2015); por tanto no se explicaría la diferencia entre RW y EC a 55 °C, por el concepto de “ventana refractiva”. Ortiz-Jerez et al. (2015) Ha estudiado el aporte que realizan los mecanismos de transferencia de calor en la deshidratación láminas de zapallo en RW, concluyendo que el aporte de calor realizado por el mecanismo de conducción es 100 veces mayor que lo aportado por el mecanismo de radiación; de igual forma, sostiene que la radiación transmitida, en presencia o no de alimento; varía sólo un 5%. Con lo anterior, posiblemente la deshidratación de manzana sea más rápida en RW, por ser un método de deshidratación de contacto directo, a diferencia de la estufa convectiva (EC), y considerando, para el caso de láminas congeladas y descongeladas, la diferencia se explica por el daño estructural efectivo que sufrió la pared celular de las manzanas, a diferencia de los tejidos de salmón y vacuno.

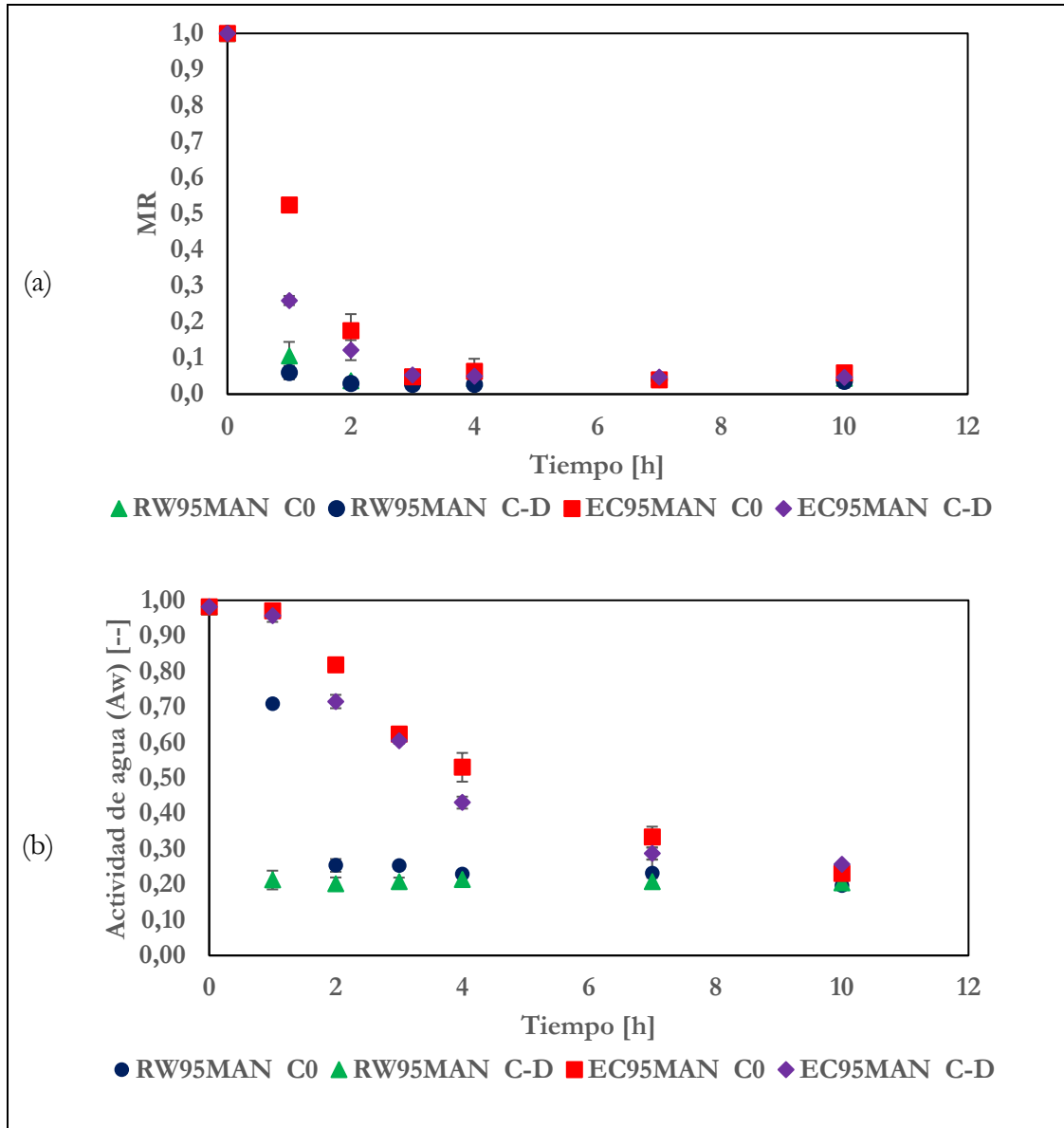


Figura 4.7 Curva de secado (a, c) y actividad de agua (b, d), muestra control y con pretratamiento de congelación- descongelación (TC -5 [°C] TD 5 [°C]) para proceso de deshidratación en láminas de manzanas en ventana refractiva (RW) y estufa convectiva (EC).

➤ *Actividad de agua*

La actividad de agua de los alimentos refleja la capacidad termodinámica (energía disponible) o la concentración efectiva del agua en los alimentos, que pueden participar como agentes químico en diversas reacciones biológicas y químicas (Fennema et al., 2017). Experimentalmente, en tejido de salmón fresco y tratado, deshidratado en RW a 55 °C; Aw es de 0.933 para ambos casos a 4 h de tratamiento. En tejido de vacuno, en las mismas

condiciones anteriores,  $A_w$  es de 0.928 (Figura 4.8). Lo anterior muestra que el pretratamiento no acelera que los alimentos alcancen  $A_w$  menores 0.6; posiblemente por las razones anteriormente expuestas, en el caso de la deshidratación. Caso contrario ocurre con la manzana, pues para manzana fresca y tratada, deshidratada en RW a 55 °C; se alcanzó  $A_w$  de 0.783 y 0.503 (Figura 4.8), respectivamente, evidenciando que hay una diferencia por efecto del pretratamiento en este tejido.

La Figura 4.8 muestra la actividad de agua ( $A_w$ ) de los tres tejidos estudiados, sin pretratamiento, deshidratados en RW (tejidos con pretratamiento, se muestran en la Figura 7.8, Anexo A). Se observa que la actividad de agua de la manzana decrece de forma más rápida que los tejidos de salmón y vacuno; por ejemplo, tejido fresco (C0) tratado a 95 °C,  $A_w$  de manzana es 0.229, mientras que para salmón y vacuno la  $A_w$  es de 0.693 y 0.906, respectivamente; a 4 h de tratamiento. Lo anterior, se debe posiblemente a que el calor de desorción necesario para remover la humedad de los tejidos aumenta, a medida que disminuye el contenido de humedad. El calor de desorción de la manzana aumenta hasta 35 kJmol<sup>-1</sup>, aproximadamente (Kaymak-Ertekin and Gedik, 2004), para el vacuno bordea los 72 kJmol<sup>-1</sup> (Iglesias and Cherife, 1976); mientras que en pescados el valor es similar al del vacuno, cercano a los 75 kJmol<sup>-1</sup> (Djendoubi et al., 2009; Hadrich et al., 2008). Es decir, la manzana requiere la mitad de la energía para remover el agua asociada o el agua que presenta interacciones del tipo dipolo- dipolo, ion- dipolo, entre otras (Fennema et al., 2017); a diferencia del salmón y vacuno que evidencian sitios de interacción altamente polares o sitios activos, que impiden la movilidad del agua (Delgado and Sun, 2002; Iglesias and Cherife, 1976). En la Figura 4.8 (a), se observa que para 55 [°C] el comportamiento de  $A_w$  para salmón y vacuno es similar, mientras que para 95 °C (Figura 4.8 (b)), hay una notoria diferencia, pues a las 10 [h] de tratamiento, la  $A_w$  es de 0.252 y de 0.650, para salmón y vacuno, respectivamente. Lo anterior, se debe posiblemente a que la mayoría de las proteínas son las responsables de la retención o mantención del agua asociada (“water binding”), debido a los grupos o sitios hidrofílico que poseen; y esta capacidad se ve disminuida debido al incremento de la temperatura; siendo más notorio en salmón (Iglesias and Cherife, 1976). Diversos autores han investigado la isoterma de desorción de humedad de la manzana, a diferentes temperaturas, concluyendo que la humedad de equilibrio y la  $A_w$  poseen un comportamiento sigmoideo (Ben Haj Said et al., 2015; Kaymak-Ertekin and Gedik, 2004; Velickova et al., 2014); de igual forma, el salmón y otros

pescados, como la sardina, poseen similar comportamiento (Djendoubi et al., 2009; Fennema et al., 2017; Hadrich et al., 2008). Sin embargo Kaymak-Ertekin and Gedik (2004), han reportado que la carne de vacuno posee un comportamiento del tipo cristalino, cuando hay presencia de sales, es decir, que a bajos contenidos de humedad, el tejido puede presentar alta actividad de agua, debido a interacciones energéticas o sitios polares más fuertes que retienen moléculas de agua (Fennema et al., 2017), lo que explicaría posiblemente porqué el tejido de vacuno disminuye de forma más lenta la  $A_w$  en comparación al salmón y manzana.

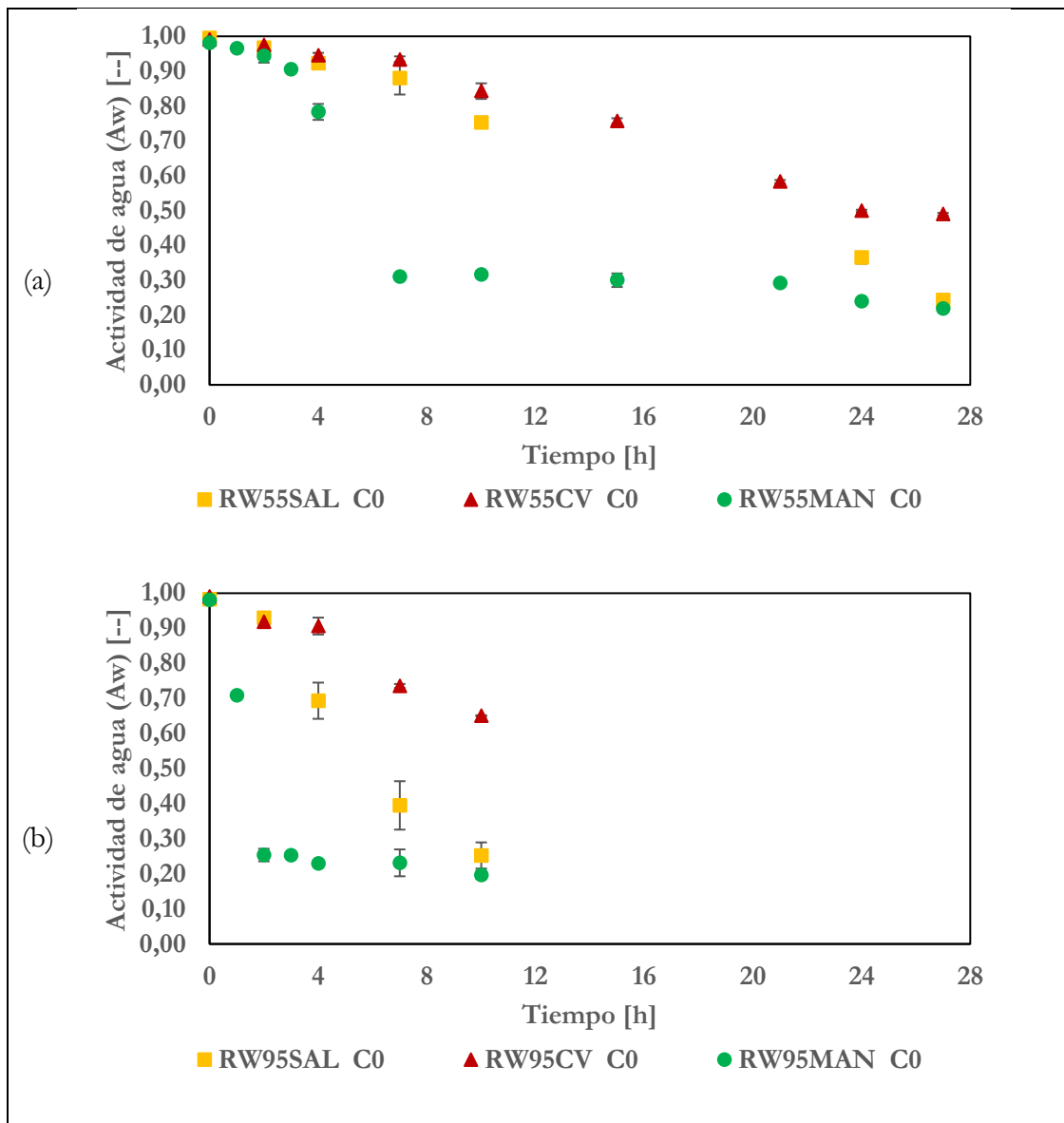


Figura 4.8 Comparación actividad de agua tejido de salmón (SAL), vacuno (CV), y manzana (MAN), en tejido fresco (C0), y tratado por congelación- descongelaación (C-D), a 55 °C; deshidratados por ventana refractiva (RW).

Se debe tener en consideración la complejidad de la matriz de los distintos alimentos, el tipo de fibra de las carnes y pescados, por lo que el proceso de deshidratación los tejidos se comportan de manera diferente.

### 4.2 Ajuste de datos experimentales a modelo de difusión (segunda ley de Fick), y modelo de difusión anómala

#### ➤ *Modelo de difusión, 2<sup>o</sup> ley de Fick*

El modelo de difusión de la segunda ley de Fick fue ajustada a los datos experimentales, en los tejidos de salmón, vacuno y manzana. El coeficiente de difusión efectivo ( $D_{\text{eff}}$ ) se muestra en la Tabla 4.1 y Tabla 7.1 (Anexo B), para temperaturas de 55 y 95 °C, en muestras frescas y con tratamiento, y deshidratadas en ventana refractiva (RW), y estufa convectiva (EC), respectivamente.

Para tejido de salmón y vacuno, deshidratado en RW y EC a 55 y 95 °C, el coeficiente de difusión efectivo aumenta con la temperatura, presentando diferencia significativa para todos los casos ( $p < 0.05$ ); sin embargo, al comparar entre muestras frescas y tratadas,  $D_{\text{eff}}$  no presenta diferencias, por las razones explicadas en la sección anterior. La magnitud de  $D_{\text{eff}}$  está en el orden de  $10^{-10} \text{ m}^2\text{s}^{-1}$ , para ambos tejidos. Para el caso del salmón, los valores son similares a los reportados por la literatura en tejidos de salmón y otros pescados (ver Tabla 2.1), mientras que para el tejido de vacuno, Trujillo et al. (2007) ha reportado valores  $D_{\text{eff}}$  de 4.84 ( $10^{-10}$ )  $\text{m}^2\text{s}^{-1}$  a 40 °C, valor similar a los obtenidos experimentalmente, donde  $D_{\text{eff}}$  está en un rango de 1.54 a 6.51 ( $10^{-10}$ )  $\text{m}^2\text{s}^{-1}$ , para RW y EC. Finalmente, la manzana presenta igual comportamiento con la temperatura, sin embargo, los coeficientes de difusión entre manzana fresca y congelada- descongela son 12.77 y 17.04 ( $10^{-10}$ )  $\text{m}^2\text{s}^{-1}$  ( $p < 0.05$ ), respectivamente, para RW a 95 °C; similar comportamiento se observó en EC. Lo anterior, posiblemente al daño en la estructura del tejido, que permitió la deshidratación en forma más rápida (Ramírez et al., 2011). Por otro lado, los coeficientes de difusión están en el orden de magnitud de  $10^{-10}$ , dentro del rango informado por diversas investigaciones, en que los valores presentados van desde los  $10^{-11}$  a  $10^{-9} \text{ m}^2\text{s}^{-1}$  (Ben Haj Said et al., 2015; Ramírez et al., 2011; Simpson et al., 2015).

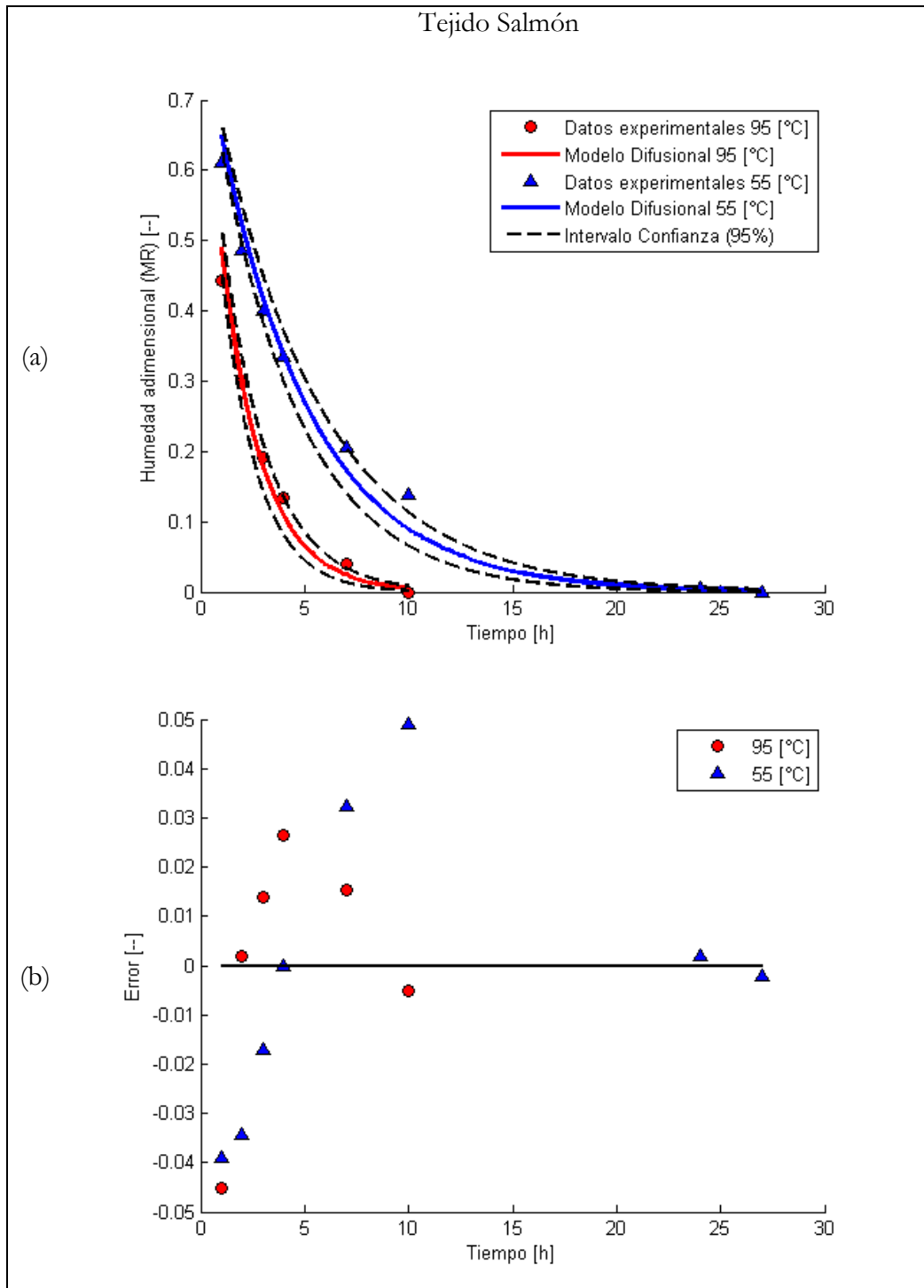


Figura 4.9 Modelo de difusión segunda ley de Fick (a) y distribución del error (b) en tejido sin tratar de salmón, deshidratado en RW a 55 y 95 °C.

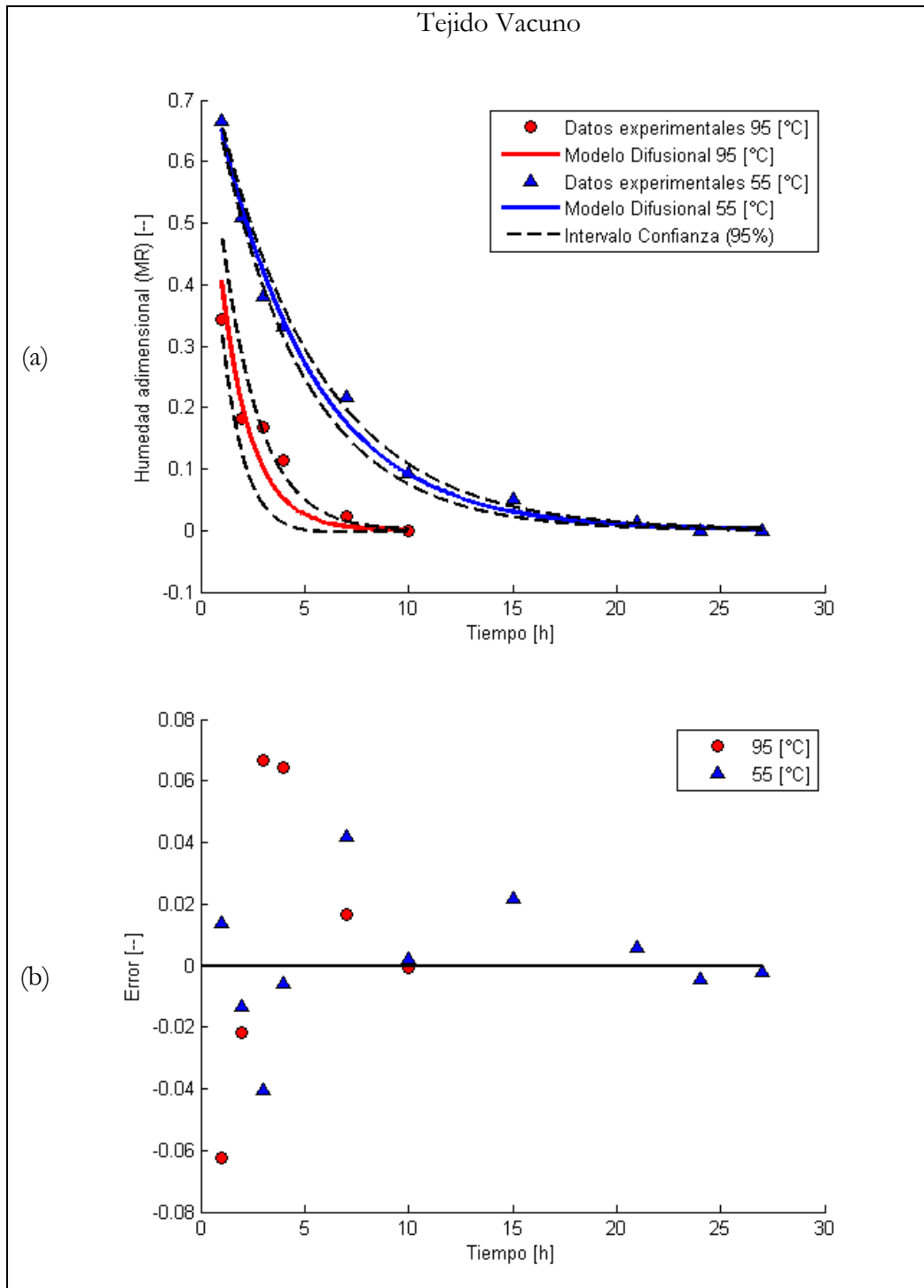


Figura 4.10 Modelo de difusión segunda ley de Fick (a) y distribución del error (b) en tejido sin tratar de vacuno, deshidratado en RW a 55 y 95 °C.

La Figura 4.9 y Figura 4.10 muestra el modelo de difusión desde la segunda ley de Fick ajustado a datos experimentales en tejido de salmón y vacuno sin tratar, deshidratados en RW a 55 y 95 °C. Los datos experimentales muestran no ajustarse bien a la segunda ley de Fick, especialmente en vacuno a 95 °C, pues el coeficiente de correlación,  $R^2$ , es 0.8297 para este caso. Adicionalmente, la Figura 4.10 (b), muestran que la distribución del error no está distribuido aleatoriamente, por lo que el modelo de difusión empleado no es adecuado (Simpson et al., 2015; Simpson et al., 2017). Sin embargo, la Figura 4.10 (b), muestra que la distribución del error sigue un comportamiento aleatorio en el tejido de vacuno a 55 °C ( $R^2$  0.9914), indicando que el modelo es una buena representación; caso contrario a lo ocurrido a 95 °C, donde no se observa un comportamiento aleatorio del error, indicando que los difusantes siguieron un camino tortuoso hasta el exterior (caso similar ocurre en tejido de salmón). Lo anterior se respalda con lo informado por Hughes et al. (2014), donde las fibras de carne pueden encogerse hasta un 60% de su volumen inicial a 90 °C (sección 4.1); dejando en manifiesto que el modelo de difusión empleado, deja consideraciones importantes fuera, como lo es el cambio de volumen de los tejidos durante la pérdida de humedad (Simpson et al., 2015). Comportamiento similar se observa para ambos tejidos con tratamiento de congelación-descongelación (Figura 7.10, Anexo B).

La Figura 4.11 muestra datos experimentales de tejido de manzana (con y sin pretratamiento) deshidratado en RW, ajustados al modelo de difusión de la segunda ley de Fick. Se observa que el ajuste no es preciso en ambos niveles de temperatura, tanto para el tejido fresco, como para el tratado, pues el  $R^2$  va desde 0.928 a 0.976 (ver Tabla 4.1). La distribución del error para 95 °C, no sigue una distribución aleatoria, incluso para el tejido con tratamiento de congelación- descongelación. Por tanto, las láminas de manzana muestran no seguir el modelo de difusión a través de la segunda ley de Fick. Comportamiento similar se presenta para estufa convectiva, en tejido fresco y tratado; y en ventana refractiva en tejido tratado (ver Figura 7.9 a Figura 7.17 Anexo B).

En vista de que el ajuste con la segunda ley de Fick, no es una representación precisa, Simpson et al. (2013) ha propuesto el modelo de difusión anómala, el cual fue ajustado a los tres tipos de tejidos en estudio (salmón, vacuno y manzana), tanto en ventana refractiva, como en estufa convectiva.

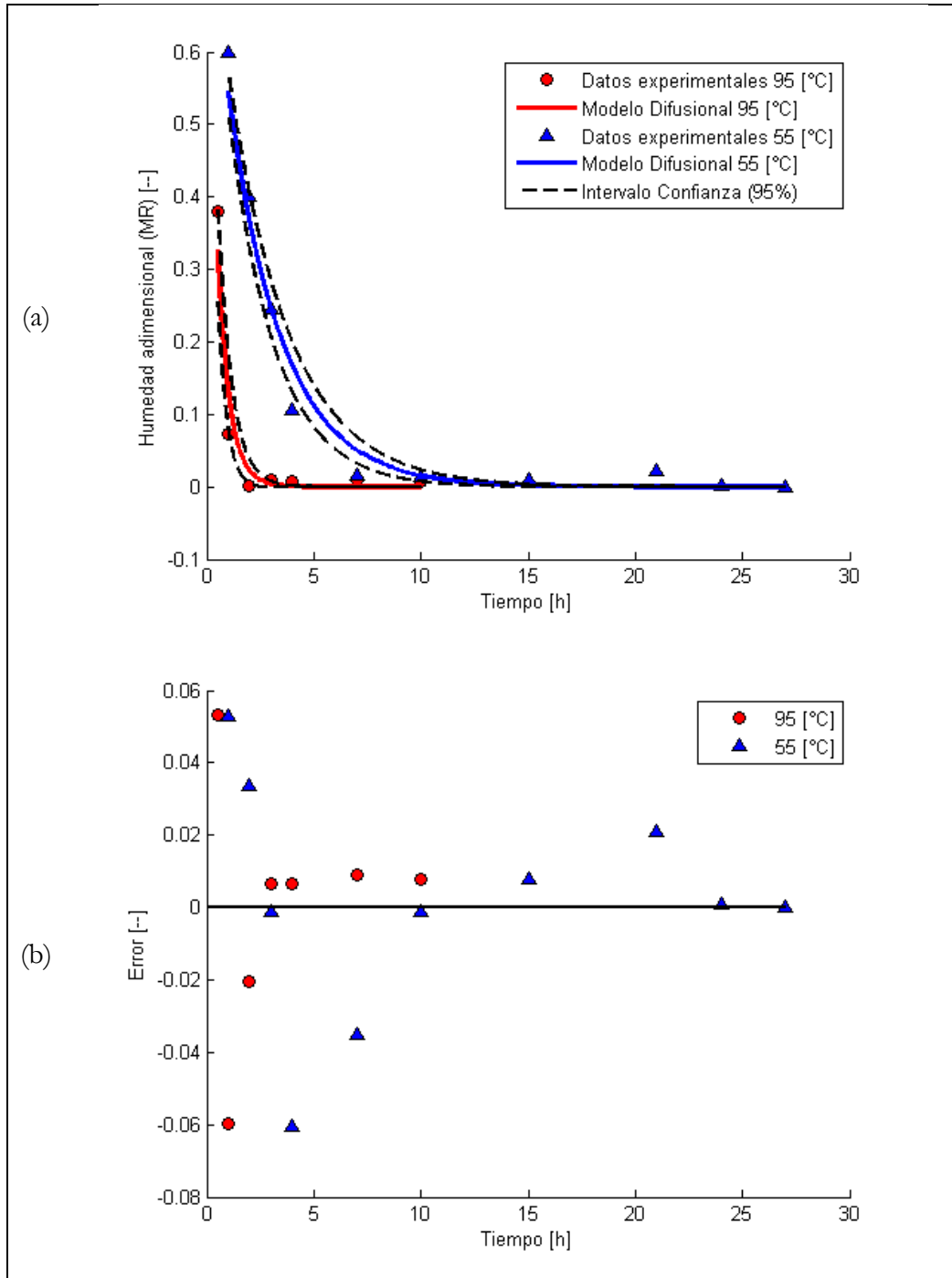


Figura 4.11 Modelo de segunda ley de Fick y distribución del error, en tejido de manzana sin tratar (a) y (c), y tratado (b) y (d); deshidratado en RW.

➤ *Modelo de difusión anómalo*

Se estudió la herramienta de cálculo fraccional, ajustando los parámetros  $\alpha$  y  $D_{\text{eff}}$  dependientes de la temperatura de deshidratación, para 55 y 95 °C, en RW y EC; sin considerar

restricción para el parámetro sobre el tiempo,  $\alpha$  (ver Tabla 7.3y Tabla 7.4). El parámetro  $\alpha$  muestra no tener una relación con la temperatura, pues en tejido de vacuno toma valores de 0.913 y 0.652 para 55 y 95 [°C], respectivamente. Situación similar ocurre en tejido de manzana, donde  $\alpha$  va desde 1.793 a 1.393, para ambos niveles de temperatura. En cuanto al coeficiente de difusión efectivo, de igual forma, no se observa una dependencia con la ley de Arrhenius, ya que en tejido de manzana deshidratado en EC,  $D_{\text{eff}}$  disminuyó desde 53.79 a 0.18 para 55 y 95 [°C], respectivamente. Lo anterior puede ser atribuido a que  $D_{\text{eff}}$  es fuertemente influenciado por  $\alpha$ , durante el ajuste de los parámetros (Ramírez et al., 2017). Comportamiento similar ha reportado Uribe et al. (2011), en deshidratación osmótica de calamar, donde al emplear el modelo de Page, el parámetros sobre el tiempo ( $n$ ), no presenta una funcionalidad con la temperatura, conclusión similar a la de Ramírez et al. (2017), en la deshidratación de láminas de manzana. Por tanto, al emplear el modelo fraccional con ambos parámetros libres ( $D_{\text{eff}}$  y  $\alpha$ ), se comporta como una ecuación empírica, tal como lo es el modelo propuesto por Page, sin representación fenomenológica del fenómeno en estudio (Simpson et al., 2017). Por otro lado, es posible observar que la suma del error al cuadrado (SSE), es menor en comparación a la segunda ley de Fick. Por ejemplo, láminas de manzanas frescas tratadas en RW, la SSE (orden de  $10^{-4}$ ) va desde 70.46 a los 2.94, mejorando el  $R^2$  desde 0.9392 a 0.9974; para la segunda ley de Fick y modelo fraccional con parámetros variables, respectivamente.

La Tabla 4.1 y Tabla 7.1, muestra que al ajustar el parámetro  $\alpha$ , este toma valores inferiores a la unidad ( $\alpha < 1$ ), para salmón y vacuno, indicando un comportamiento sub-difusivo para estos tejidos. Para el caso de la manzana, este tejido presenta un valor superior a la unidad, indicando un comportamiento súper-difusivo ( $\alpha > 1$ ), por tanto el parámetro  $\alpha$  debe estar relacionado con la microestructura del material del alimento (Simpson et al., 2015; Simpson et al., 2017). En vista de lo anterior, se ha aplicado el modelo de difusión anómala ( $\alpha$  constante) a los tres tipos de tejidos, en los dos niveles de temperatura, y por separado en las muestras congeladas- descongelaadas, y frescas.

Simpson et al. (2013) ha concluido que el parámetro sobre el tiempo,  $\alpha$ , tiene una relación con la microestructura del tejido en estudio. La Figura 4.13 muestra el uso del modelo de difusión anómala con  $\alpha$  constante, para dos niveles de temperaturas (55 y 95 °C) e igual tipo de tejido y condición inicial (fresco y tratado); las muestras fueron deshidratadas en RW, presenta un comportamiento sub-difusivo, con  $\alpha$  de 0.831 y 0.850 ( $p > 0.05$ ), para muestras frescas y tratadas por congelación- descongelaación, respectivamente; es decir las moléculas de aguas recorren un camino más tortuoso para migrar al exterior (Simpson et al., 2017). Con lo anterior, pese a que posiblemente el daño en el tejido sea

importante, el proceso de deshidratación está gobernado por la temperatura, que afecta directamente el encogimiento de las fibras, y la desnaturalización de las proteínas (Hughes et al., 2014; Vieira et al., 2009), no observándose diferencia significativa en el parámetro  $\alpha$ . Por otro lado, el salmón presenta un comportamiento sub-difusivo, con  $\alpha$  de 0.816 y 0.855 ( $p < 0.05$ ), para tejido fresco y tratado, respectivamente (ver Figura 4.12). Para este caso, se observa que hay diferencia significativa en el valor de  $\alpha$  debido, posiblemente, al daño en el tejido por la congelación lenta; sin embargo, la presencia de grasas y ácidos grasos puede afectar en la movilidad de moléculas de agua, haciendo que difunda de forma más lenta (Alizadeh et al., 2009; Djendoubi et al., 2009; Hadrich et al., 2008). Para ambos tipos de tejidos (salmón y vacuno), al emplear el modelo de difusión anómala, y por presentar un comportamiento sub-difusivo, el  $D_{\text{eff}}$  aumenta con respecto la segunda ley de Fick. Por ejemplo, tejido de vacuno fresco deshidratado en RW a 95 °C (ver Tabla 4.1 y

Tabla 4.2), el  $D_{\text{eff}}$  va desde 4.87 a 18.07 ( $10^{-10}$ )  $\text{m}^2\text{s}^{-1}$ , para la segunda ley de Fick y modelo de difusión anómalo, respectivamente. Lo anterior, porque el modelo de difusión anómala separa, adecuadamente, el carácter sub-difusivo en el parámetro  $\alpha$ , haciendo que el término  $D_{\text{eff}}$  aumente (Ramírez et al., 2017). Otro hecho importante, es que los  $D_{\text{eff}}$  presentan diferencia significativa entre muestra fresca y tratada por congelación- descongelación, indicando que para los difusantes, su movilidad es más rápida, pero queda determinada por la microestructura del tejido.

Tejido de salmón
------------------

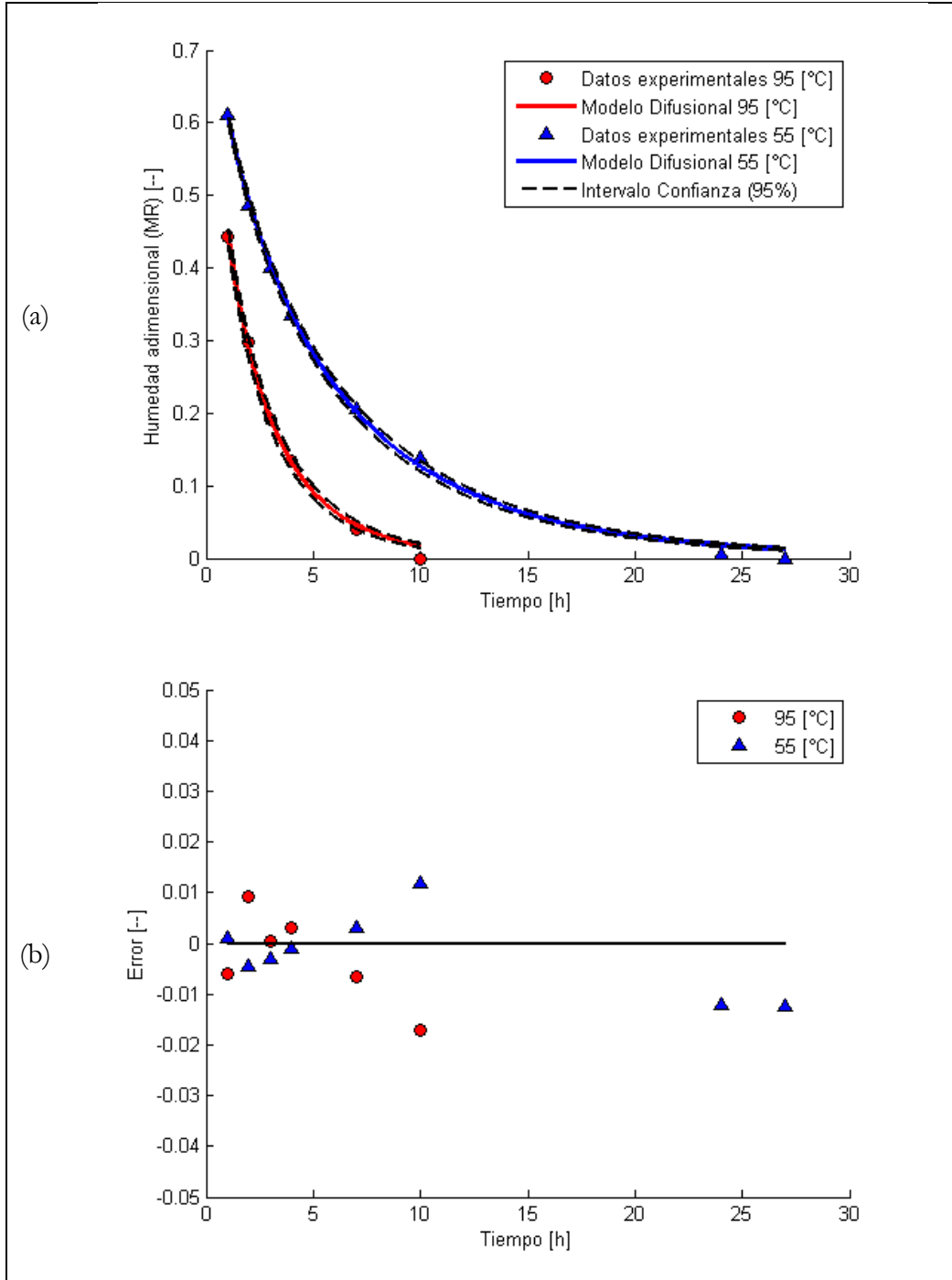


Figura 4.12 Modelo de difusión anómala con  $\alpha$  constante (a), en tejido de salmón sin tratamiento, y distribución del error (b); deshidratados en RW a 55 y 95 °C.

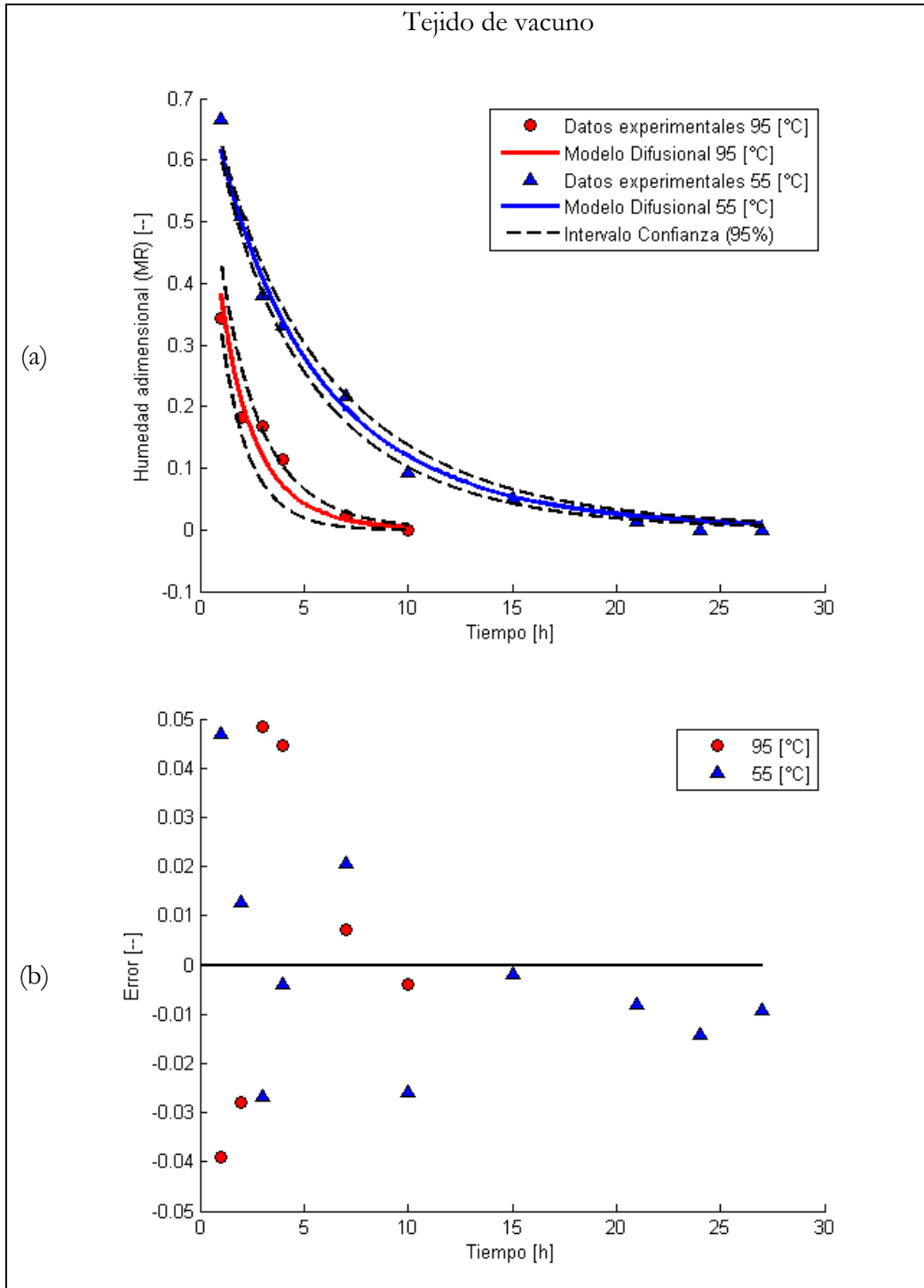


Figura 4.13 Modelo de difusión anómala con  $\alpha$  constante (a), en tejido de vacuno sin tratamiento, y distribución del error (b); deshidratados en RW a 55 y 95 °C.

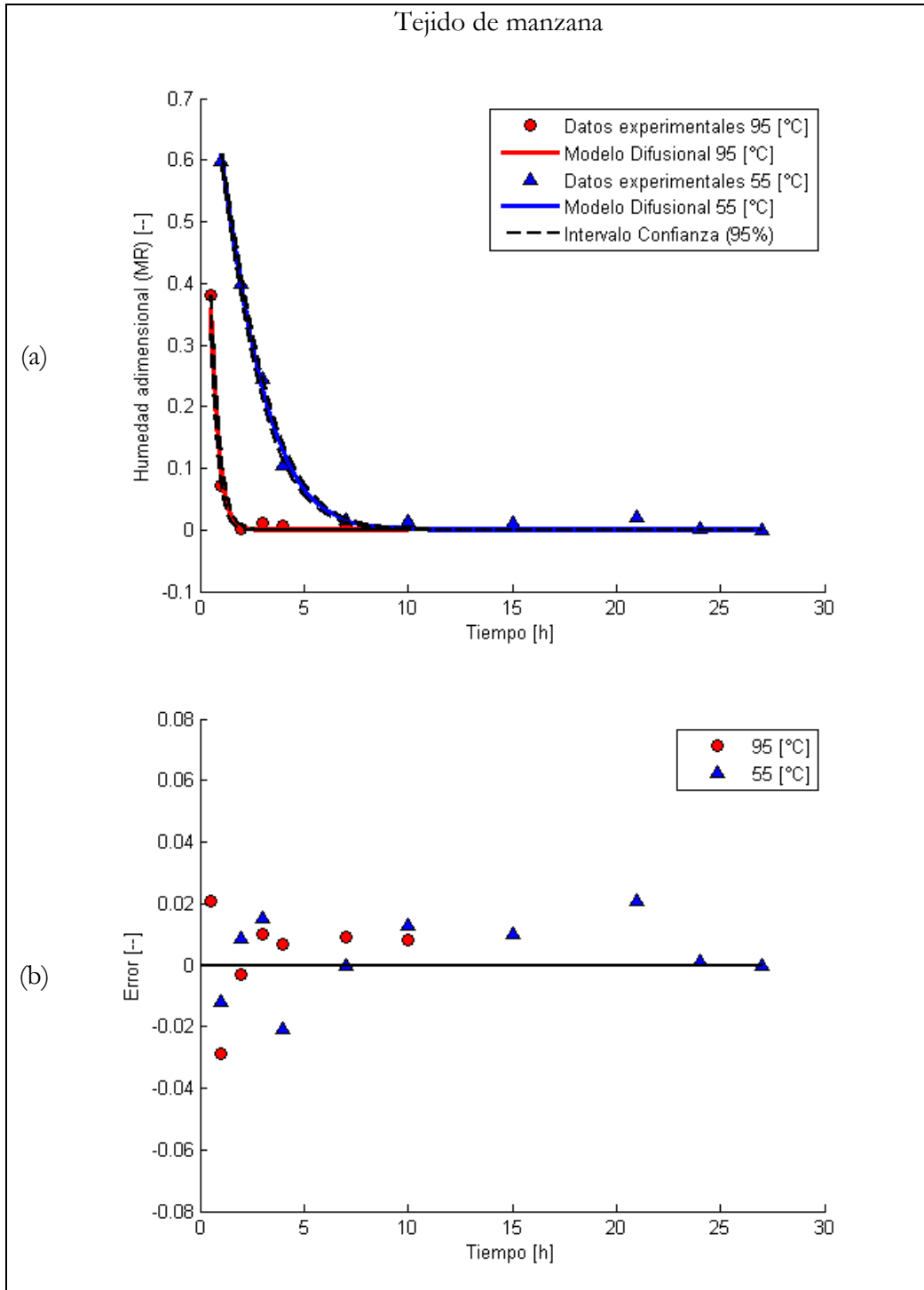


Figura 4.14 Modelo de difusión anómala con  $\alpha$  constante (a), en tejido de manzana sin tratamiento, y distribución del error (b); deshidratados en RW a 55 y 95 °C.

El modelo de difusión anómala, con el parámetro  $\alpha$  dependiente de la microestructura, se muestra en la Figura 4.14. Para el tejido de manzana, a diferencia del salmón y vacuno, presenta un comportamiento súper-difusivo ( $\alpha > 1$ ). Manzana fresca deshidratada en RW,  $\alpha$  es de 1.354; similar valor reportado por Simpson et al. (2015), en deshidratación osmótica ( $\alpha$  de 1.35), además, informa que al aplicar un campo eléctrico, la manzana se torna más homogénea, debido al fenómeno de electroporación (daño en el tejido), comportándose de forma similar a lo predicho por la segunda ley de Fick ( $\alpha \sim 1$ ). Sin embargo, experimentalmente, al tratar manzanas por congelación- descongelación, su comportamiento se tornó aún más súper-difusivo ( $\alpha$  aumenta a 1.714). Lo anterior, se podría explicar debido al posible daño en la microestructura, permitiendo que los difusantes tomen menos tiempo de ir de un punto a otro (Simpson et al., 2013), además, en el proceso de deshidratación, la reducción del espesor favorece a que se determine un valor  $\alpha$  mayor (Ramírez et al., 2017). Simpson et al. (2017) en la deshidratación de manzanas en una estufa no convectiva, reporta un resultado similar para el parámetro  $\alpha$ , de 1.72.

La Figura 4.12 a la Figura 4.14, muestra los datos experimentales ajustados al modelo de difusión anómala, en los tres tipos de tejidos sin pretratamiento. Al aplicar el modelo de difusión anómala, se observa una mejor representación de los datos, ya que el  $R^2$  aumenta y el SSE disminuye, con respecto a la segunda ley de Fick. Por ejemplo, en tejido de salmón deshidratado a 95 °C, sin tratamiento, la segunda ley de Fick arroja un valor de 0.9768 y 32.43 para  $R^2$  y SSE (magnitud  $10^{-4}$ ), respectivamente (ver Tabla 4.1); mientras que por medio del modelo de difusión anómala,  $R^2$  aumentó a 0.9966 y el SSE disminuyó a 4.73 (ver

Tabla 4.2). Investigaciones previas concluyen, de igual manera, que el modelo de difusión anómalo presenta mejor ajuste experimental y reduce aún más el error de lo predicho por el modelo y los datos experimentales (Ramírez et al., 2017; Simpson et al., 2015; Simpson et al., 2017). Lo anterior se evidencia, de igual forma, en la Figura 4.12 (b) a la Figura 4.14 (b), pues se observa una distribución aleatoria del error, y más cercana a cero. En todos los tejidos tratados por congelación- descongelación deshidratados en RW (ver Figura 7.18 a la Figura 7.20); y tejidos frescos y tratados por congelación- descongelación, deshidratados en estufa convectiva (ver Figura 7.21 a la Figura 7.26), se observó similar comportamiento (ver Tabla 7.1 y Tabla 7.2).

**Tabla 4.1 Coeficiente de determinación ( $R^2$ ), suma del error cuadrático (SSE), y coeficiente de difusión efectivo (Deff); segunda ley de Fick en método de deshidratación por ventana refractiva (RW).**

2° ley de Fick, Ventana Refractiva (RW)	
Control (C0)	Congelado- Descongelado (C-D)

	T°	R <sup>2</sup>	SSE*10 <sup>-4</sup>	Deff*10 <sup>-10</sup> m <sup>2</sup> s <sup>-1</sup>	R <sup>2</sup>	SSE*10 <sup>-4</sup>	Deff*10 <sup>-10</sup> m <sup>2</sup> s <sup>-1</sup>
Salmón (SAL)	55	0.9816	64.13	1.553 <sup>a,A</sup> ± 0.188	0.9914	31.98	1.632 <sup>a,A</sup> ± 0.139
	95	0.9768	32.43	3.553 <sup>b,A</sup> ± 0.439	0.9794	25.73	4.021 <sup>b,A</sup> ± 0.458
Vacuno (CV)	55	0.9914	43.91	1.540 <sup>a,A</sup> ± 0.127	0.9971	14.02	1.642 <sup>a,A</sup> ± 0.077
	95	0.8297	132.04	4.877 <sup>b,A</sup> ± 1.365	0.6309	163.64	6.256 <sup>b,A</sup> ± 2.184
Manzana (MAN)	55	0.9761	93.64	2.793 <sup>a,A</sup> ± 0.366	0.9287	236.33	3.768 <sup>a,A</sup> ± 0.843
	95	0.9392	70.46	12.779 <sup>b,A</sup> ± 2.793	0.9079	93.73	17.042 <sup>b,B</sup> ± 3.534

Letra minúscula: diferencia entre temperatura para un mismo tejido.

Letra mayúscula: diferencia entre pretratamientos (C0, C-D) en un mismo tejido y nivel de temperatura.

**Tabla 4.2 Coeficiente de determinación (R<sup>2</sup>), suma del error cuadrático (SSE), coeficiente de difusión efectivo (Deff), y parámetro alpha (α); modelo de difusión anómala en método de deshidratación por ventana refractiva (RW).**

Modelo de difusión anómala (α cte.), Ventana Refractiva (RW)						
Control (C0)						
	T°	R <sup>2</sup>	SSE*10 <sup>-4</sup>	Deff*10 <sup>-10</sup> m <sup>2</sup> s <sup>-1</sup>	α	
Salmón (SAL)	55	0.9986	4.81	9.027 <sup>a,A</sup> ± 0.280	0.816 <sup>A</sup> ± 0.088	
	95	0.9966	4.73	18.695 <sup>b,A</sup> ± 0.834		
Vacuno (CV)	55	0.9933	33.44	6.515 <sup>a,A</sup> ± 0.514	0.831 <sup>A</sup> ± 0.093	
	95	0.9136	67.05	18.077 <sup>b,A</sup> ± 3.410		
Manzana (MAN)	55	0.9959	15.88	0.110 <sup>a,A</sup> ± 0.007	1.354 <sup>A</sup> ± 0.104	
	95	0.9863	15.84	0.805 <sup>b,A</sup> ± 0.089		
Congelado- Descongelado (C-D)						
	T°	R <sup>2</sup>	SSE*10 <sup>-4</sup>	Deff*10 <sup>-10</sup> m <sup>2</sup> s <sup>-1</sup>	α	
Salmón (SAL)	55	0.9984	6.00	6.521 <sup>a,B</sup> ± 0.230	0.855 <sup>B</sup> ± 0.191	
	95	0.9981	2.31	14.720 <sup>b,B</sup> ± 0.483		
Vacuno (CV)	55	0.9983	27.73	8.371 <sup>a,B</sup> ± 0.515	0.850 <sup>A</sup> ± 0.145	
	95	0.8048	86.01	26.556 <sup>b,B</sup> ± 6.272		
Manzana (MAN)	55	0.9973	8.79	0.006 <sup>a,B</sup> ± 0.000	1.714 <sup>B</sup> ± 0.096	
	95	0.9912	8.94	0.074 <sup>b,B</sup> ± 0.002		

Letra minúscula: diferencia entre temperatura para un mismo tejido.

Letra mayúscula: diferencia entre pretratamientos (C0, C-D) en un mismo tejido y nivel de temperatura.

## 4.3 Análisis de calidad final

### 4.3.1 Color

El color en el producto de salmón es uno de los parámetros más relevantes de calidad, debido a su característico color anaranjado (Ortiz et al., 2013). En la Figura 4.15 (a), se muestra el cambio de color ( $\Delta E$ ), en muestras de salmón fresco y congelado, deshidratado en RW y EC, a 55 y 95 °C, respectivamente. Se observa que, al evaluar el efecto de la temperatura en cada tratamiento, EC C0, RW C0, y RW C-D; presentan diferencia significativa ( $p < 0.05$ ), siendo en RW C0, la diferencia más notoria, ya que el  $\Delta E$  va desde 12.40 a 18.73, para 55 y 95 °C, respectivamente (ver Tabla 4.3). A diferencia de lo informado por Ortiz et al. (2013), el parámetros colorimétrico  $L^*$ , se mantiene con la temperatura; y  $b^*$  aumentan con la temperatura, provocando un menor oscurecimiento de las muestras después de ser tratadas térmicamente (ver Figura 7.27). Por otro lado, el color anaranjado dado por el carotenoide astaxanthin (Ortiz et al., 2013), al ser tratado térmicamente, se observó que las muestras aumentaban su coloración naranja característica, especialmente en muestras congeladas-descongeladas tratadas a 55 [°C]. Lo anterior, se evaluó por el parámetro  $a^*$ , ya que aumenta de 8.91 a 17.04, para RW C-D (caso más notorio); sin embargo, no se observa una clara tendencia de la variación de este carotenoide con la temperatura y/o el pretratamiento.

En el tratamiento de muestras de vacuno, experimentalmente se observa que RW C0, RW C-D, y EC C-D; presentan diferencia significativa ( $p < 0.05$ ) por efecto de la temperatura de tratamiento. Por otro lado, sólo a 55 °C se observó diferencia significativa ( $p < 0.05$ ) por efecto del pretratamiento, tanto en el método de RW y EC (ver Tabla 4.3). El color rojo característico de la carne de vacuno, está dado por la proteína Oximoglobina, que presenta inestabilidad al aumentar la temperatura, lo que provoca que se oxide favoreciendo el pardeamiento de la carne al formarse Metmioglobina (Jeremiah and Gibson, 2001; O'Dowd et al., 2013). Lo anterior se observa en la Figura 7.28 (Anexo D), donde el parámetro  $L^*$  se reduce en todos los tratamiento, indicando que ocurre un oscurecimiento de la fibra. Jeremiah and Gibson (2001), ha señalado que los parámetros colorimétricos  $a^*$  y  $b^*$ , presentan una dependencia con la temperatura, disminuyendo de valor al aumentar la temperatura;

experimentalmente se observó similar comportamiento, ya que  $a^*$  y  $b^*$  se reducen considerablemente en todos los tratamientos.

En tejido de manzana, se observa diferencia significativa ( $p < 0.05$ ) por efecto de la temperatura de tratamiento en RW C-D, EC C0, y EC C-D; sin embargo, no hay diferencia significativa ( $p > 0.05$ ) en RW C0, por efecto de la temperatura (55 y 95 °C). Resultado concordante con lo informado con diversas investigaciones de RW, que señalan que esta técnica preserva de buena manera el color de alimentos después de ser procesados (Abonyi et al., 2002; Caparino et al., 2012; Nindo et al., 2007; Pavan et al., 2012); sin embargo Ortiz-Jerez et al. (2015), argumenta que este efecto se debe a la separación que hay entre la muestra y el film, y no por los principios de la “ventana refractiva”. Se observa que hay diferencia significativa por efecto del pretratamiento, tanto en RW y EC, con un menor  $\Delta E$  en las muestras C0, posiblemente a que poseen un contenido mayor de pectinas, debido a que su microestructura celular no ha colapsado a diferencia de las muestras tratadas por C-D (Huang et al., 2012).

Finalmente, al comparar el efecto del método empleado para la deshidratación de tejidos salmón o vacuno, no se observa una tendencia o diferencia que indique que método es mejor. Por ejemplo, en tejido de salmón tratado a 95 °C, no se observó diferencia entre muestras frescas (C0), pero sí en muestras tratadas (C-D); caso similar ocurre en tejido de vacuno, donde a 95 °C, no se observa diferencia significativa en ningún caso. Para la manzana, se observa que RW55 C0 y RW 95 C0, no presentaron diferencia significativa en el  $\Delta E$ , por tanto utilizar altas temperaturas reduce el tiempo de tratamiento con resultados similares, comprobando que RW es una técnica que preserva el color en el producto final, tal como lo ha mencionado diversos autores (Abonyi et al., 2002; Caparino et al., 2012; Celli et al., 2016; Nindo et al., 2007; Ochoa-Martínez et al., 2012; Ortiz-Jerez et al., 2015; Pavan et al., 2012; Topuz et al., 2011).

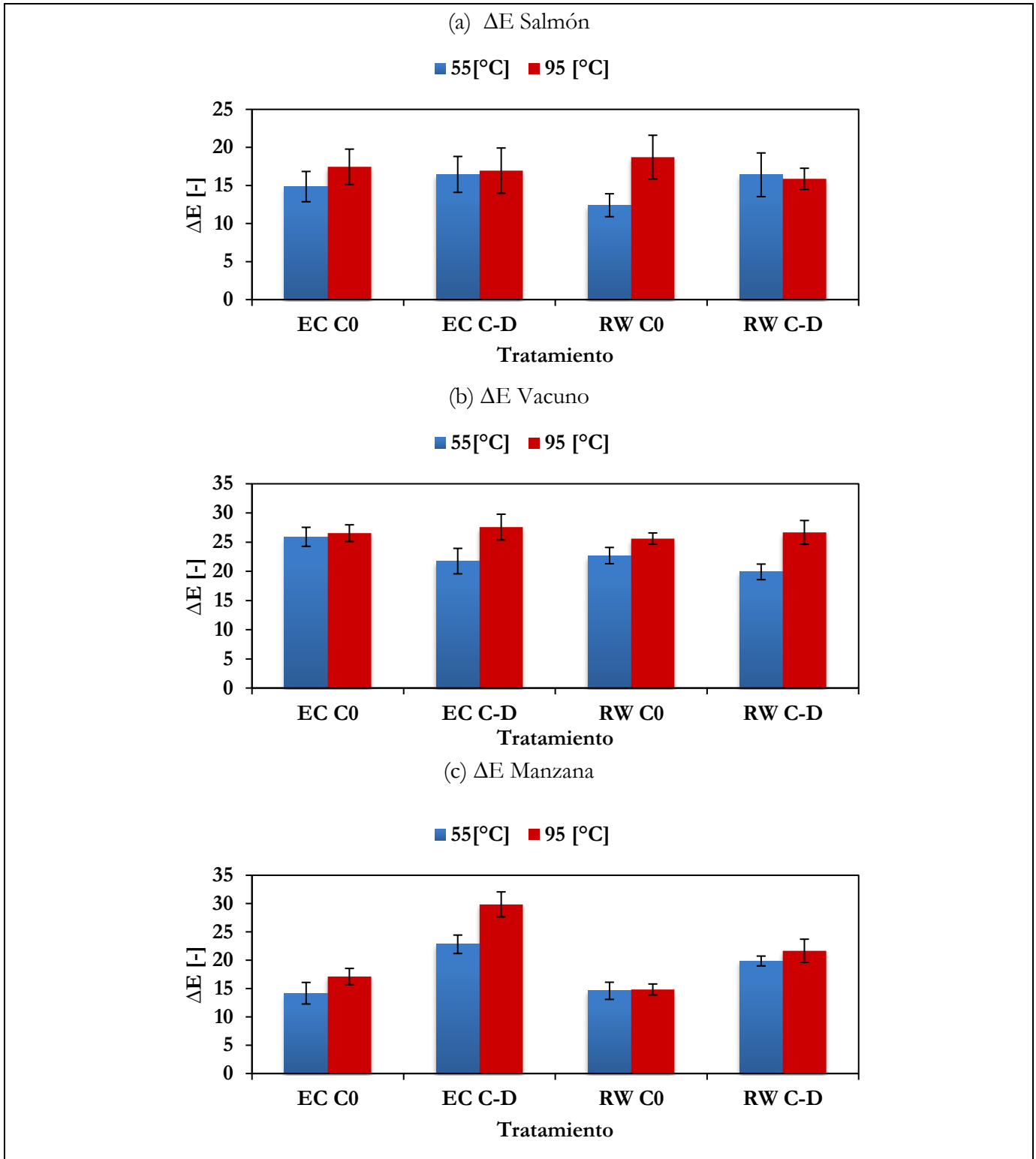


Figura 4.15 Cambio de color,  $\Delta E$ , en tejido de salmón, vacuno y manzana, en muestras frescas y congeladas- descongeladas, deshidratadas en RW y EC.

Tabla 4.3 Cambio de color,  $\Delta E$ , en tejido de salmón, vacuno y manzana, en muestras frescas y congeladas- descongelaadas, deshidratadas en RW y EC.

Tejido	T° [°C]	Ventana Refractiva (RW)		Estufa Convectiva (EC)	
		C0	C-D	C0	C-D
Salmón (SAL)	55	12.40 <sup>a,A,1</sup> ± 1.51	16.40 <sup>a,B,1</sup> ± 1.99	14.85 <sup>a,A,2</sup> ± 1.99	16.45 <sup>a,B,1</sup> ± 2.36
	95	18.73 <sup>b,A,1</sup> ± 2.87	15.88 <sup>b,B,1</sup> ± 1.38	17.45 <sup>b,A,1</sup> ± 2.33	16.95 <sup>a,A,2</sup> ± 2.98
Vacuno (CV)	55	22.70 <sup>a,A,1</sup> ± 1.40	25.61 <sup>a,B,1</sup> ± 2.65	21.75 <sup>a,A,2</sup> ± 2.18	25.91 <sup>a,B,2</sup> ± 1.63
	95	19.91 <sup>b,A,1</sup> ± 1.34	26.67 <sup>b,A,1</sup> ± 3.37	26.53 <sup>a,A,1</sup> ± 2.92	27.58 <sup>b,A,1</sup> ± 4.07
Manzana (MAN)	55	14.60 <sup>a,A,1</sup> ± 1.52	19.87 <sup>a,B,1</sup> ± 0.87	14.18 <sup>a,A,1</sup> ± 1.91	22.82 <sup>a,B,2</sup> ± 1.63
	95	14.84 <sup>a,A,1</sup> ± 0.98	21.68 <sup>b,B,1</sup> ± 2.04	17.12 <sup>b,A,2</sup> ± 1.43	29.86 <sup>b,B,2</sup> ± 2.21

Letra minúscula: diferencia entre temperatura (fila).

Letra mayúscula: diferencia entre C0 y C-D en un mismo método, RW o EC, a igual nivel de temperatura (columna).

Número: Diferencia entre método para una misma temperatura y C0 o C-D (columna).

La diferencia significativa está hecha por tejido.

N = 20, por cada tratamiento y nivel.

### 4.3.2 Textura

El tejido muscular del salmón está compuesto, principalmente, por miofibrillas, sarcoplasma, y tejido conectivo (colágeno), siendo el principal factor que modifica la textura, la desnaturalización de las proteínas de las miofibrillas y el daño al tejido conectivo (Ortiz et al., 2013). Experimentalmente (ver Figura 4.16), se han obtenido valores de textura que oscilan en 0.141 Nmm<sup>-1</sup> obtenidos en RW C0 a 55 °C a 0.281 Nmm<sup>-1</sup> en RW C0 a 95 °C; no se observó diferencia significativa ( $p > 0.05$ ) por efecto del pretratamiento (C0 y C-D), y sin una tendencia clara del efecto de la temperatura en la firmeza (ver Tabla 4.4). Estos valores están muy por debajo de los informados por Ortiz et al. (2013), donde se alcanzan valores cercanos a los 80 Nmm<sup>-1</sup>, para un tratamiento de 60 °C (el espesor de las muestras fue de 10 mm, el doble de lo utilizado en la presente investigación). Sun (2005), ha mostrado que el musculo de salmón tiene un 34% menos de tejido conectivo, en comparación a tejido de pollo, y posiblemente, la menor cantidad de tejido conectivo, además de la desnaturalización de las proteínas, provoque que el producto final tenga una baja firmeza, haciendo un producto quebradizo y frágil. Análisis de punción en diferentes “snack” ha mostrado que la fuerza máxima por muestra está entre 5 a 10 N para un producto comercial (Paula and Conti-Silva, 2014), valor superior a los obtenidos, pues en 10 muestras de salmón deshidratados se alcanzan valores que oscilan entre los 4 a 7 N.

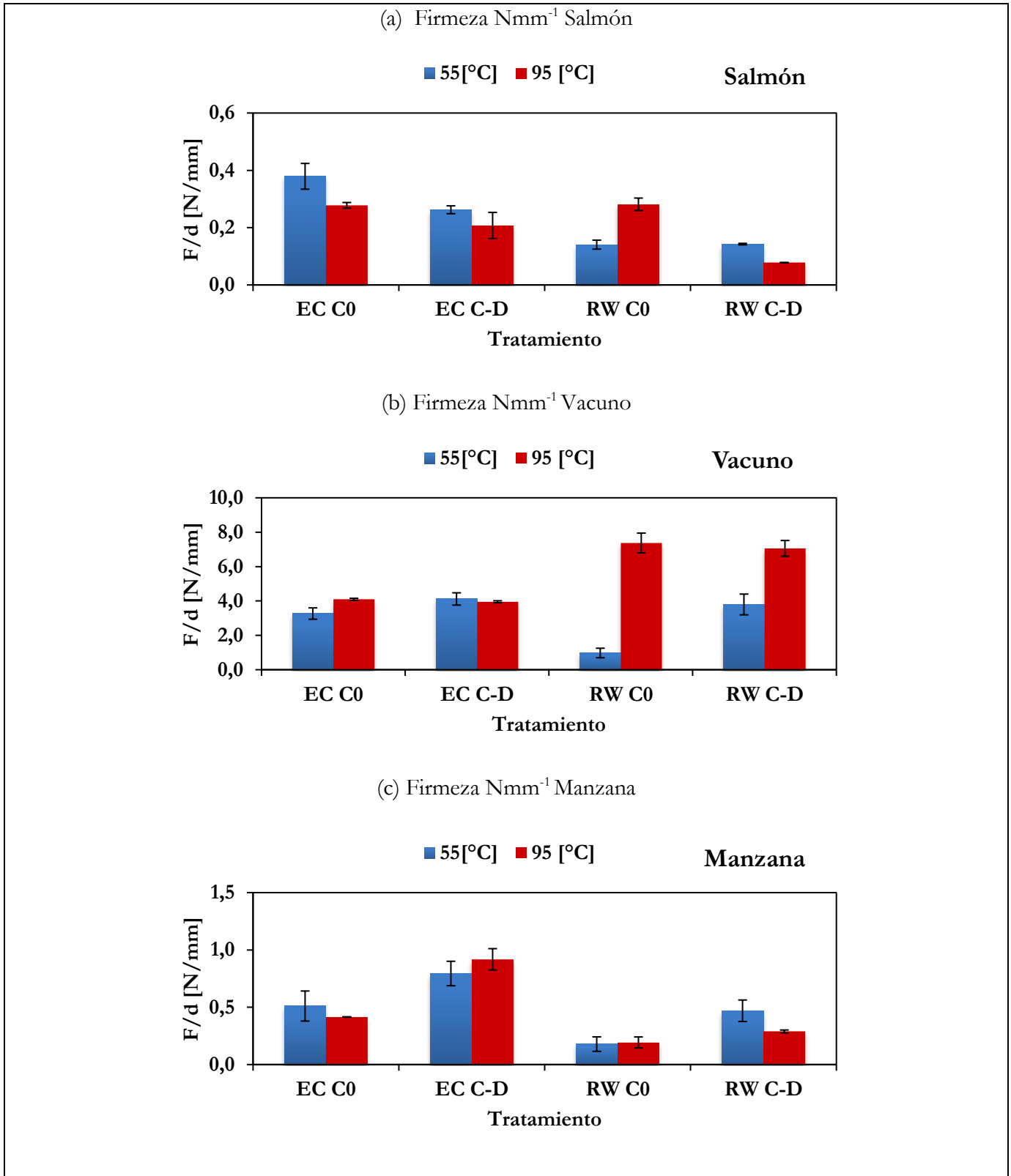


Figura 4.16 Análisis de textura  $\text{Nmm}^{-1}$ , en tejido de salmón, vacuno y manzana, en muestras frescas y congeladas- descongeladas, deshidratadas en RW y EC, a 55 y 95 °C.

En tejido de vacuno, experimentalmente se obtuvieron altos valores de fuerzas aplicadas en el ensayo de firmeza. Por ejemplo, para RW C0 deshidratado a 95 °C se obtuvieron valores de 94.8 N caso similar en EC C-D deshidratada a 55 °C, donde la fuerza máxima fue de 112.9 N; valores muy superiores a los de un producto deshidratado tradicional (“snack”), haciendo del vacuno deshidratado un producto duro, debido al encogimiento excesivo de las miofibrillas a 55 y 95 °C, respectivamente (Hughes et al., 2014). De la Tabla 4.4, se observa que las láminas de vacuno deshidratadas aumentan la firmeza al aumentar la temperatura de 55 a 95 °C, sin embargo, no se observan diferencias significativas para las láminas deshidratadas por el método EC; de igual forma, para evaluar el efecto del pretratamiento ( $p>0.05$ ). Comparando los métodos de deshidratación empleados, se observa diferencia significativa en todos los casos, a excepción de muestras tratadas y deshidratadas a 55 °C; RW C0 a 55 °C mostró tener la menor firmeza de todos los ensayos. En tejido de manzana, el análisis de textura no mostró tener una dependencia con la temperatura ( $p>0.05$ ). El efecto del pretratamiento mostró tener un efecto al observarse diferencia significativa entre muestras frescas (C0) y tratadas (C-D), donde la firmeza aumenta por este efecto; por ejemplo para EC a 95 °C, mostró aumentar de 0.415 a 0.918 Nmm<sup>-1</sup>, para C0 y C-D, respectivamente. Lo anterior, se debe posiblemente que las muestras tratadas pierden rigidez (aumentan elasticidad) por el daño en la pared celular (Huang et al., 2012; Velickova et al., 2014).

**Tabla 4.4 Análisis de textura [Nmm<sup>-1</sup>], en tejido de salmón, vacuno y manzana, en muestras frescas y congeladas- descongeladas, deshidratadas en RW y EC.**

Tejido	Ventana Refractiva (RW)			Estufa Convectiva (EC)		
	C0	C-D		C0	C-D	
Salmón (SAL)	55	0.141 <sup>a,A,1</sup> ± 0.016	0.143 <sup>a,A,1</sup> ± 0.003	0.379 <sup>a,A,2</sup> ± 0.045	0.262 <sup>a,A,2</sup> ± 0.014	
	95	0.281 <sup>a,A,1</sup> ± 0.022	0.078 <sup>b,A,1</sup> ± 0.001	0.278 <sup>b,A,1</sup> ± 0.010	0.208 <sup>a,A,2</sup> ± 0.045	
Vacuno (CV)	55	0.974 <sup>a,A,1</sup> ± 0.276	3.797 <sup>a,B,1</sup> ± 0.604	3.268 <sup>a,A,2</sup> ± 0.330	4.117 <sup>a,A,1</sup> ± 0.358	
	95	7.373 <sup>b,A,1</sup> ± 0.574	7.059 <sup>b,A,1</sup> ± 0.457	4.094 <sup>a,A,2</sup> ± 0.062	3.953 <sup>a,A,2</sup> ± 0.060	
Manzana (MAN)	55	0.179 <sup>a,A,1</sup> ± 0.063	0.469 <sup>a,B,1</sup> ± 0.094	0.511 <sup>a,A,2</sup> ± 0.131	0.795 <sup>a,B,2</sup> ± 0.107	
	95	0.193 <sup>a,A,1</sup> ± 0.048	0.289 <sup>a,B,1</sup> ± 0.013	0.415 <sup>b,A,1</sup> ± 0.002	0.918 <sup>a,B,2</sup> ± 0.093	

Letra minúscula: diferencia entre temperatura (fila).

Letra mayúscula: diferencia entre C0 y C-D en un mismo método, RW o EC (columna).

Número: Diferencia entre método para una misma temperatura y C0 o C-D (columna).

La diferencia significativa está hecha por tejido.

N = 3, por cada tratamiento y nivel.

## 5. Conclusiones

En base a los resultados experimentales, la aplicación de pulsos eléctricos (PEF) no fue efectivo en alimentos sólidos, como el salmón; pues se requieren de la utilización de corrientes superiores a los 20 A para provocar la electroporación de las células y acelerar los procesos de transferencia de masa. El pretratamiento de congelación- descongelación, mostró no ser efectivo en tejido de vacuno y salmón, debido a que estos tejidos se afectan mayormente por la temperatura (encogimiento y desnaturalización de proteínas); sin embargo, el tejido de manzana y su estructura rígida, muestra acelerar los procesos de deshidratación con la aplicación de este pretratamiento.

El uso del modelo de difusión a través de la segunda ley de Fick, mostró no ser una buena representación fenomenológica de los datos, no así el modelo de difusión anómalo ( $\alpha$  constante), ya que se reduce el error de predicción, aumenta el coeficiente de correlación, y tiene sentido físico (coeficiente de difusión sigue ley de Arrhenius), a diferencia del uso del mismo modelo con el parámetro ( $\alpha$ ) libre.

Parámetros de calidad, como el cambio de color,  $\Delta E$ , y textura; no muestran una tendencia con la temperatura y el pretratamiento, en tejidos de salmón y vacuno, no observándose si la técnica de ventana refractiva es superior a otras técnicas como la estufa convectiva. Sin embargo, para tejidos de manzana se obtuvieron valores similares de  $\Delta E$  para 55 y 95 [°C]. Por tanto, la RW es una técnica efectiva en la deshidratación de matrices vegetales que no presentan altas interacciones energéticas durante el secado, y no se afectan por desnaturalización de proteínas y encogimiento de fibras, como lo es el vacuno y el salmón.

## 6. Referencias

- Abonyi, B.I., FENG, H., Tang, J., Edwards, C.G., Chew, B.P., Mattinson, D.S., Fellman, J.K., 2002. Quality Retention in Strawberry and Carrot Purees Dried with Refractance Window™ System. *J Food Science* 67 (3), 1051–1056.
- Ade-Omowaye, B., Angersbach, A., Taiwo, K.A., Knorr, D., 2001. Use of pulsed electric field pre-treatment to improve dehydration characteristics of plant based foods. *Trends in Food Science & Technology* 12 (8), 285–295.
- Alizadeh, E., Chapleau, N., de-Lamballerie, M., Le-Bail, A., 2009. Impact of Freezing Process on Salt Diffusivity of Seafood: Application to Salmon (*Salmo salar*) Using Conventional and Pressure Shift Freezing. *Food Bioprocess Technol* 2 (3), 257–262.
- Alizadeh, E., Chapleau, N., Lamballerie, M. de, Le bail, A., 2007. Effects of freezing and thawing processes on the quality of Atlantic salmon (*Salmo salar*) fillets. *Journal of food science* 72 (5), E279-84.
- Amami, E., Vorobiev, E., Kechaou, N., 2006. Modelling of mass transfer during osmotic dehydration of apple tissue pre-treated by pulsed electric field. *LWT - Food Science and Technology* 39 (9), 1014–1021.
- Baeghbali, V., Niakousari, M., Farahnaky, A., 2016. Refractance Window drying of pomegranate juice: Quality retention and energy efficiency. *LWT - Food Science and Technology* 66, 34–40.
- Barbosa-Cánovas, G.V., Raso, J., Heinz, V. (Eds.), 2006. *Pulsed Electric Fields Technology for the Food Industry*. Springer US, Boston, MA.
- Ben Haj Said, L., Bellagha, S., Allaf, K., 2015. Measurements of texture, sorption isotherms and drying/rehydration kinetics of dehydrofrozen-textured apple. *Journal of Food Engineering* 165, 22–33.
- Caparino, O.A., Sablani, S.S., Tang, J., Syamaladevi, R.M., Nindo, C.I., 2013. Water Sorption, Glass Transition, and Microstructures of Refractance Window– and Freeze-Dried Mango (Philippine “Carabao” Var.) Powder. *Drying Technology* 31 (16), 1969–1978.
- Caparino, O.A., Tang, J., Nindo, C.I., Sablani, S.S., Powers, J.R., Fellman, J.K., 2012. Effect of drying methods on the physical properties and microstructures of mango (Philippine ‘Carabao’ var.) powder. *Journal of Food Engineering* 111 (1), 135–148.
- Celli, G.B., Khattab, R., Ghanem, A., Brooks, M.S.-L., 2016. Refractance Window drying of haskap berry--preliminary results on anthocyanin retention and physicochemical properties. *Food chemistry* 194, 218–221.
- Cheng, J.-H., Sun, D.-W., Han, Z., Zeng, X.-A., 2014. Texture and Structure Measurements and Analyses for Evaluation of Fish and Fillet Freshness Quality: A Review. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety* 13 (1), 52–61.
- Corzo, O., Bracho, N., 2007. Determination of water effective diffusion coefficient of sardine sheets during vacuum pulse osmotic dehydration. *LWT - Food Science and Technology* 40 (8), 1452–1458.
- Crank J., 1975. The mathematics of diffusion. *Polymer* 16 (11), 855.
- Delgado, A.E., Sun, D.-W., 2002. Desorption isotherms for cooked and cured beef and pork. *Journal of Food Engineering* 51 (2), 163–170.

- Djendoubi, N., Boudhrioua, N., Bonazzi, C., Kechaou, N., 2009. Drying of sardine muscles: Experimental and mathematical investigations. *Food and Bioproducts Processing* 87 (2), 115–123.
- Faridnia, F., Ma, Q.L., Bremer, P.J., Burritt, D.J., Hamid, N., Oey, I., 2015. Effect of freezing as pre-treatment prior to pulsed electric field processing on quality traits of beef muscles. *Innovative Food Science & Emerging Technologies* 29, 31–40.
- Fennema, O.R., Damodaran, S., Parkin, K.L., 2017. *Fennema's food chemistry*, Fifth edition ed. CRC Press, Boca Raton, pages cm.
- Gallart-Jornet, L., Barat, J.M., Rustad, T., Erikson, U., Escriche, I., Fito, P., 2007. Influence of brine concentration on Atlantic salmon fillet salting. *Journal of Food Engineering* 80 (1), 267–275.
- Hadrich, B., Boudhrioua, N., Kechaou, N., 2008. Experimental and mathematical study of desorption isotherms of Tunisian Sardine (*Sardinella aurita*). *Food and Bioproducts Processing* 86 (4), 242–247.
- Houghton, P.N., Lyng, J.G., Cronin, D.A., Morgan, D.J., Fanning, S., Whyte, P., 2012. Efficacy of pulsed electric fields for the inactivation of indicator microorganisms and foodborne pathogens in liquids and raw chicken. *Food Control* 25 (1), 131–135.
- Huang, L.-l., Zhang, M., Wang, L.-p., Mujumdar, A.S., Sun, D.-f., 2012. Influence of combination drying methods on composition, texture, aroma and microstructure of apple slices. *LWT - Food Science and Technology* 47 (1), 183–188.
- Hughes, J.M., Oiseth, S.K., Purslow, P.P., Warner, R.D., 2014. A structural approach to understanding the interactions between colour, water-holding capacity and tenderness. *Meat Science* 98 (3), 520–532.
- IGLESIAS, H.A., Cherife, J., 1976. Equilibrium moisture contents of air dried beef. Dependence on drying temperature. *International Journal of Food Science & Technology* 11 (6), 565–573.
- Jain, D., Pathare, P.B., 2007. Study the drying kinetics of open sun drying of fish. *Journal of Food Engineering* 78 (4), 1315–1319.
- Jeremiah, L., Gibson, L., 2001. The influence of storage temperature and storage time on color stability, retail properties and case-life of retail-ready beef. *Food Research International* 34 (9), 815–826.
- Kaale, L.D., Eikevik, T.M., 2013. A histological study of the microstructure sizes of the red and white muscles of Atlantic salmon (*Salmo salar*) fillets during superchilling process and storage. *Journal of Food Engineering* 114 (2), 242–248.
- Kaymak-Ertekin, F., Gedik, A., 2004. Sorption isotherms and isosteric heat of sorption for grapes, apricots, apples and potatoes. *LWT - Food Science and Technology* 37 (4), 429–438.
- Kilic, A., 2009. Low temperature and high velocity (LTHV) application in drying: Characteristics and effects on the fish quality. *Journal of Food Engineering* 91 (1), 173–182.
- Lebovka, N.I., Shynkaryk, N.V., Vorobiev, E., 2007. Pulsed electric field enhanced drying of potato tissue. *Journal of Food Engineering* 78 (2), 606–613.
- Leygonie, C., Britz, T.J., Hoffman, L.C., 2012. Meat quality comparison between fresh and frozen/thawed ostrich M. iliofibularis. *Meat Science* 91 (3), 364–368.

- Martín-Belloso, O., Marsellés-Fontanet, Á., Elez-Martínez, P., 2014a. Food Safety Aspects of Pulsed Electric Fields, in: , Emerging Technologies for Food Processing. Elsevier, pp. 169–178.
- Martín-Belloso, O., Marsellés-Fontanet, Á.R., Elez-Martínez, P., 2014b. Enzymatic Inactivation by Pulsed Electric Fields, in: , Emerging Technologies for Food Processing. Elsevier, pp. 155–168.
- McDonnell, C.K., Allen, P., Chardonnerau, F.S., Arimi, J.M., Lyng, J.G., 2014. The use of pulsed electric fields for accelerating the salting of pork. *LWT - Food Science and Technology* 59 (2), 1054–1060.
- Nindo, C.I., FENG, H., SHEN, G.Q., Tang, J., KANG, D.H., 2003. ENERGY UTILIZATION AND MICROBIAL REDUCTION IN A NEW FILM DRYING SYSTEM. *J Food Processing Preservation* 27 (2), 117–136.
- Nindo, C.I., Powers, J.R., Tang, J., 2007. Influence of Refractance Window evaporation on quality of juices from small fruits. *LWT - Food Science and Technology* 40 (6), 1000–1007.
- Nindo, C.I., Tang, J., 2007. Refractance Window Dehydration Technology: A Novel Contact Drying Method. *Drying Technology* 25 (1), 37–48.
- Ochoa-Martínez, C.I., Quintero, P.T., Ayala, A.A., Ortiz, M.J., 2012. Drying characteristics of mango slices using the Refractance Window™ technique. *Journal of Food Engineering* 109 (1), 69–75.
- O'Dowd, L.P., Arimi, J.M., Noci, F., Cronin, D.A., Lyng, J.G., 2013. An assessment of the effect of pulsed electrical fields on tenderness and selected quality attributes of post rigour beef muscle. *Meat Science* 93 (2), 303–309.
- Ortiz, J., Lemus-Mondaca, R., Vega-Galvez, A., Ah-Hen, K., Puente-Díaz, L., Zura-Bravo, L., Aubourg, S., 2013. Influence of air-drying temperature on drying kinetics, colour, firmness and biochemical characteristics of Atlantic salmon (*Salmo salar* L.) fillets. *Food chemistry* 139 (1-4), 162–169.
- Ortiz-Jerez, M.J., Gulati, T., Datta, A.K., Ochoa-Martínez, C.I., 2015. Quantitative understanding of Refractance Window™ drying. *Food and Bioproducts Processing* 95, 237–253.
- Paula, A.M., Conti-Silva, A.C., 2014. Texture profile and correlation between sensory and instrumental analyses on extruded snacks. *Journal of Food Engineering* 121, 9–14.
- Pavan, M.A., Schmidt, S.J., Feng, H., 2012. Water sorption behavior and thermal analysis of freeze-dried, Refractance Window-dried and hot-air dried açai (*Euterpe oleracea* Martius) juice. *LWT - Food Science and Technology* 48 (1), 75–81.
- Ramírez, C., Astorga, V., Nuñez, H., Jaques, A., Simpson, R., 2017. Anomalous diffusion based on fractional calculus approach applied to drying analysis of apple slices: The effects of relative humidity and temperature. *Journal of Food Process Engineering* 44 (5), e12549.
- Ramírez, C., Troncoso, E., Muñoz, J., Aguilera, J.M., 2011. Microstructure analysis on pre-treated apple slices and its effect on water release during air drying. *Journal of Food Engineering* 106 (3), 253–261.
- Simpson, R., Jaques, A., Nuñez, H., Ramirez, C., Almonacid, A., 2013. Fractional Calculus as a Mathematical Tool to Improve the Modeling of Mass Transfer Phenomena in Food Processing. *Food Eng Rev* 5 (1), 45–55.
- Simpson, R., Ramírez, C., Birchmeier, V., Almonacid, A., Moreno, J., Nuñez, H., Jaques, A., 2015. Diffusion mechanisms during the osmotic dehydration of Granny Smith apples subjected to a moderate electric field. *Journal of Food Engineering* 166, 204–211.

- Simpson, R., Ramírez, C., Nuñez, H., Jaques, A., Almonacid, S., 2017. Understanding the success of Page's model and related empirical equations in fitting experimental data of diffusion phenomena in food matrices. *Trends in Food Science & Technology* 62, 194–201.
- Smith, P., 2011. *Introduction to Food Process Engineering*, Second edition ed. Springer US, 529 pp.
- Sun, D.-W., 2005. *Emerging technologies for food processing*. Elsevier Academic Press, Amsterdam, Boston, xvii, 771.
- Toepfl, S., Heinz, V., Knorr, D., 2006. Applications of Pulsed Electric Fields Technology for the Food Industry, in: Barbosa-Cánovas, G.V., Raso, J., Heinz, V. (Eds.), *Pulsed Electric Fields Technology for the Food Industry*. Springer US, Boston, MA, pp. 197–221.
- Toepfl, S., Heinz, V., Knorr, D., 2007. High intensity pulsed electric fields applied for food preservation. *Chemical Engineering and Processing: Process Intensification* 46 (6), 537–546.
- Toepfl, S., Siemer, C., Heinz, V., 2014a. Effect of High-Intensity Electric Field Pulses on Solid Foods, in: , *Emerging Technologies for Food Processing*. Elsevier, pp. 147–154.
- Toepfl, S., Siemer, C., Saldaña-Navarro, G., Heinz, V., 2014b. Overview of Pulsed Electric Fields Processing for Food, in: , *Emerging Technologies for Food Processing*. Elsevier, pp. 93–114.
- Topuz, A., Dincer, C., Ozdemir, K.S., Feng, H., Kushad, M., 2011. Influence of different drying methods on carotenoids and capsaicinoids of paprika (Cv., Jalapeno). *Food chemistry* 129 (3), 860–865.
- Trujillo, F.J., Wiangkaew, C., Pham, Q.T., 2007. Drying modeling and water diffusivity in beef meat. *Journal of Food Engineering* 78 (1), 74–85.
- Uribe, E., Miranda, M., Vega-Gálvez, A., Quispe, I., Clavería, R., Di Scala, K., 2011. Mass Transfer Modelling During Osmotic Dehydration of Jumbo Squid (*Dosidicus gigas*): Influence of Temperature on Diffusion Coefficients and Kinetic Parameters. *Food Bioprocess Technol* 4 (2), 320–326.
- Vega-Gálvez, A., Miranda, M., Clavería, R., Quispe, I., Vergara, J., Uribe, E., Paez, H., Di Scala, K., 2011. Effect of air temperature on drying kinetics and quality characteristics of osmo-treated jumbo squid (*Dosidicus gigas*). *LWT - Food Science and Technology* 44 (1), 16–23.
- Velickova, E., Winkelhausen, E., Kuzmanova, S., 2014. Physical and sensory properties of ready to eat apple chips produced by osmo-convective drying. *Journal of food science and technology* 51 (12), 3691–3701.
- Vieira, C., Diaz, M.T., Martinez, B., Garcia-Cachan, M.D., 2009. Effect of frozen storage conditions (temperature and length of storage) on microbiological and sensory quality of rustic crossbred beef at different states of ageing. *Meat Science* 83 (3), 398–404.

## 7. Anexos

### Anexo A MÉTODOS DE DESHIDRATACIÓN: VENTANA REFRACTIVA Y ESTUFA CONVECTIVA

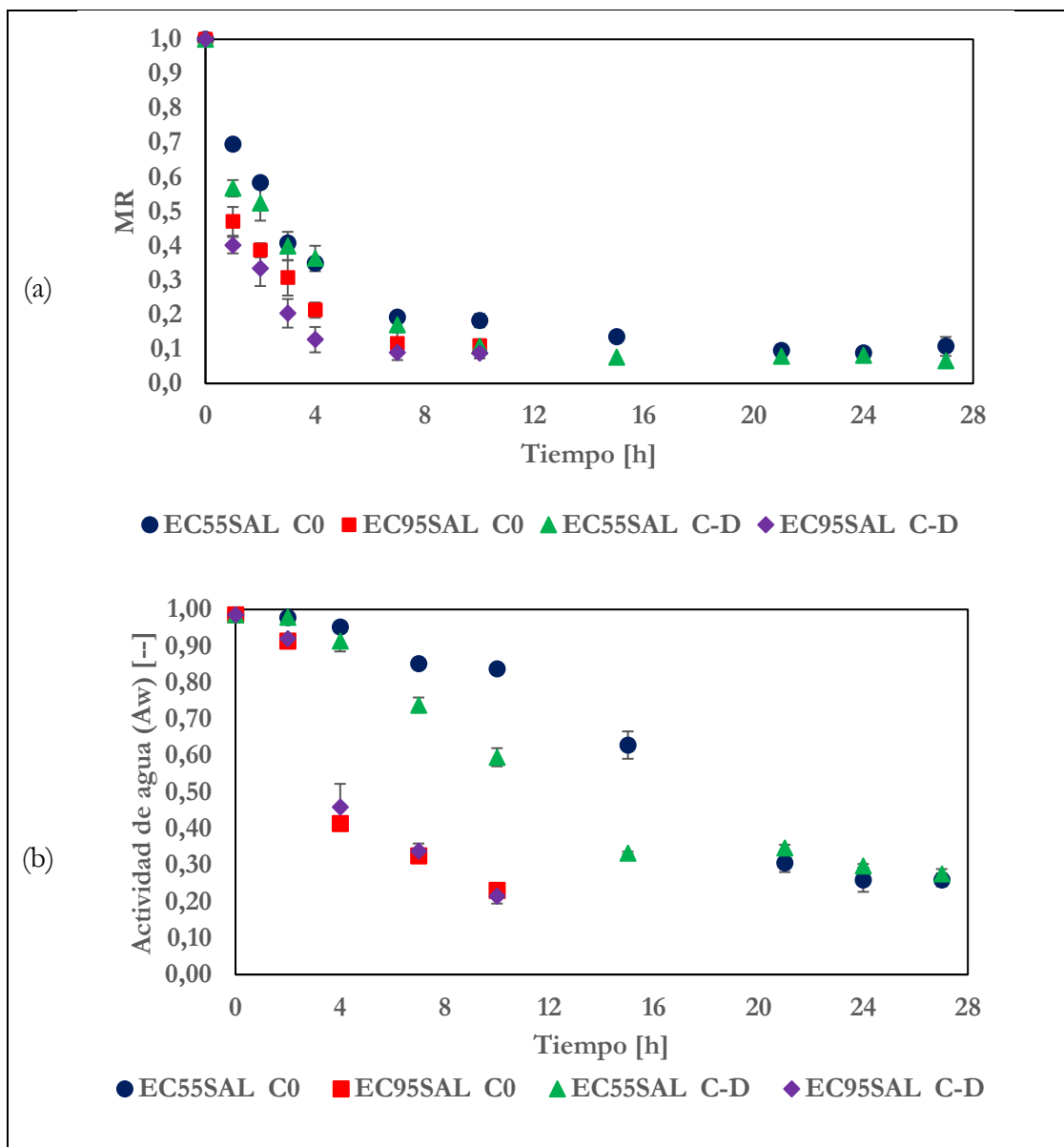


Figura 7.1 Curva de secado (a) y actividad de agua (b), muestra control y con pretratamiento de congelación- descongelación para proceso de deshidratación de tejido de salmón en estufa convectiva (EC) a 55 y 95 °C.

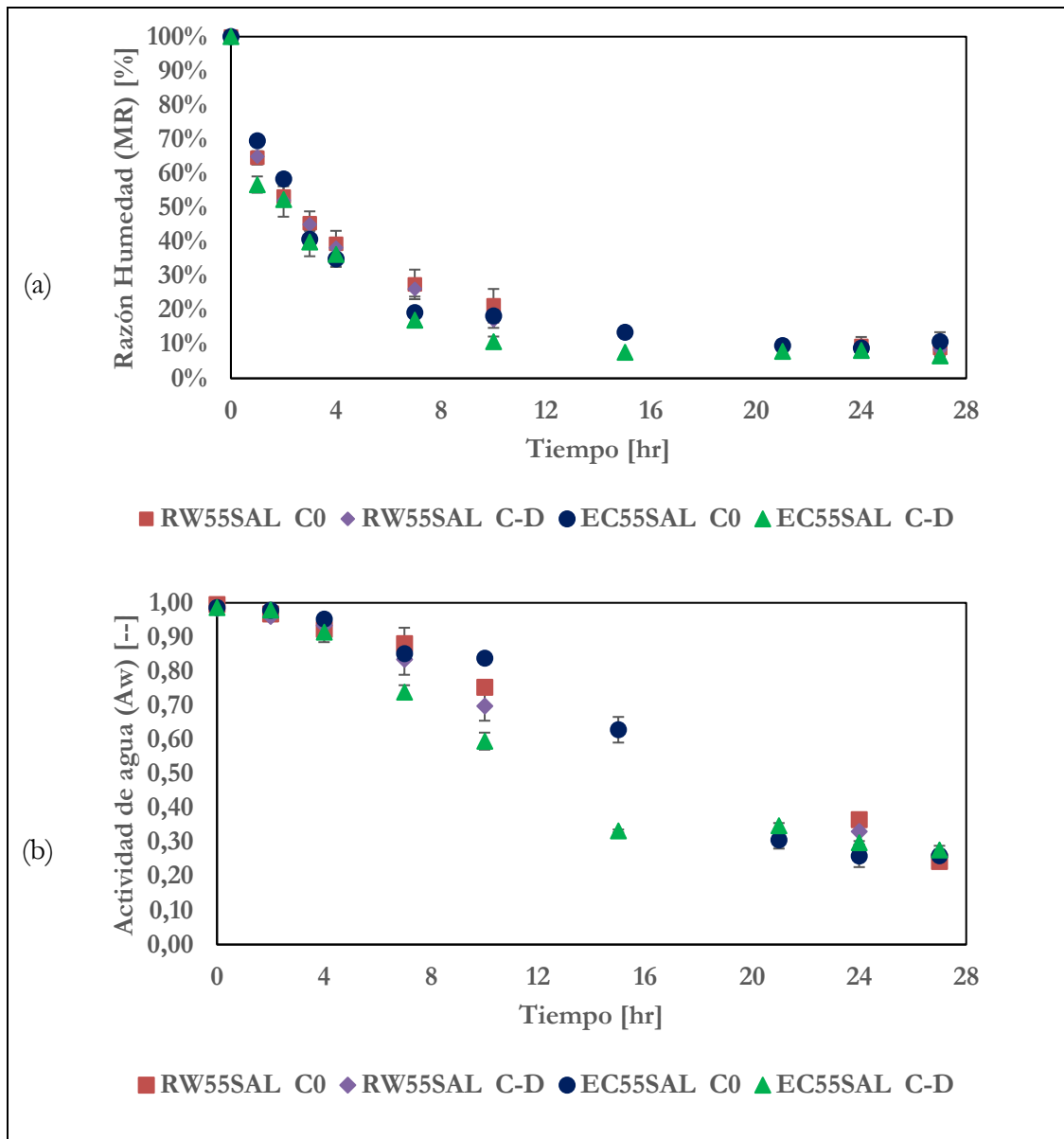


Figura 7.2 Curva de secado (a) y actividad de agua (b), muestra control y con pretratamiento de congelación- descongelaación para proceso de deshidratación de tejido de salmón en ventana refractiva (RW) y estufa convectiva (EC) a 55 °C.

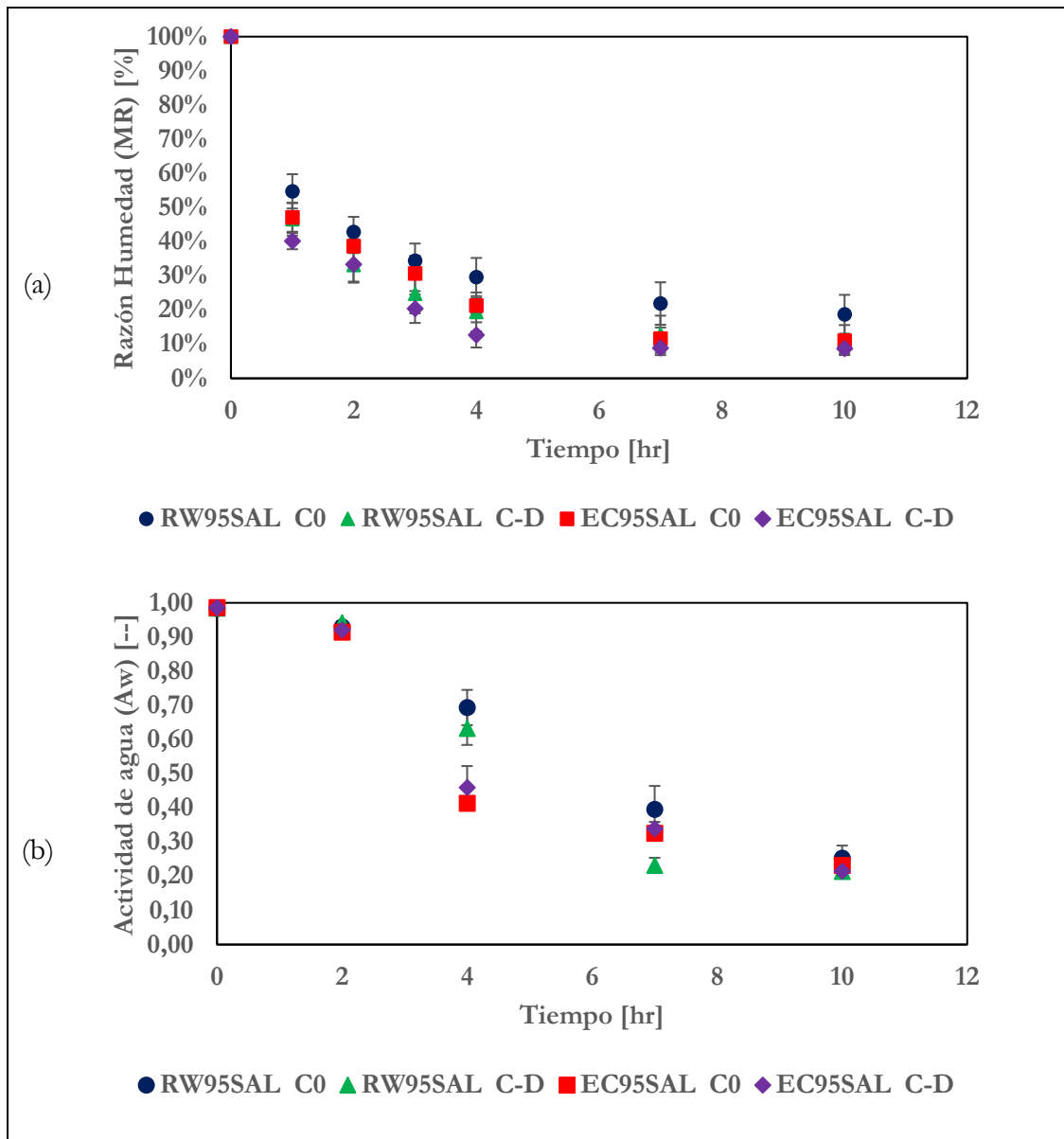


Figura 7.3 Curva de secado (a) y actividad de agua (b), muestra control y con pretratamiento de congelación- descongelaón para proceso de deshidratación de tejido de salmón en ventana refractiva (RW) y estufa convectiva (EC) a 95 °C.

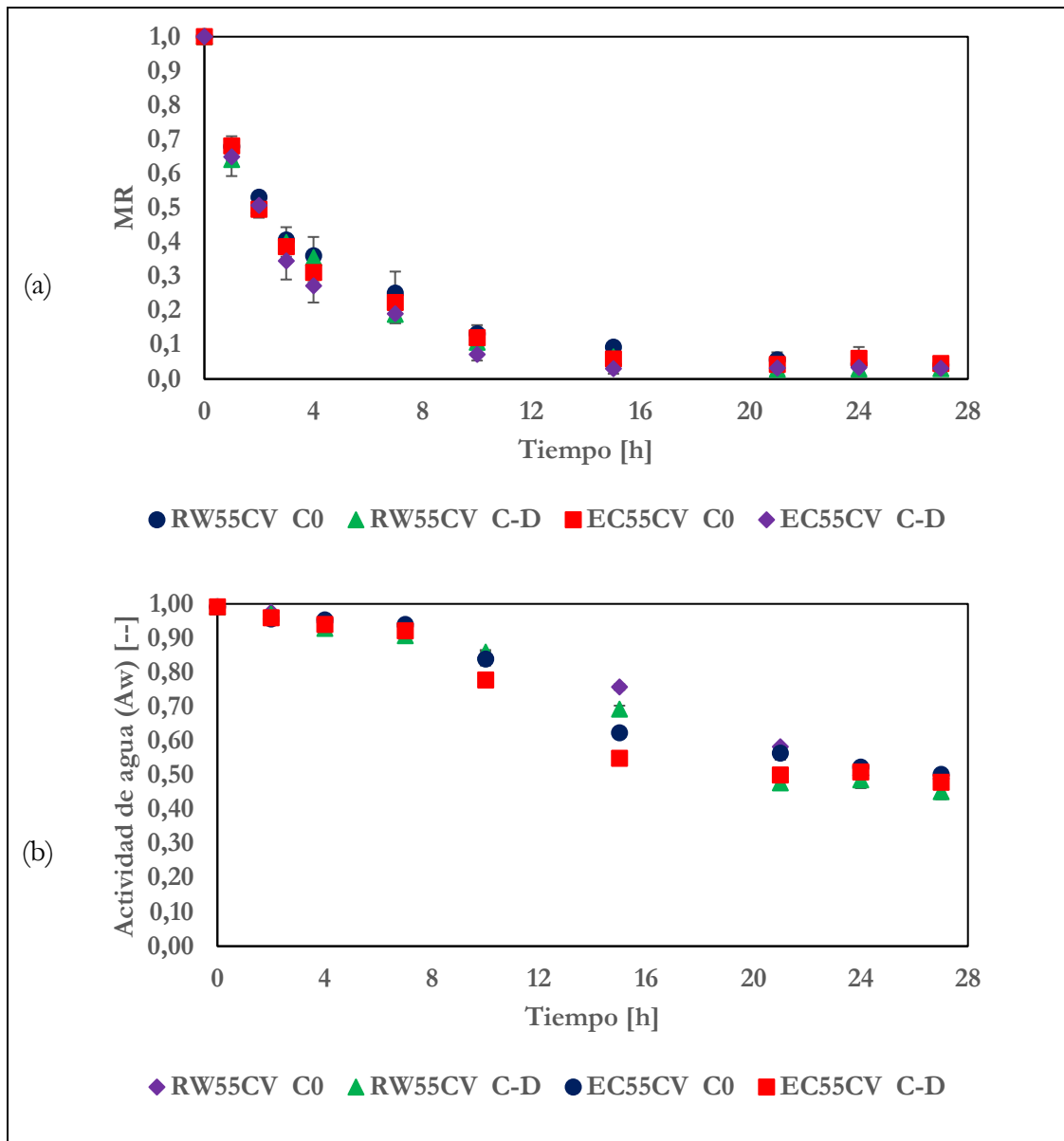


Figura 7.4 Curva de secado (a) y actividad de agua (b), muestra control y con pretratamiento de congelación- descongelación para proceso de deshidratación de tejido de vacuno en ventana refractiva (RW) y estufa convectiva (EC) a 55 °C.

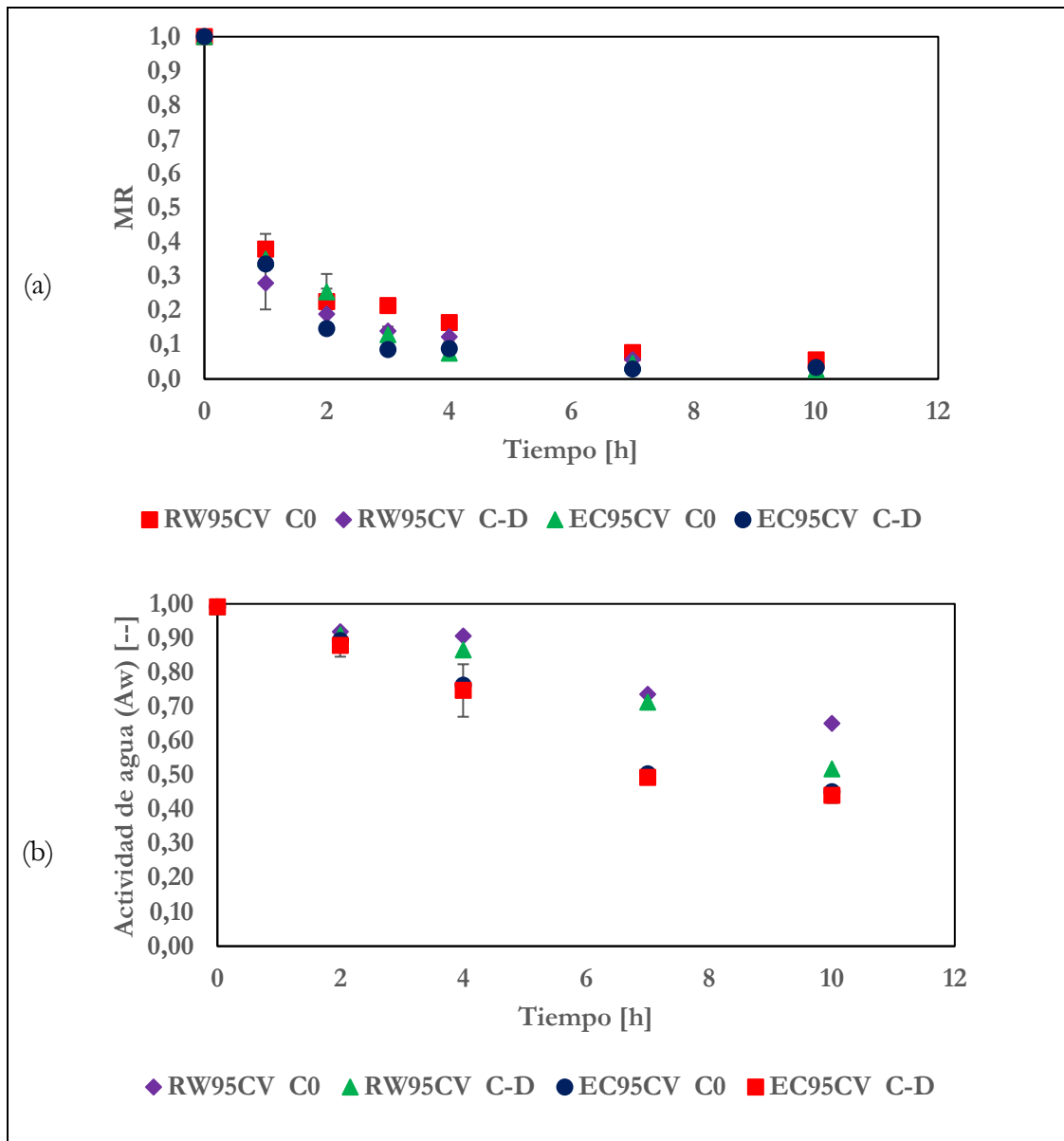


Figura 7.5 Curva de secado (a) y actividad de agua (b), muestra control y con pretratamiento de congelación- descongelación para proceso de deshidratación de tejido de vacuno en ventana refractiva (RW) y estufa convectiva (EC) a 95 °C.

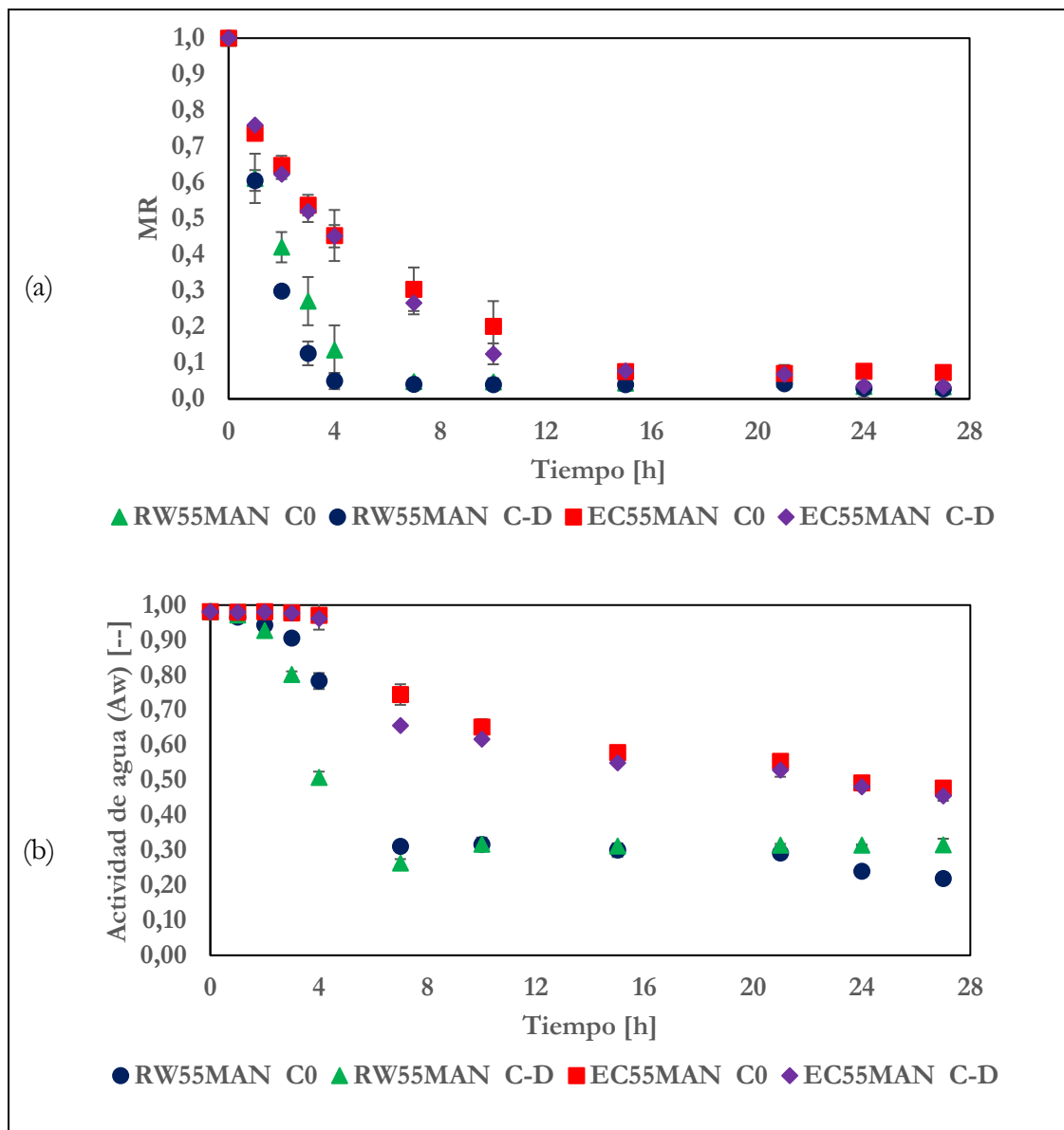


Figura 7.6 Curva de secado (a) y actividad de agua (b), muestra control y con pretratamiento de congelación-descongelación para proceso de deshidratación de tejido de manzana en ventana refractiva (RW) y estufa convectiva (EC) a 55 °C.

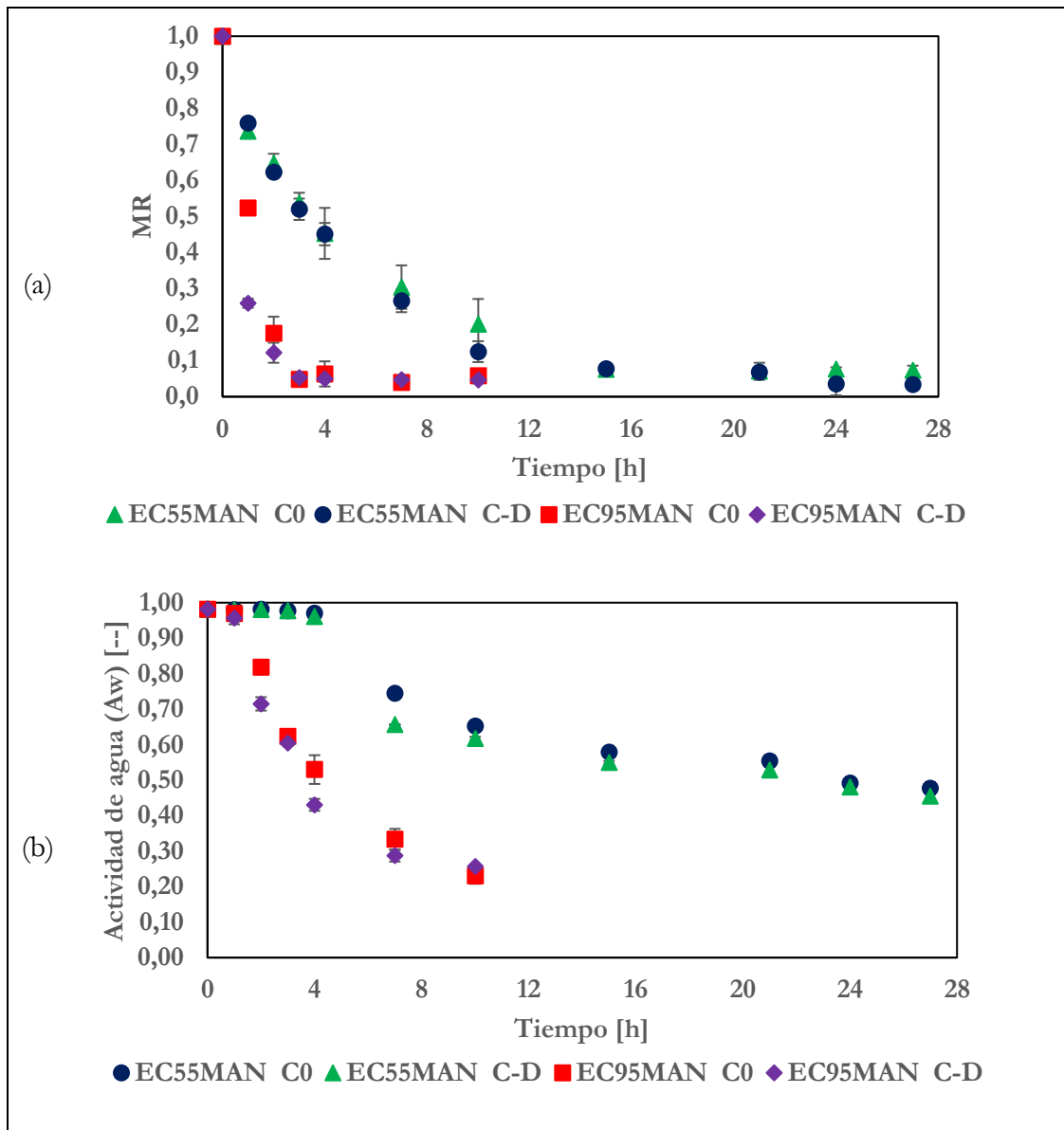


Figura 7.7 Curva de secado (a) y actividad de agua (b), muestra control y con pretratamiento de congelación- descongelaación para proceso de deshidratación de tejido de manzana en estufa convectiva (EC) a 55 y 95 °C.

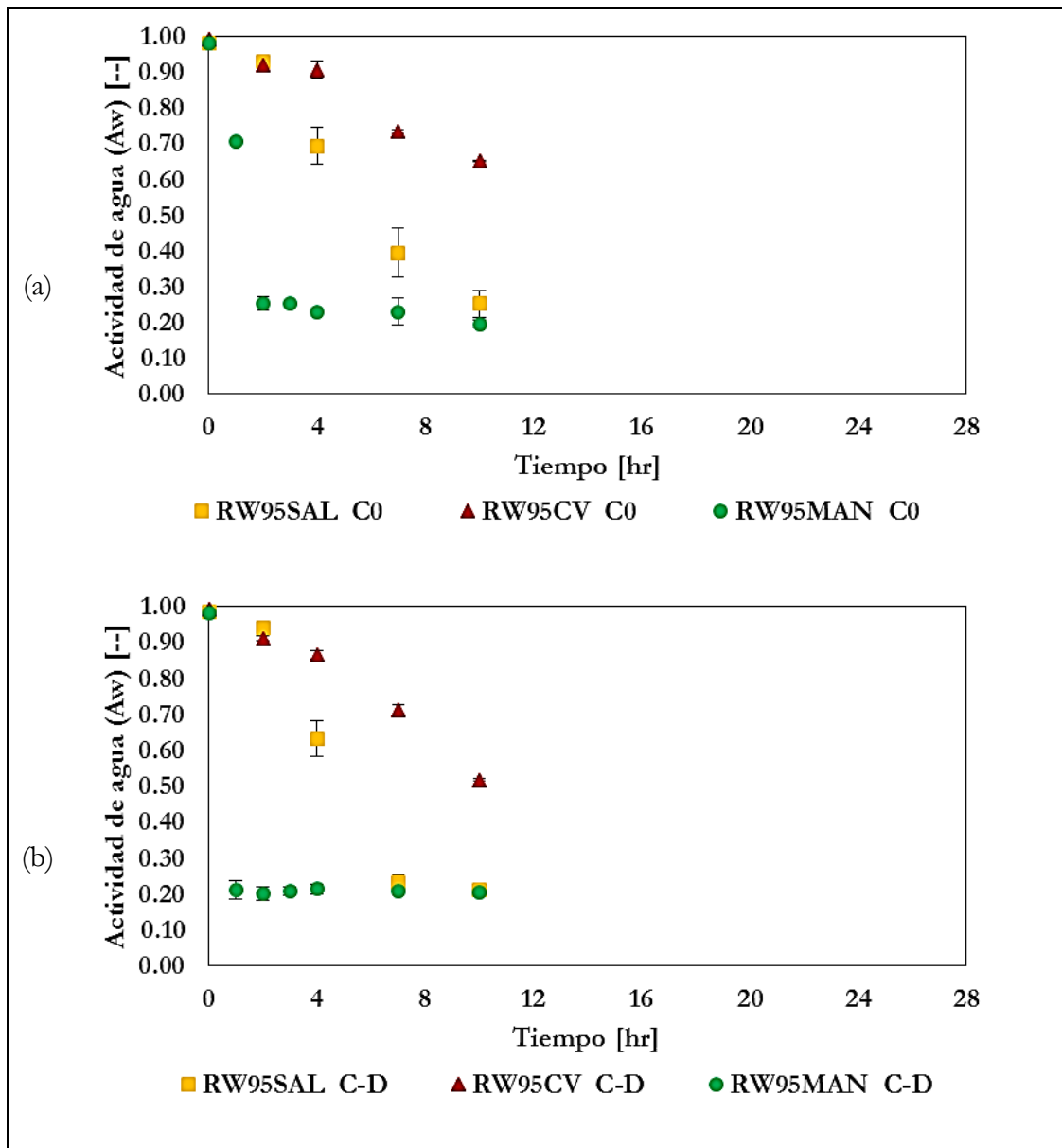


Figura 7.8 Comparación actividad de agua tejido de salmón (SAL), vacuno (CV), y manzana (MAN), en tejido fresco (C0), y tratado por congelación- descongelación (C-D), a 55 °C; deshidratados por ventana refractiva (RW).

## Anexo B MODELO DE SEGUNDA LEY DE FICK

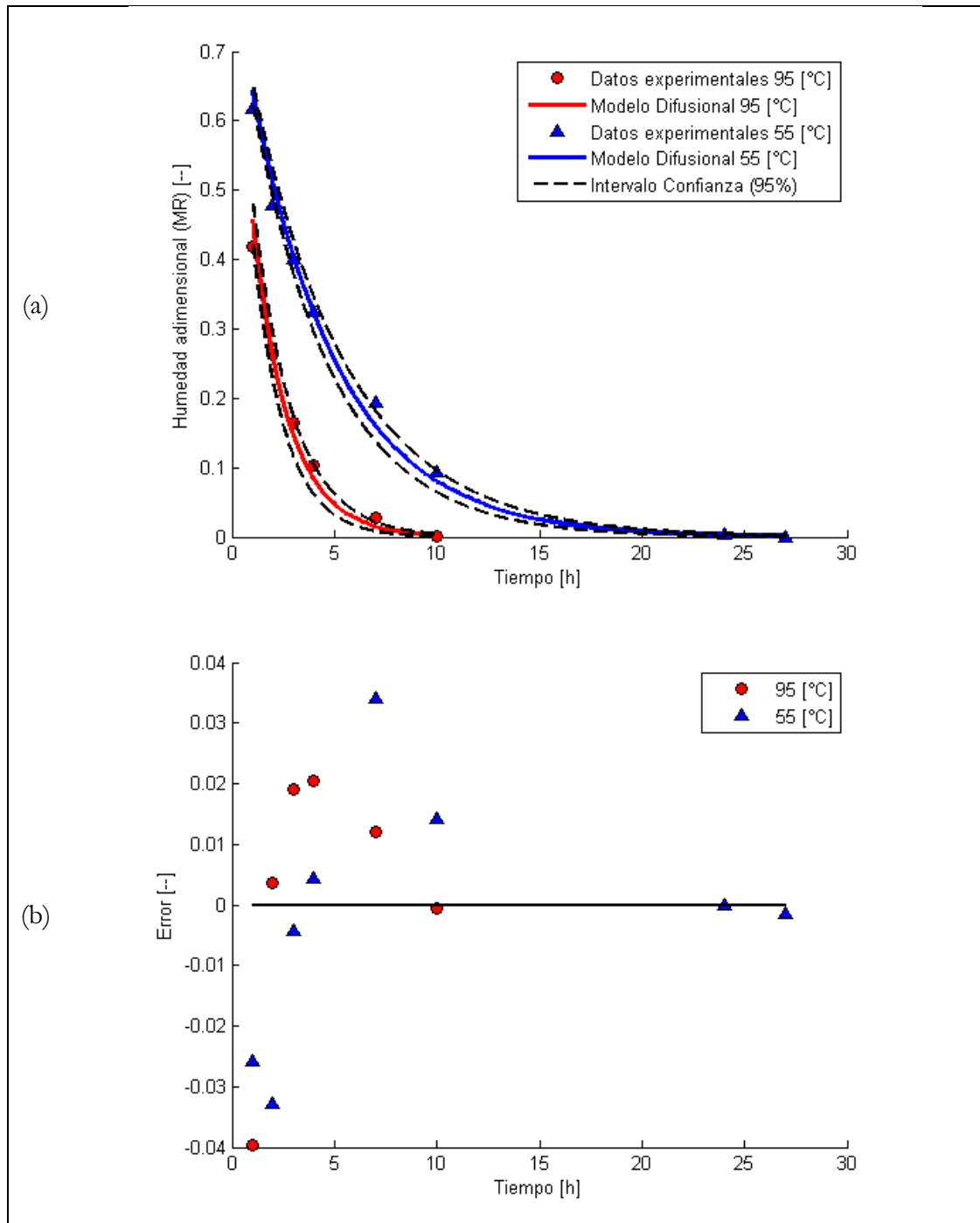


Figura 7.9 Modelo de difusión (segunda ley de Fick (a)) y distribución del error (b), en tejido con tratamiento de salmón; deshidratado en RW.

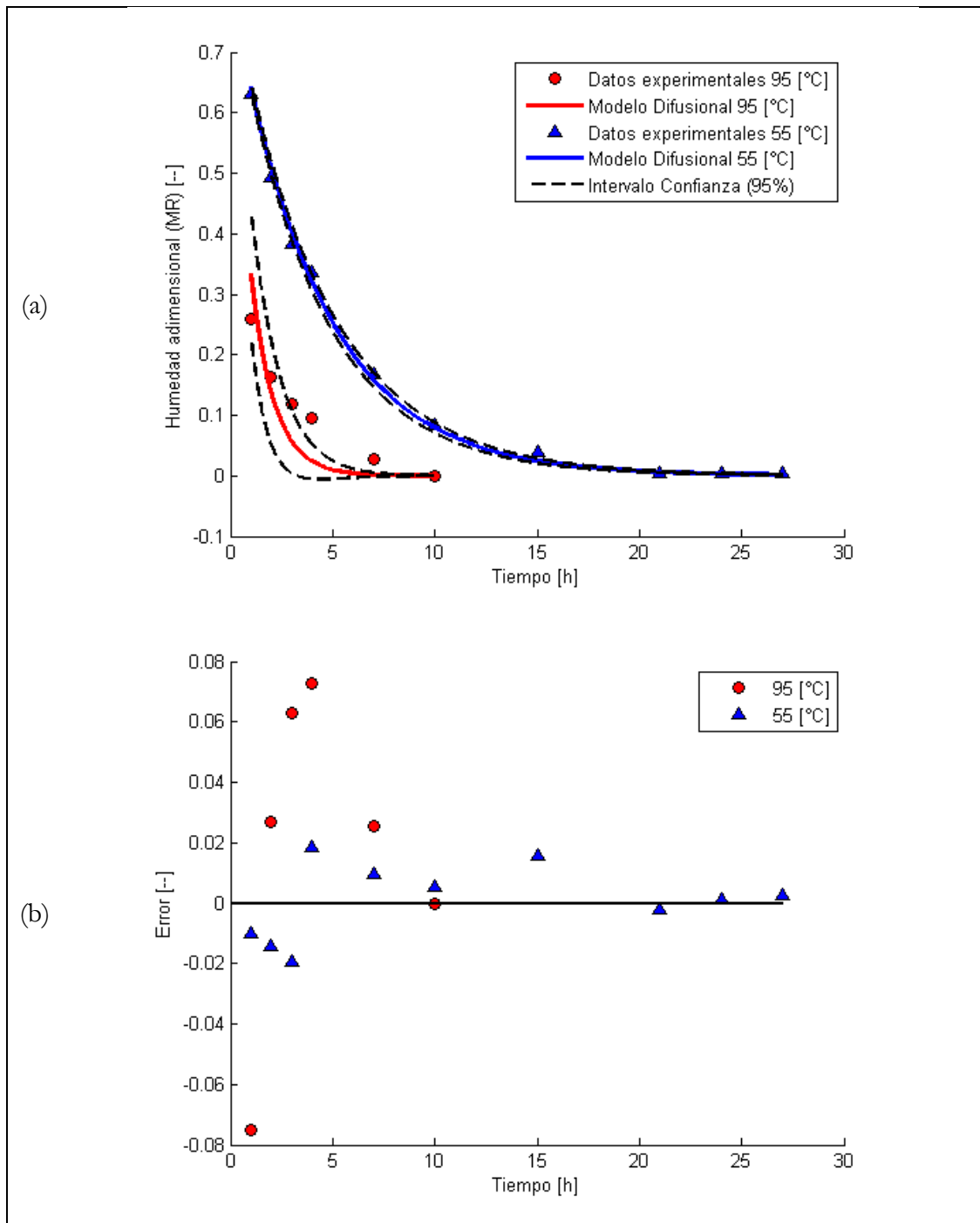


Figura 7.10 Modelo de difusión (segunda ley de Fick (a)) y distribución del error (b), en tejido con tratamiento de vacuno; deshidratado en RW.



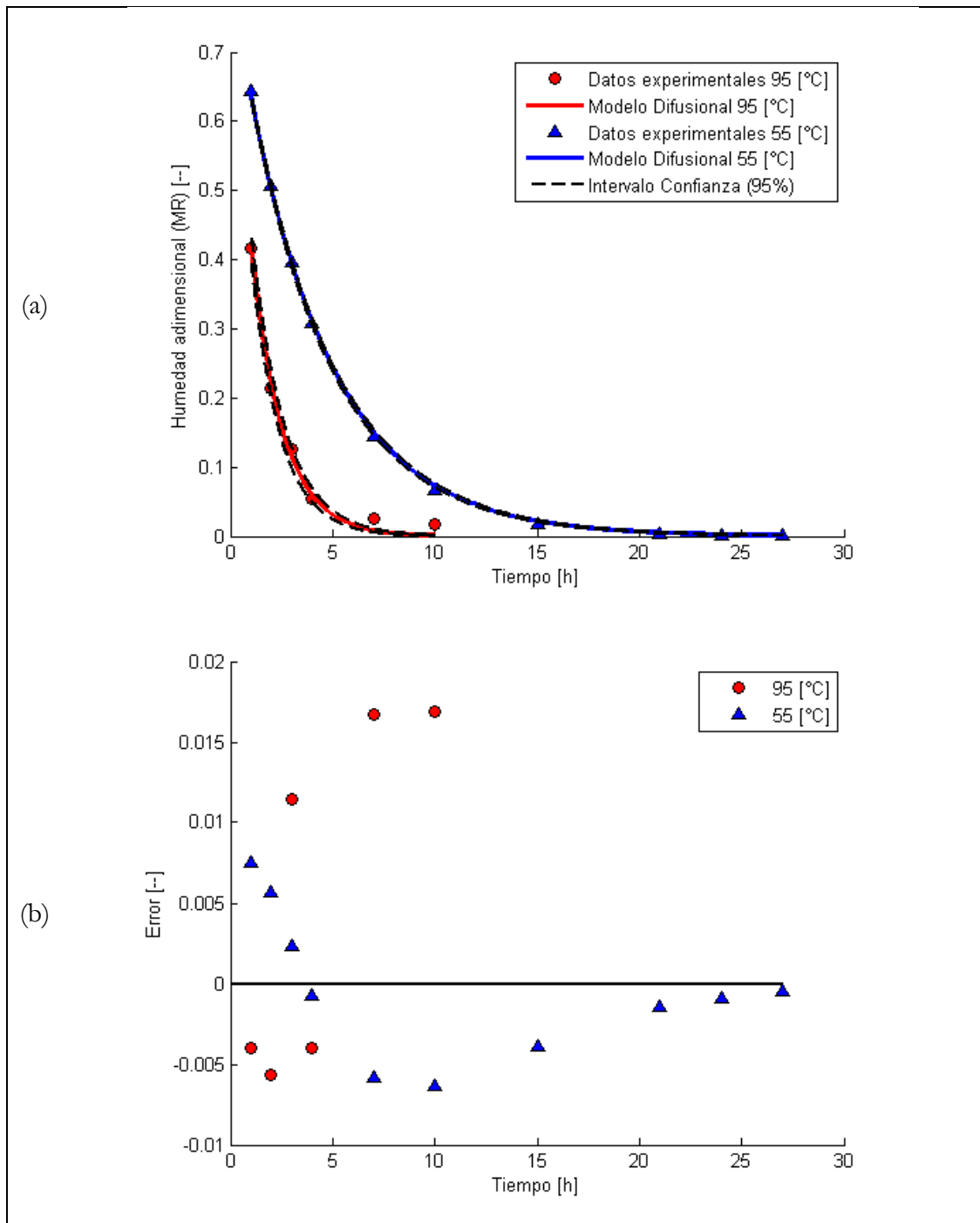


Figura 7.12 Modelo de difusión (segunda ley de Fick (a)) y distribución del error (b), en tejido de salmón sin tratamiento; deshidratado en EC.

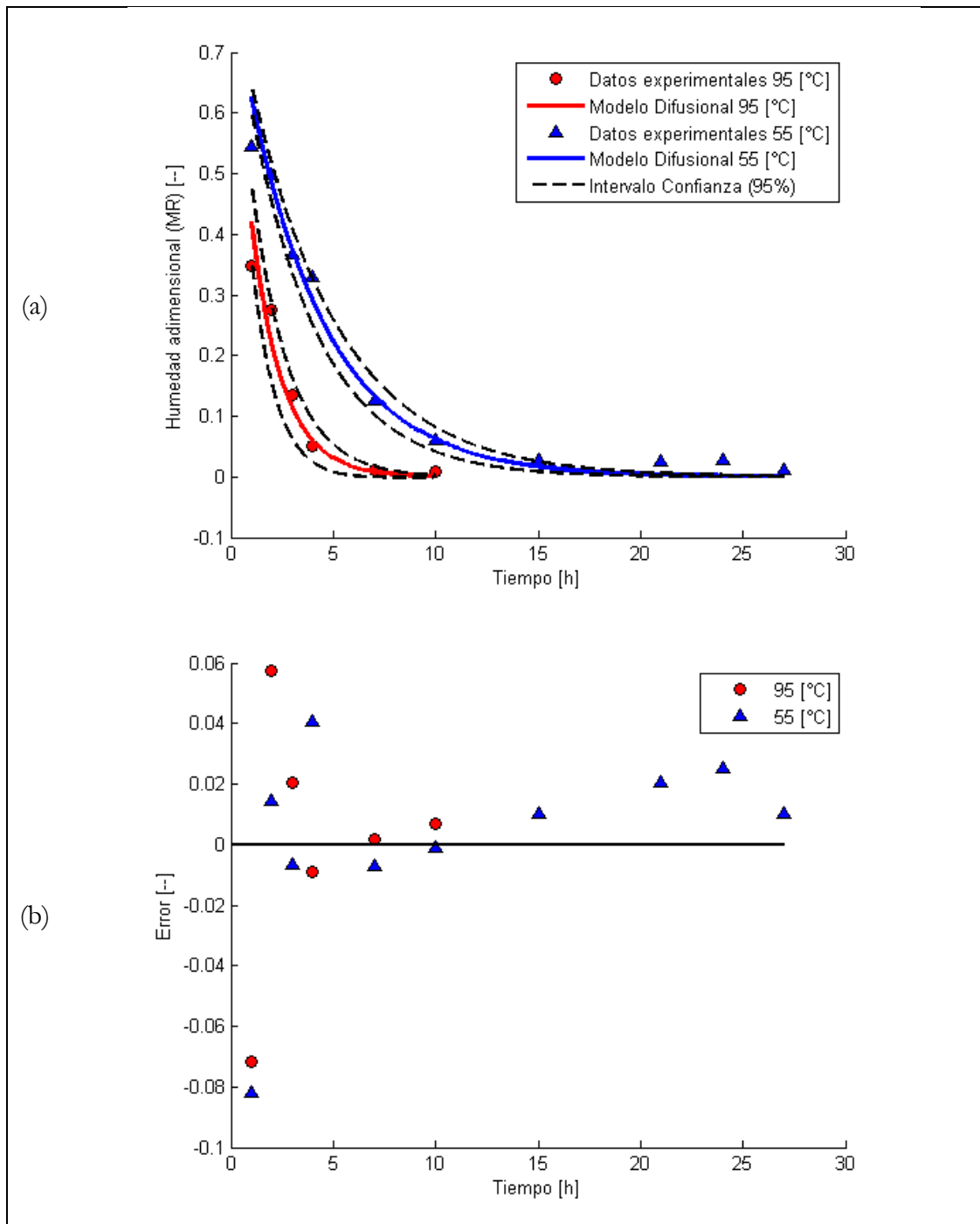


Figura 7.13 Modelo de difusión (segunda ley de Fick (a)) y distribución del error (b), en tejido de salmón tratado por congelación- descongelación; deshidratado en EC.

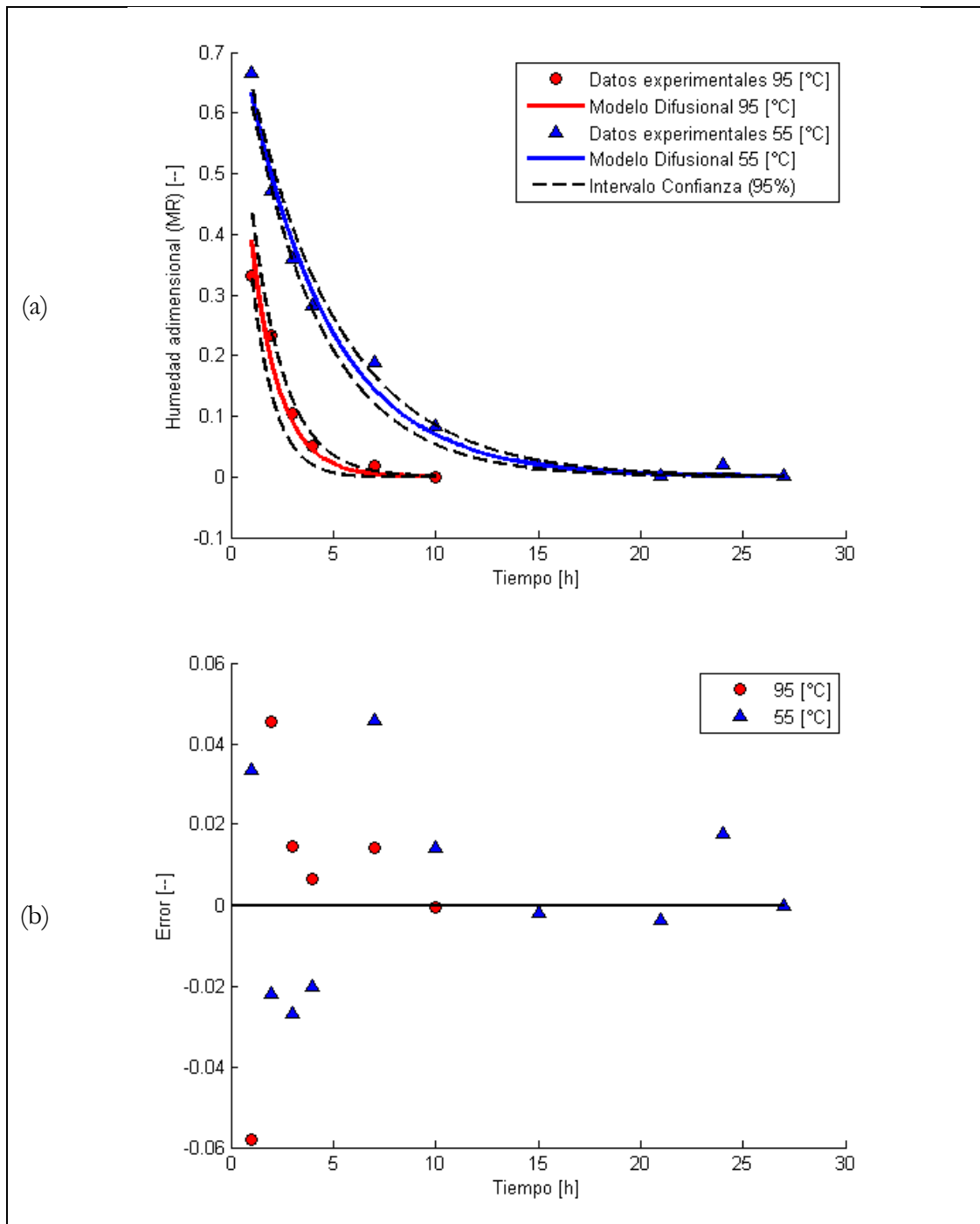


Figura 7.14 Modelo de difusión (segunda ley de Fick (a)) y distribución del error (b), en tejido de vacuno sin tratamiento; deshidratado en EC.

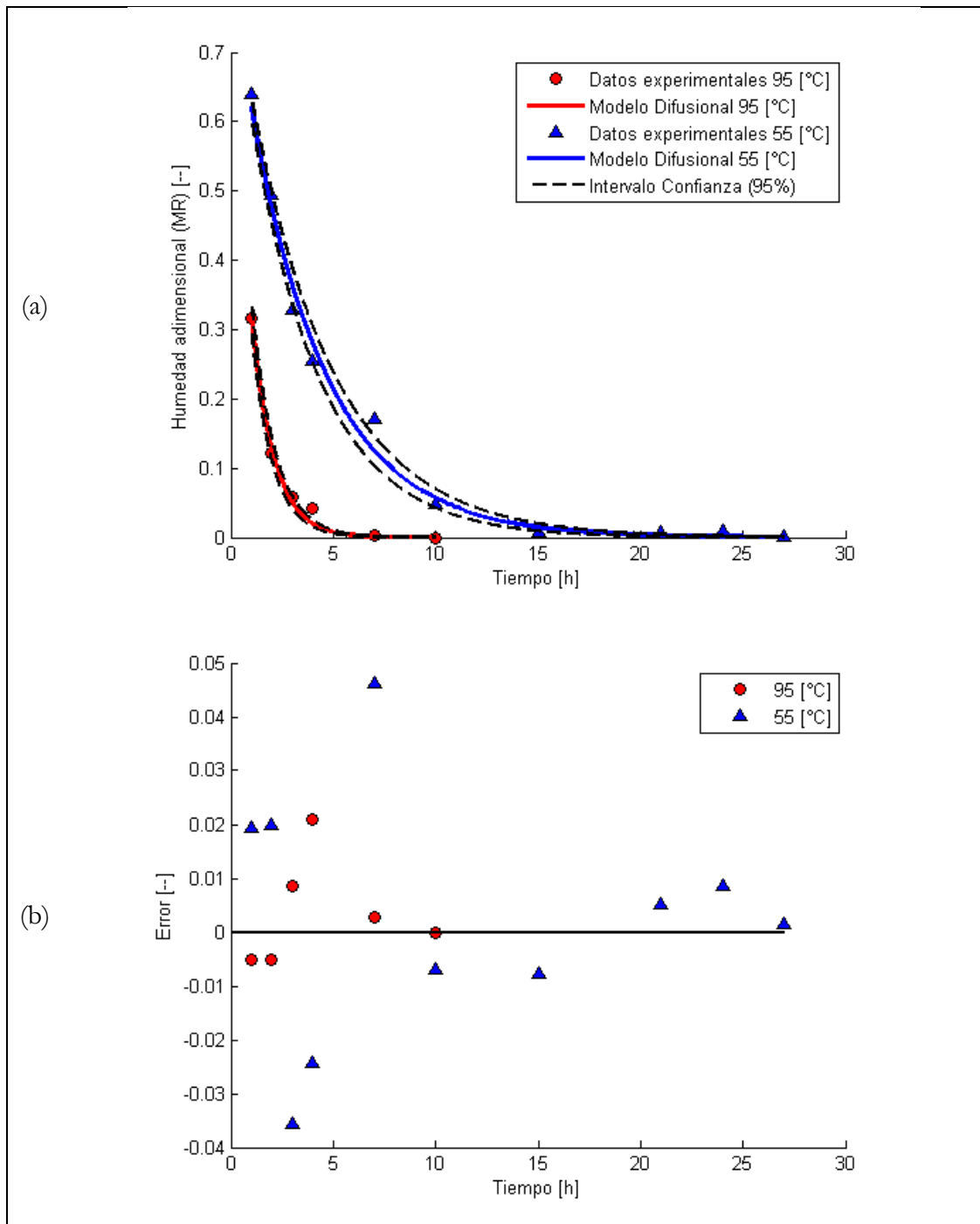


Figura 7.15 Modelo de difusión (segunda ley de Fick (a)) y distribución del error (b), en tejido de vacuno tratado por congelación- descongelación; deshidratado en EC.

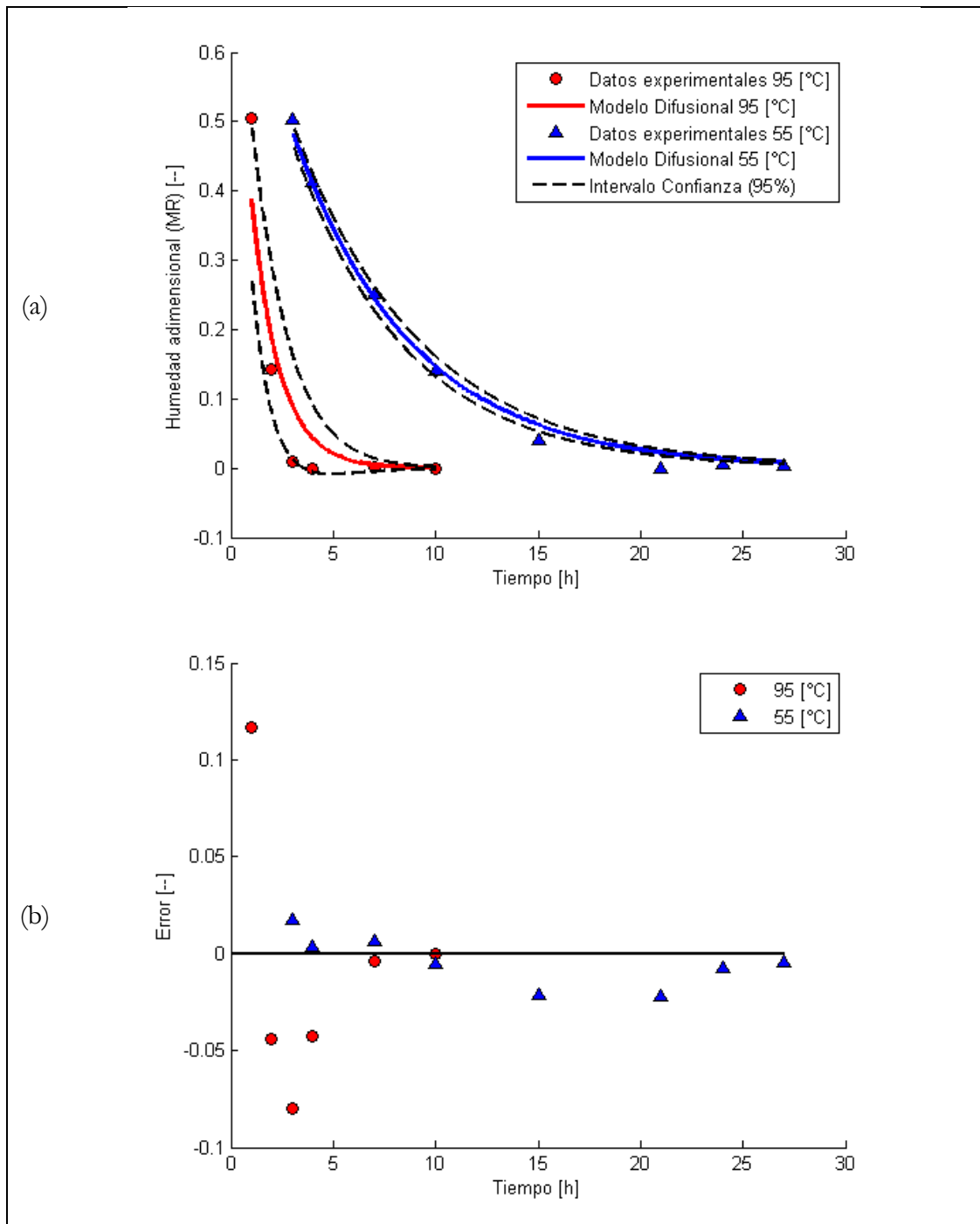


Figura 7.16 Modelo de difusión (segunda ley de Fick (a)) y distribución del error (b), en tejido de manzana sin pretratamiento; deshidratado en EC.

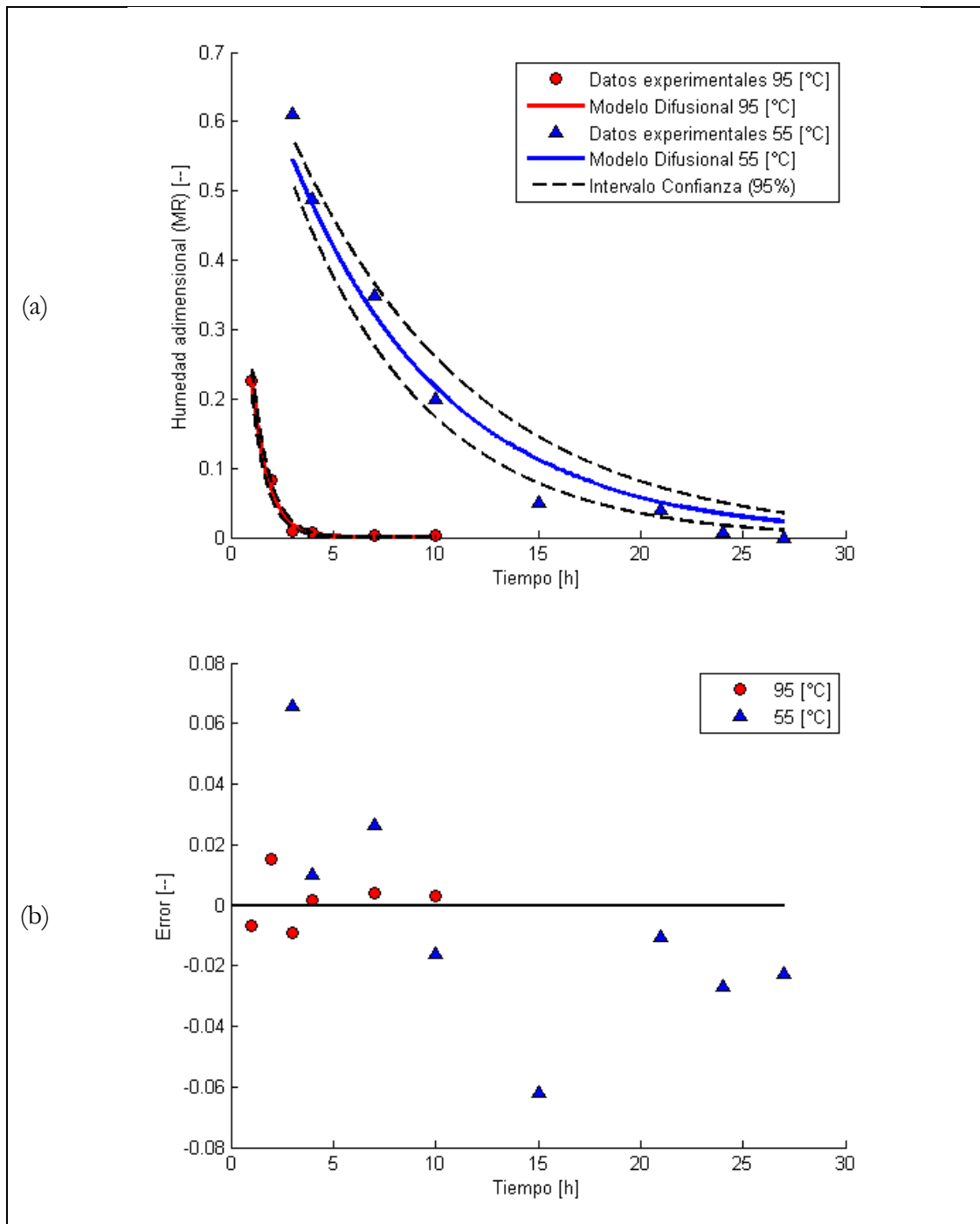


Figura 7.17 Modelo de difusión (segunda ley de Fick (a)) y distribución del error (b), en tejido de salmón tratado por congelación- descongelación; deshidratado en EC.

Tabla 7.1 Coeficiente de determinación ( $R^2$ ), suma del error cuadrático (SSE), y coeficiente de difusión efectivo (Deff); 2º ley de Fick en método de deshidratación por estufa convectiva (EC).

2º ley de Fick, Estufa Convectiva (EC)					
Control (C0)					
	T°	R <sup>2</sup>	SSE*10 <sup>-4</sup>	Deff*10 <sup>-10</sup>	m <sup>2</sup> s <sup>-1</sup>
Salmón	55	0.9996	1.87	1.694 <sup>a,Δ</sup>	± 0.003
(SAL)	95	0.9905	9.58	4.610 <sup>b,Δ</sup>	± 0.302
Vacuno	55	0.9888	53.69	1.735 <sup>a,Δ</sup>	± 0.162
(CV)	95	0.9326	58.81	5.148 <sup>b,Δ</sup>	± 0.984
Manzana	55	0.9949	13.91	1.205 <sup>a,Δ</sup>	± 0.070
(MAN)	95	0.8829	238.1	5.177 <sup>b,Δ</sup>	± 1.995
Congelado- Descongelado (C-D)					
	T°	R <sup>2</sup>	SSE*10 <sup>-4</sup>	Deff*10 <sup>-10</sup>	m <sup>2</sup> s <sup>-1</sup>
Salmón	55	0.9753	99.45	1.817 <sup>a,Δ</sup>	± 0.231
(SAL)	95	0.9137	90.19	4.612 <sup>b,Δ</sup>	± 1.043
Vacuno	55	0.9894	49.81	1.880 <sup>a,Δ</sup>	± 0.170
(CV)	95	0.9918	5.77	6.014 <sup>b,Δ</sup>	± 0.438
Manzana	55	0.9733	105.59	0.929 <sup>a,B</sup>	± 0.141
(MAN)	95	0.9619	15.08	8.783 <sup>b,B</sup>	± 0.578

Letra minúscula: diferencia entre temperatura para un mismo tejido.  
 Letra mayúscula: diferencia entre pretratamientos (C0, C-D) en un mismo tejido y nivel de temperatura.

## Anexo C MODELO DE DIFUSIÓN ANÓMALA

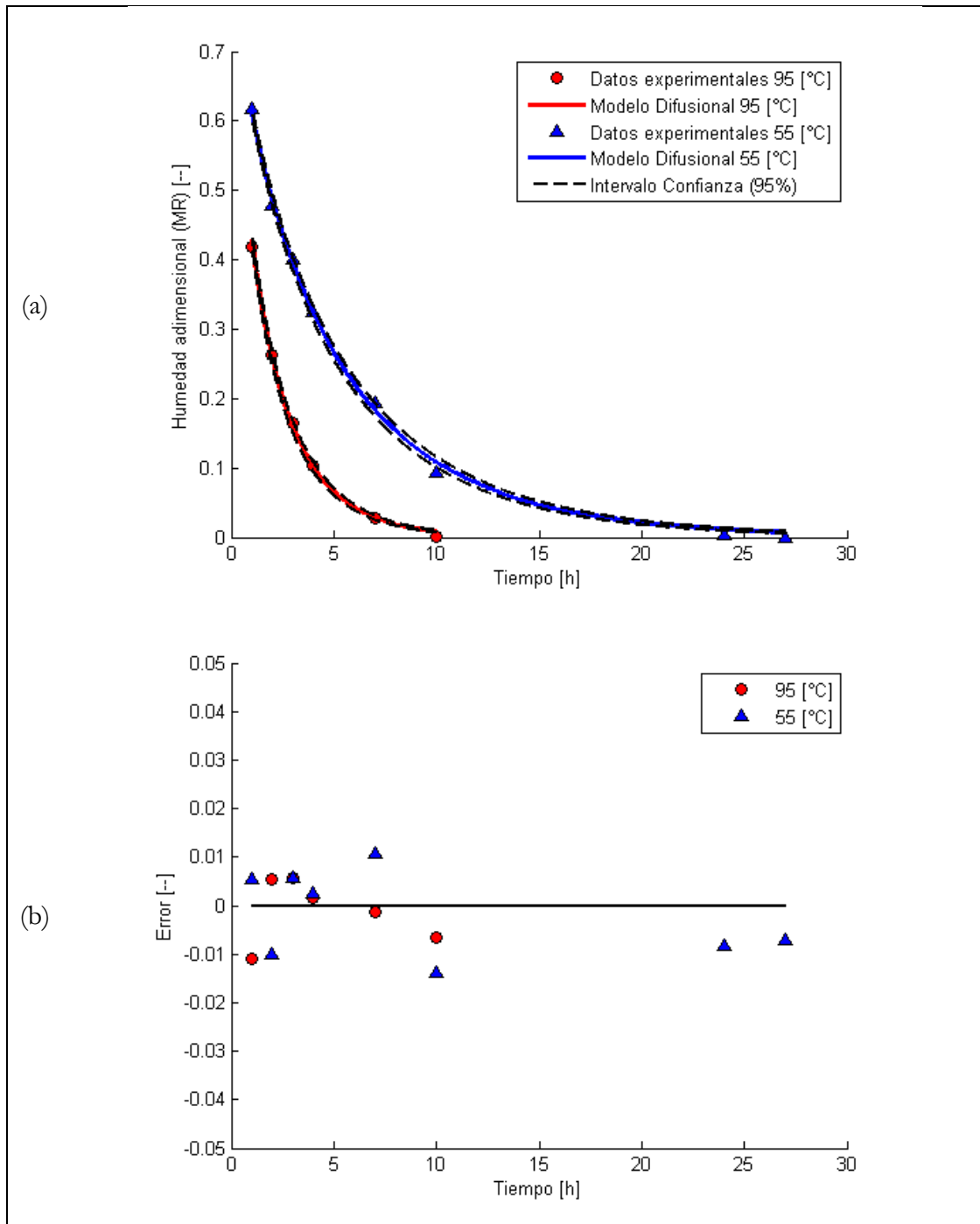


Figura 7.18 Modelo de difusión anómala (a) y distribución del error (b), en tejido de salmón tratado por congelación- descongelación; deshidratado en RW.

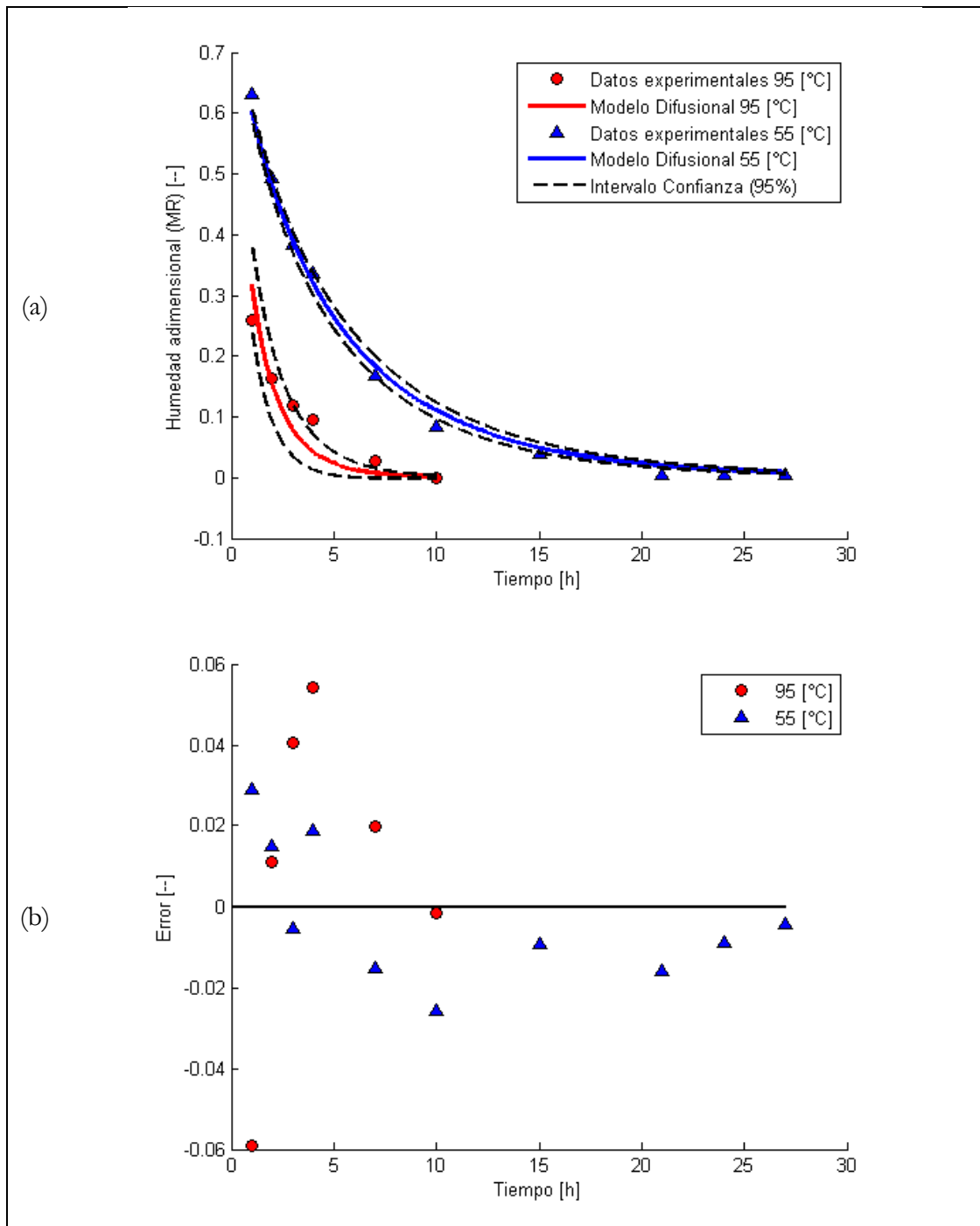


Figura 7.19 Modelo de difusión anómala (a) y distribución del error (b), en tejido de vacuno tratado por congelación- descongelación; deshidratado en RW.

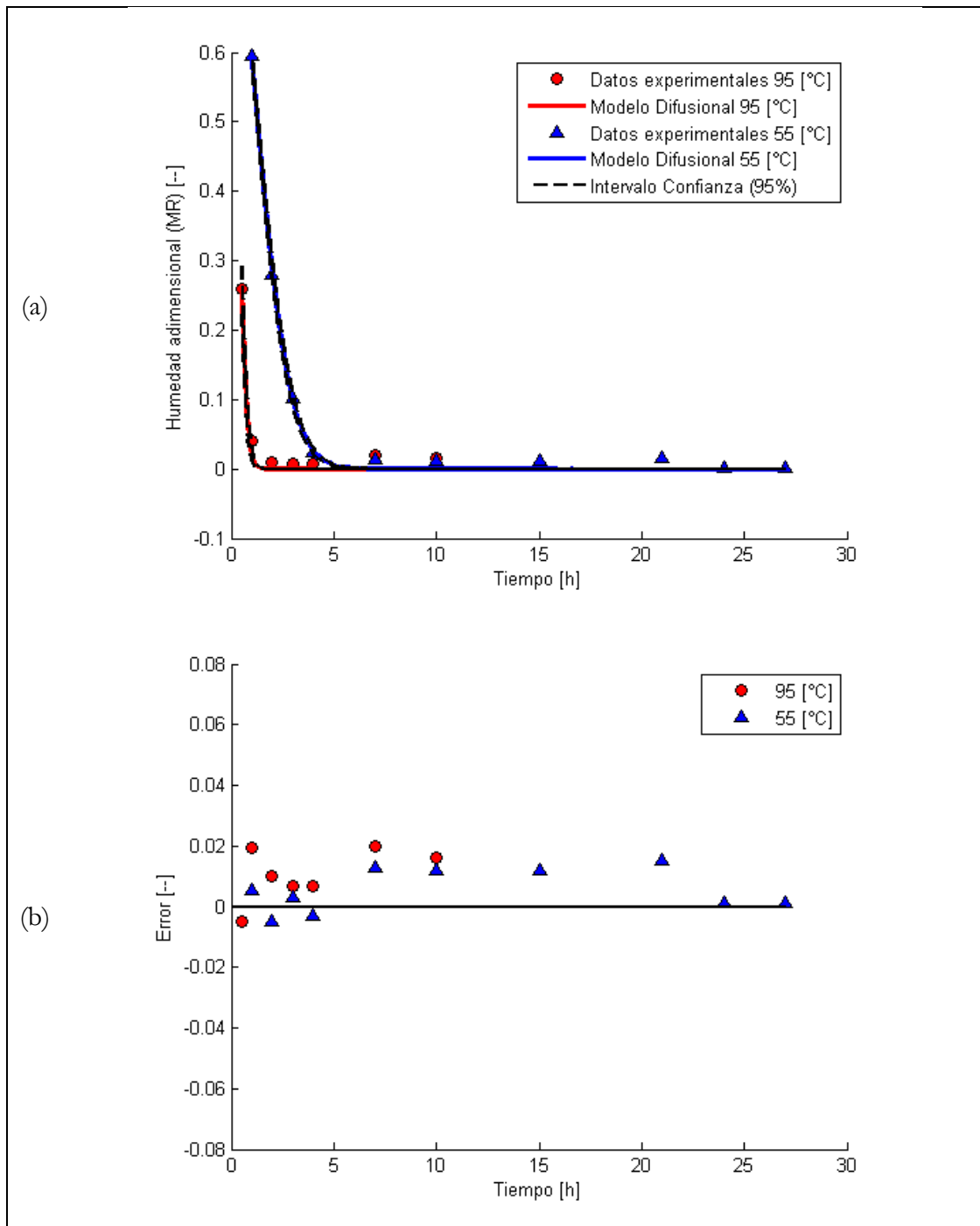


Figura 7.20 Modelo de difusión anómala (a) y distribución del error (b), en tejido de manzana tratado por congelación- descongelación; deshidratado en RW.

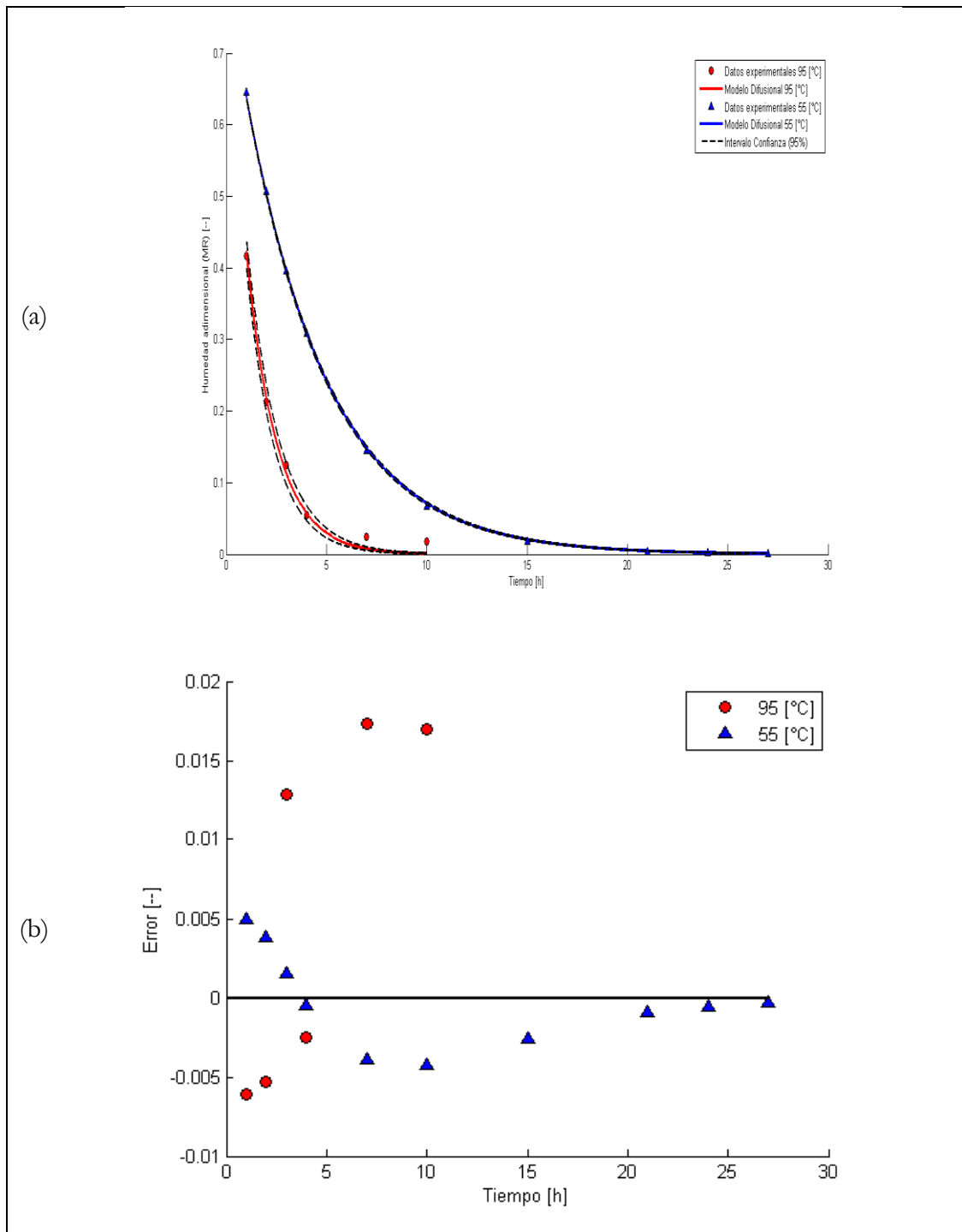


Figura 7.21 Modelo de difusión anómala (a) y distribución del error (b), en tejido de salmón sin pretratamiento; deshidratado en EC.

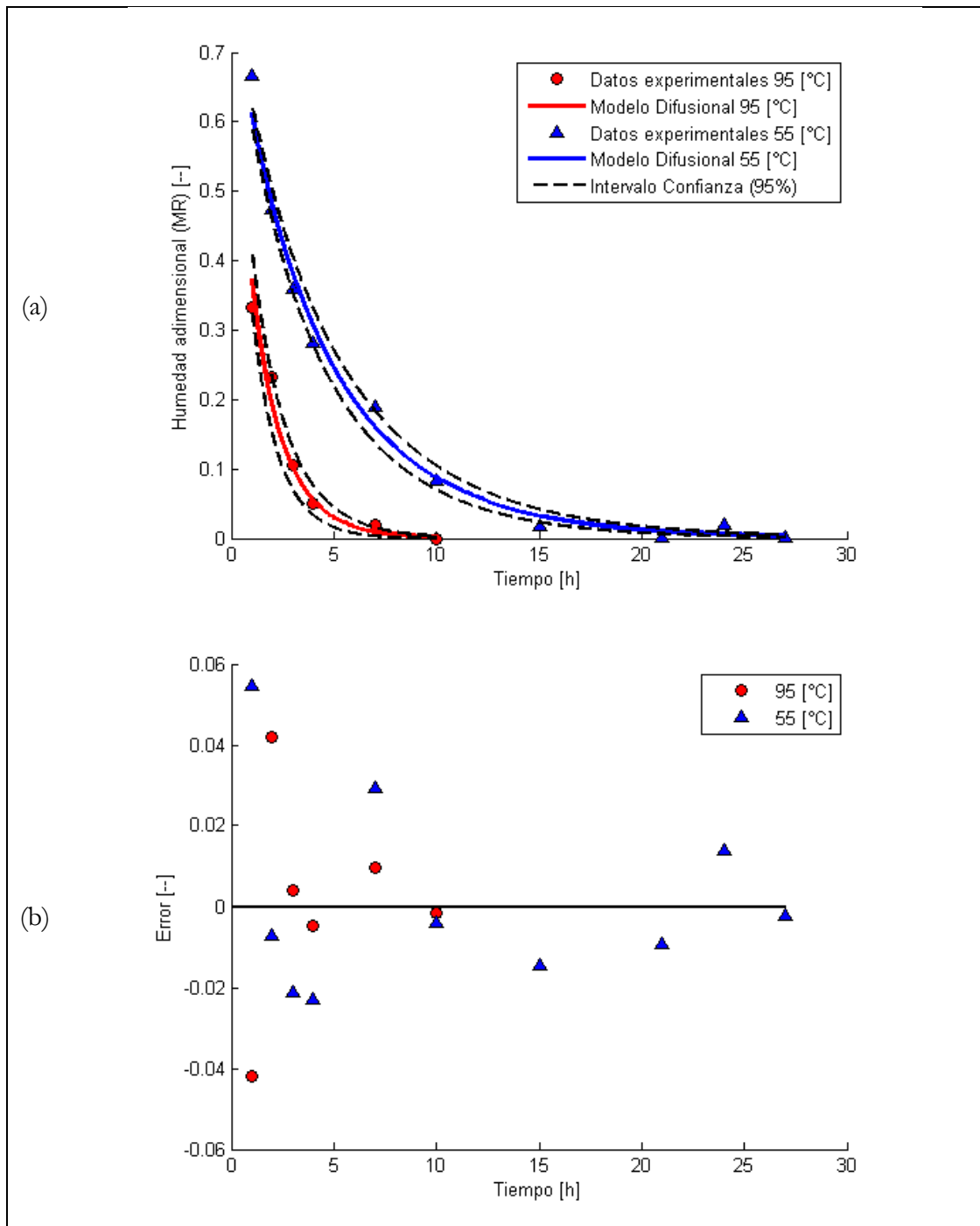


Figura 7.22 Modelo de difusión anómala (a) y distribución del error (b), en tejido de vacuno sin pretratamiento; deshidratado en EC.

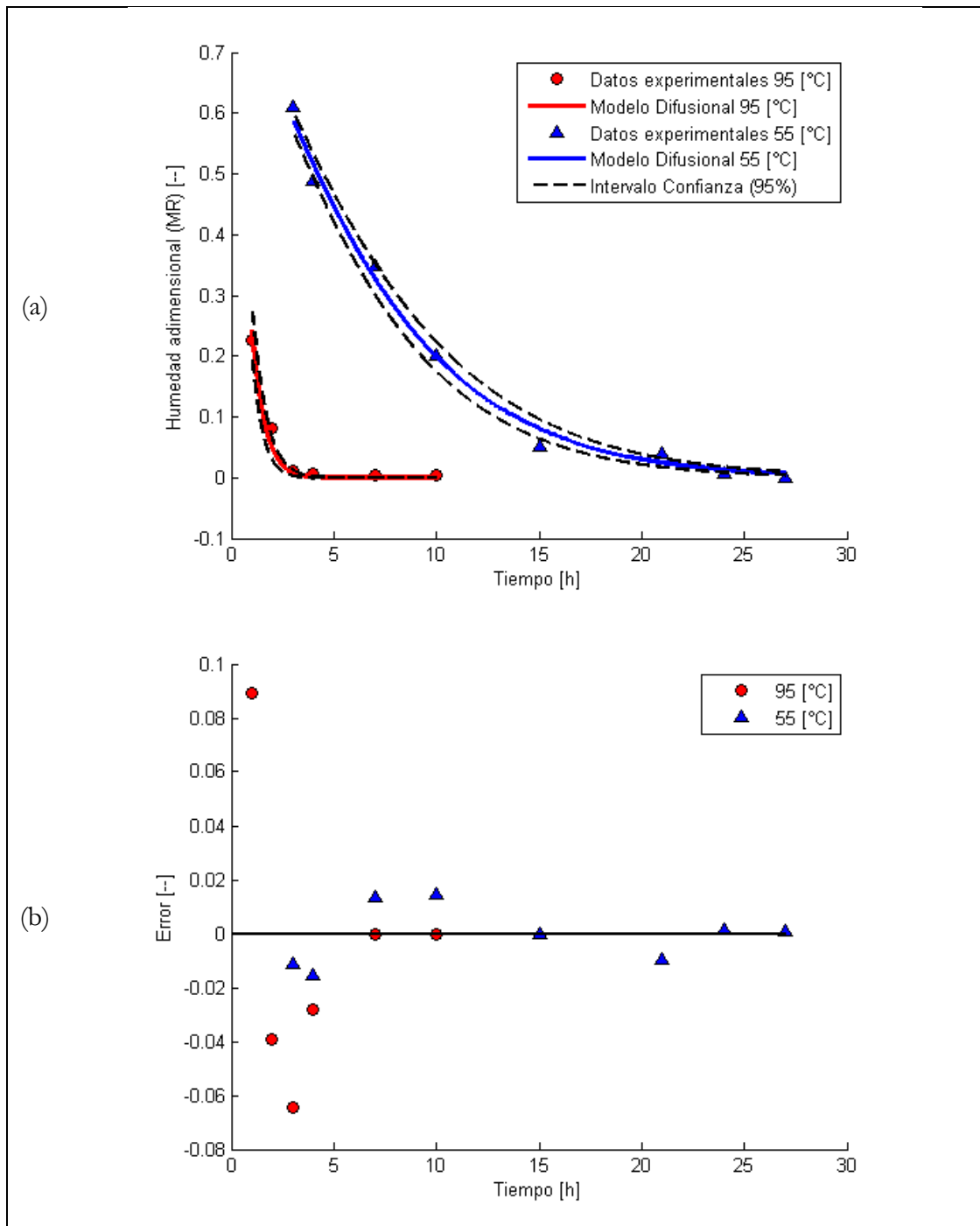


Figura 7.23 Modelo de difusión anómala (a) y distribución del error (b), en tejido de manzana sin pretratamiento; deshidratado en EC.

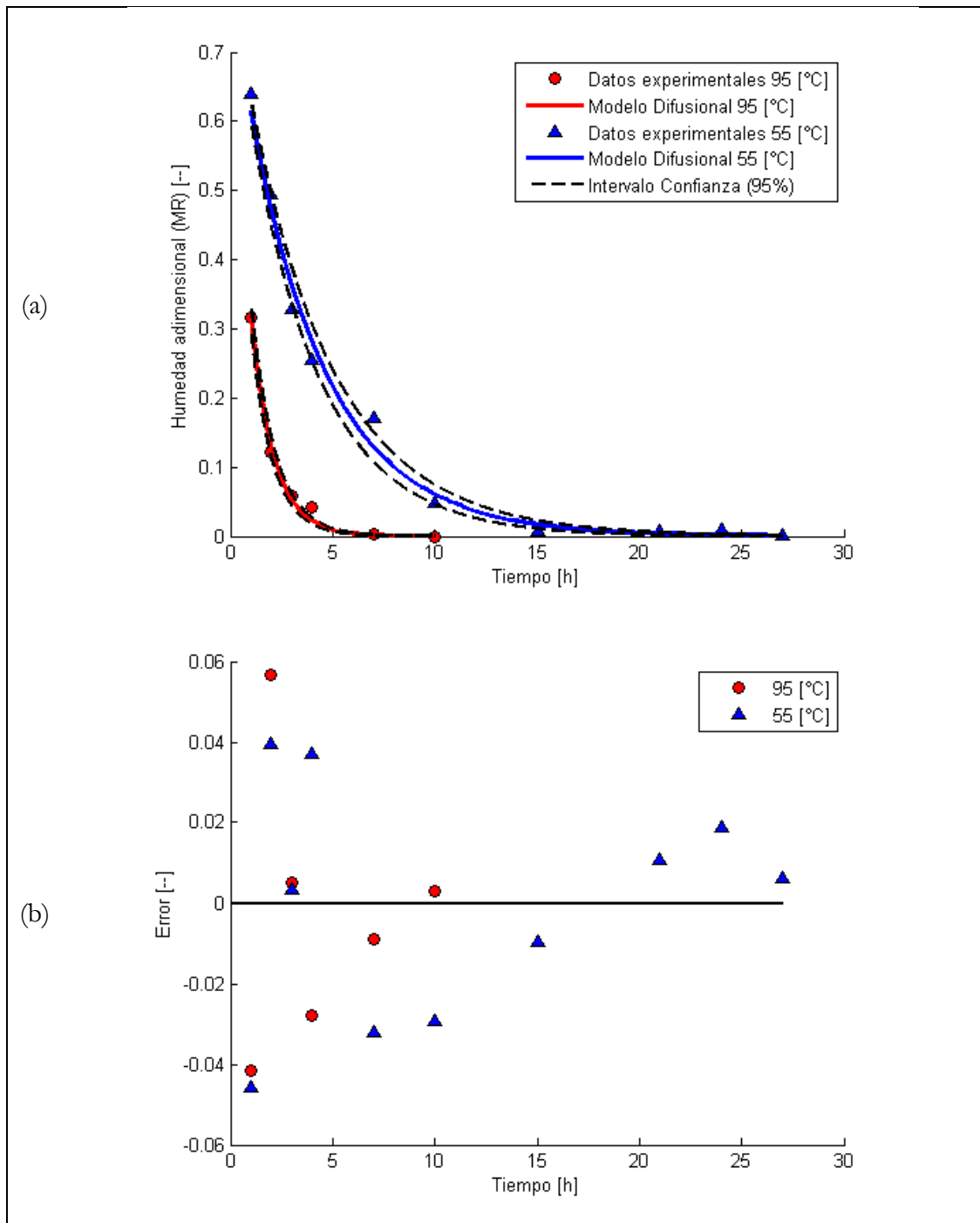


Figura 7.24 Modelo de difusión anómala (a) y distribución del error (b), en tejido de salmón tratado por congelación- descongelación; deshidratado en EC.

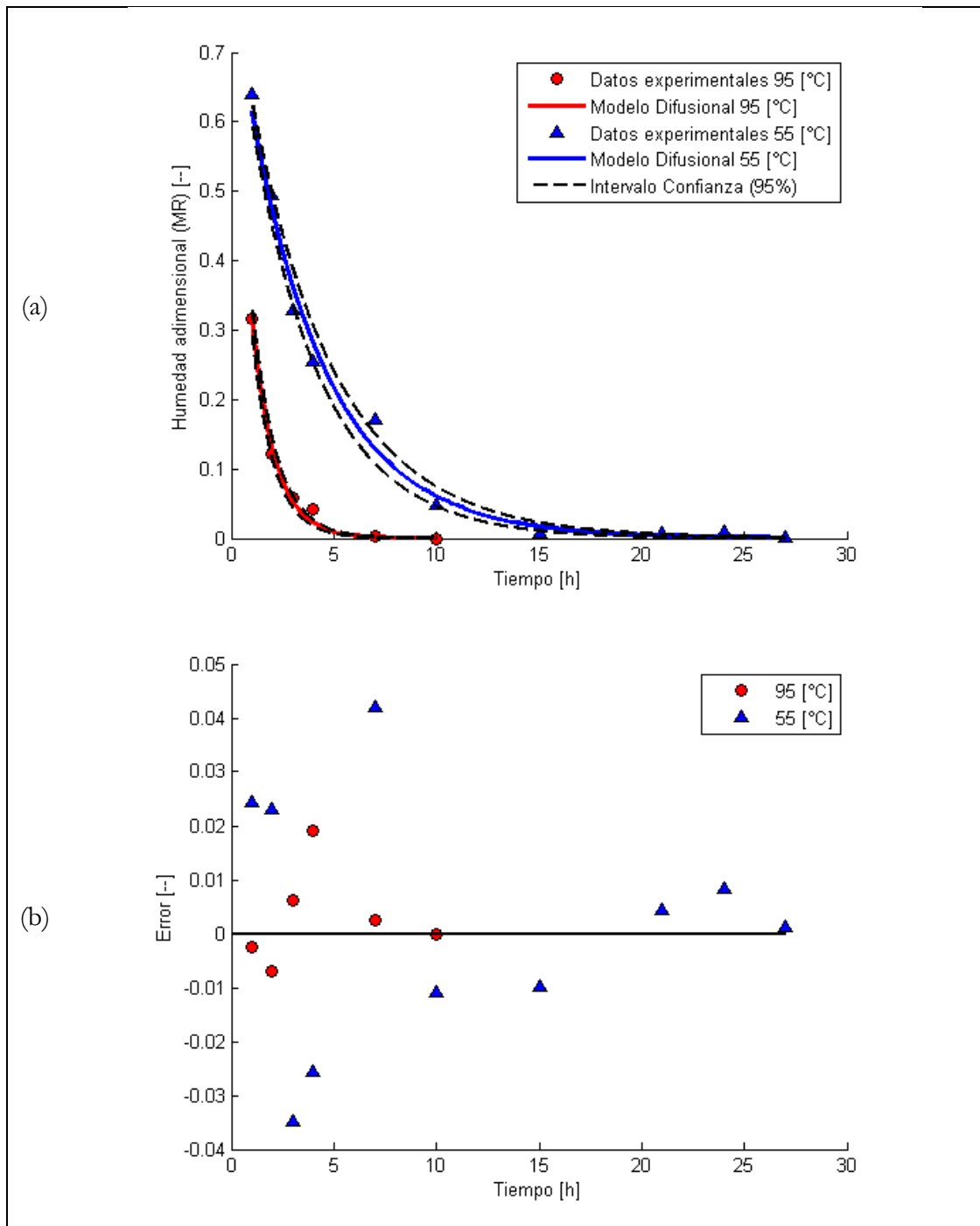


Figura 7.25 Modelo de difusión anómala (a) y distribución del error (b), en tejido de vacuno tratado por congelación- descongelación; deshidratado en EC.

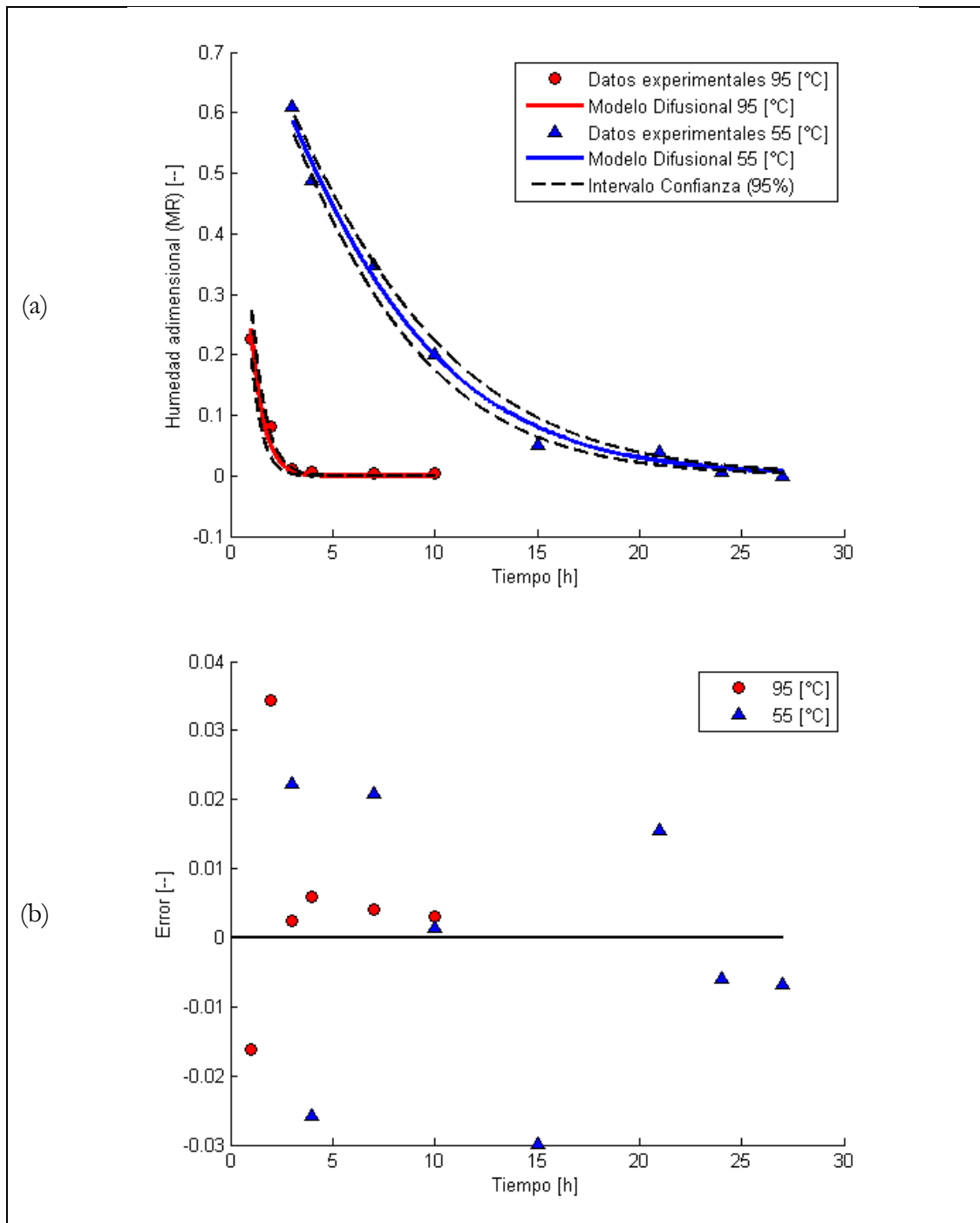


Figura 7.26 Modelo de difusión anómala (a) y distribución del error (b), en tejido de manzana tratado por congelación- descongelación; deshidratado en EC.

Tabla 7.2 Coeficiente de determinación ( $R^2$ ), suma del error cuadrático (SSE), coeficiente de difusión efectivo (Deff), y parámetro alpha ( $\alpha$ ); modelo de difusión anómala ( $\alpha$  constante) en método de deshidratación por estufa convectiva (EC).

Modelo de difusión anómala ( $\alpha$ cte.), Estufa Convectiva (EC)						
Control (C0)						
	T°	R <sup>2</sup>	SSE*10 <sup>-4</sup>	Deff*10 <sup>-10</sup>	m <sup>2</sup> s <sup>-1</sup>	$\alpha$
Salmón (SAL)	55	0.9998	0.82	1.504 <sup>a,A</sup>	± 0.017	0.840 <sup>A</sup> ± 0.099
	95	0.9929	8.25	4.130 <sup>b,A</sup>	± 0.284	
Vacuno (CV)	55	0.9889	53.03	4.447 <sup>a,A</sup>	± 0.397	0.901 <sup>A</sup> ± 0.052
	95	0.9583	36.39	12.269 <sup>b,B</sup>	± 1.783	
Manzana (MAN)	55	0.9968	8.63	0.232 <sup>a,A</sup>	± 0.011	1.165 <sup>A</sup> ± 0.078
	95	0.9288	144.7	1.216 <sup>b,A</sup>	± 0.385	
Congelado- Descongelado (C-D)						
	T°	R <sup>2</sup>	SSE*10 <sup>-4</sup>	Deff*10 <sup>-10</sup>	m <sup>2</sup> s <sup>-1</sup>	$\alpha$
Salmón (SAL)	55	0.9813	75.18	8.252 <sup>a,B</sup>	± 0.852	1.013 <sup>B</sup> ± 0.084
	95	0.9441	58.47	18.938 <sup>b,B</sup>	± 3.273	
Vacuno (CV)	55	0.9896	48.65	2.3447 <sup>a,B</sup>	± 0.212	0.977 <sup>B</sup> ± 0.061
	95	0.9933	4.68	7.966 <sup>b,B</sup>	± 0.478	
Manzana (MAN)	55	0.9928	28.27	0.088 <sup>a,B</sup>	± 0.008	1.330 <sup>B</sup> ± 0.089
	95	0.9902	3.86	1.290 <sup>b,B</sup>	± 0.178	

Letra minúscula: diferencia entre temperatura para un mismo tejido.  
Letra mayúscula: diferencia entre pretratamientos (C0, C-D) en un mismo tejido y nivel de temperatura.

Tabla 7.3 Coeficiente de determinación ( $R^2$ ), suma del error cuadrático (SSE), coeficiente de difusión efectivo (Deff), y parámetro alpha ( $\alpha$ ); modelo de difusión anómala ( $\alpha$  variable) en método de deshidratación por ventana refractiva (RW).

Modelo de difusión anómala ( $\alpha$ var.), Ventana Refractiva (RW)									
Control (C0)									
	T°	R <sup>2</sup>	SSE*10 <sup>-4</sup>	Deff*10 <sup>-10</sup> m <sup>2</sup> s <sup>-1</sup>			$\alpha$		
Salmón (SAL)	55	0.9986	4.74	10.735	±	0.191	0.800	±	0.018
	95	0.9966	4.58	16.719	±	0.625	0.840	±	0.041
Vacuno (CV)	55	0.9933	33.44	0.004	±	0.001	0.913	±	0.021
	95	0.9680	24.75	1.068	±	0.412	0.652	±	0.042
Manzana (MAN)	55	0.9959	15.88	7.484	±	3.596	1.399	±	0.052
	95	0.9974	2.94	7.673	±	3.368	1.660	±	0.056
Congelado- Descongelado (C-D)									
	T°	R <sup>2</sup>	SSE*10 <sup>-4</sup>	Deff*10 <sup>-10</sup> m <sup>2</sup> s <sup>-1</sup>			$\alpha$		
Salmón (SAL)	55	0.9984	5.66	6.471	±	1.276	0.857	±	0.020
	95	0.9986	1.67	15.926	±	6.679	0.848	±	0.046
Vacuno (CV)	55	0.9986	6.91	0.003	±	0.001	0.922	±	0.022
	95	0.9813	8.21	3.732	±	1.491	0.530	±	0.043
Manzana (MAN)	55	0.9977	7.37	0.329	±	0.260	1.793	±	0.089
	95	0.9916	8.53	1.514	±	0.362	1.885	±	0.029

Tabla 7.4 Coeficiente de determinación ( $R^2$ ), suma del error cuadrático (SSE), coeficiente de difusión efectivo (Deff), y parámetro alpha ( $\alpha$ ); modelo de difusión anómala ( $\alpha$  variable) en método de deshidratación por estufa convectiva (EC).

Modelo de difusión anómala ( $\alpha$ var.), Estufa Convectiva (EC)									
Control (C0)									
	T°	R <sup>2</sup>	SSE*10 <sup>-4</sup>	Deff*10 <sup>-10</sup> m <sup>2</sup> s <sup>-1</sup>			$\alpha$		
Salmón (SAL)	55	0.9999	0.00	1.341	±	0.338	1.027	±	0.026
	95	0.9944	6.52	5.710	±	1.539	0.977	±	0.030
Vacuno (CV)	55	0.9950	31.00	3.155	±	0.718	0.939	±	0.023
	95	0.9680	24.75	34.894	±	8.273	0.783	±	0.026
Manzana (MAN)	55	0.9982	4.81	53.796	±	15.778	1.082	±	0.029
	95	0.9995	0.89	0.183	±	0.123	1.916	±	0.077
Congelado- Descongelado (C-D)									
	T°	R <sup>2</sup>	SSE*10 <sup>-4</sup>	Deff*10 <sup>-10</sup> m <sup>2</sup> s <sup>-1</sup>			$\alpha$		
Salmón (SAL)	55	0.9816	74.08	7.254	±	0.151	0.856	±	0.021
	95	0.9464	5.60	27.823	±	6.131	0.799	±	0.024
Vacuno (CV)	55	0.9985	6.91	2.030	±	0.519	0.994	±	0.026
	95	0.9981	3.21	10.307	±	3.946	0.947	±	0.044
Manzana (MAN)	55	0.9932	26.89	7.334	±	2.088	1.250	±	0.027
	95	0.9920	3.13	1.157	±	0.708	0.968	±	0.071

Anexo D COLOR

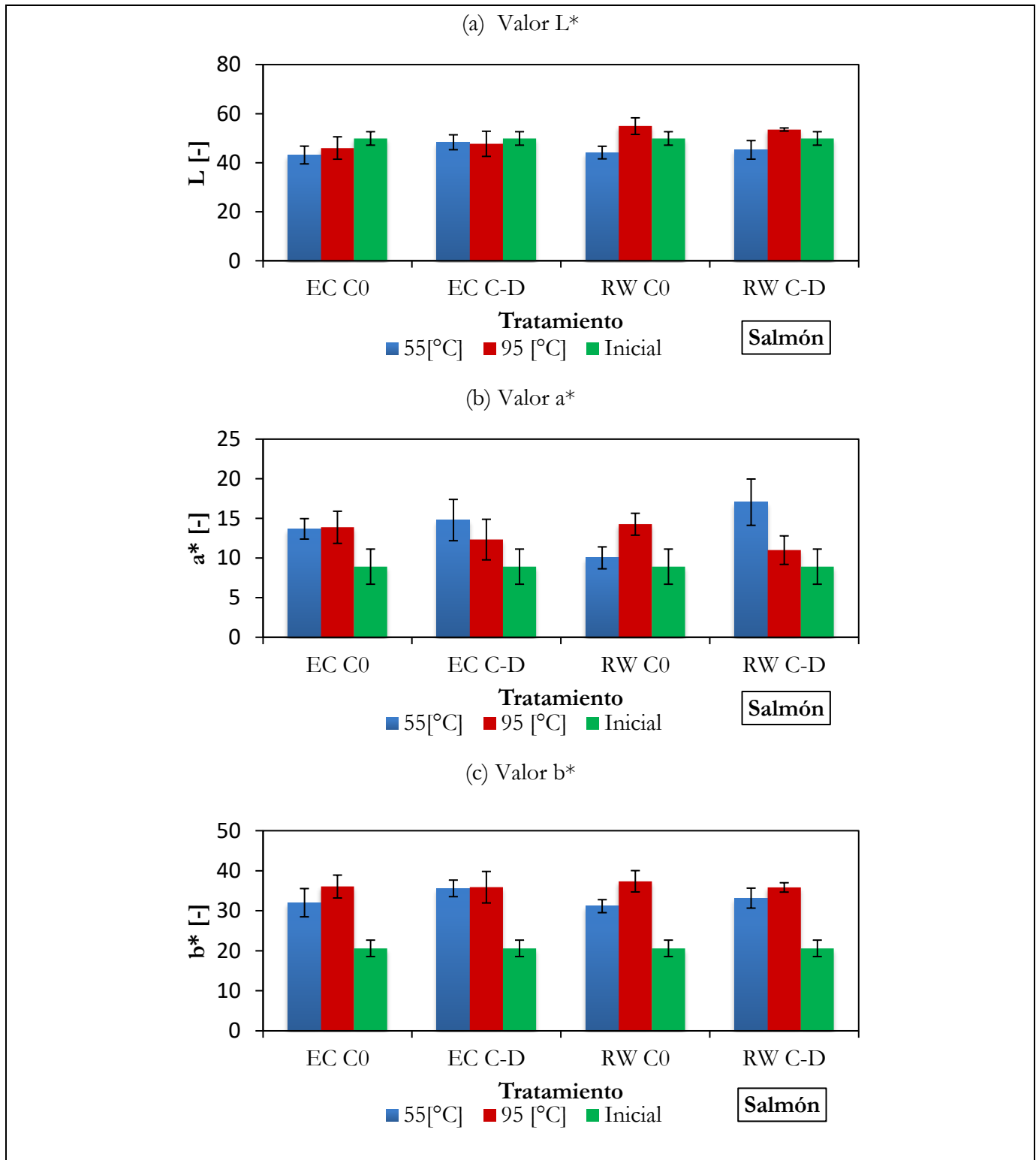


Figura 7.27 Coordenadas colorimétricas tejido salmón (tejido fresco y tratado) en ventana refractiva (RW) y estufa convectiva (EC).

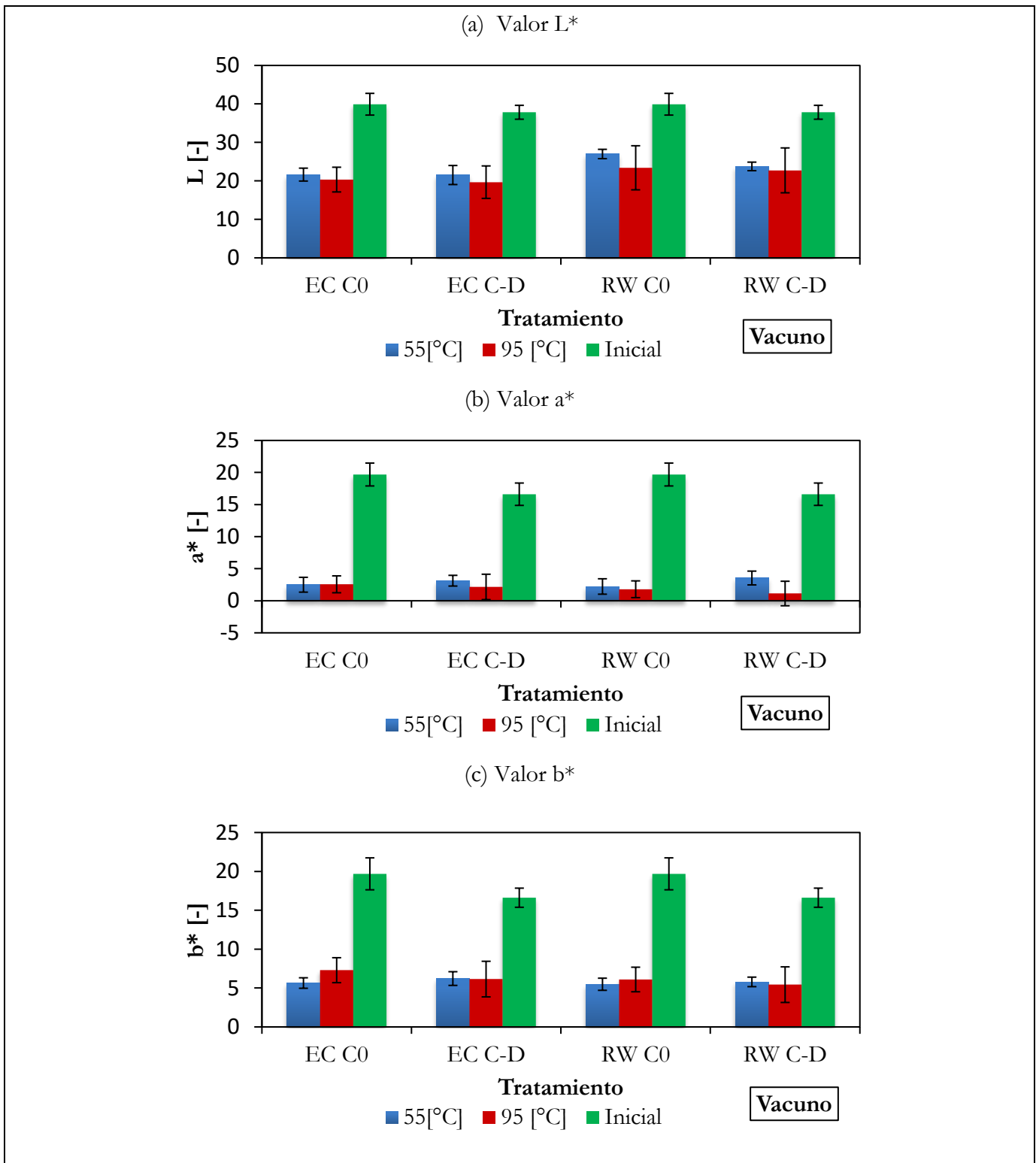


Figura 7.28 Coordenadas colorimétricas tejido vacuno (tejido fresco y tratado) en ventana refractiva (RW) y estufa convectora (EC).

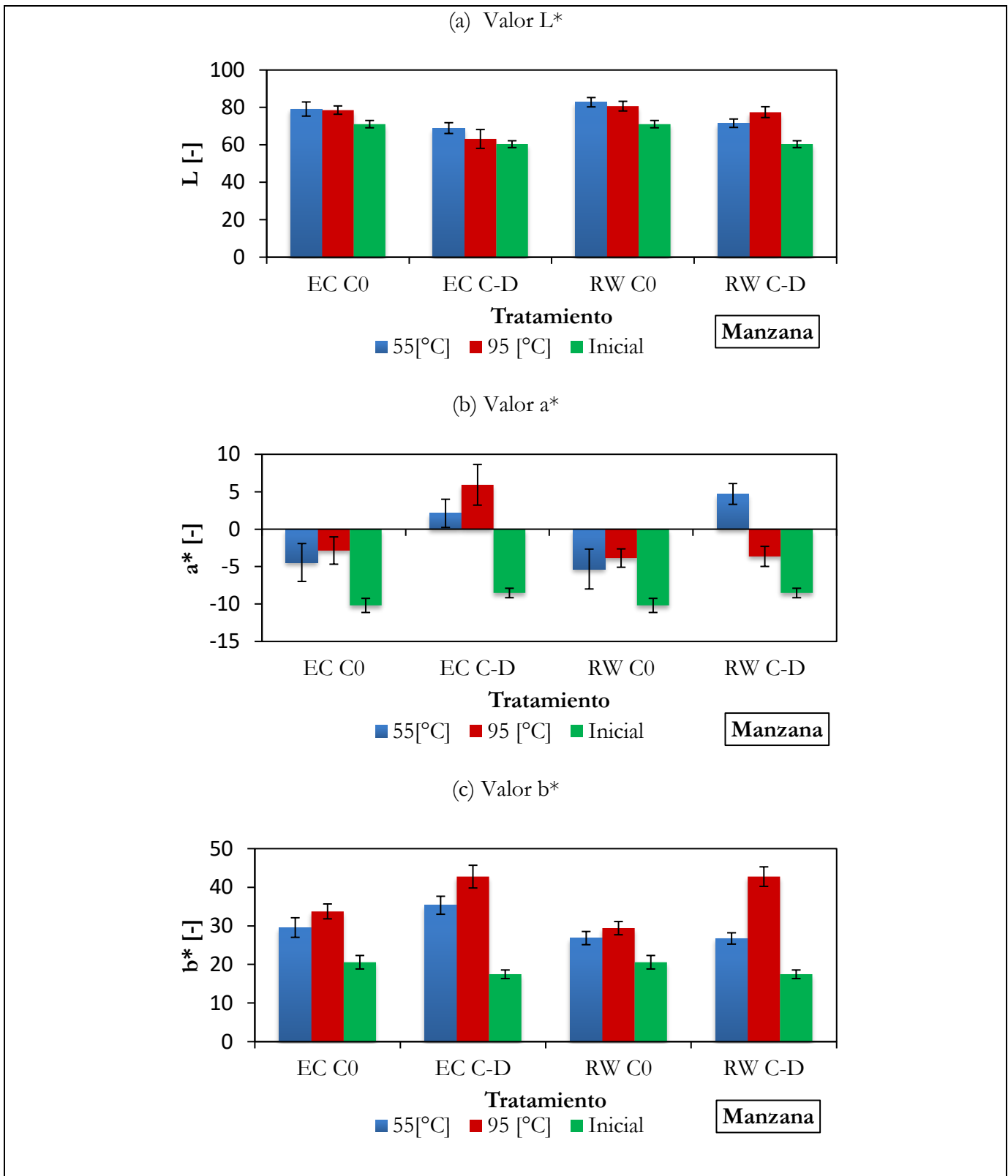


Figura 7.29 Coordenadas colorimétricas tejido de manzana (tejido fresco y tratado) en ventana refractiva (RW) y estufa convectiva (EC).

Tabla 7.5 Parámetros colorimétricos en tejido de salmón, vacuno y manzana deshidratado en RW y EC

Parámetros Colorimétricos														
T°	Ventana Refractiva (RW)						Estufa Convectiva (EC)							
	C0			C-D			C0		C-D					
Salmón (SAL)	55	L	44.13 <sup>a,Δ,1</sup>	±	2.57	45.23 <sup>a,Δ,1</sup>	±	3.78	43.13 <sup>a,Δ,1</sup>	±	3.63	48.33 <sup>a,B,2</sup>	±	3.04
		a*	10.02 <sup>a,Δ,1</sup>	±	1.38	17.04 <sup>a,B,1</sup>	±	2.92	13.67 <sup>a,Δ,2</sup>	±	1.29	14.78 <sup>a,Δ,2</sup>	±	2.61
		b*	31.15 <sup>a,Δ,1</sup>	±	1.62	33.15 <sup>a,B,1</sup>	±	2.50	32.01 <sup>a,Δ,1</sup>	±	3.53	35.59 <sup>a,B,2</sup>	±	2.07
	95	L	54.91 <sup>b,Δ,1</sup>	±	3.38	53.52 <sup>b,Δ,1</sup>	±	0.64	45.98 <sup>b,Δ,2</sup>	±	4.57	47.69 <sup>a,Δ,2</sup>	±	5.13
		a*	14.26 <sup>b,Δ,1</sup>	±	2.59	10.99 <sup>b,B,1</sup>	±	1.80	13.87 <sup>a,Δ,1</sup>	±	2.03	12.32 <sup>b,B,1</sup>	±	2.56
		b*	37.36 <sup>b,Δ,1</sup>	±	2.66	35.82 <sup>b,B,1</sup>	±	1.17	36.04 <sup>b,Δ,1</sup>	±	2.86	35.88 <sup>a,Δ,1</sup>	±	3.94
Vacuno (CV)	55	L	26.99 <sup>a,Δ,1</sup>	±	1.21	23.76 <sup>a,B,1</sup>	±	1.11	21.63 <sup>a,Δ,2</sup>	±	1.68	21.52 <sup>a,Δ,2</sup>	±	2.48
		a*	2.22 <sup>a,Δ,1</sup>	±	1.20	3.54 <sup>a,B,1</sup>	±	1.08	2.50 <sup>a,Δ,1</sup>	±	1.16	3.12 <sup>a,Δ,1</sup>	±	0.84
		b*	5.48 <sup>a,Δ,1</sup>	±	0.78	5.79 <sup>a,Δ,1</sup>	±	0.61	5.64 <sup>a,Δ,1</sup>	±	0.67	6.21 <sup>a,B,1</sup>	±	0.88
	95	L	23.40 <sup>b,Δ,1</sup>	±	5.73	22.73 <sup>a,Δ,1</sup>	±	5.83	20.34 <sup>a,Δ,2</sup>	±	3.21	19.67 <sup>a,Δ,2</sup>	±	4.22
		a*	1.79 <sup>a,Δ,1</sup>	±	1.31	1.13 <sup>b,Δ,1</sup>	±	1.91	2.56 <sup>a,Δ,1</sup>	±	1.32	2.15 <sup>a,Δ,1</sup>	±	1.98
		b*	6.09 <sup>a,Δ,1</sup>	±	1.58	5.43 <sup>a,Δ,1</sup>	±	2.17	7.29 <sup>b,Δ,2</sup>	±	1.60	6.14 <sup>b,Δ,1</sup>	±	2.29
Manzana (MAN)	55	L	82.79 <sup>a,Δ,1</sup>	±	2.50	71.57 <sup>a,B,1</sup>	±	2.25	79.15 <sup>a,Δ,2</sup>	±	3.78	68.96 <sup>a,B,2</sup>	±	2.88
		a*	-5.32 <sup>a,Δ,1</sup>	±	2.66	4.70 <sup>a,B,1</sup>	±	1.39	-4.45 <sup>a,Δ,1</sup>	±	2.53	2.11 <sup>a,B,2</sup>	±	1.88
		b*	26.83 <sup>a,Δ,1</sup>	±	1.71	26.74 <sup>a,Δ,1</sup>	±	1.46	29.56 <sup>a,Δ,2</sup>	±	2.54	35.33 <sup>a,B,2</sup>	±	2.33
	95	L	80.69 <sup>b,Δ,1</sup>	±	2.57	77.49 <sup>b,B,1</sup>	±	2.91	78.59 <sup>a,Δ,2</sup>	±	2.22	63.16 <sup>b,B,2</sup>	±	5.03
		a*	-3.86 <sup>b,Δ,1</sup>	±	1.23	-3.63 <sup>b,Δ,1</sup>	±	1.34	-2.85 <sup>b,Δ,2</sup>	±	1.83	5.92 <sup>b,B,2</sup>	±	2.71
		b*	29.41 <sup>b,Δ,1</sup>	±	1.71	29.32 <sup>b,Δ,1</sup>	±	2.53	33.74 <sup>b,Δ,2</sup>	±	1.93	42.75 <sup>b,B,2</sup>	±	2.94

Letra minúscula: diferencia entre temperatura (fila).

Letra mayúscula: diferencia entre C0 y C-D en un mismo método, RW o EC, a igual nivel de temperatura (columna).

Número: Diferencia entre método para una misma temperatura y C0 o C-D (columna).

La diferencia significativa está hecha por tejido.

N = 20, por cada tratamiento y nivel.