

**UNIVERSIDAD DE CHILE**

**FACULTAD DE CIENCIAS AGRONÓMICAS**

**ESCUELA DE PREGRADO**

**MEMORIA DE TÍTULO**

**MONITOREO AUTOMATIZADO DE LA TEMPERATURA EN AMBIENTE  
CONTROLADO MEDIANTE TECNOLOGÍA DE BAJO COSTO**

**CHRISTIAN JOSEPH VERGARA VARGAS**

**SANTIAGO, CHILE**

**2015**

**UNIVERSIDAD DE CHILE**

**FACULTAD DE CIENCIAS AGRONÓMICAS**

**ESCUELA DE PREGRADO**

**MEMORIA DE TÍTULO**

**MONITOREO AUTOMATIZADO DE LA TEMPERATURA EN AMBIENTE  
CONTROLADO MEDIANTE TECNOLOGÍA DE BAJO COSTO**

**AUTOMATED TEMPERATURE MONITORING IN CONTROLLED  
ENVIRONMENT THROUGH LOW COST TECHNOLOGY**

**CHRISTIAN JOSEPH VERGARA VARGAS**

**SANTIAGO, CHILE**

**2015**

# **UNIVERSIDAD DE CHILE**

**FACULTAD DE CIENCIAS AGRONÓMICAS**

**ESCUELA DE PREGRADO**

## **MEMORIA DE TÍTULO**

### **MONITOREO AUTOMATIZADO DE LA TEMPERATURA EN AMBIENTE CONTROLADO MEDIANTE TECNOLOGÍA DE BAJO COSTO**

Memoria para optar al Título Profesional de  
Ingeniero en Recursos Naturales Renovables

**CHRISTIAN JOSEPH VERGARA VARGAS**

<b>Profesores Guía</b>	<b>Calificaciones</b>
Sr. Cristian Mattar B. Ingeniero en Recursos Naturales Renovables, Dr.	7,0
Sr. Víctor Escalona C. Ingeniero Agrónomo, Dr.	7,0
<b>Profesores Evaluadores</b>	
Sr. Luis Luchsinger L. Ingeniero Agrónomo, Ph.D	7,0
Sra. Loreto Cánaves S. Ingeniero Agrónomo, M.S.	6,8

**SANTIAGO, CHILE  
2015**

## **AGRADECIMIENTOS**

En primer lugar agradezco a mi familia por el apoyo incondicional que me dieron a lo largo de mi etapa universitaria. A mis hermanos Karla y Nicolás por su paciencia y comprensión en las etapas de estudio y frustración, y a mis padres Erika e Iván quienes me enseñaron que el cariño y la perseverancia son pilares fundamentales en cualquier labor que realice.

A la fundación Eduardo Guilisasti Tagle quienes me brindaron el apoyo económico y humano a lo largo de mis estudios. Estaré siempre agradecido por la oportunidad que me entregaron, y que entiendo, es un privilegio en esta sociedad.

A mi profesor guía Cristian Mattar por su apoyo y enseñanzas a pesar de su restringido tiempo. Para él mi respeto y admiración en el ámbito profesional.

Al Laboratorio para el Análisis de la Biósfera (LAB) y al Centro de Estudios Postcosecha (CEPOC) de la Universidad de Chile, quienes me brindaron apoyo técnico en las distintas etapas de esta memoria. En especial a Claudio Durán (LAB) por su ayuda fundamental en la creación de imágenes 3D de temperatura, a Miguel Gómez de la Universidad Politécnica de Madrid, por facilitarme los sensores comerciales de temperatura y al profesor Víctor Escalona quién puso a disposición su tiempo y recursos para el desarrollo de este estudio.

A mis compañeros y amigos, que hicieron de esta etapa la de mayor crecimiento y conocimiento personal. Por todos los trabajos, viajes, decepciones, celebraciones y momentos compartidos que quedaran grabados por siempre en mi memoria.

## INDICE

RESUMEN .....	5
ABSTRACT.....	6
INTRODUCCIÓN.....	7
Objetivo general.....	10
Objetivos específicos .....	10
MATERIALES Y MÉTODO .....	11
Lugar de estudio.....	11
Materiales .....	12
Métodos.....	14
Configuración y evaluación del sistema de monitoreo de bajo costo .....	14
Análisis de la variación temporal y espacial de la temperatura.....	16
RESULTADOS Y ANÁLISIS.....	20
Configuración y evaluación del sistema de monitoreo de bajo costo .....	20
Comparación entre sensores .....	21
Evaluación con otros sistemas .....	22
Análisis de la variación temporal y espacial de la temperatura .....	26
Interpolación de temperaturas.....	30
CONCLUSIONES.....	36
BIBLIOGRAFÍA.....	37
APÉNDICES .....	41

## RESUMEN

Medir y controlar variables ambientales para optimizar procesos productivos es un desafío continuo y complejo dentro de la industria alimentaria. Más aún, si se pretende implementar una red de sensores *in situ*, los costos económicos pueden llegar a transformarse en un factor limitante para la creación de dichas redes.

El objetivo de este estudio fue la creación e implementación de una red automatizada, para el monitoreo de temperaturas en ambientes controlados mediante tecnología de bajo costo. Para ello, se procedió a: 1) configurar y evaluar un sistema de monitoreo de temperatura ambiental de bajo costo y 2) analizar la variación espacial de la temperatura a partir de diferentes situaciones configuradas en un ambiente cerrado.

Para la configuración del sistema de bajo costo se utilizaron sensores de temperatura DS18B20 conectados a una placa Arduino. Mientras que para evaluar su funcionamiento se comparó con dos sistemas comerciales de monitoreo. El análisis de la variación espacial se desarrolló en una cámara de frío del CEPOC de la Universidad de Chile, donde se implementó la red de monitoreo de bajo costo y se realizaron mediciones durante 24 horas para 2 configuraciones de almacenamiento, las cuales se evaluaron a 3 temperaturas: 0, 5 y 10 °C. Finalmente se generaron imágenes 3D a partir de la interpolación de los registros obtenidos para visualizar y analizar los resultados de manera espacial.

Se logró configurar e implementar satisfactoriamente la red de monitoreo de temperaturas de bajo costo. La comparación con ambos sistemas comerciales demostró que no hubo diferencias mayores a 0,5 °C en los registros. Sin embargo la red Arduino presentó costos estimados en 3 y 5 veces más bajos, respectivamente. Mientras que el análisis espacial demostró que hubo diferencias de temperaturas muy marcadas dentro la cámara de frío de hasta 9,5 °C para un mismo instante y configuración de almacenamiento.

Se concluye que la precisión y rendimiento del sistema de bajo costo es semejante a los sistemas comerciales, lo cual permitió caracterizar espacial y temporalmente las temperaturas de una cámara de frío. Tecnología de este tipo debe seguir siendo objeto de estudio puesto que brinda acceso a herramientas útiles para la investigación académica y acelera el traspaso de conocimiento hacia la industria.

**Palabras clave: Temperaturas, Monitoreo, Arduino, Bajo Costo.**

## ABSTRACT

To measure and control environmental variables in order to optimize production processes is a continuous and complex challenge in the food industry. This is moreover the case, if there is a plan to set up a sensor network on-field, so that economic costs could become a limiting factor for the creation of such networks.

The purpose of this study was the creation and set up of an automated network, for temperature monitoring in controlled environments using low-cost technology. It was therefore necessary to: 1) configure and test a low-cost environmental monitoring temperature system and 2) analyze the temperature spatial variation from different situations configured in closed environment.

DS18B20 temperature sensors connected to an Arduino board were used for configuration of the low-cost system. To evaluate correctly their performance were compared with two commercial monitoring systems. The spatial variation analysis was developed in a cold room of CEPOC of the Universidad de Chile, where the low-cost monitoring network had been implemented and measured 24 hours for two storage configurations, which were evaluated at 3 temperatures: 0, 5 and 10 °C. Finally 3D images were obtained from the temperatures' interpolations to visualize and spatially analyze the results.

It was possible to set up and successfully implement the low-cost temperature monitoring network. The comparison with both commercial systems proved that there had not been differences bigger than 0.5 °C on the data. However Arduino network presented estimated costs three and five times lower, respectively. While the spatial analysis proved that there existed differences between areas of up to 9.46 °C for a same moment and storage configuration.

In conclusion, it can be considered as given that the accuracy and performance of the low-cost system is similar to commercial systems, which allows to spatially and temporally characterize temperatures of a cold room. Such kind of technology should be investigated in further studies since it provides access to useful tools for academic research and accelerate the transfer of knowledge to industry.

**Key words: Temperature, Monitoring, Arduino, Low-cost.**

## INTRODUCCIÓN

Medir y controlar variables ambientales para optimizar procesos productivos se ha transformado en un desafío continuo de la industria alimentaria mundial. Se estima que la mitad de los alimentos producidos a nivel global son perecederos, por lo que la búsqueda de métodos de conservación para retrasar los procesos microbianos y enzimáticos que ocasionan la descomposición, se transforma en una tarea de gran importancia para el sector alimentario (Amstrong *et al.*, 2012).

En la industria hortofrutícola, especialmente la de exportación, las condiciones de conservación y transporte son determinantes para la calidad del producto, entendiéndose esto como el aspecto, textura, sabor y valor nutritivo del alimento (FAO, 2012; Recasens *et al.*, 2009). Con base en un estudio realizado por la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO) (López, 2003), se determinó que la apariencia y condición física de las frutas es la variable cualitativa más importante para los consumidores como medida de calidad. Por lo tanto, el monitoreo y supervisión de los parámetros de conservación de los alimentos adoptan una gran relevancia desde el punto de vista comercial.

Entre los métodos existentes para la conservación de alimentos, la refrigeración se ha transformado en uno de los más utilizados, debido a que es capaz de mantener el sabor, olor y aspectos naturales de los alimentos (Plank, 1980). En términos generales, la disminución de las temperaturas prolonga la vida útil de las frutas y hortalizas debido a una ralentización en su metabolismo, sin embargo, puede producir alteraciones fisiológicas por lo que su implementación debe ser supervisada y monitoreada (Ruiz-García *et al.*, 2009).

Las cámaras frigoríficas han demostrado ser una solución complementaria eficaz para la conservación en fresco de productos por períodos de tiempo prolongados, manteniendo su calidad y mejorando los niveles de comercialización (Barreiro y Sandoval, 2006; Saldías, 2003). En términos generales, se definen como un volumen cerrado con aislamiento térmico y barreras físicas que impiden un intercambio abrupto de calor con el exterior para mantener una temperatura determinada. Específicamente una cámara frigorífica de convección forzada, es aquella que a través de la reiterada compresión y descompresión de un fluido baja la temperatura del aire circundante, el cual se hace recircular en su interior para mantener un ambiente favorable de conservación (Plank, 1980; Saldías, 2003).

Además de mantener un ambiente propicio de conservación, estudiar los gradientes de temperatura generados durante toda la cadena productiva se ha transformado en un tema crítico para la industria agroalimentaria (Rodríguez-Bermejo *et al.*, 2007). Esto se debe a

que el mantenimiento homogéneo de la temperatura al interior de cámaras frigoríficas y contenedores es un objetivo difícil de conseguir, y además, durante las distintas etapas como la carga y descarga, los productos se pueden exponer a temperaturas extremas o no contar con un adecuado sistema de refrigeración (Jiménez-Ariza *et al.*, 2011). Es así como la temperatura puede ser modelada con una distribución espacial dentro de cámaras de frío y contenedores, dejando de lado la hipótesis de una distribución homogénea del clima interior utilizada anteriormente en modelos de este tipo (Nebballi *et al.*, 2012). Un ejemplo de esto, fue el demostrado por Ruiz-García *et al.* (2009) donde se determinó que un modelo espacial de temperatura para la predicción de la calidad mediante uso de sensores de temperatura al interior de camiones refrigerados, incrementó hasta un 20% la vida útil de productos alimentarios como hortalizas y frutas.

En este contexto, el monitoreo automatizado de las temperaturas mediante sensores instalados *in situ* demuestra ser una alternativa necesaria para el control de alimentos, ya que proveen información específica y útil para el manejo de la producción y cadena de frío (Ehret *et al.*, 2001). Los últimos avances en electrónica y telecomunicaciones han permitido el desarrollo de sensores cada vez más portátiles, llegando a la obtención de artefactos inalámbricos del tamaño de una pila de reloj capaces de registrar temperaturas en una memoria interna, e incluso sensores conectados en pequeñas redes capaces de enviar información de manera remota. Todos ellos han demostrado ser una solución apta para el monitoreo de sistemas productivos, sin embargo los costos de implementación pueden llegar a representar un factor limitante al momento de evaluar su inclusión en la cadena productiva (Ruiz-Altisent *et al.*, 2010; Suárez, 2013).

El concepto de *low cost* nace como una estrategia comercial ligada a la gestión de empresas que se refiere a la oferta de un producto o servicio con precios de venta más bajos que sus competidores, pero con un rendimiento igual o similar. Esto se logra disminuyendo los costos de producción, utilizando modelos de negocio simples, eliminando intermediarios en la cadena de procesos o quitando elementos del producto o servicio que no son esenciales para el propósito o consumidor final (Berman 2014; Chiambaretto y Fernandez, 2014). Sin embargo en los últimos años se ha hecho un uso excesivo del concepto, desvirtuando su significado y transformándose en sinónimo de ofertar un producto a precios más bajos, sin conllevar necesariamente un modelo de gestión como el descrito anteriormente (Vila, 2010). En el ámbito académico y de investigación, el concepto de tecnología *low cost* se asocia al uso o construcción de artefactos con costos de implementación menores a los sistemas comerciales convencionales y que se caracterizan por ser altamente versátiles en su configuración y cambio de elementos, lo que permite reconfigurarlos y adecuarlos a situaciones específicas (Valera *et al.*, 2014; Yang *et al.*, 2014).

Es así como diversos autores aplican el concepto basados en la comparación monetaria, técnica o una mezcla de ambas. Yeh *et al.* (2014) consideraron la creación de un generador de hidrógeno *low cost* al presentar costos de producción de gas entre 9 y 13 veces más barato que los sistemas comerciales. En cambio Ahadani *et al.* (2012) determinaron como satisfactorio su sistema Arduino de bajo costo al tener más de un 90% de eficiencia en comparación a sistemas comerciales para el conteo de insumos farmacéuticos. Walzik *et al.*

(2015) establecieron que la construcción de un sistema de observación de células fabricado con Arduino era considerado *low cost* al tener costos menores a €1.250, por otra parte Gomes *et al.* (2015) utilizaron el concepto para la fabricación de un sistema de caracterización de sensores ópticos con costos menores a €1.400, mientras que Fuentes *et al.* (2014) establecieron que la creación de un registrador de datos (*data logger*) para sistemas fotovoltaicos entraba en esta categoría al presentar costos de construcción equivalentes a €60. Finalmente Young *et al.* (2014) determinaron como *low cost* un sensor de temperatura del aire con envío de datos vía *Wi-Fi* y una precisión de 0,22 °C al presentar costos cercanos a los US\$150.

En un sector tan competitivo y exigente como la exportación de frutas, contar con un monitoreo constante y preciso de los productos se transforma en una ventaja importante. Más aún si esto se hace mediante una tecnología de bajo coste, este factor puede llegar a transformarse en una ventaja competitiva al momento de seleccionar distribuidores, debido a la confianza que genera el conocimiento acabado de sus procesos, y el posible aseguramiento de la calidad y gestión del producto (MAGRAMA, 2004).

El monitoreo de las diversas etapas de producción y distribución es una labor que se ha intentado llevar a cabo en la industria hortofrutícola, sin embargo debido a la complejidad y diversidad de actores que participan a lo largo de la cadena, esta se vuelve una tarea difícil desde un punto de vista técnico y económico (Badía, 2011). Por lo que reducir los costos asociados a los instrumentos de monitoreo y automatizar el proceso de generación y recolección de datos es un nicho importante hacia donde se puede avanzar mediante tecnología de tipo *low cost* como Arduino.

El objetivo de esta memoria fue generar una red de monitoreo y registro automatizada de temperatura del aire, mediante tecnología *low cost* para ser empleada en un ambiente controlado como lo son las cámaras de frío.

## **Objetivo general**

Implementar un sistema de monitoreo de temperaturas en un ambiente controlado a través de un sistema de bajo costo.

## **Objetivos específicos**

- Configurar y evaluar un sistema de monitoreo de temperatura ambiental de bajo costo.
- Analizar la variación espacial de la temperatura a partir de diferentes situaciones configuradas en un ambiente cerrado.

## MATERIALES Y MÉTODO

### Lugar de estudio

El estudio se llevó a cabo en una cámara de frío del Centro de Estudios Postcosecha (CEPOC) de la Facultad de Ciencias Agronómicas de la Universidad de Chile, ubicada en la comuna de La Pintana, Santiago de Chile. Dicha cámara consiste en una habitación de 3,6 metros de largo, 2,6 metros de ancho y 3 metros de alto, con murallas recubiertas de poliestireno extendido. Cuenta con un sistema de enfriamiento marca Danfoss Optyma, fabricado en Dinamarca, de 4 ventiladores de 355 mm de diámetro, un compresor hermético modelo R404 con aceite refrigerante de polioléster, y una capacidad de refrigeración de 22.280 BTU/h para una temperatura de trabajo de 5 °C.

Cabe destacar que el sistema de control de frío de la cámara contó sólo con un termómetro digital impermeabilizado con cubierta metálica para el control de las temperaturas, modelo DS18B20, fabricado en Estados Unidos, el cual estuvo conectado al sistema de enfriamiento para dirigir el funcionamiento de los equipos. Dicho termómetro se encontraba frente al primer evaporador que recibe el líquido refrigerante, con lo que se aseguró la medición de las temperaturas más bajas dentro de la cámara y así evitar daños por frío en los productos almacenados. En la Figura 1 se muestra la ubicación del sensor en la cámara de frío.

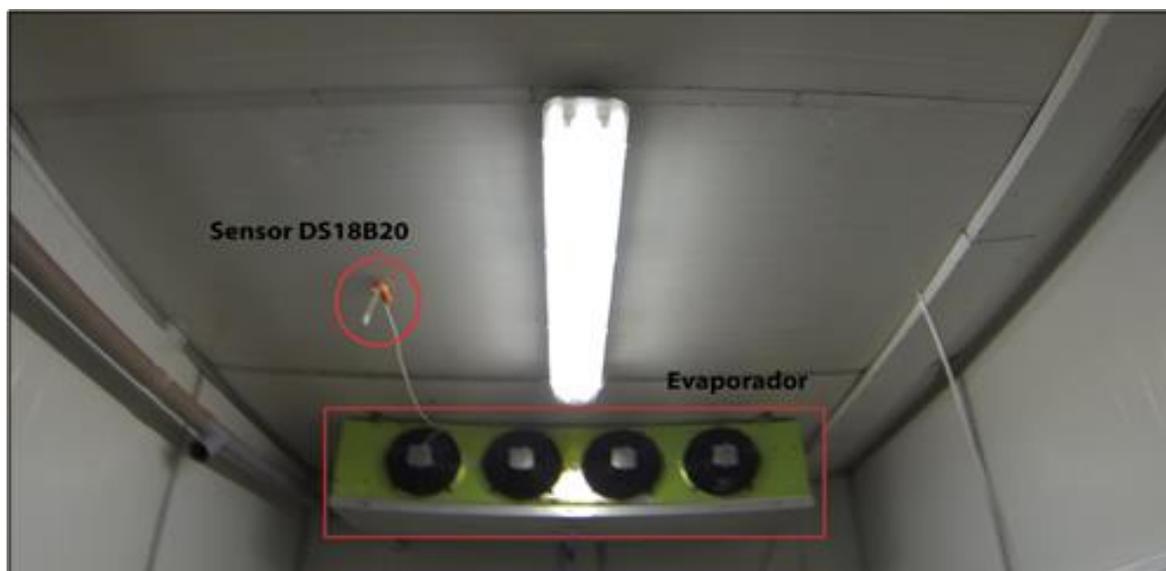


Figura 1. Ubicación del termómetro digital del sistema de enfriamiento de la cámara de frío del CEPOC.

## Materiales

Para el monitoreo de temperaturas se emplearon 8 sensores modelo DS18B20, 8 cilindros de PVC de 2,5 cm de diámetro y 5 cm de altura con orificios que fueron utilizados como cubierta para los sensores, un micro controlador Atmega 328 integrado en una placa Arduino Uno™ versión R3 y un sistema de almacenamiento de información (*datalogger*) Arduino *micro SD Shield*™, ambos fabricados en Italia, además de 30 m de cable telefónico de 4 vías de 1,5 mm para realizar las conexiones. Mientras que para la evaluación de los resultados se utilizó un sensor TurboTag® modelo t700 y un sensor iButton© modelo DS1923. En el Cuadro 1 se presentan las características técnicas de ambos sistemas, mientras que en la Figura 2 se muestran los materiales utilizados para el desarrollo de este estudio. Adicionalmente se empleó el software Arduino™ y Microsoft Excel® para la lectura y procesamiento de los datos obtenidos.

Cuadro 1. Características técnicas de los sistema de monitoreo de temperaturas iButton y TurboTag.

Sistema	Rango de funcionamiento	Precisión	Capacidad de almacenamiento	Resolución temporal		Autonomía
	°C	°C	Nº datos	mínimo (segundos)	máximo (horas)	horas
TurboTag (t 700)	-30° y 40°	0,5° para rango entre -26° y 35°	703	60	504	17.520
iButton (DS1923)	-20° y 85°	0,5° para rango entre -10° y 65°	2.048	1	273	70.080

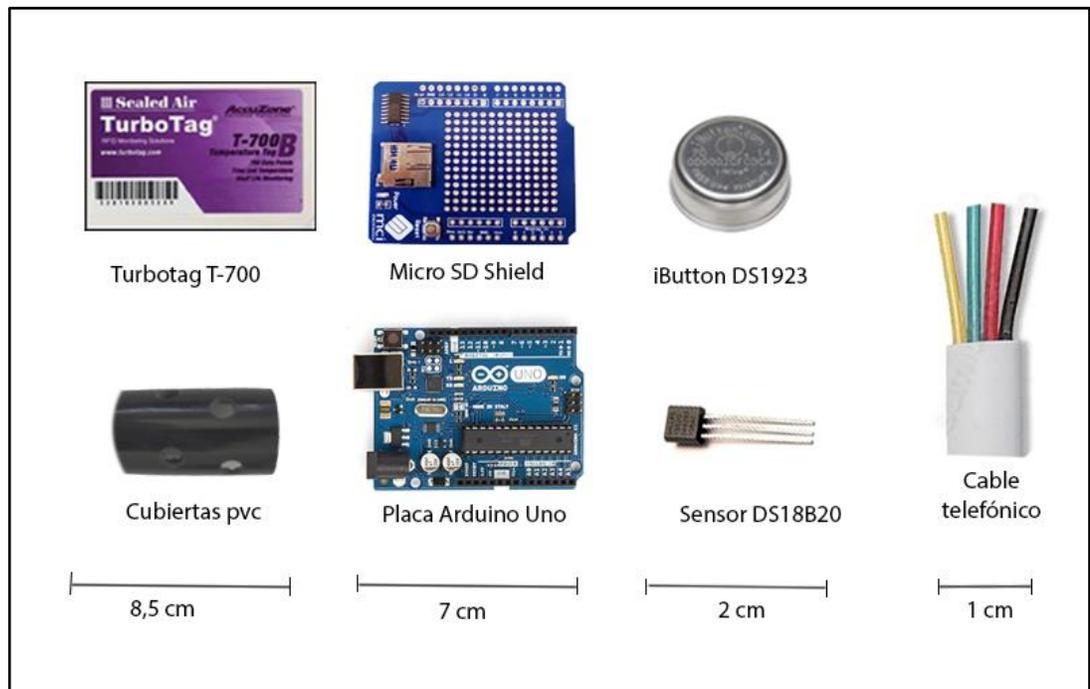


Figura 2. Materiales utilizados para implementar y comparar el sistema de monitoreo de temperaturas.

## Métodos

### Configuración y evaluación del sistema de monitoreo de bajo costo

Con el objetivo de evaluar las temperaturas dentro de la cámara de frío, se diseñó y construyó un circuito capaz de medir la temperatura dentro de la cámara. Para ello, se encapsularon los sensores de temperatura en los cilindros plásticos con agujeros, para evitar el contacto directo de objetos que pudieran alterar las mediciones pero que a la vez permitieran la circulación de aire. Se conectaron los ocho sensores en serie a una placa Arduino Uno ubicada dentro de la misma cámara, utilizando como entrada de información los pines digitales de la placa. Esta configuración permitió obtener y almacenar los 8 registros de temperatura de forma simultánea. De forma adicional, se montó el sistema de almacenamiento y se equipó con una tarjeta micro SD. Las conexiones del sistema se muestran en la Figura 3.

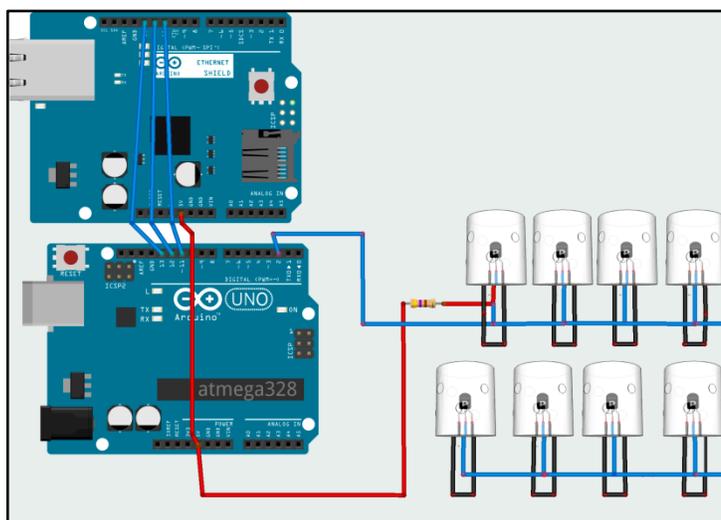


Figura 3. Conexiones del sistema de registro de temperaturas mediante Arduino.

Con la finalidad de descartar problemas en las mediciones entre los 8 sensores, se realizó un análisis de varianza de un factor entre registros temperatura, con un 95% de confianza. Mediante un muestreo de 24 horas al interior de la cámara, vacía y ubicando los sensores en un mismo lugar a 3 centímetros entre sí, se descartaron diferencias espaciales en las mediciones, analizando únicamente la capacidad que tenían para captar y registrar la temperatura.

Por medio del *software* Arduino 1.6.2, se programaron las tareas a realizar por el sistema de recolección de datos (sensores) y almacenamiento (*datalogger*) en la memoria del micro controlador, estableciendo un tiempo de muestreo de 5 segundos y generando promedios de un minuto para cada sensor. En la Figura 4 se muestra un diagrama de flujo con las etapas

de configuración del sistema.

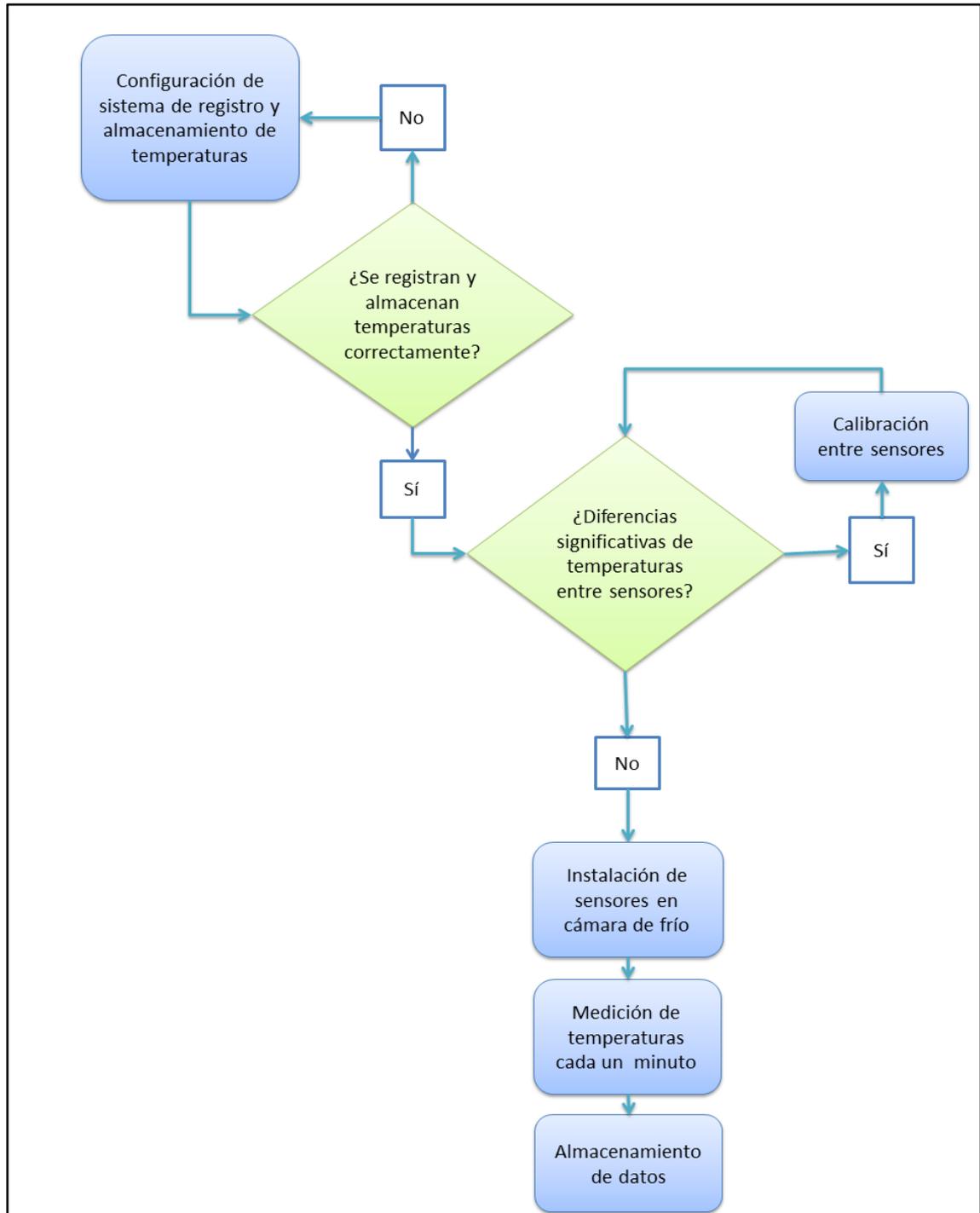


Figura 4. Etapas del sistema de monitoreo de temperaturas propuesto.

Para evaluar el funcionamiento del sistema generado, se procedió a comparar con otros 2 sistemas comerciales utilizados para el monitoreo de temperaturas: TurboTag® y iButton©.

Para esto se realizó un monitoreo de 24 horas con un sensor de cada sistemas midiendo simultáneamente y generando registros de temperatura cada tres minutos, la medición se realizó al interior de la cámara de frío sin elementos en su interior y funcionando a 5 °C.

Finalmente se realizó una comparación técnico-económica para los tres sistemas descritos en el punto anterior con el fin de determinar las ventajas y desventajas de cada uno. Las características consideradas para esta evaluación se detallan a continuación:

- a) Costos de implementación, considerando los valores comerciales de los productos de forma unitaria y el costo económico que conlleva generar una red de monitoreo.
- b) Precisión, según información entregada de fábrica para distintos rangos de temperatura.
- c) Capacidad de almacenamiento, expresado en cantidad de datos que es posible guardar.
- d) Resolución temporal, definido como el tiempo mínimo y máximo de muestreo.
- e) Tiempo de autonomía, expresado en horas de funcionamiento sin necesidad de recargar o cambiar baterías.
- f) Método de recolección de datos, descrito como el procedimiento necesario para acceder a los datos de temperatura registrados.

### **Análisis de la variación temporal y espacial de la temperatura**

Una vez descartados errores en los sensores, se procedió a analizar la variación espacial de las temperaturas de la cámara, distribuyendo los sensores a través de la línea de corriente de aire frío, que teóricamente se genera por la inyección de aire desde los ventiladores y posterior circulación dentro de la cámara.

Los sensores encapsulados fueron colocados a una distancia de 10 cm del techo, y a 1,2 metros de la salida del evaporador, asegurando la medición del aire frío proveniente de ellos. El resto de los sensores encapsulados se ubicaron contiguos a las murallas y piso, para evaluar diferencias de temperaturas entre la salida del evaporador y los extremos de la cámara.

Se registraron datos de temperatura cada 5 segundos, generando promedios cada un minuto durante 24 horas con la cámara de frío vacía y funcionando a 0 °C, de manera de caracterizar la distribución de temperaturas del aire, sin perturbaciones ni elementos que interactuaran con él.

Debido a que en promedio más de un 80% de la composición de frutas y hortalizas corresponde a agua (Grupo PM, 2006; Macario, 2004; Plank, 1980), se ingresaron tres

tambores de 90 cm de altura con capacidad para 200 litros con este líquido para representar productos almacenados que interactuaban con el aire al interior de la cámara, sin considerar las dimensiones y distribución reales de un almacenamiento en frío. Se colocaron los tambores al centro de la cámara, para interferir de manera más directa la corriente de aire frío del evaporador. De esta forma se buscó registrar sólo el efecto de la perturbación en la corriente de aire que se inyectó y del intercambio de calor entre ambos fluidos.

Con esta nueva configuración de almacenamiento se repitió el registro de temperaturas promedio cada un minuto durante 24 horas. En la Figura 5 se muestra la ubicación de los contenedores con agua y la distribución de los sensores de temperatura utilizada.

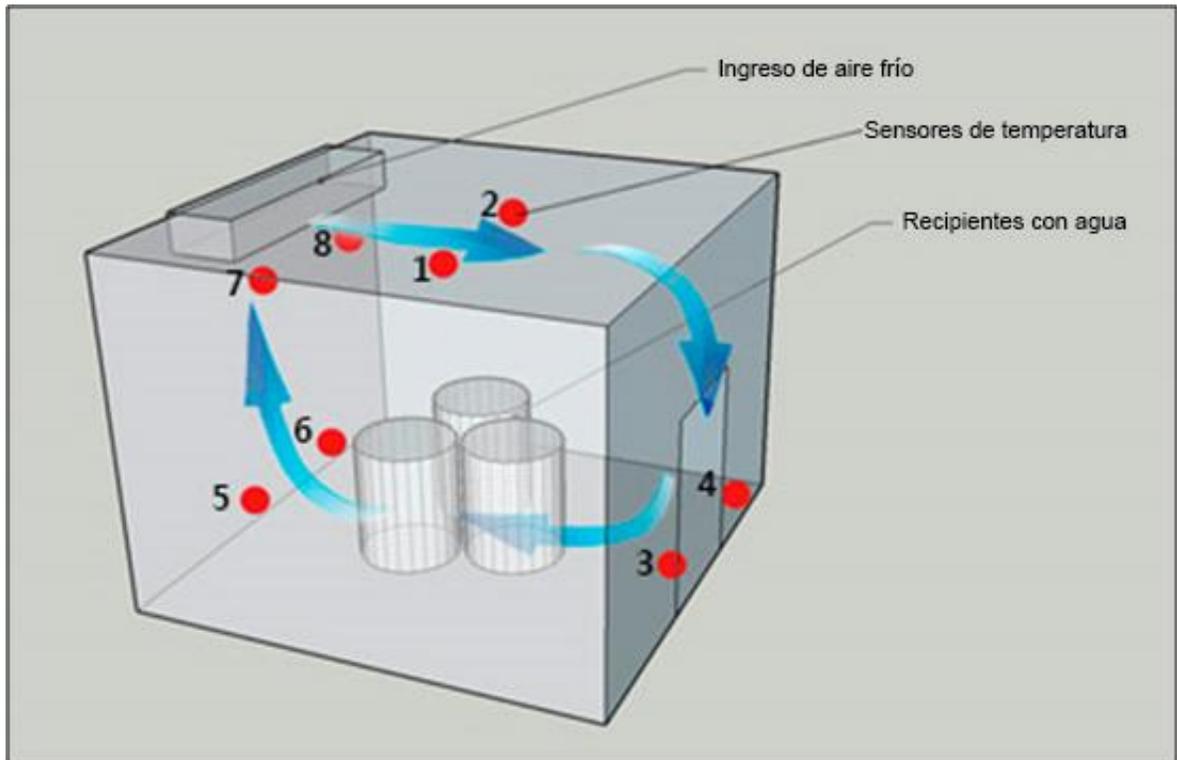


Figura 5. Distribución de tambores de 200 L llenos con agua y sensores de temperatura en la cámara de frío.

Luego se interpolaron los datos de cada muestreo mediante el método del inverso de la distancia (IDW), dividiendo el volumen de la cámara en cubos de 50 cm de lado. La ecuación 1 muestra el detalle del método de interpolación.

$$V = \frac{\sum_1^n P_{nt} \cdot \frac{1}{d_{nj}}}{\sum_1^n \frac{1}{d_{nj}}}$$

Ecuación 1. Método de interpolación inverso de la distancia

Donde,

V: valor interpolado para el punto j

$P_{nt}$ : valor de temperatura registrado en el sensor n en el instante t

$d_{nj}$ : distancia entre el sensor n y el punto j.

Si bien este método admite una variación en la potencia del inverso de la distancia, se optó por dejar este valor en su mínimo (1), ya que de esta forma se obtuvo un resultado más suavizado de interpolación y se evitaron influencias excesivas de los valores más cercanos siguiendo las recomendaciones de García y Cebrián (2006).

Luego se procedió a aumentar la resolución de la imagen matricial generada (raster), se determinó que los cubos de muestreo fueran de 10 cm de lado ya que es un volumen suficientemente pequeño para analizar variaciones de temperaturas dentro de distintas zonas de la cámara de frío. Esto se obtuvo interpolando la grilla generada mediante el método IDW, pero esta vez utilizando el método de spline cúbico (Ecuación 2), el cual obtiene valores interpolados como resultado de un ajuste matemático de n polinomios cúbicos a partir de todos los puntos de muestra, a diferencia del IDW que lo hace a partir de una ponderación de las distancias.

$$g(x) = f_j + b_j(x - x_j) + c_j(x - x_j)^2 + d_j(x - x_j)^3$$

Ecuación 2. Método de interpolación spline cúbico.

Donde,

$g(x)$ : función interpolada

$f_j$ : función original evaluada en el punto j

$b_j, c_j, d_j$ : parámetros de la ecuación interpolada para el punto j

$x-x_j$ : intervalo de interpolación.

Las imágenes raster de temperatura a 10 cm se utilizaron para comparar distintas zonas de la cámara de frío para una misma configuración de almacenamiento. Y por otra parte, para determinar si hubo diferencias significativas de temperaturas para una misma zona entre la configuración vacía y con agua al interior de la cámara.

Posteriormente se repitió el muestreo para otras 2 situaciones de temperaturas controladas; a 5 y 10 °C, para caracterizar situaciones de almacenamiento diferentes. Se efectuó una medición de 24 horas para la configuración de almacenamiento vacía y otra de igual duración para la configuración con agua al interior de la cámara. Finalmente se interpolaron los datos obtenidos para 5 y 10 °C a 50 cm mediante el método IDW y posteriormente a 10 cm de resolución mediante el método de spline cúbico, para efectuar los mismos análisis comparativos que a 0 °C.

Se realizaron pruebas t-Student para muestras independientes con un 95% de confianza (Ecuación 3) para cada cubo generado con la interpolación mediante el método spline, con la finalidad de determinar si hubo diferencias estadísticamente significativas para una misma zona de la cámara bajo las mismas condiciones de temperatura, y estableciendo como única diferencia la presencia de un volumen de agua,

$$t = \frac{\bar{X} + \bar{Y}}{\sqrt{\frac{(n-1)\widehat{S}_1^2 + (m-1)\widehat{S}_2^2}{n+m-2} \sqrt{\frac{1}{n} + \frac{1}{m}}}}$$

Ecuación 3. Prueba de t-Student

Donde,

t: valor de prueba t-Student

$\bar{X}$ : promedio muestra 1

$\bar{Y}$ : promedio muestra 2

n: cantidad de datos muestra 1

m: cantidad de datos muestra 2

$S_1$ : varianza muestral 1

$S_2$ : varianza muestral 2.

El análisis se hizo utilizando como datos de entrada los registros por minuto durante 24 horas para cada cubo con cámara vacía y se compararon con los registros de la cámara con agua en su interior. Finalmente se generó una imagen raster con los resultados de las pruebas de t-Student para visualizar aquellas zonas que presentaban diferencias significativas de temperaturas entre las configuraciones de almacenamiento.

## **RESULTADOS Y ANÁLISIS**

### **Configuración y evaluación del sistema de monitoreo de bajo costo**

Se realizaron las conexiones de los 8 sensores a lo largo de la línea de corriente de aire frío generada por los dos ventiladores de los extremos. Con esto se midió la temperatura más baja y más alta proveniente del equipo de frío, debido a que el primer ventilador recibe el líquido refrigerante a una temperatura establecida, y producto de su actividad e intercambio de calor con el aire circundante, los ventiladores siguientes reciben este fluido cada vez a mayor temperatura. Para fijar los trazados con cable a través de las paredes se utilizó cinta adhesiva, mientras que la placa Arduino y el sistema de recolección de datos se introdujeron en una caja de acrílico para evitar daños por humedad producto de las constantes variaciones de temperatura. En la Figura 6 se muestran la instalación de sensores DS18B20 encapsulados que se realizó al interior de la cámara de frío.



Figura 6. Instalación de sensores DS18B20 y sistemas Arduino al interior de la cámara de frío. (A) Sensores ubicados a la salida del evaporador. (B) Sensor *low-cost* (izquierda) y sensor del sistema de enfriamiento de la cámara fría (derecha). (C) Sensor *low-cost* en la zona de retorno del evaporador. (D) Placa Arduino y cableado del sistema creado.

### Comparación entre sensores

Como resultado del análisis de varianza entre registros cada 5 segundos durante 24 horas de los 8 sensores DS18B20, se determinó que no hubo diferencias significativas, por lo que se descartaron diferencias en los registros debido a fallas o problemas de fábrica entre los sensores. En el Cuadro 2 se muestra un resumen del análisis de varianza realizado.

Cuadro 2. Resumen de análisis de varianza mediante prueba de Tukey para registros de 24 horas entre los sensores DS18B20.

Sensor	Cantidad de datos	Media	p-valor
1	1440	0,841	0,784
2	1440	0,846	
3	1440	0,850	
4	1440	0,843	
5	1440	0,837	
6	1440	0,847	
7	1440	0,841	
8	1440	0,848	

### Evaluación con otros sistemas

En la Figura 7 se muestran los resultados de las mediciones efectuadas por los 3 sistemas de monitoreo al interior de la cámara de frío vacía a 5 °C. Si bien los datos fueron tomados cada 3 minutos, el gráfico despliega los registros cada 6 minutos para apreciar de mejor manera las variaciones generales a lo largo del monitoreo y las diferencias entre sistemas, en el Apéndice 1 se muestra el gráfico original con los registros cada 3 minutos. Se aprecia un comportamiento cíclico de las temperaturas, presentando máximos cada 6 horas y que responden al funcionamiento del equipo de enfriamiento. Específicamente las máximas de temperatura corresponden a aquellos períodos de tiempo donde el evaporador entra en una etapa de deshielo, haciendo que el proceso de enfriamiento se detenga por lapsos de aproximadamente 20 minutos, y se generen aumentos de hasta 15,7 °C respecto de la temperatura programada (5 °C). Con relación a los registros entre sensores, se observaron diferencias promedio de 0,4 °C entre los sistemas Arduino y TurboTag con una desviación estándar de  $\pm 0,3$  °. Mientras que el sistema iButton presentó diferencias promedio de 0,5 °C con una desviación estándar de  $\pm 0,3$  ° respecto al sistema de bajo costo. Con base en el estudio comparativo de distintos sensores de temperatura realizado por Badía (2011), estas variaciones se consideran poco significativa, ya que se obtuvieron diferencias promedio inferiores a 1 °C sin haber efectuado una calibración entre sensores, sino solo un ajuste de las curvas para conseguir una coincidencia entre los picos.

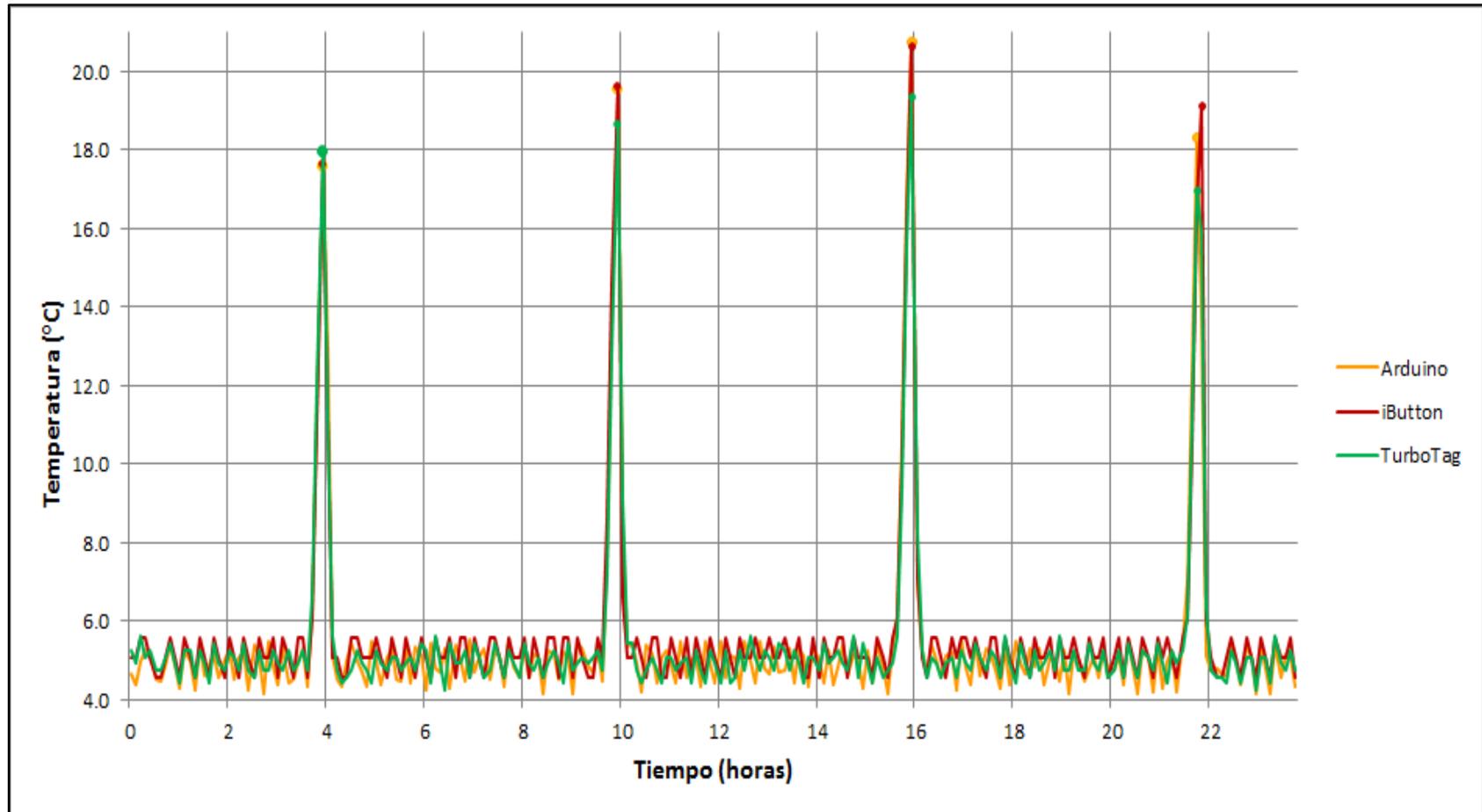


Figura 7. Mediciones de temperatura de los 3 sistemas de monitoreo de temperaturas durante 24 horas.

Para el análisis de costos de los 3 sistemas se consultó distribuidores formales a nivel nacional e internacional generando un costo aproximado para cada uno de ellos. En el caso de iButton y Arduino los precios fueron obtenidos del catálogo online de Ingeniería MCI Ltda., distribuidor oficial de ambos productos en Chile. Mientras que para los productos TurboTag no fue posible encontrar un distribuidor a nivel nacional, por lo que se consultó el catálogo digital de la empresa inglesa Temperature Controlled Packaging Ltd., especialista en la fabricación de embalajes e insumos para sistemas de refrigeración y cadena de frío a nivel internacional.

Las descripciones técnicas fueron obtenidas desde las fichas técnicas originales de cada producto. El Cuadro 3 muestra la comparación económica entre los sistemas estudiados.

Cuadro 3. Comparación económica entre los 3 sistemas de registro de temperaturas (precios de referencia para diciembre de 2014).

Sistema	Costo sensor	Costo sistema de lectura	Costo sistema de almacenamiento	Costo de red de 8 sensores
Pesos Chilenos				
Bajo Coste Arduino (DS18B20)	3.800	1.200	12.600	80.900
TurboTag (t 700)	23.500	77.000	-	265.000
iButton (DS1923)	50.500	9.200	-	413.200

El sistema de monitoreo de temperaturas Arduino tuvo un costo base aproximado de \$32.000 en materiales, lo cual incluyó la placa Arduino Uno; el sistema *micro SD Shield* para almacenar los datos; una memoria micro SD de 2 GB; el sistema de lectura, que corresponde a un adaptador USB de tarjetas micro SD; y una caja de acrílico para la protección de los circuitos. Es así como implementar un sensor de temperatura de bajo coste con 8 metros de cable de 3 vías tuvo un costo aproximado de \$41.000 en materiales. Por otra parte, implementar un sensor y su correspondiente sistema de lectura TurboTag tuvo un costo de \$100.500, mientras que para el sistema iButton la cifra fue de \$59.700.

Se debe considerar que a diferencia del sistema construido con Arduino, los sistemas comerciales evaluados son inalámbricos por lo que no presentan costos por cableado. Dicho elemento del sistema representa un costo aproximado de \$300 por metro, y se puede cubrir toda la red de sensores con una única línea de conexión, sin necesidad de generar enlaces

independientes hacia el micro controlador. Si bien este aspecto puede conllevar un gasto económico importante para la creación de redes extensas, se ve amortiguado por la amplia diferencia de precios que existe entre los sensores.

En cuanto a los aspectos técnicos, ambos sistemas comerciales contienen memorias internas en cada sensor, lo que se traduce en una lectura individual de los datos, y que requiere de un desmontaje de la red creada para el traspaso de información. En el caso de las TurboTag, la memoria tiene una capacidad de almacenamiento de 703 datos, que se pueden programar en intervalos de entre 1 minuto y 504 horas, mientras que los iButton tienen una capacidad de almacenamiento de 2048 datos programables de 1 segundo hasta 273 horas. Finalmente, el sistema Arduino, contiene un sistema de almacenamiento externo, es decir, independiente de los sensores de temperatura y además es expandible, ya que al tratarse de una tarjeta micro SD convencional existe la posibilidad de intercambiar dicho dispositivo.

Para una tarjeta de 2 GB, la capacidad de almacenamiento de la red es de 32 millones de datos, programables a un mínimo de un segundo y sin límite máximo de horas, que presentan la particularidad de contener las temperaturas de todos los sensores conectados a la vez, y sin necesidad de quitar las conexiones realizadas. Esta característica hace que el sistema montado en Arduino sea mucho más eficiente al momento de retirar los datos, ya que facilita el traspaso de información sin necesidad de equipos especiales, sólo un lector SD, implementado en la mayoría de los notebooks actuales. Además, entrega dichos datos de manera sincronizada para toda la red, característica que no es posible en ninguno de los otros 2 sistemas y que se vuelve relevante al momento de crear redes con gran número de sensores.

En cuanto a la alimentación de los sensores, el sistema TurboTag presenta una autonomía de trabajo de 17.520 horas, mientras que el sistema iButton 70.080 horas. Por su parte el sistema Arduino requiere de una fuente externa de alimentación. Para el desarrollo de este estudio el sistema fue conectado a la red eléctrica mediante un cable USB, lo cual da un tiempo de trabajo indefinido mientras la red esté en funcionamiento. Sin embargo, se presenta la posibilidad de conectar el circuito a una batería externa con salida de 5 Volts, en dicho caso la autonomía del sistema queda sujeta a la capacidad de almacenamiento del acumulador. Es así como una batería de 12 Ah, de un costo aproximado a los \$15.000, puede entregar una autonomía de 100 horas al circuito Arduino completo.

Finalmente la forma de acceder a los datos es distinta para cada sistema evaluado. Las tarjetas TurboTag al tratarse de un sistema de identificación por radiofrecuencia (RFID) necesitan de un lector específico para acceder a los datos, el cual debe ser del mismo fabricante y que tiene un costo incluso más alto que la tarjeta TurboTag. Para el sistema iButton también se necesita un lector especial, sin embargo en la actualidad existe una gran variedad de lectores y precios para esta tecnología. Además de los sistemas especiales para la lectura de los artefactos, ambos sistemas comerciales requieren de un *software* específico para acceder a los datos y finalmente traspasarlos a un documento digital. En cambio, el sistema Arduino presenta la ventaja de almacenar los datos en un sistema independiente, lo que permite traspasar los datos sin la necesidad de *software* ni artefactos especiales, solo de

un adaptador USB para conectar a un computador. Además entrega los resultados en un archivo digital de tipo texto, el cual es directamente visible y editable.

### Análisis de la variación temporal y espacial de la temperatura

Cada sensor DS18B20 registró 1.440 datos de temperatura promedio por minuto para cada configuración de almacenamiento (vacío y con agua) y prueba de temperatura. En la Figura 8 se muestra la variación temporal de las temperaturas promedio de los 8 sensores instalados al interior de la cámara de frío vacía, mientras que en el Apéndice 2 se muestran los registros por minuto de cada sensor de forma independiente.

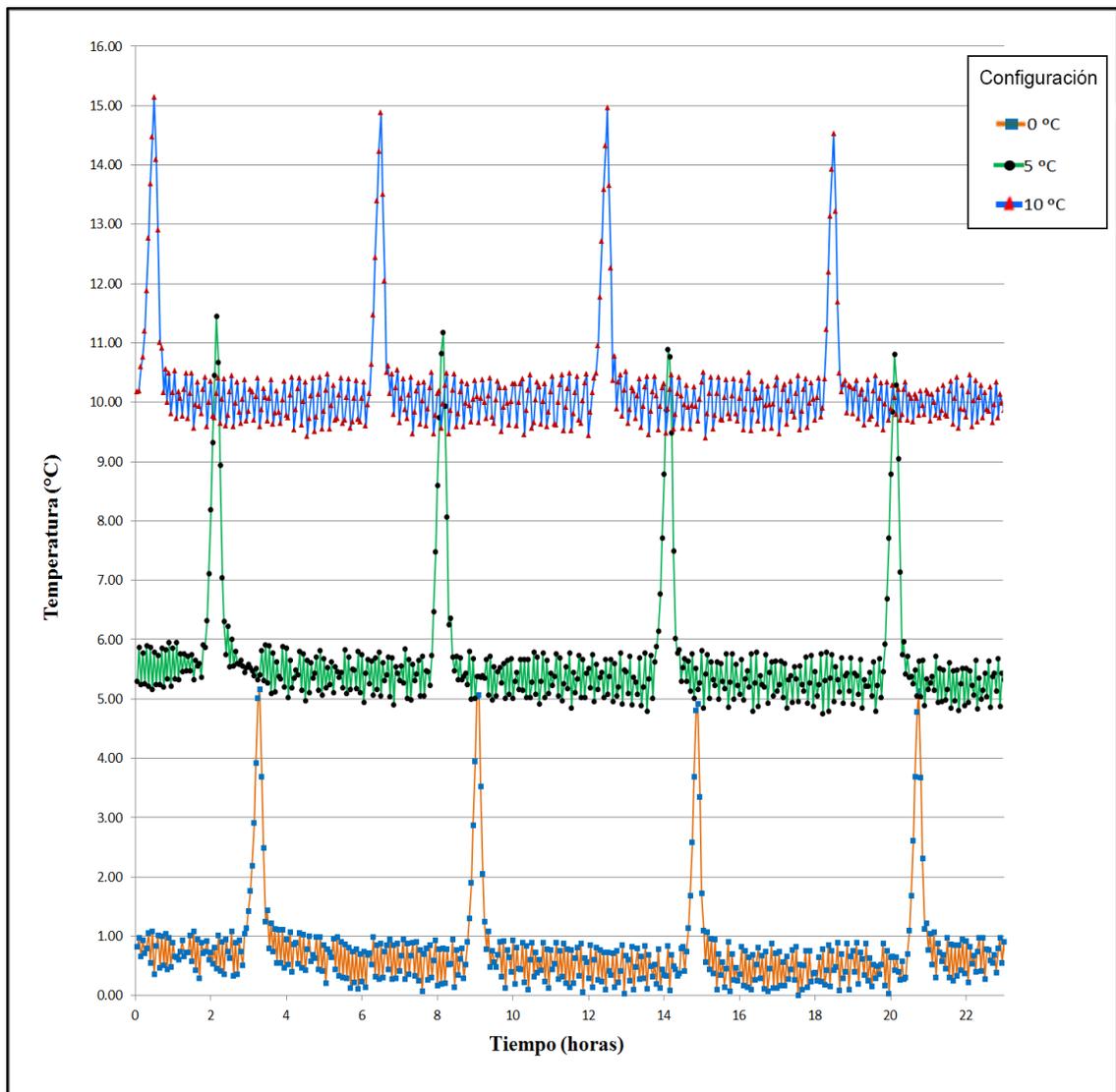


Figura 8. Registros de temperatura promedio por minuto con cámara vacía a 0, 5 y 10 °C.

Para las tres configuraciones de temperatura existen ciclos de máximas correspondientes al proceso de deshielo de los equipos de enfriamiento, los cuales ocurrieron aproximadamente cada 6 horas y tienen una duración cercana a los 20 minutos. Por otra parte se observan constantes fluctuaciones, que se hacen más recurrentes a medida que las temperaturas programadas son más bajas. Este comportamiento se debe al funcionamiento del compresor de la cámara, el cual aspira constantemente el fluido refrigerante para comprimirlo mediante el movimiento cíclico de un pistón. Dicho trabajo se realiza de manera más rápida cuando se necesita quitar más calor del aire circundante, y en consecuencia genera fluctuaciones más frecuentes en los registros (Antonio, 2012).

Los registros de la cámara con agua en su interior (Figura 9) muestran una tendencia general a ser más bajos que los registros de la cámara vacía, excepto en la prueba realizada a cero grados. Esto último pudo deberse a que las muestras se tomaron días distintos, y por lo tanto el contexto en que se llevaron a cabo pudo influir en la medición, ya sea producto de un efecto ambiental directo como la temperatura del aire exterior, o por factores indirectos como acción humana (Rodríguez, 2009). Esto también es apreciable durante las seis primeras horas de muestreo en la configuración a cero grados, donde se denota un aumento sostenido de aproximadamente 1 °C en las temperaturas, probablemente ya que antes de la prueba la cámara se encontraba funcionando a una temperatura mayor.

Por otra parte se distingue una menor amplitud térmica en los registros con agua al interior de la cámara de frío. Esto se debe a que agua posee una inercia térmica mayor que el aire, por lo tanto, cuando aumenta la temperatura de la cámara, el agua lo hará más lento que el aire y terminará absorbiendo parte del calor circundante debido a la diferencia térmica entre ambos fluidos (Holman, 1999).

Como muestra el Cuadro 4, independiente de la configuración de almacenamiento, las temperaturas máximas y mínimas fueron registradas por los sensores 1 y 2, que se ubicaron en la zona alta de la cámara y fueron los más cercanos a la salida del evaporador, por lo que se vieron afectados de forma más directa por la actividad del equipo de frío, registrando además la mayor desviación típica. En términos generales, se observa que los sensores 5 y 6, instalados en la zona baja del retorno del evaporador, registraron las temperaturas medias más altas al interior de la cámara, sin embargo a medida que la temperatura programada aumentó, los sensores ubicados en las zonas altas mostraron una tendencia a registrar las mayores temperaturas medias.

Asimismo se aprecia una mayor estabilidad en las temperaturas registradas por los sensores de las zonas bajas de la cámara de frío (3, 4, 5 y 6), registrando diferencias menores a 6 grados Celsius entre máximas y mínimas de una misma configuración, lo que contrasta con los registros de las zonas altas donde se apreciaron diferencias de hasta 18,2 °C entre valores extremos de una misma configuración.

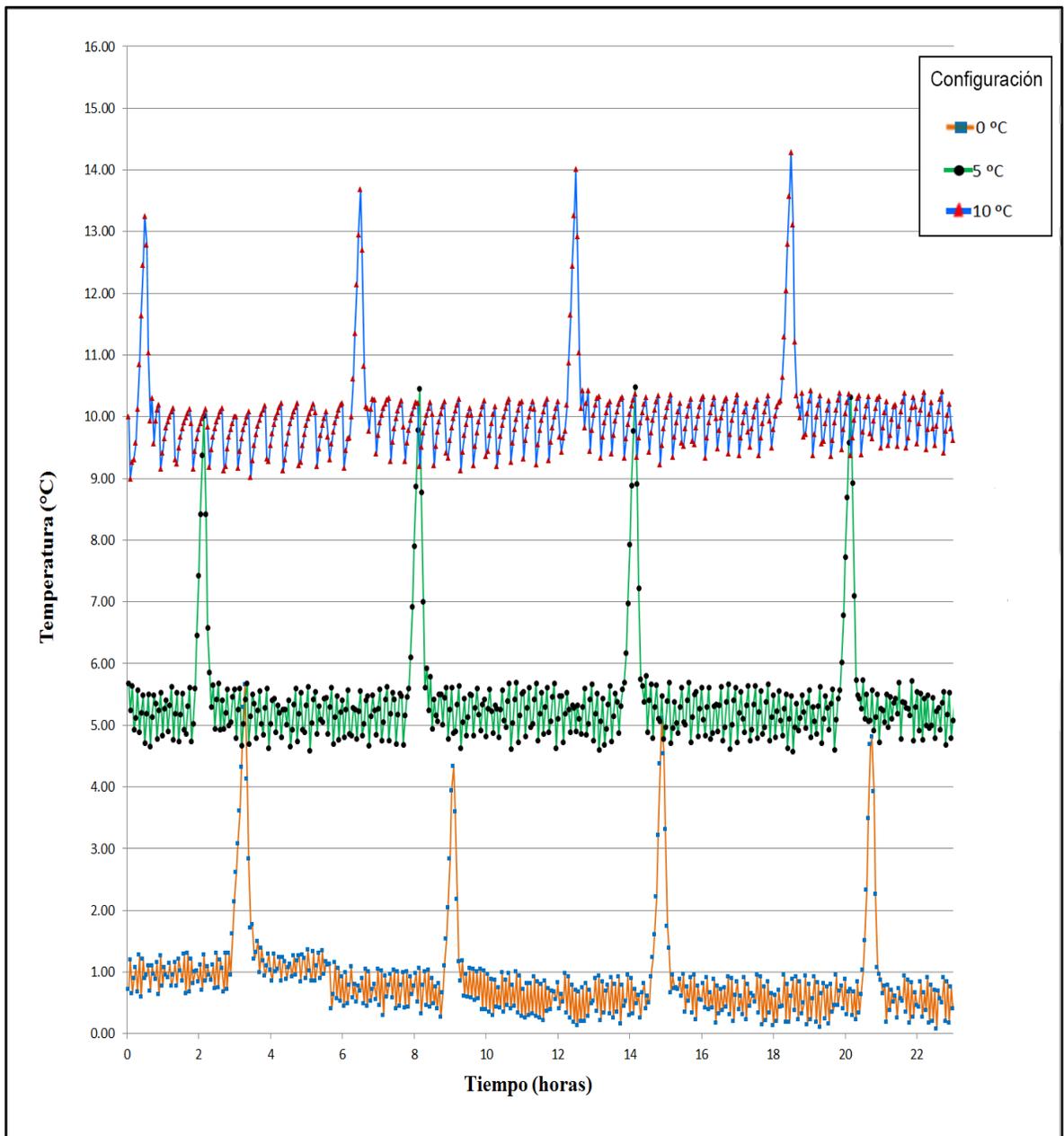


Figura 9. Registros de temperatura promedio por minuto con agua en tambores al interior de la cámara a 0, 5 y 10 °C.

Cuadro 4. Medidas de dispersión de registros de los 8 sensores de temperatura DS18B20 para las distintas configuraciones de almacenamiento y temperatura de la cámara de frío.

Configuración Cámara	Parámetro	Temperaturas							
		sensor 1	sensor 2	sensor 3	sensor 4	sensor 5	sensor 6	sensor 7	sensor 8
		°C							
0 °C vacía	media	0,5	0,6	0,7	0,6	1,2	1,0	0,6	0,9
	s	±1,8	±1,9	±0,5	±0,6	±0,4	±0,4	±0,6	±0,6
	máxima	13,8	14,4	4,3	4,7	3,6	4,0	4,9	5,2
	mínima	-0,9	-0,9	0,0	-0,2	0,7	0,5	-0,1	0,2
0 °C agua	media	0,5	0,6	1,1	0,7	1,3	1,2	0,7	1,0
	s	±1,7	±1,7	±0,7	±0,6	±0,4	±0,5	±0,7	±0,7
	máxima	14,3	14,6	5,6	5,4	4,4	4,6	5,9	6,0
	mínima	-0,9	-0,8	0,1	-0,3	0,7	0,6	-0,1	0,3
5 °C vacía	media	5,4	5,5	5,5	5,5	6,0	6,0	5,4	5,7
	s	±2,5	±2,5	±0,6	±0,6	±0,6	±0,6	±0,8	±0,8
	máxima	22,0	22,2	9,9	10,0	9,9	9,7	10,8	10,7
	mínima	3,9	4,0	4,8	4,7	5,3	5,3	4,6	5,0
5 °C agua	media	5,4	5,5	5,2	5,2	5,5	5,5	5,3	5,5
	s	±2,4	±2,4	±0,4	±0,5	±0,4	±0,4	±0,6	±0,6
	máxima	20,9	20,9	7,9	8,2	7,8	7,8	8,9	9,1
	mínima	3,8	3,9	4,6	4,5	5,0	5,0	4,6	4,8
10 °C vacía	media	10,4	10,4	10,0	10,0	10,3	10,2	10,1	10,3
	s	±2,4	±2,3	±0,4	±0,4	±0,4	±0,4	±0,6	±0,6
	máxima	24,9	24,6	12,9	13,1	12,9	12,7	14,3	14,3
	mínima	8,7	8,8	9,4	9,3	9,7	9,7	9,3	9,6
10 °C agua	media	10,4	10,5	9,8	9,9	9,7	9,7	10,0	10,2
	s	±2,1	±2,2	±0,3	±0,4	±0,3	±0,3	±0,5	±0,5
	máxima	23,9	24,1	11,4	12,0	11,0	11,2	12,9	13,1
	mínima	8,5	8,7	8,8	8,9	8,6	8,6	9,1	9,4

## Interpolación de temperaturas

Para la obtención de imágenes espaciales de temperatura se procedió a interpolar los datos de los 8 sensores por cada minuto. Posteriormente se generó una secuencia de 1.440 imágenes raster (una por minuto) para cada situación de almacenamiento y temperatura, con la finalidad de visualizar la variación de las temperaturas al interior de la cámara durante las 24 horas de muestreo (Apéndice digital 1). El Cuadro 5 muestra las temperaturas máximas y mínimas que se registraron para cada secuencia de interpolación y la diferencia máxima entre distintas zonas de la cámara para un mismo instante.

Cuadro 5. Temperaturas interpoladas máximas, mínimas y diferencias máximas en un instante para cada configuración de almacenamiento.

Configuración cámara	Temperaturas		
	Máxima	Mínima	Diferencia máxima
0 °C vacía	10,8	-0,6	7,9
0 °C agua	11,0	-0,5	8,1
5 °C vacía	18,1	4,3	9,5
5 °C agua	17,1	4,1	9,4
10 °C vacía	21,1	9,0	9,0
10 °C agua	20,4	8,8	9,4

Finalmente se generó una imagen raster con los promedios de temperatura de 24 horas para cada unidad espacial de 10x10x10 cm para distinguir en rasgos generales el comportamiento de los registros. En la Figura 10 se presentan las interpolaciones de temperaturas medias correspondientes a las muestras tomadas a 0°C.

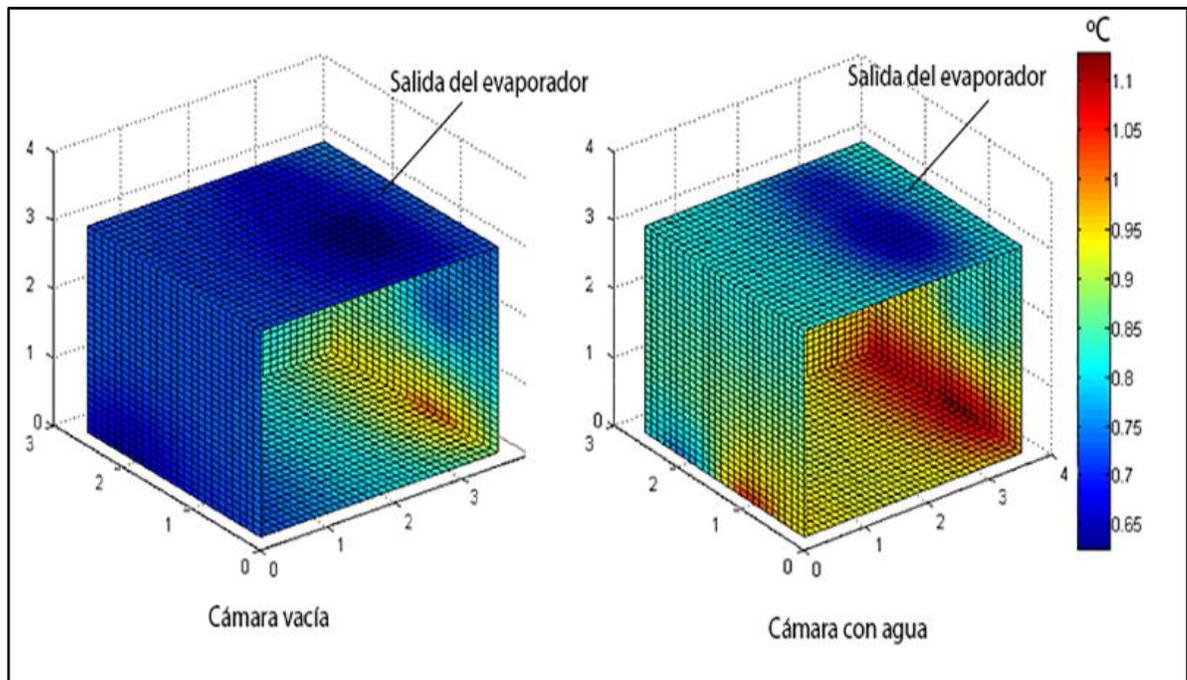


Figura 10. Interpolación de temperaturas promedio de 24 horas para cámara vacía y con agua a 0 °C.

Se observan diferencias muy marcadas para distintas zonas de la cámara de frío en una misma configuración de almacenamiento y temperatura. En el caso de la configuración vacía se observaron diferencias máximas de 0,38 °C entre los promedios interpolados, mientras que en el caso de los registros con agua se alcanzaron diferencias máximas de 0,47 °C entre distintas zonas de la cámara de frío.

Por otra parte se observó un aumento en las temperaturas en las zonas del retorno del evaporador, dicho fenómeno fue también registrado a 5 °C (Figura 11). Esto se debió a que la zona de retorno es la última en recibir el aire frío de la corriente generada por los ventiladores, y por lo tanto lo hace a una temperatura mayor que la de salida debido al intercambio de calor con el aire y agua (ver Figura 3 para detalle del flujo de aire frío).

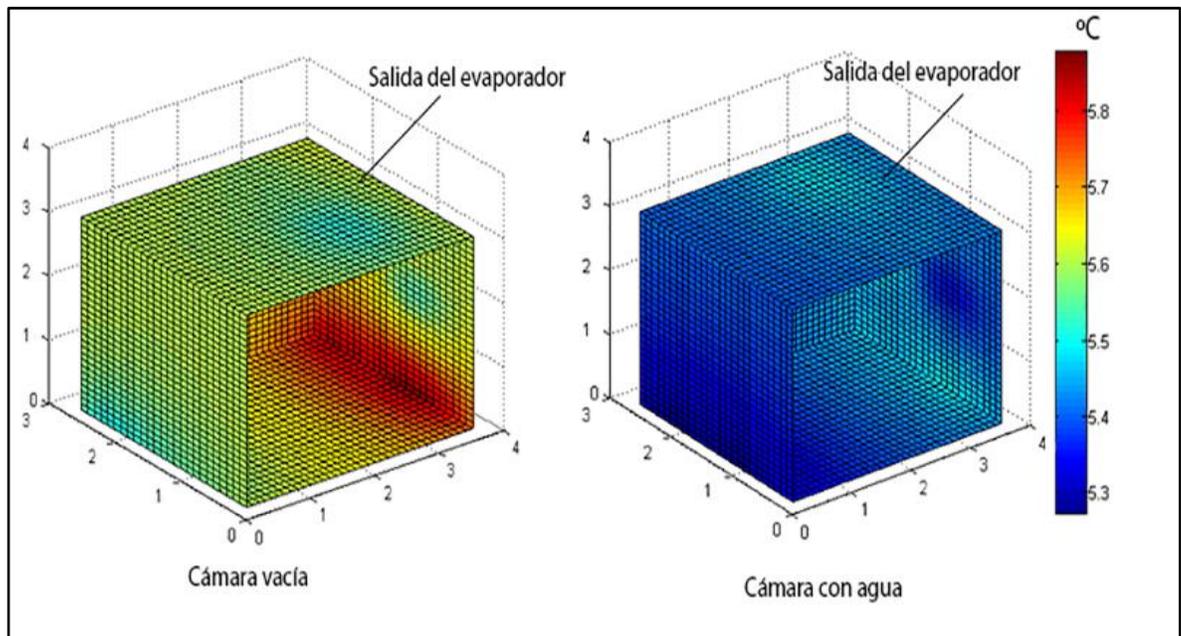


Figura 11. Interpolación de temperaturas promedio de 24 horas para cámara vacía y con agua a 5 °C.

Particularmente en las configuraciones a 10 °C (Figura 12) se ve un aumento de las temperaturas más próximas a las zonas altas de la cámara, lo cual se presume fue debido a los considerables aumentos de temperaturas durante los períodos de deshielo, que causaron un traspaso de calor desde la salida del evaporador hacia el interior de la cámara de manera mucho más intensa, alcanzando temperaturas superiores a los 20 °C por períodos de 10 minutos e incluso promedios por minuto de más de 24 °C en los sensores cercanos a estas zonas, lo que generó aumentos marcado en las temperaturas medias interpoladas.

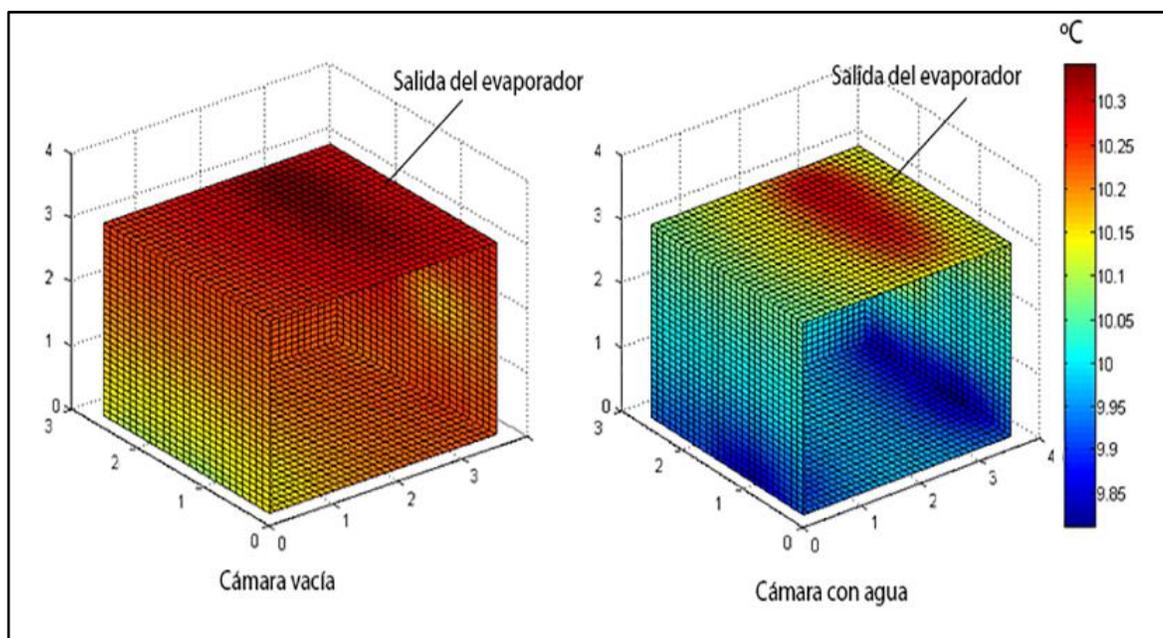


Figura 12. Interpolación de temperaturas promedio de 24 horas para cámara vacía y con agua a 10 °C.

La cámara de frío estudiada presenta buenos resultados al evitar que la temperatura interior descienda abruptamente respecto de la temperatura programada. En las pruebas realizadas a 0 °C no se registraron descensos mayores a 0,5 °C respecto de la temperatura objetivo, mientras que las pruebas configuradas a 5 °C dicha diferencia no superó los 0,9 °C y en las configuraciones a 10 °C las temperaturas no descendieron más de 1,2 °C respecto de la temperatura de consigna. Esto se debe a que a pesar de contar con solo un sensor de temperatura, este se encuentra en la zona más fría de la cámara, que es la salida del primer evaporador, y por lo tanto cuando registra una baja de las temperaturas se detiene el sistema de enfriamiento. Si bien este procedimiento permite evitar daños y pérdidas por frío, no logra controlar las constantes subidas de temperaturas, que en algunas zonas y lapsos específicos llega a ser superior a los 20 °C, lo que podría significar una madurez heterogénea de las frutas y hortalizas almacenadas e incluso daños en los tejidos de las mismas (Kitinoja y Kader, 2002; Karelovic, 2012).

En cuanto a las pruebas t-Student para la comparación de las temperaturas medias de cada cubo interpolado (Figura 13), se determinó que hubo diferencias significativas para la mayoría de las zonas de la cámara de frío entre las distintas configuraciones de almacenamiento.

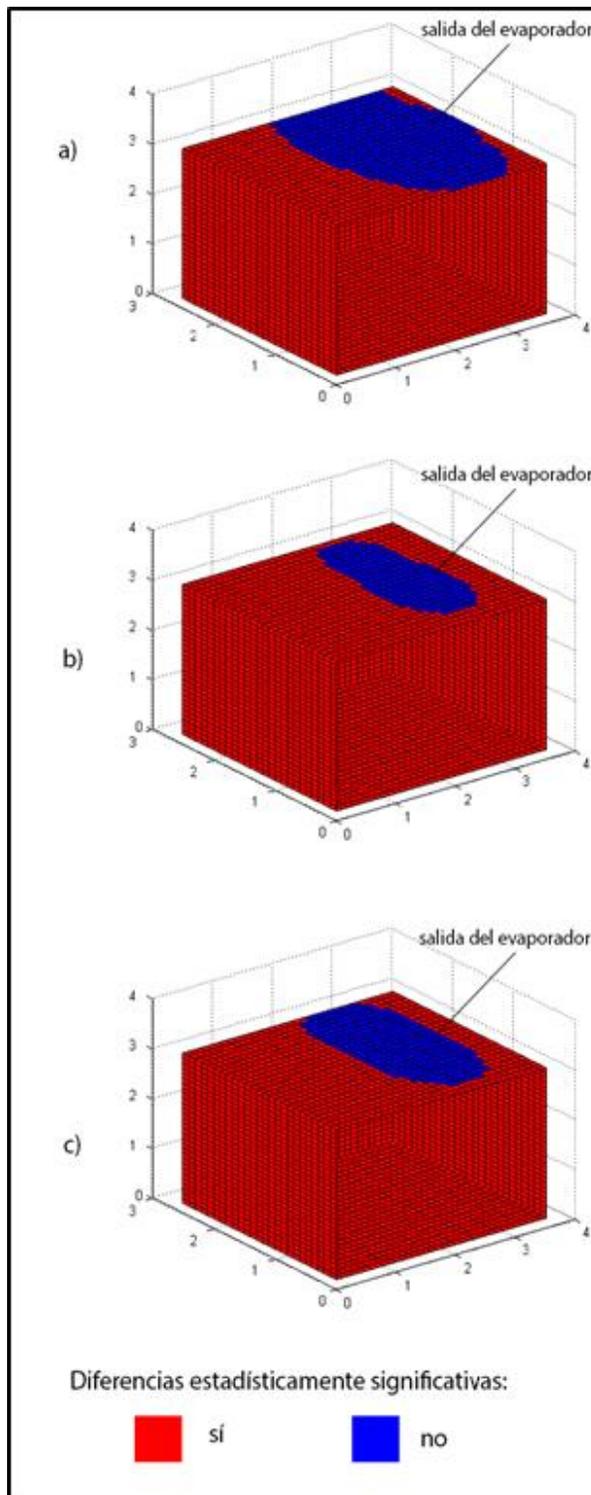


Figura 13. Diferencias significativas de temperaturas medias entre unidades cúbicas de cámara de frío para dos situaciones de almacenamiento a 0 (a); 5 (b); y 10 °C (c).

El volumen de la cámara se dividió en 29.016 cubos de 10 cm de lado, de los cuales un 88% presentó diferencias significativas para los muestreos realizados a 0 °C, un 97% en los datos a 5 °C y un 94,6% en las configuraciones a 10 °C. Tal como se aprecia en la Figura 13 las zonas que no presentaron diferencias significativas entre ambas configuraciones de almacenamiento se concentraron en la zona alta de la cámara, específicamente a la salida del evaporador.

Estos resultados corroboran que la presencia de un volumen con agua genera una alteración de las temperaturas al interior de una cámara de ambiente controlado. Por una parte, debido a la barrera física que interrumpe la corriente de aire frío y además por el intercambio de calor que genera la presencia del volumen con el aire circundante. En las zonas de la salida del evaporador no se apreciaron diferencias significativas, ya que a pesar de ser la zona que presentó una mayor amplitud térmica en las 3 configuraciones de temperatura, ésta no fue alterada por los tambores como barrera física. Además al estar influenciado directamente por el aire proveniente del sistema de enfriamiento no fue mayormente afectada por la temperatura del volumen de agua, lo que provocó una estabilidad de las temperaturas en dicha zona, impidiendo alzas o bajas abruptas ajenas al funcionamiento propio de la cámara.

## CONCLUSIONES

En este trabajo se logró desarrollar dispositivos de medición y almacenamiento de temperaturas, lo que permitió generar una red de monitoreo automatizado de bajo costo para ambientes cerrados. Su funcionamiento fue probado en una cámara de frío en distintos escenarios para un rango de temperatura programada entre 0 y 10 °C y su aplicación demostrada en la generación de modelos espaciales de temperatura mediante interpolaciones espaciales de los registros.

Se establece que el funcionamiento de los sensores de temperatura de bajo costo contruidos con Arduino es satisfactorio. Las comparaciones de registros con otros sistemas comerciales de similar precisión arrojaron diferencias promedio máximas de 0,5 °C. Sin embargo las diferencias de precios que implica generar una red de monitoreo entre dichos sistemas son considerables, siendo el sistema Arduino un 80,4 y un 69,4% más económico que el sistema iButton y TurboTag respectivamente.

Se pudo caracterizar temporal y espacialmente las temperaturas de una cámara de frío y establecer que la presencia de productos con altos niveles de agua, como frutas y hortalizas, genera una alteración en la distribución de las mismas. Se registraron diferencias de hasta 9,46 °C entre distintas zonas de la cámara de frío para una misma configuración de almacenamiento y temperatura y se corroboró que las zonas altas de la cámara y el retorno del evaporador son las que registraron las temperaturas más altas.

El sistema de monitoreo propuesto permite la caracterización de temperaturas al interior de una cámara de frío ayudando a controlar las condiciones óptimas de almacenamiento. Sin embargo es necesario considerar otros factores ambientales de importancia como humedad relativa, la cantidad y tipo de productos a almacenar, embalaje utilizado, capacidad del equipo frío, entre otros.

Finalmente son necesarios más estudios y pruebas de campo de este tipo, ya que permiten acercar y poner a disposición de la industria los nuevos conocimientos. Indagar en tecnologías de este tipo puede significar romper brechas entre pequeños y grandes productores, ya que permitiría controlar sus procesos a un costo menor a los actuales y establecer una apertura a nuevos mercados.

## BIBLIOGRAFÍA

Ahadani, M., L. De Silva, I. Petra, M. Faisal & T. Wong. 2012. Low Cost Robotic Medicine Dispenser. *Procedia Engineering*, 41:202-209.

Amstrong, W., L. Quintana y V. Chesta. 2012, marzo. Evaluación de la cadena de frío en cinco fábricas de cecinas y su implicancia en el recuento microbiológico. *Revista Chilena de Nutrición*, 11:53-61.

Antonio, E. 2012. Cámaras frigoríficas para el almacenamiento temporal de productos. Memoria de Ingeniero Técnico Industrial. Valladolid, España: Universidad de Valladolid. 25p.

Badía, R. 2011. Supervisión de la cadena de frío de productos hortofrutícolas mediante tecnologías de identificación por radio frecuencia (RFID) y redes inalámbricas de sensores (WSN) en almacenes frigoríficos de Mercamadrid. Memoria Ingeniero Agrónomo. Madrid, España: Universidad Politécnica de Madrid. 174p.

Barreiro, J. y A. Sandoval. 2006. Operaciones de conservación de alimentos por bajas temperaturas. Caracas, Venezuela: Equinoccio. 296p.

Berman, B. 2014, enero. How to compete effectively against low-cost competitors. *Business Horizons*, 58:87-97.

Chiambaretto, P. & A.S. Fernandez, 2014, abril. Transferring low-cost marketing practices from air to rail services: The Ouigo case. *Research in Transportation Business & Management*, 10:40-44.

Ehret, D., A. Lau, S. Bittman, W. Lin & T. Shelford. 2001, mayo. Automated monitoring of greenhouse crops. *Agronomie*, 21(4): 403-414.

FAO (Food and Agriculture Organization of the United Nations). 2012. Pérdidas en la manipulación después de la cosecha. (pp 6-8). En: Comité de problemas de productos básicos (4<sup>a</sup>, Julio de 2005, Guayaquil, Ecuador). Grupo intergubernamental sobre el banano y las frutas tropicales. Roma, Italia: FAO. 18p.

Fuentes, M., M. Vivar, J.M. Burgos, J. Agulera & J.A. Vacas, 2014, noviembre. Design of an accurate, low-cost autonomous data logger for PV system monitoring using Arduino™ that complies with IEC standards. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 130:529-543.

García, J.A., & F. Cebrián, 2006. La interpolación como método de representación cartográfica para la distribución de la población: Aplicación a la provincia de Albacete. (pp. 19-23). En: XII Congreso Nacional de Tecnologías de la Información Geográfica (1ª Edición, Septiembre de 2006, Granada, España). El Acceso a la información espacial y las nuevas tecnologías geográficas. Camacho, M., J. Cañete y J. Lara (Eds.). España. 1831p.

Gomes, J.M., J.H. Correira & J.P. Carmo, 2015, febrero. A Low-Cost Flexible-Platform (LCFP) for characterization of photodetectors. *Measurement*, 61:206-215.

Grupo PM. 2006. ABC: Manual Técnico de Frutas y Verduras. (Doc. Tec.), Grupo PM. Cuernavaca, México. 224p.

Holman, J.P. 1999. Transferencia de calor. 10ª edición. México DF: McGraw. 622p.

Jiménez-Ariza, H., J. García-Hierro, B. Diezma, P. Barreiro, E.C. Correa y J.I. Robla. 2011. Registro y análisis del historial térmico durante el almacenamiento y transporte refrigerado de productos mínimamente procesados. (pp. 1-11). En: Congreso Ibérico de AgroIngeniería (6º, 5 a 7 de Septiembre de 2011, Évora, Portugal). 11p.

Karelovic, F. 2012. Influencia del método de congelamiento en el daño micro-estructural de arándanos liofilizados. Memoria Ingeniero Civil Mecánico. Santiago, Chile: Universidad de Chile. 61p.

Kitinoja, L. y A. Kader. 2002, Julio. Small-Scale postharvest handling practices: A manual for horticultural crops (Doc. Tec. 4<sup>th</sup> Edition). Postharvest Technology Research and Information Center. California. UC Davis. 260p.

López, A. 2003. Manual para la preparación y venta de frutas y hortalizas: del campo al Mercado. (Bol. Tec. N°51), FAO. Roma, Italia: FAO. 49p.

Macario, R., 2004. Elaboración de Conservas de frutas y hortalizas. Primera Edición. Metepec, México: Secretaría de Desarrollo agropecuario. 23p.

MAGRAMA (Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente), España. 2004, junio. Informe del sector frutas y hortalizas: Oferta, Distribución y Demanda. (Doc. Tec.), Deloitte. Madrid, España. 141p.

Nebali, R., J.C. Roy & T. Boulard. 2012, julio. Dynamic simulation of the distributed radiative and convective climate within a cropped greenhouse. *Renewable Energy*, 43:111-129.

Plank, R. 1980. El empleo del frío en la Industria de la Alimentación. Barcelona, España: Reverté. 828p.

Recasens, I., W. Schotsmans, Y. Soria y C. Larrigaudiere. 2009. Bases fisiológicas de los cambios de calidad de las frutas durante el transporte. (pp. 38 – 45). En: Reunión Científico Técnica Frutera de Sao Paulo (1ª Edición, Septiembre de 2009, Sao Paulo, Brasil). Detección de problemas asociados a la calidad de frutas y hortalizas. E. Correa, M. Ruiz y L. Ruiz (Eds.). Madrid, España. 113p.

Rodríguez, A. 2009. Métodos de predicción y técnicas de control de condensación en invernaderos. Tesis doctoral Ingeniero Agrónomo. Madrid, España: Universidad Politécnica de Madrid. 208p.

Rodríguez-Bermejo, J., P. Barreiro, J.I. Robla y L. Ruiz-García. 2007, mayo. Thermal study of a transport container. *Journal of Food Engineering*, 80:517-527.

Ruiz-Altisent, M., L. Ruiz-García, G.P. Moreda, R. Lu, N. Hernandez-Sanchez, E.C. Correa, et al. 2010. Sensors for product characterization and quality of specialty crops - A review. *Computers and Electronics in Agriculture*, 74:176-194.

Ruiz-García, L., P. Barreiro y M. Ruiz-Altisent. 2009. Sistemas de control en el transporte de productos perecederos. (pp. 56 – 67). En: Reunión Científico Técnica Frutera de Sao Paulo (1ª Edición, Septiembre de 2009, Sao Paulo, Brasil). Detección de problemas asociados a la calidad de frutas y hortalizas. E. Correa, M. Ruiz y L. Ruiz (Eds.). Madrid, España. 113p.

Saldías, E. 2003. Diseño de una cámara de refrigeración para zanahoria (*Daucus carota L.*), betarraga (*Beta vulgaris L.*) y repollo (*Brassica oleracea L. var. Capitata*) adaptada a las condiciones de Coyhaique, en la XI Región. Memoria Licenciado en Agronomía. Valdivia, Chile: Universidad Austral de Chile. 132p.

Suárez, J.C. 2013. Application of Zigbee Technology for monitoring environmental variables in greenhouses. En: Congreso Argentino de Ciencias de la Computación (18ª, 8 al 12 de Octubre de 2012, Bahía Blanca, Argentina). Workshop procesamiento de señales y sistemas de tiempo real. 7p.

Valera, A., A. Soriano y M. Vallés, 2014, diciembre. Plataformas de Bajo Coste para la Realización de Trabajos Prácticos de Mecatrónica y Robótica. *Revista Iberoamericana de Automática e Informática Industrial RIAI*, 11:363-376.

Vila, M. 2010. Competir con estrategias *low cost*. *Revista de Contabilidad y Dirección*, 11:25-38.

Walzik, M., V. Vollmar, T. Lachnit, H. Dietz, S. Haug, H. Bachmann, et al. 2015, febrero. A portable low-cost long-term live-cell imaging platform for biomedical research and education. *Biosensors and Bioelectronics*, 64:639-649.

Yang, B., M. Patsavas, R. Byrne & J. Ma, 2014, marzo. Seawater pH measurements in the field: A DIY photometer with 0.01 unit pH accuracy. *Marine Chemistry*, 160:75-81.

Yeh, G., Y. Kao, S. Yang & M. Rei. 2014, diciembre. Low Cost compact onsite hydrogen generation. *International Journal of Hydrogen Energy*, 39:20614-20624.

Young, D., L. Chapman, C. Muller, X. Cai & S. Grimmond, 2014, abril. A Low-Cost Wireless Temperature Sensor: Evaluation for Use in Environmental Monitoring Applications. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 31(4):938–944.

## APÉNDICES

Apéndice Digital 1. Variación de las temperaturas por minuto durante 24 horas al interior de la cámara de frío vacía y con agua a 0; 5; y 10 °C.

Apéndice 1. Registro comparativo entre los 3 sistemas de monitoreo de temperaturas.

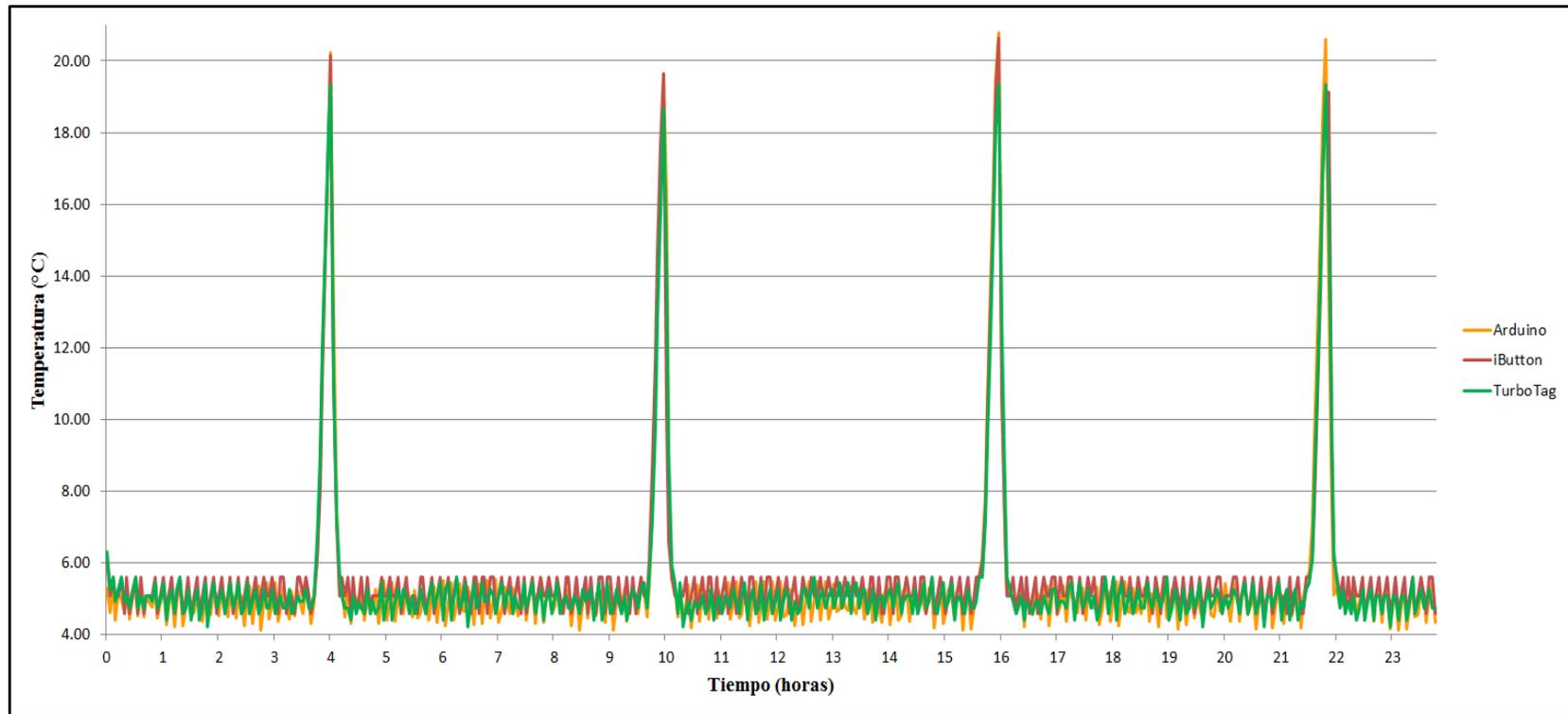


Figura 14. Mediciones de temperatura cada 3 minutos de los 3 sistemas de monitoreo durante 24 horas.

Apéndice 2. Registros promedio por minuto de los sensores DS18B20 para distintas configuraciones de almacenamiento y temperatura al interior de la cámara de frío del CEPOC.

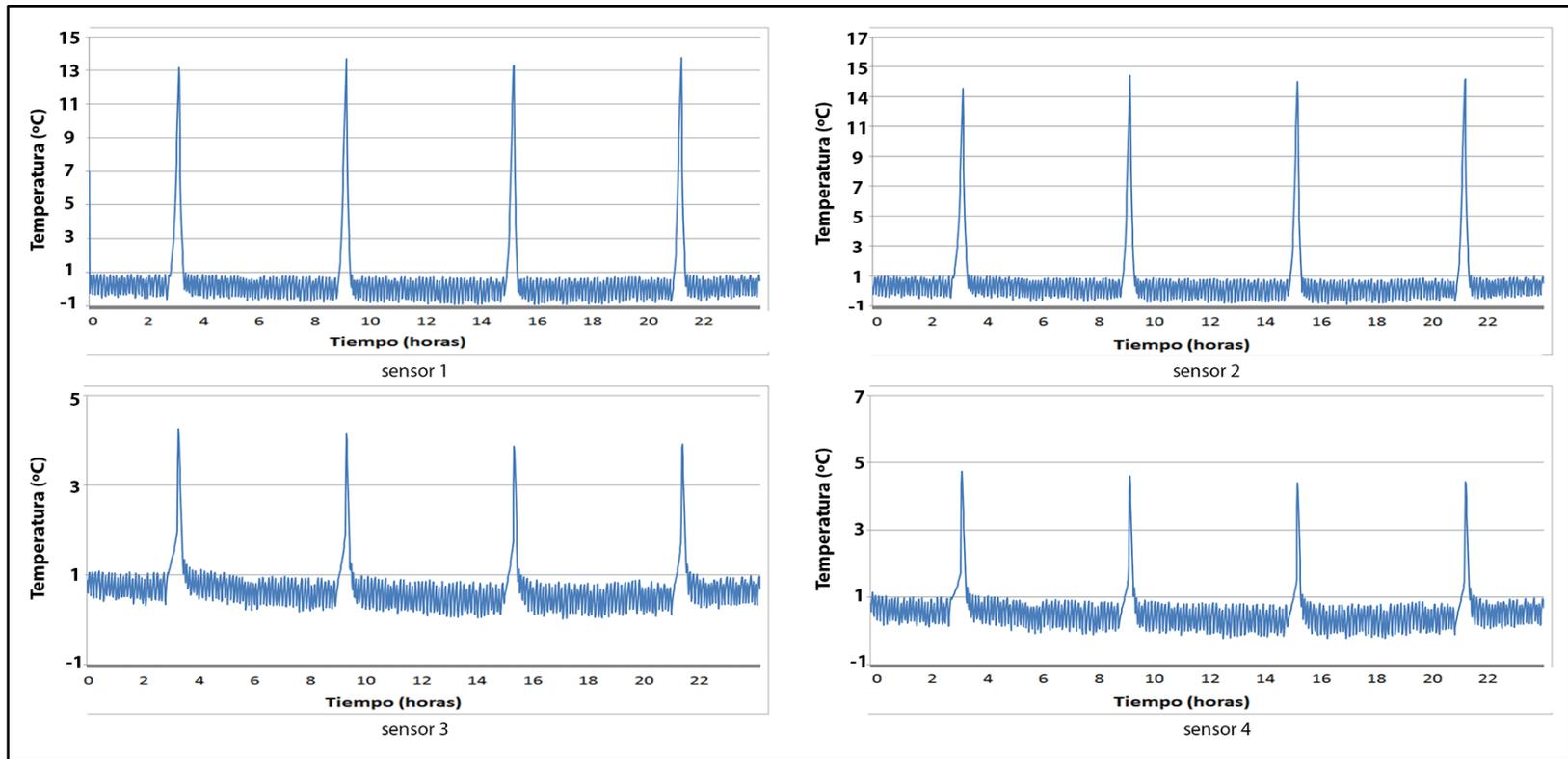


Figura 15. Registros de temperatura de los sensores 1, 2, 3 y 4 para configuración de cámara vacía a 0 °C.

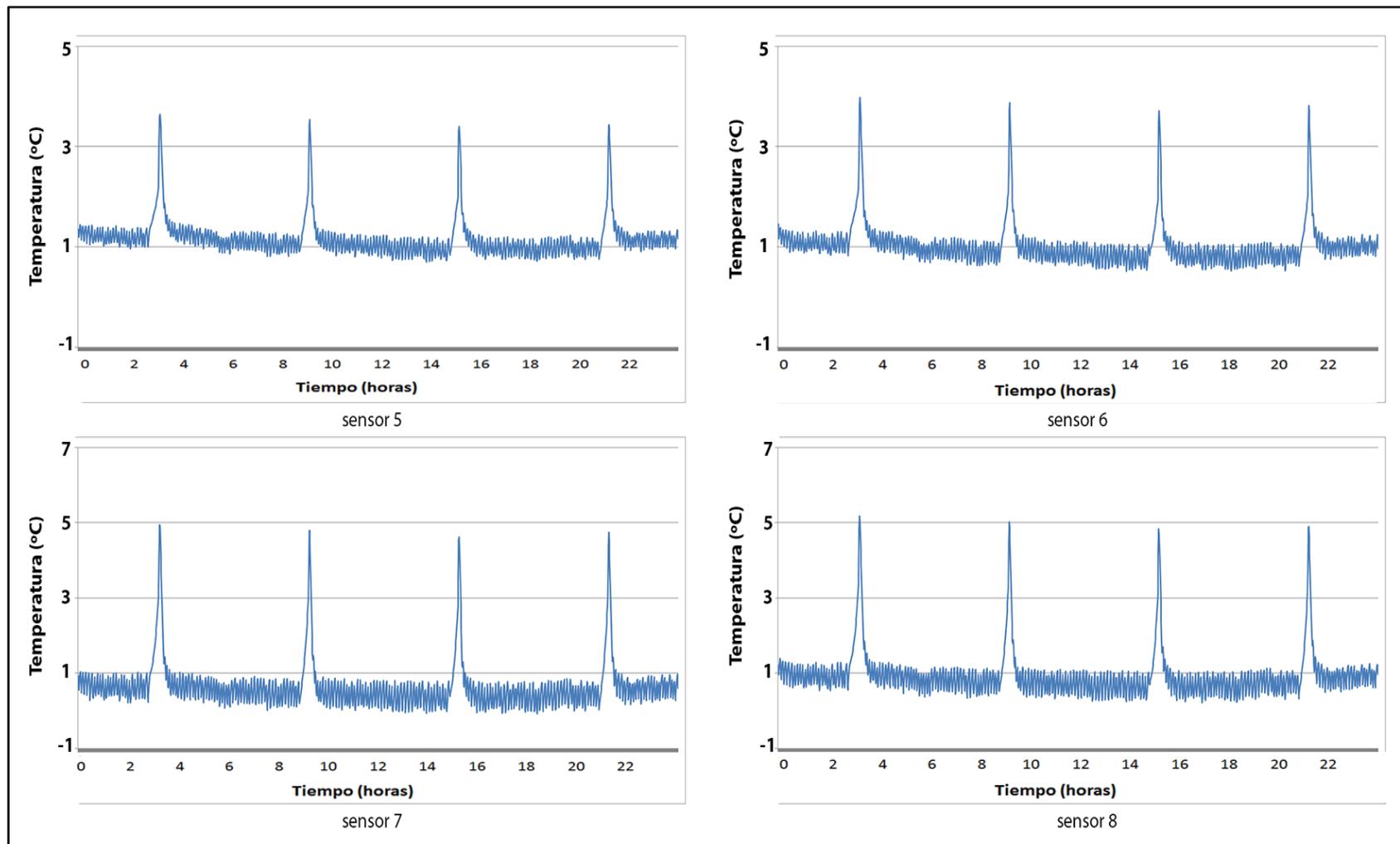


Figura 16. Registros de temperatura de los sensores 5, 6, 7 y 8 para configuración de cámara vacía a 0 °C.

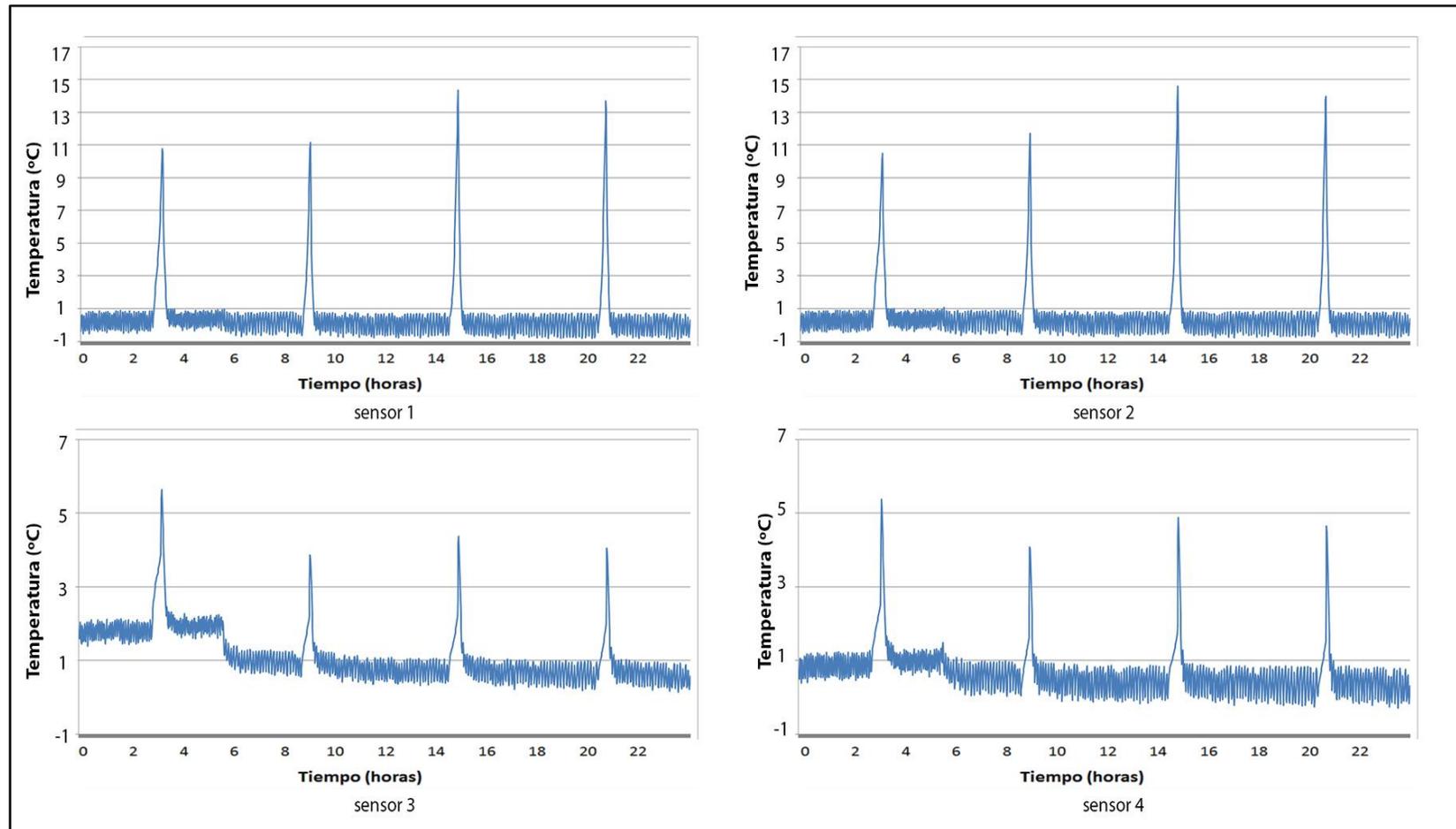


Figura 17. Registros de temperatura de los sensores 1, 2, 3 y 4 para configuración de cámara con agua a 0 °C.

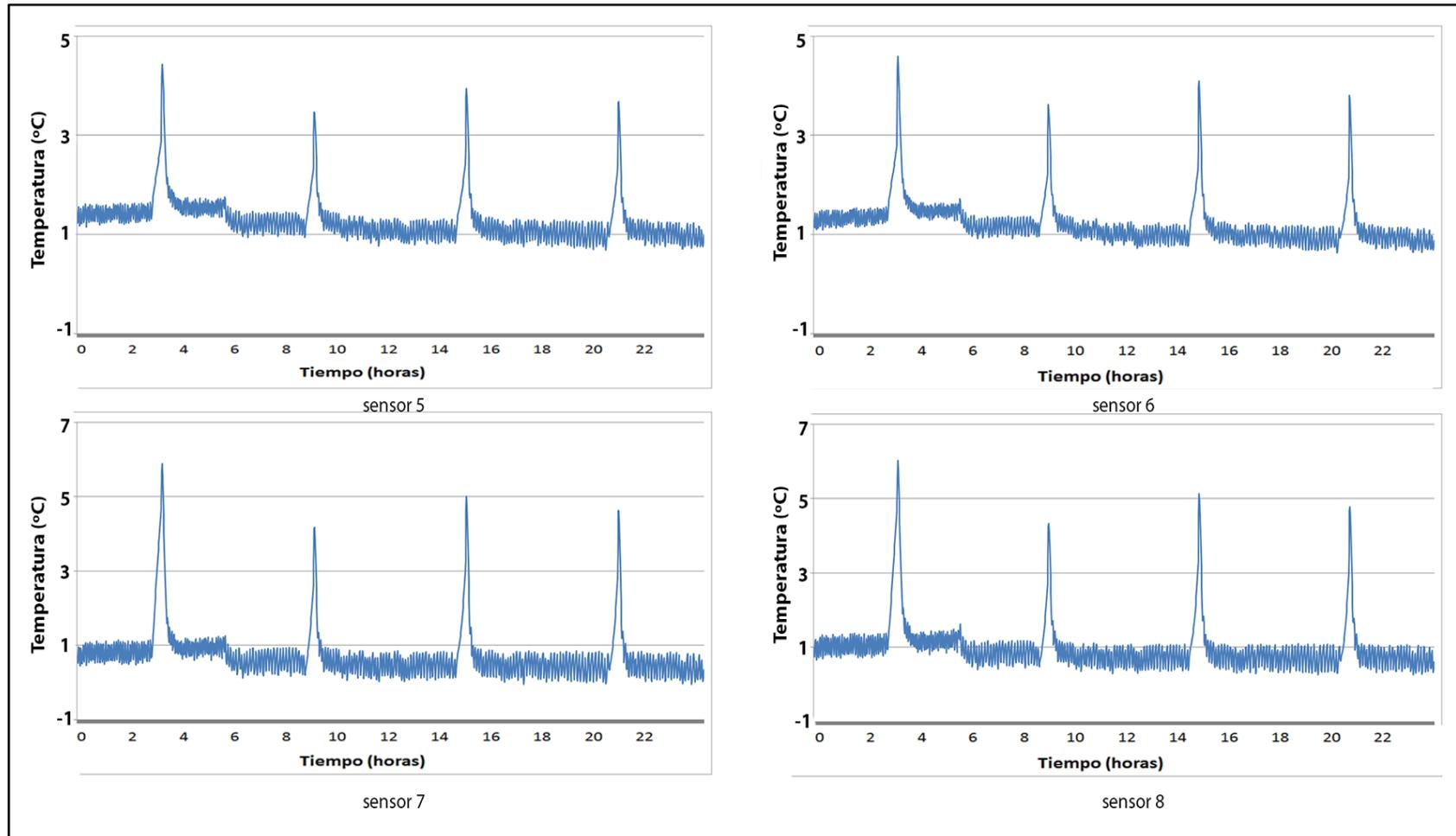


Figura 18. Registros de temperatura de los sensores 5, 6, 7 y 8 para configuración de cámara con agua a 0 °C.

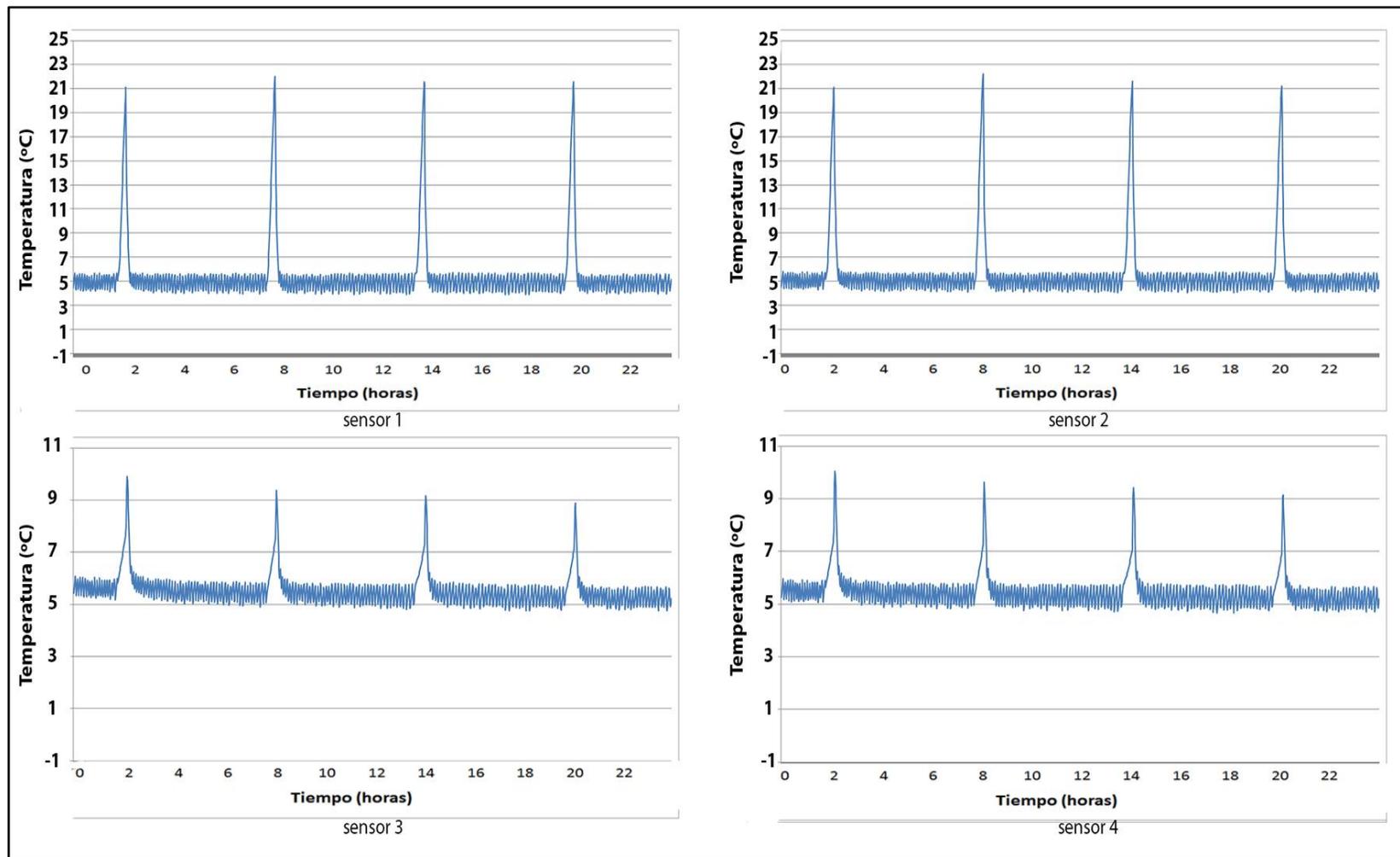


Figura 19. Registros de temperatura de los sensores 1, 2, 3 y 4 para configuración de cámara vacía a 5 °C.

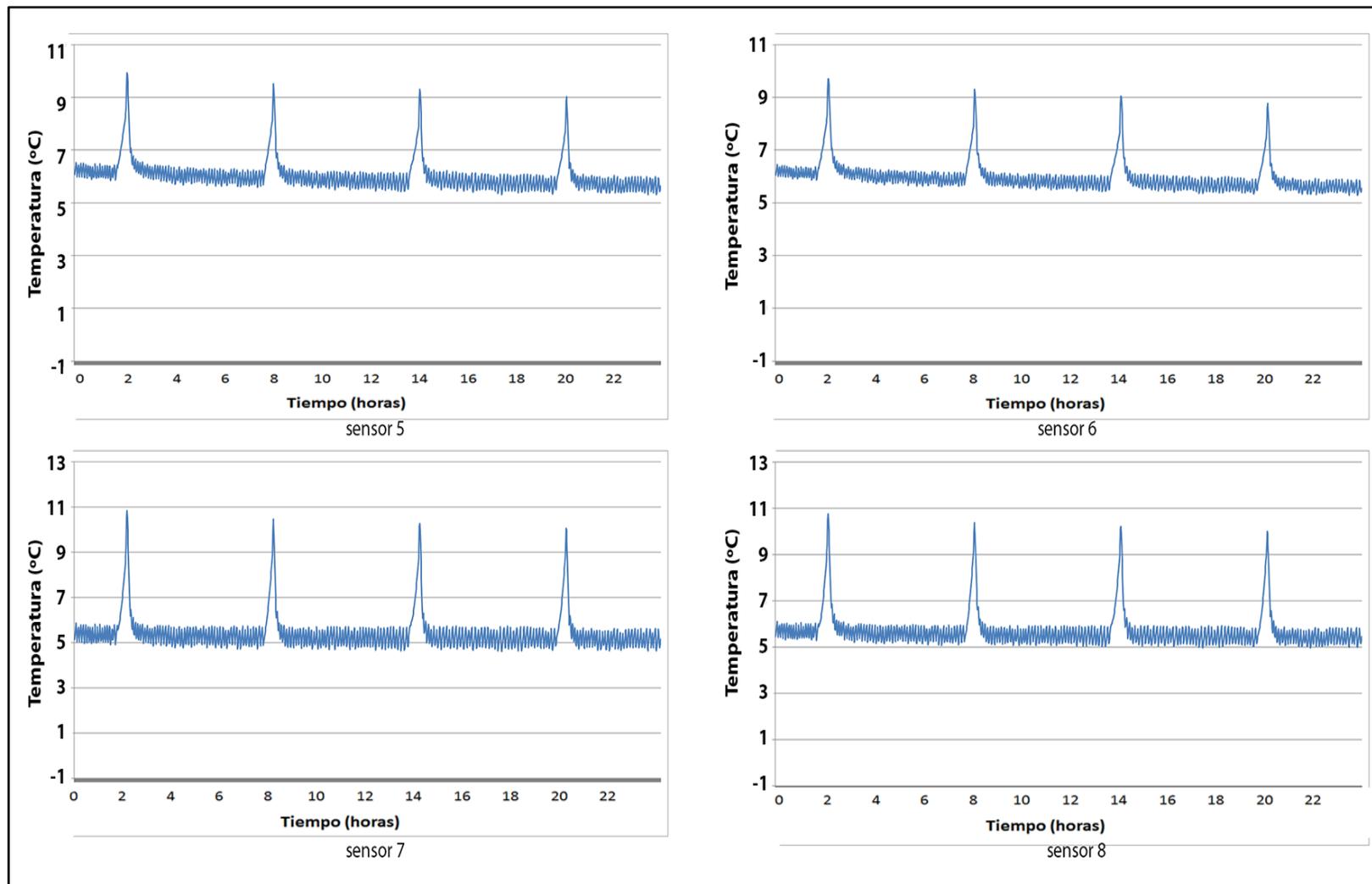


Figura 20. Registros de temperatura de los sensores 5, 6, 7 y 8 para configuración de cámara vacía a 5 °C.

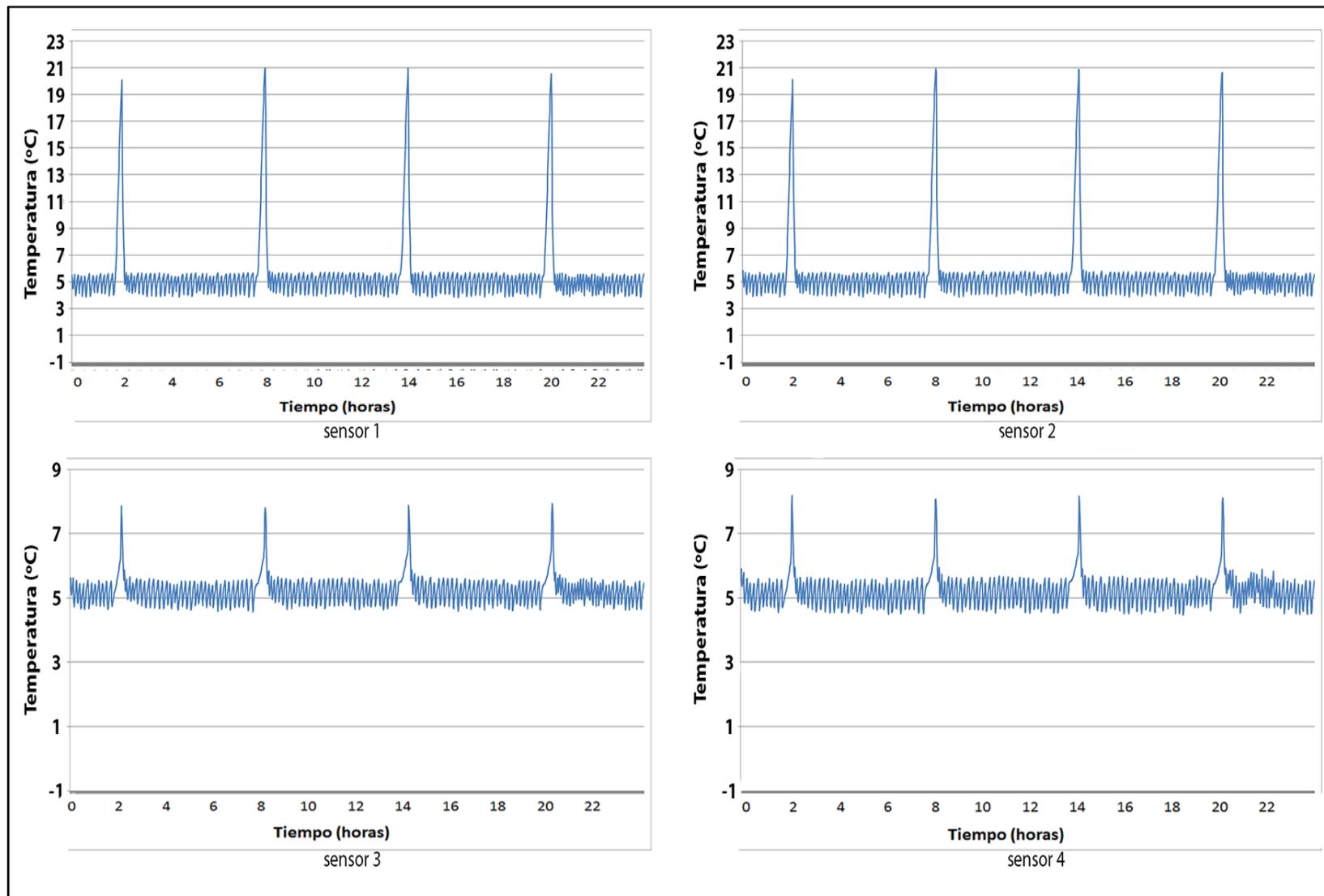


Figura 21. Registros de temperatura de los sensores 1, 2, 3 y 4 para configuración de cámara con agua a 5 °C.

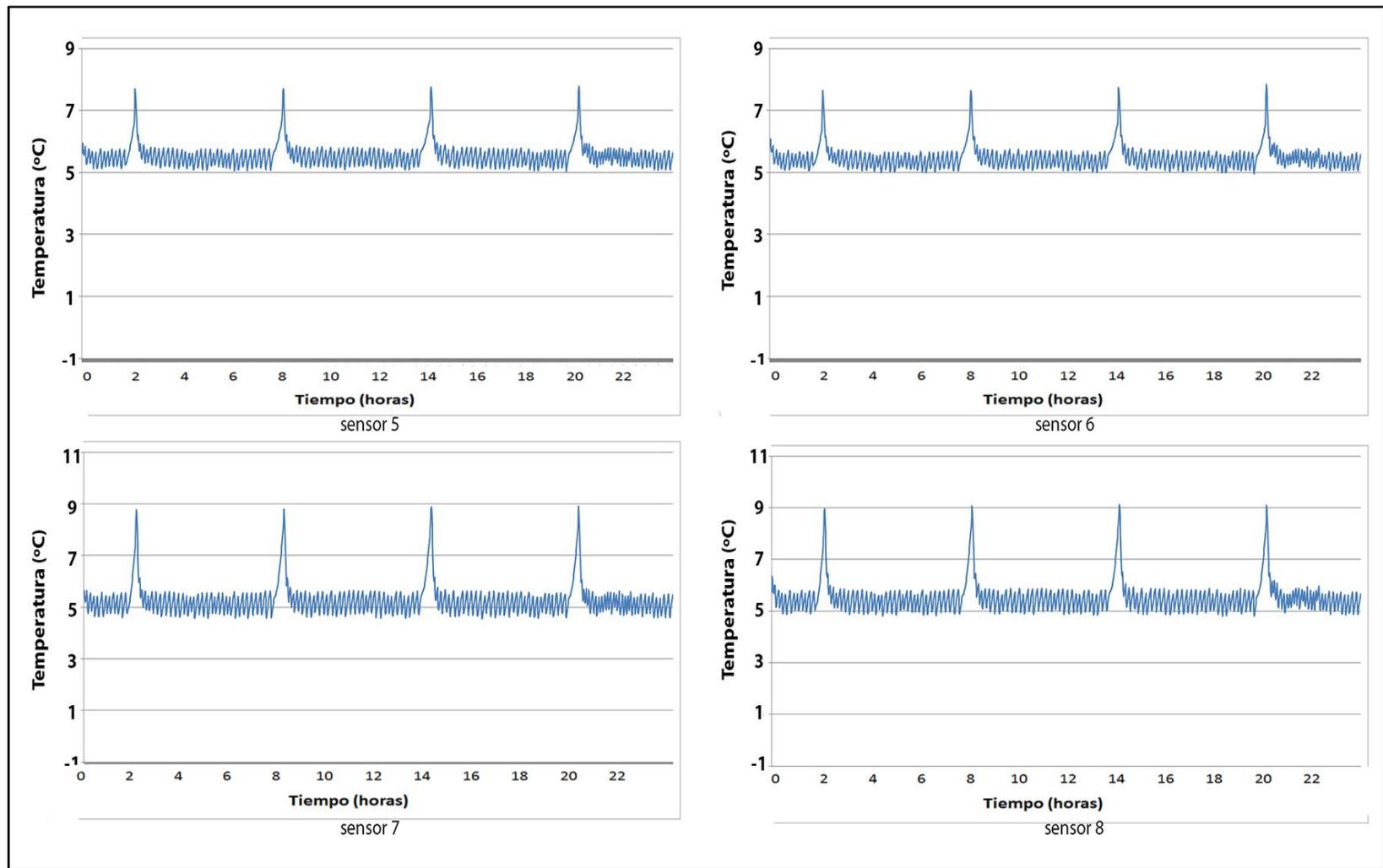


Figura 22. Registros de temperatura de los sensores 5, 6, 7 y 8 para configuración de cámara con agua a 5 °C.

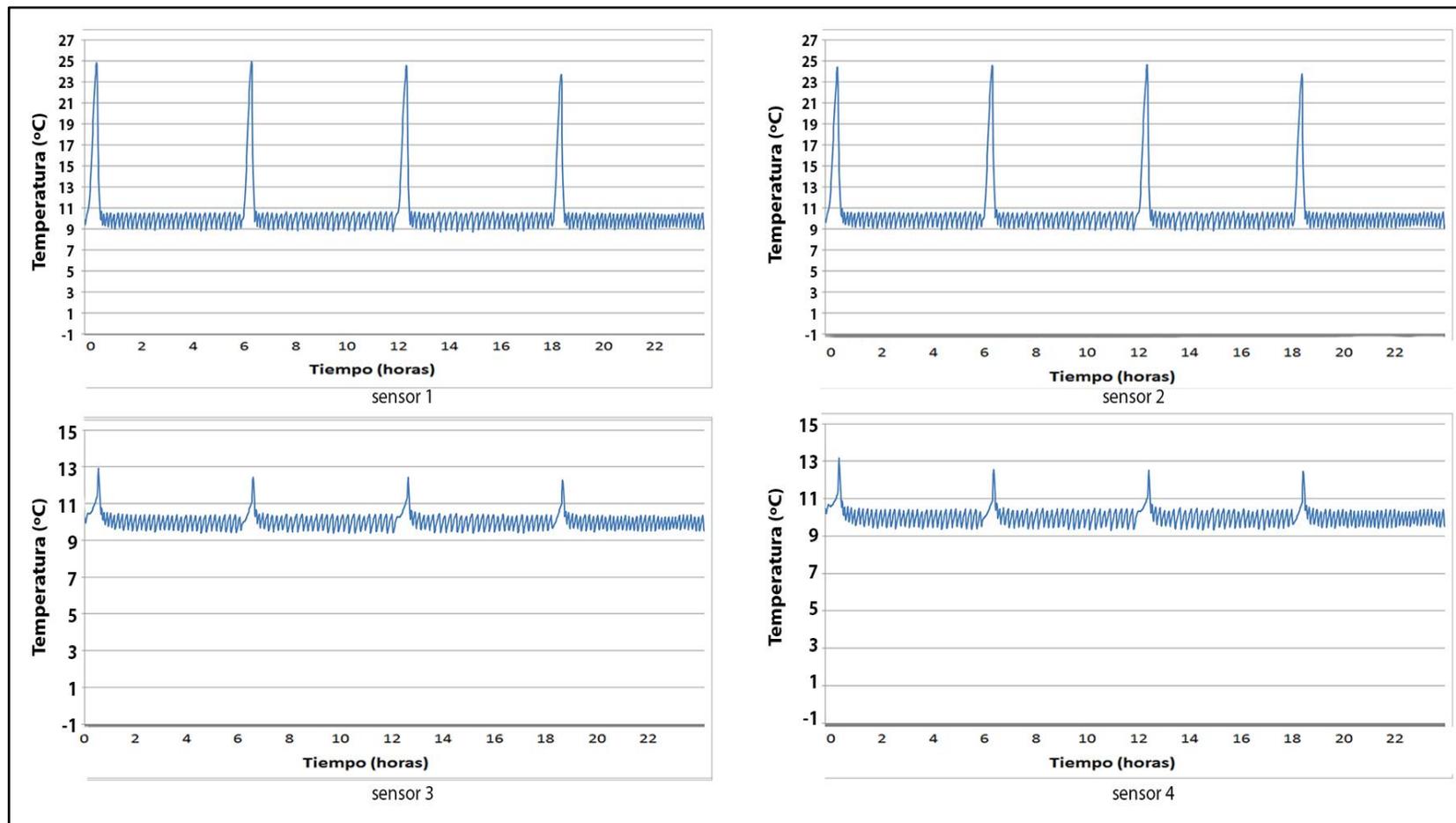


Figura 23. Registros de temperatura de los sensores 1, 2, 3 y 4 para configuración de cámara vacía a 10 °C.

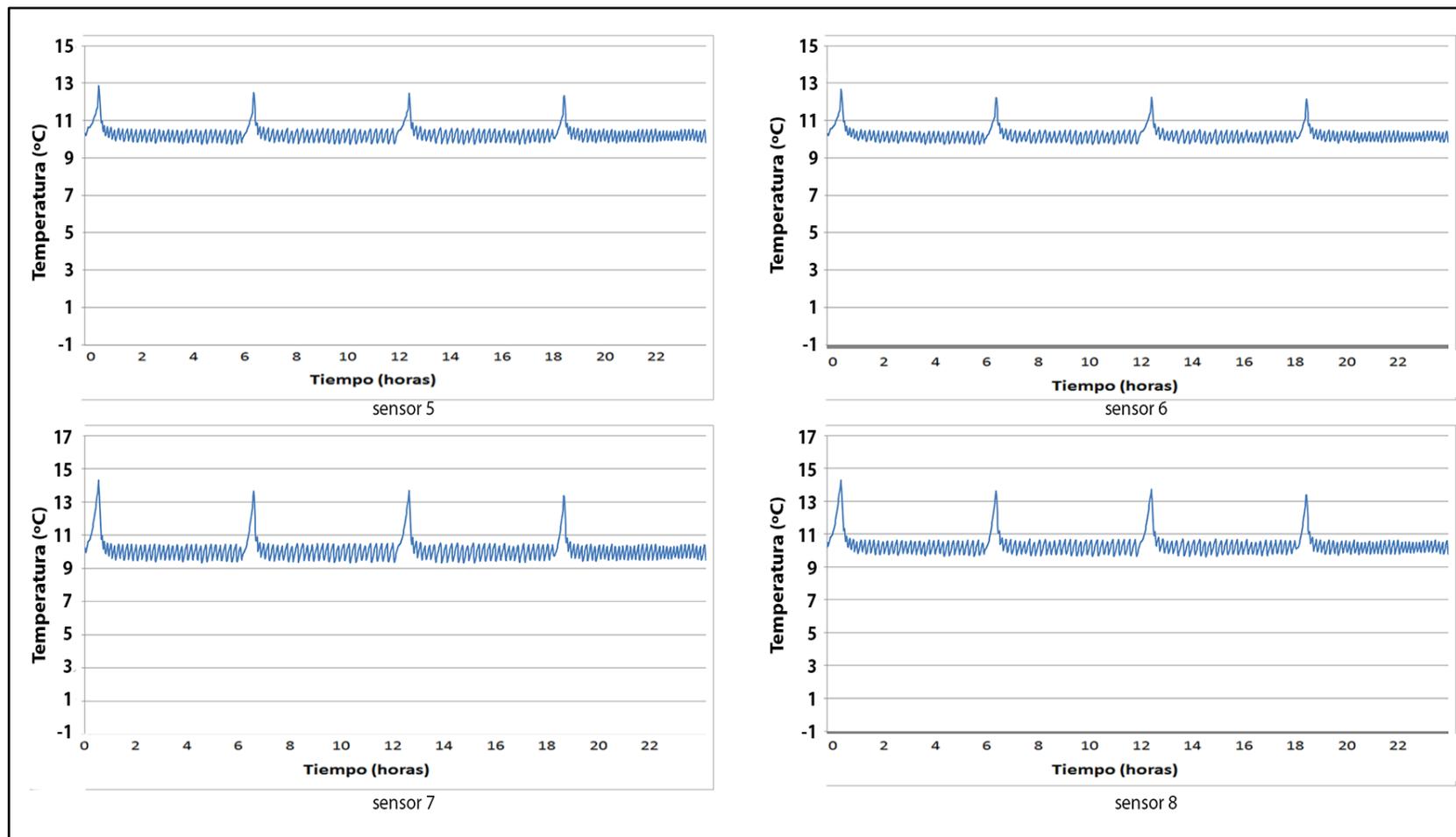


Figura 24. Registros de temperatura de los sensores 5, 6, 7 y 8 para configuración de cámara vacía a 10 °C.

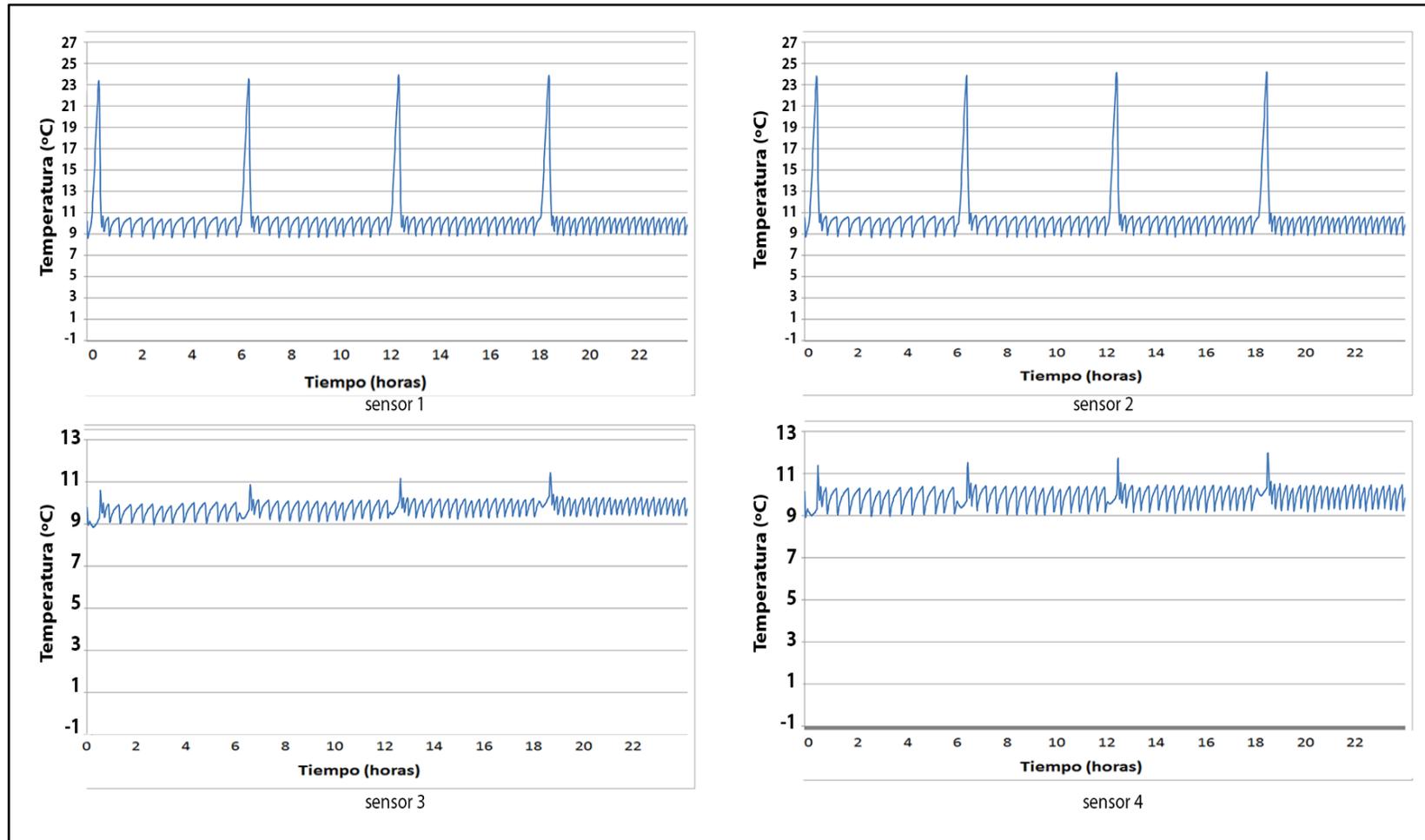


Figura 25. Registros de temperatura de los sensores 1, 2, 3 y 4 para configuración de cámara con agua a 10 °C.

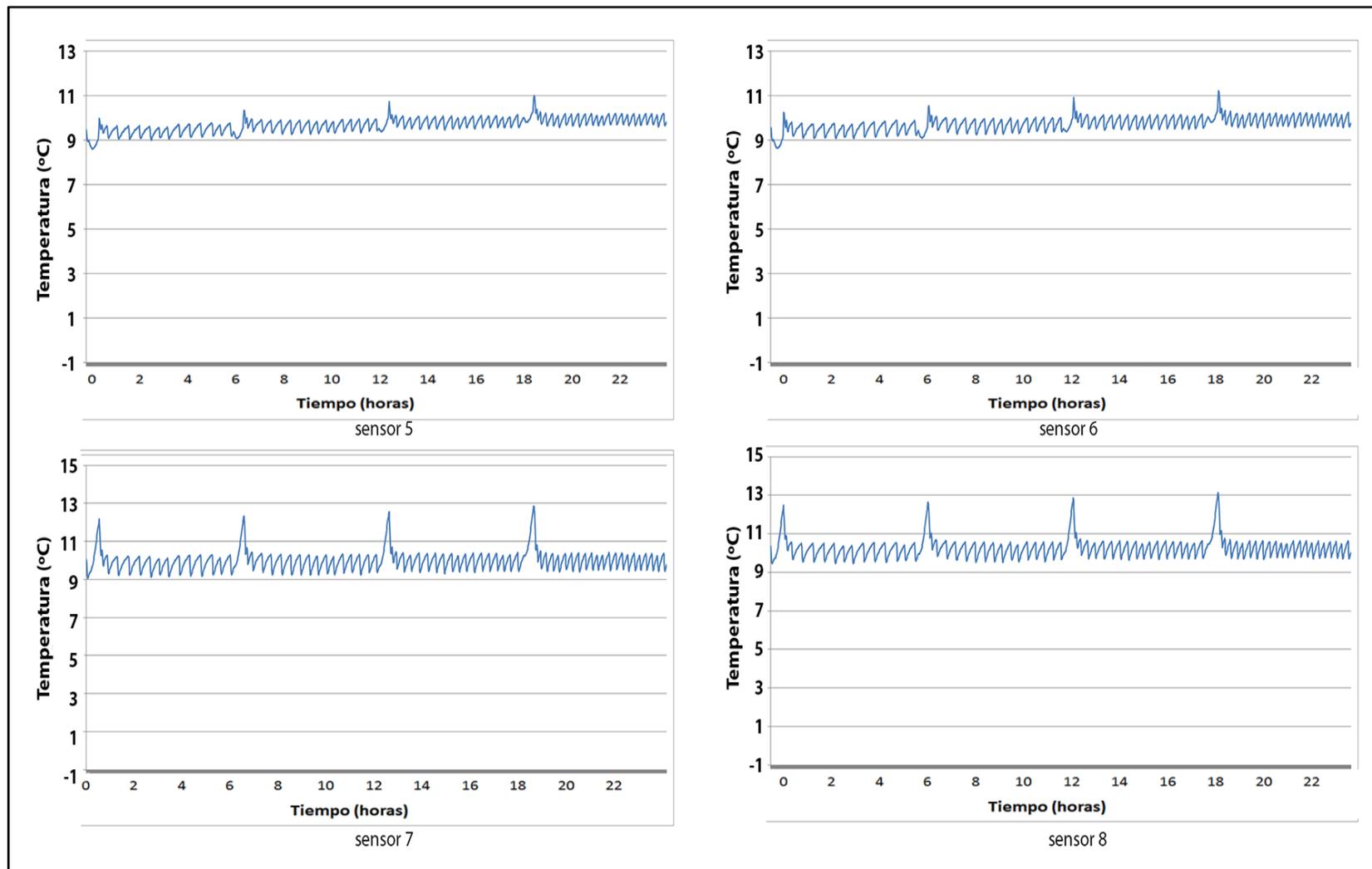


Figura 26. Registros de temperatura de los sensores 5, 6, 7 y 8 para configuración de cámara con agua a 10 °C.

