

Recibido 18 OCT. 2023

ReCIBE, Año 12 No.2, NOV. 2023

Aceptado 18 ENE. 2024

Efecto de la oscilación térmica diaria sobre celdas de carga de galgas extensiométricas genéricas

Effect of Daily Thermal Oscillation on Generic Strain Gauge Load Cells

Rubén Esparza Orozco¹

eoruben9006@gmail.com

Abel Quevedo Nolasco¹

Carlos Ramírez Ayala¹

Roberto Ascencio Hernández¹

Bertha Patricia Zamora Morales²

¹Colegio de Postgraduados

²Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias.

RESUMEN

El objetivo de esta investigación fue evaluar el efecto de la oscilación térmica diaria en sobre tres celdas de carga de galgas extensiométricas (C1, C2 y C3) como elemento sensible de instrumentos de pesaje. Para ello se fabricaron tres básculas digitales con capacidad nominal de 5 kg, equipadas individualmente con un dispositivo electrónico que cuenta con un sistema de reloj, un termómetro y un sistema de almacenamiento de datos. Las básculas fueron dispuestas dentro de un invernadero del Colegio de Postgraduados, Campus Montecillos, del 18 de mayo al 25 de mayo durante 164 horas consecutivas. A cada báscula se aplicó una carga sólida de 5 kg de manera sostenida para registrar las series de tiempo de oscilación térmica y error observado en intervalos de una hora. Ambas series mostraron una relación directa lo que permitió aplicar modelos para compensar el error que registró cada sensor. Los modelos permitieron reducir los errores promedio de 9.79 g, 8,40 g y 11.91 g a 1.39 g, 0.4 g y 1.13 g, respectivamente para cada celda de carga.

Palabras clave: celdas de carga, oscilación térmica, error, modelos de compensación.

ABSTRACT

The objective of this research was to assess the effect of daily thermal oscillation on three strain gauge load cells (C1, C2, and C3) as the sensitive element of weighing instruments. Three digital scales with a nominal capacity of 5 kg were manufactured, each equipped with an electronic device featuring a clock system, a thermometer, and a data storage system. The scales were placed inside a greenhouse at the Colegio de Postgraduados, Montecillos Campus, from May 18 to May 25, continuously for 164 hours. A sustained 5 kg load was applied to each scale to record the time series of thermal oscillation and observed error at one-hour intervals. Both series showed a direct relationship, allowing the application of models to compensate for the error recorded by each sensor. The models reduced the average errors of 9.79 g, 8.40 g, and 11.91 g to 1.39 g, 0.4 g, and 1.13 g, respectively, for each load cell.

Keywords: load cells, thermal oscillation, error, compensation models.

1. INTRODUCCIÓN

El Proyecto de Norma Oficial Mexicana PROY-NOM-010-SCFI-2014, presenta las definiciones técnicas, requisitos técnicos, procedimientos de clasificación y evaluación de instrumentos para pesar de funcionamiento no automático. De dicho documento se extraen y puntualizan los siguientes conceptos.

- “Instrumento para pesar: Instrumento de medición para determinar la masa de un cuerpo utilizando la acción de la gravedad sobre este cuerpo. Este instrumento también puede utilizarse para determinar otras magnitudes, cantidades, parámetros o características relacionadas con la masa”.
- “Instrumento para pesar de funcionamiento no automático: Instrumento que requiere la intervención de un operador durante el proceso de pesada para decidir si el resultado de pesada es aceptable”.
- “Error de indicación: indicación de un instrumento menos el valor convencionalmente verdadero de la masa correspondiente”.
- “División de escala (d): diferencia entre dos valores consecutivos, para una indicación digital, expresado en unidades de masa”.
- “División de escala de verificación (e): valor expresado en unidades de masa, utilizado para la clasificación y verificación de un instrumento para pesar.

Los instrumentos para pesar electrónicos comúnmente utilizan celdas de galgas extensiométricas como elemento sensible. Las galgas extensiométricas se disponen en un circuito eléctrico conocido como puente de Wheatstone, en el que actúan como resistencias variables cuyo valor es proporcional a la carga que se aplica sobre la celda de carga. Si la celda de carga esta en reposo, el voltaje del puente es 0 V; al aplicar una carga, la resistencia de la galga extensiométrica cambia y se genera un voltaje en el puente para reequilibrar el circuito. Los cambios de voltaje son enviados a un micro controlador para su transducción a unidades de peso (Dong & Hansen, 2023; McCauley & Nackley, 2022).

Adicionalmente, de acuerdo con el PROY-NOM-010-SCFI-2014 las pruebas de desempeño deben realizarse a una temperatura ambiente estable. La temperatura es considerada estable siempre que la velocidad de variación no sobrepase los 5°C por hora. También se especifica que las observaciones de error deben hacerse un periodo máximo de 30 minutos. Sin embargo, en algunas aplicaciones se requiere que un instrumento para pesar opere de forma continua bajo condiciones de oscilación térmica natural o controlada por un periodo indeterminado de tiempo (días, semanas, meses y hasta años). Tal es el caso de los lisímetros de pesada, en los que el cambio de masa permite determinar la evapotranspiración de cultivo). Varios investigadores han propuesto diferentes diseños de lisímetros de pesada empleando para ellos instrumentos para pesar de funcionamiento automático de principio electrónico (Beeson, 2011; McCauley et al., 2021).

Evidentemente, las celdas de carga son sensibles a la oscilación térmica, además de que dicha sensibilidad es variable entre ellas, aun siendo de las mismas características. La sensibilidad se manifiesta con una desviación positiva con el aumento de temperatura y una desviación negativa con el descenso de temperatura; es decir, respectivamente, una aparente adición o sustracción de masa del receptor de carga del instrumento (Beeson, 2011).

El objetivo de esta investigación fue observar y compensar los errores registrados en cada una de las celdas de carga derivados de la oscilación térmica diaria dentro de un invernadero del Colegio de Postgraduados, Campus Montecillos.

2. METODOLOGÍA

Para observar la sensibilidad de las celdas de carga a la temperatura se fabricaron tres básculas digitales de funcionamiento automático con capacidad nominal de 5 kg equipadas individualmente con un dispositivo electrónico que cuenta con un sistema de reloj, un termómetro y un sistema de almacenamiento de datos.

Previamente al arranque del funcionamiento automático de las básculas se realizaron las pruebas de desempeño indicadas en el PROY-NOM-010-SCFI-2014 requeridas para instrumentos para pesar de funcionamiento no automático para verificar el correcto funcionamiento de las mismas. Para ello se seleccionó una división de escala (d) y una división de escala de verificación (e) igual a 1g. Se efectuaron las pruebas de desempeño: prueba de pesada, repetitividad y retorno a cero.

Posteriormente, las básculas fueron dispuestas dentro de un invernadero del Colegio de Postgraduados, Campus Montecillo, y a cada una se aplicó una carga sólida de 5 kg de manera sostenida para registrar las series de tiempo de oscilación térmica y error registrado en intervalos de una hora durante 6 días.

2.1. Fabricación de los instrumentos para pesar

Cada báscula cuenta se equipó con un dispositivo electrónico que integra: un micro controlador Arduino y un amplificador HX711 para la transducción de la señal de la celda de carga; un módulo reloj, un módulo mSD con una tarjeta mSD de 16 GB para el almacenamiento de datos y display LCD 16x2 para el mostrar información al usuario. Los componentes fueron montados sobre una tarjeta PCB y fueron resguardados dentro de un gabinete plástico (Figura 1).

La calibración de las celdas de carga consistió en medir el voltaje que se crea en el puente Wheatstone al momento de aplicar una masa calibrada y conocida por el usuario. A esta relación se le conoce como factor de carga y es característico de cada celda de carga. Para ello se utilizó el programa "Calibration" de la librería HX711 sobre la IDE Arduino (Kallhovd, 2022).

El código de trabajo del sistema de pesaje se desarrolló con base en los ejemplos incluidos en la librería HX711 (Kallhovd, 2022). En él, se indicó el factor de celda que se obtuvo durante la calibración de cada celda de carga y se desarrollaron las líneas de código para habilitar los módulos: reloj, almacenamiento de datos y salida de datos por la pantalla LCD.

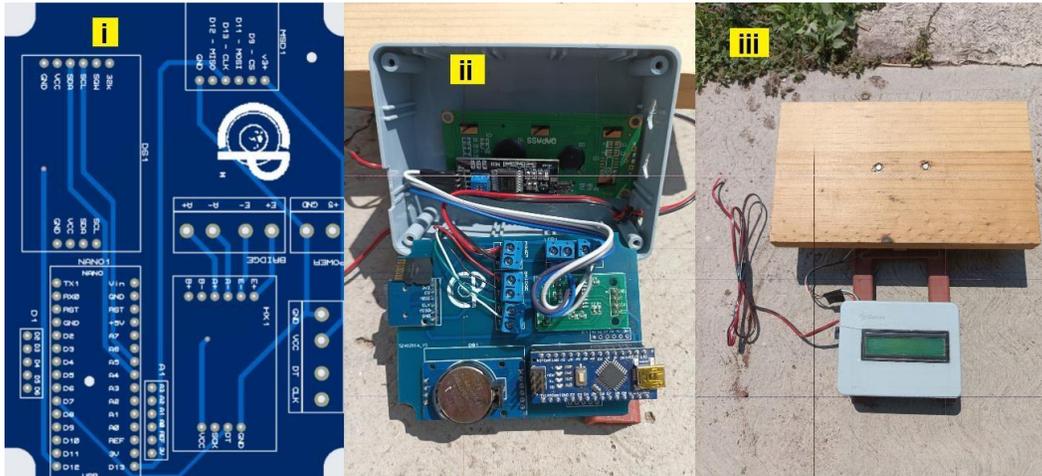


Figura 1. Instrumento para pesar de celda de carga. (i) la tarjeta PCB para el montaje y conexión de los componentes electrónicos, (ii) dispositivo electrónico, y (iii) la integración del instrumento para pesar.

2.2. Descripción de las pruebas de desempeño de funcionamiento no automático

- Pesada: Aplicar cargas calibradas a partir de cero de manera creciente hasta la capacidad Máx del instrumento; similarmente las cargas deben retirarse hasta regresar a cero. El error observado en cada carga no debe ser superior al error máximo permitido para esa carga.
- Prueba de retorno a cero: Una carga de por lo menos $1/3$ la capacidad máxima del instrumento debe permanecer sobre la plataforma de carga por media hora. Al retirar la carga el error desde cero no debe ser superior a $0.5e$.
- Repetividad: Una misma carga debe aplicarse y retirarse en al menos cinco repeticiones. La diferencia en las cifras registradas no deber ser superior al error máximo permitido para esa carga.

2.3. Registro de series de tiempo error y temperatura en funcionamiento automático

El registro de las series de tiempo error y temperatura se inició a las 16:00 hrs del día 18 de mayo de 2023. Los registros se hicieron en intervalos de 1 hora y fueron registrados automáticamente las memorias mSD. Las tres básculas operaron de manera automática e ininterrumpida hasta las 8:00 horas del día 25 de mayo de 2023, 164 horas totales.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1. Resultados de pruebas de desempeño de funcionamiento no automático

De los resultados de las pruebas de desempeño en funcionamiento no automático se determinó que los tres instrumentos que se construyeron cumplen con los requisitos metrológico de un instrumento para pesar de funcionamiento no automático, con exactitud Clase III, para una división de la escala de verificación $e = 1$ g. Por simplificación, solo se presentan los resultados de la celda de carga C1.

□ Prueba de pesada

El Error Observado (EO) al aplicar cada carga fue menor al error máximo permitido (EMP) para esa carga, con división de escala $e = 1$ g (Cuadro 1).

Carga calibrada (g)	Carga observada (g)		Error obser. (g)		Error máx permisible, EMP (g)	Pasa si EO < EMP
	Creciente	Decreciente	Creciente	Decreciente		
0	0.06	-0.01	0.06	0.01	0.5	OK
10	10.07	10.03	0.07	0.03	0.5	OK
500	500.24	500.17	0.24	0.17	0.5	OK
1000	1000.24	1000.25	0.24	0.25	1.0	OK
2000	2000.44	2000.45	0.44	0.45	1.0	OK
4229	4230.08	4230.2	1.08	1.2	1.5	OK
4729	4730.12	4730.09	1.12	1.09	1.5	OK
4999	5000.08	5000.17	1.08	1.08	1.5	OK
6499	6500.03	---	1.13	1.03	1.5	OK

Cuadro 1. Resultado de prueba de pesada de la celda de carga C1.

□ Prueba de retorno a cero

La desviación de la indicación cero después de un periodo de carga de media hora de duración fue 0.25 e y 0.37 e, para las cargas Max y 1.3 Max, respectivamente (Cuadro 2). Los errores observados fueron menores a < 0.5 e, error máximo permitido para esta prueba, por lo que el IBP pasa la prueba.

	Inicio	Final
Hora	13:40:00	14:10:00
Temperatura (°C)	27.25	27.25
Carga Max (g)	4999.72	0.25
Carga 1.3 Máx (g)	6500.22	0.37

Cuadro 2. Resultados de retorno a cero de la celda de carga C1.

□ Prueba de repetividad

La diferencia entre los resultados de cinco pesadas de las cargas 0.5Max, Max y 1.3Max es menor al error máximo que se permite para esa carga (Cuadro 3).

0.5 Máx (g)	Máx (g)	1.3Max (g)
2500.33	4999.88	6500.12
2500.26	4999.67	6500.22
2500.31	4999.45	6500.11
2500.08	4999.34	6500.15
2500.13	4999.53	6500.23

Cuadro 3. Prueba de repetividad de la celda de carga C1.

3.2. Sensibilidad de las celdas de carga a la oscilación térmica

Las condiciones de inicio fueron: fecha 18 de mayo de 2023, 16:00 horas, temperatura 34.5 °C, error igual a 0 (cero) en todos los dispositivos.

Las series de tiempo error y temperatura revelaron la sensibilidad de cada una de las celdas de carga (C1, C2 y C3) a la oscilación de temperatura durante las pruebas de operación (Figura 2).



Figura 2. Pruebas de funcionamiento automático en tres instrumentos para pesar (capacidad 5 kg).

Como menciona Beeson, 2011, el ciclo diario de calentamiento-enfriamiento produce una aparente adición de masa con la subida de temperatura o sustracción de masa con el descenso de temperatura. Adicionalmente, esta aparente adición/sustracción de masa no es equilibrada, tiene una tendencia decreciente que se acumula con forme se cierran ciclos de calentamiento-enfriamiento, es decir el error aumenta por debajo del cero inicial (Figura 3).

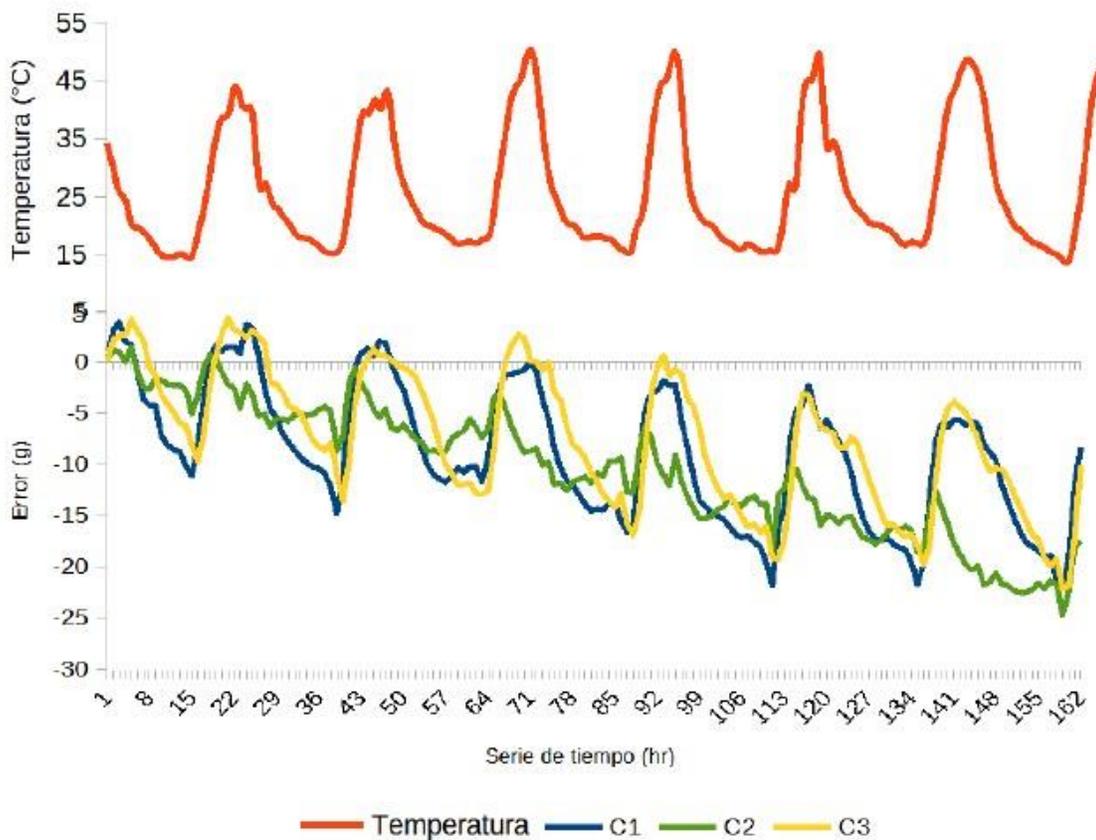


Figura 3. Series de tiempo Temperatura-Error en cada una de las celdas de carga.

En la Figura 4, el par ordenado temperatura-error revela que la sensibilidad de las celdas de carga no es lineal, sino describen una trayectoria diferenciada dependiendo de si la temperatura instantánea se localiza en una fase de enfriamiento o calentamiento. Este tipo de bucles ha sido observado en materiales con memoria de forma en los que una fuerza motriz (temperatura, tensión, fuerza magnética) produce un cambio en alguna propiedad física del material y la misma puede invertirse o retirarse, y se conocen como fenómeno de histéresis. (Ivshin & Pence, 1994). Además, la tendencia decreciente del error genera curvas que recuerdan a un resorte estirado por debajo del cero.

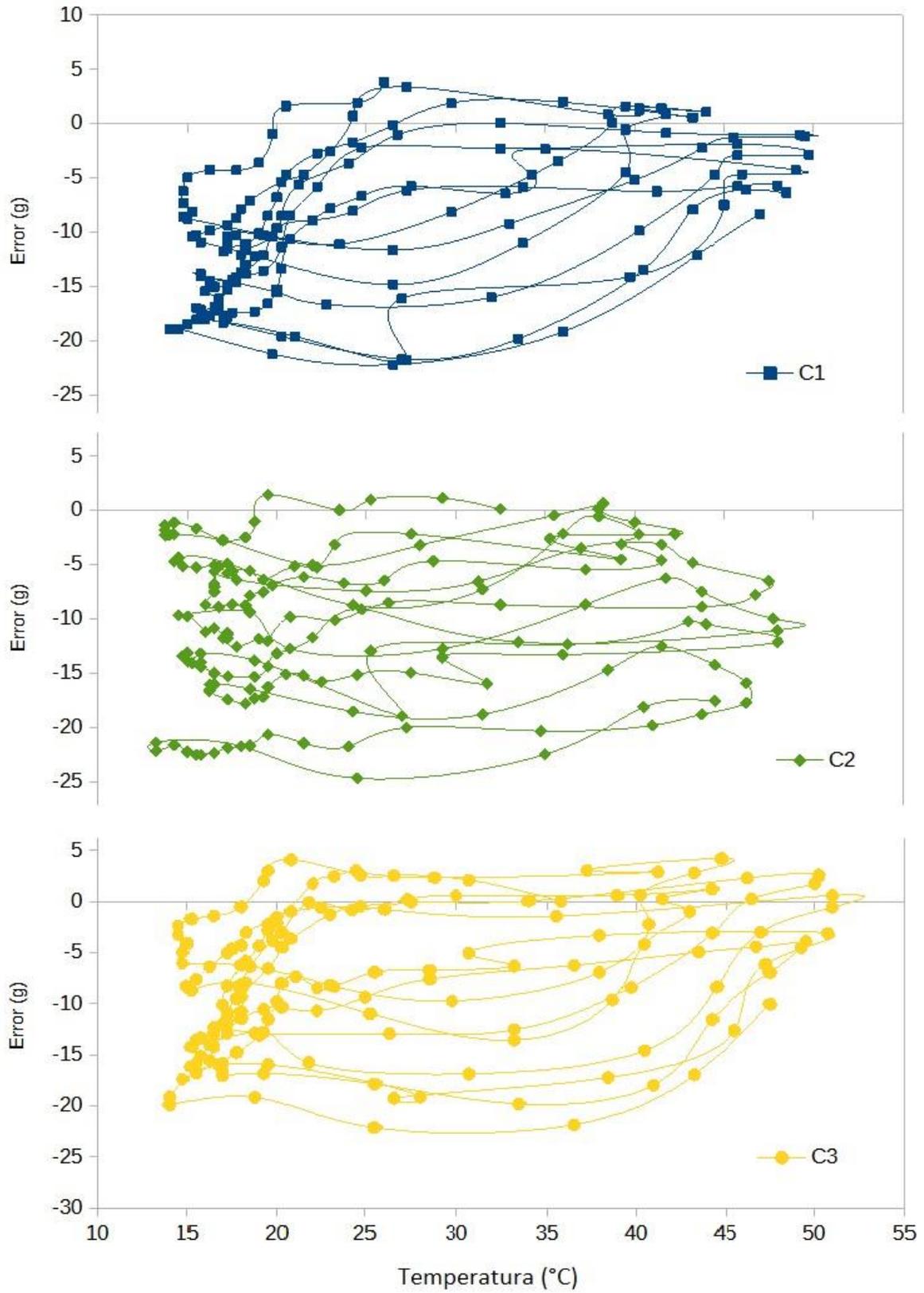


Figura 4. Datos originales del par ordenado temperatura-error.

3.3. Compensación del error

A continuación, se describen la metodología que se siguió para intentar compensar el error observado debido a la sensibilidad de las celdas de carga a la temperatura:

i. Identificación de las temperaturas máxima y mínima.

Durante el periodo de observación, la temperatura mínima se presentó a las 6:00 horas de la mañana, y la temperatura máxima a las 14:00 horas. Con ello, cada día se fraccionó en las fases de enfriamiento y calentamiento, respectivamente con una duración promedio de 16 y 8 horas.

Es posible que la duración tan extensa de la fase de enfriamiento, de origen a la acumulación del error por debajo del cero. La rapidez con la que se presenta la fase de calentamiento parece ser insuficiente para reestablecer consistentemente las propiedades físicas de la celda de carga previas al último ciclo de enfriamiento.

ii. Ejecución del comando Tara

La tendencia decreciente en las series de tiempo del error se corrigió forzando un retorno del error a cero a las 14:00 horas de cada día, momento de ocurrencia de la temperatura máxima. De esta manera, se evitó la elongación de los bucles de histéresis por debajo del cero, efecto resorte, curvas continuas de la Figura 5. Esta compensación también hace más evidente que las celdas de carga son distintamente sensibles a la temperatura. La celda 2 es aparentemente menos sensible a la oscilación térmica diaria, mientras que las celdas 1 y 3 presentan un mayor error registrado y curvas de histéresis muy claras (Figura 5).

Se consideraron los periodos de enfriamiento y calentamiento para ajustar modelos polinómicos de tercer grado que permitieran compensar el error debido a la oscilación térmica diaria (Figura 6, Figura 7 y Figura 8). De las series de datos se han excluido los datos del arranque al primer registro de temperatura máxima, tiempo que se considera necesario para el acondicionamiento de la celda de carga a la atmósfera de operación.

Con la aplicación de los modelos a los registros de peso se redujo el error que se genera por el efecto de la temperatura sobre la celda de carga (Cuadro 4 y Figura 9).

Celda de carga	C1	C2	C3
Originales (g)	9.79	11.91	8.40
Tara (g)	7.65	2.46	8.62
Compensados (g)	1.39	0.41	1.13

Cuadro 4. Resumen de error medio observado para los datos originales, ajuste por comando tara y modelos polinómicos ajustados a las fases de enfriamiento calentamiento, previo ajuste por comando tara.

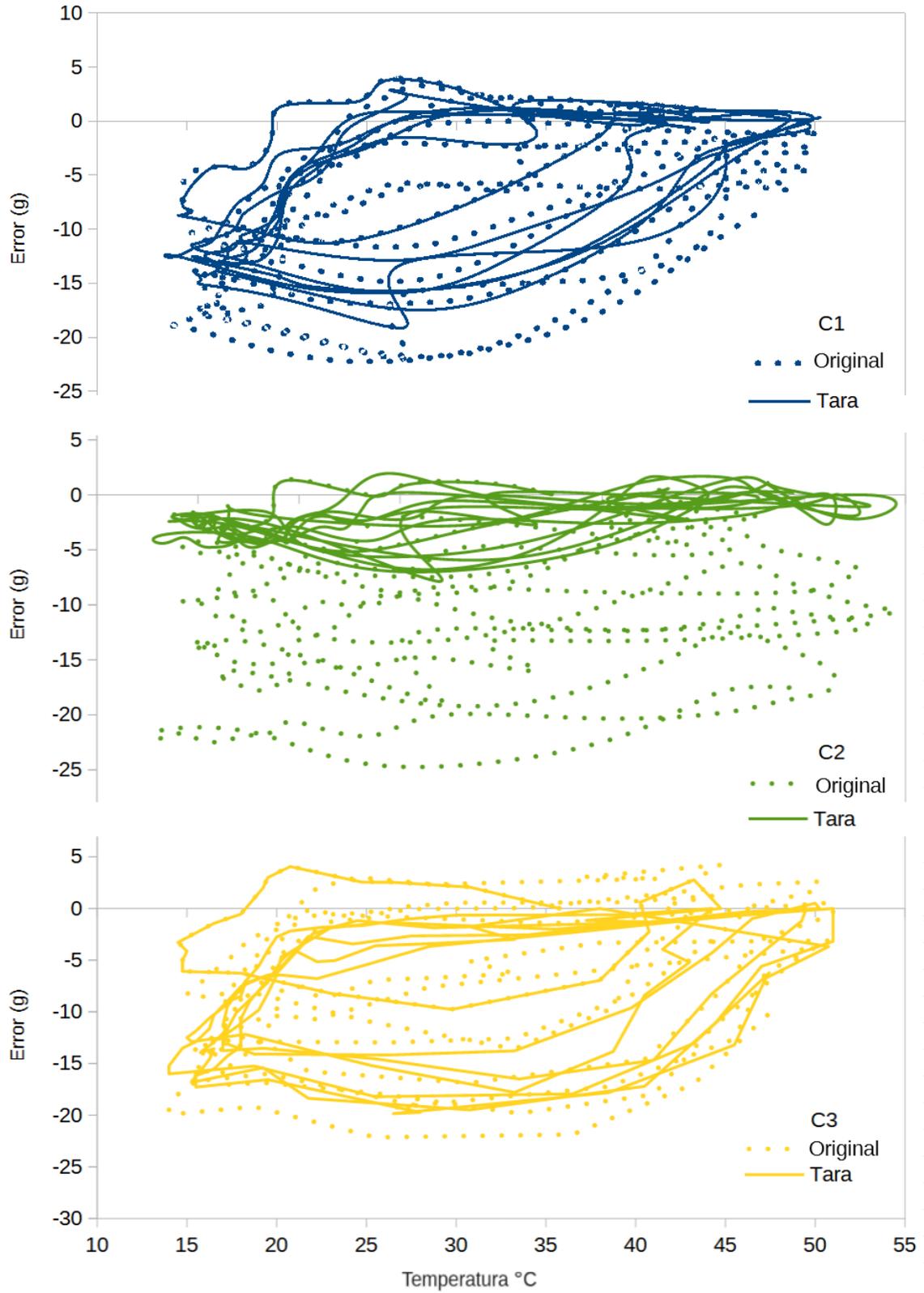


Figura 5. Curvas de par ordenado Temperatura- Error después de forzar el retorno a cero del error.

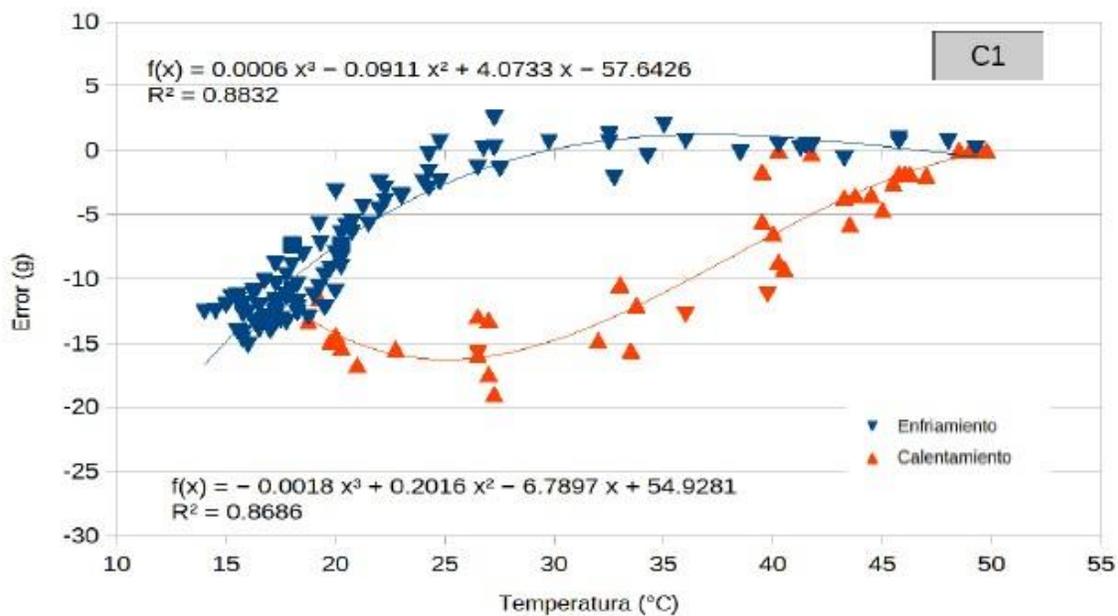


Figura 6. Curva de temperatura-error y modelos de compensación de error, celda de carga (C1).

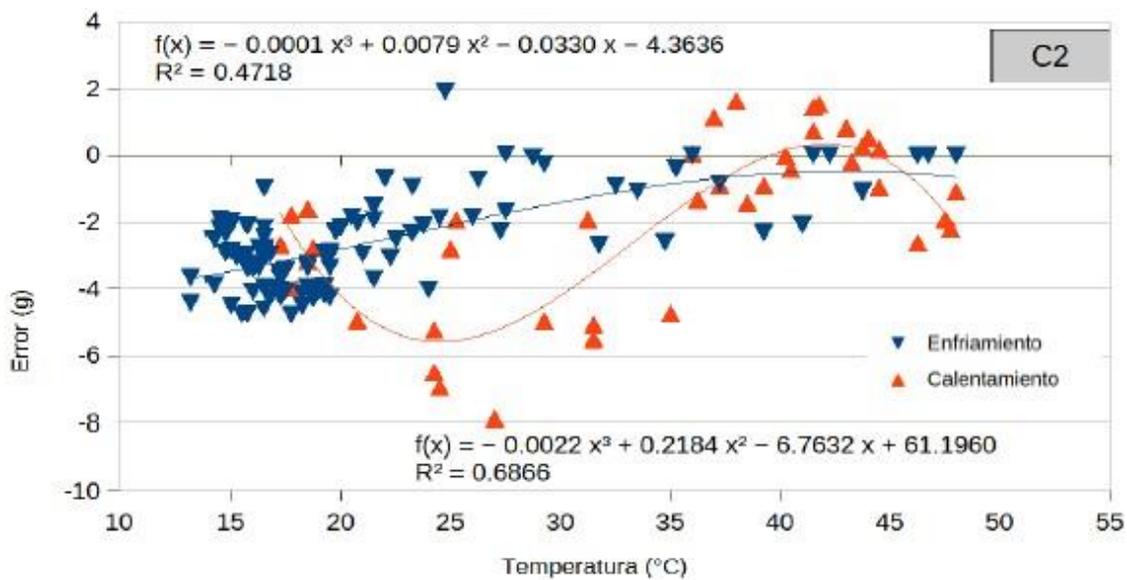


Figura 7. Curva de temperatura-error y modelos de compensación de error, celda de carga (C2).

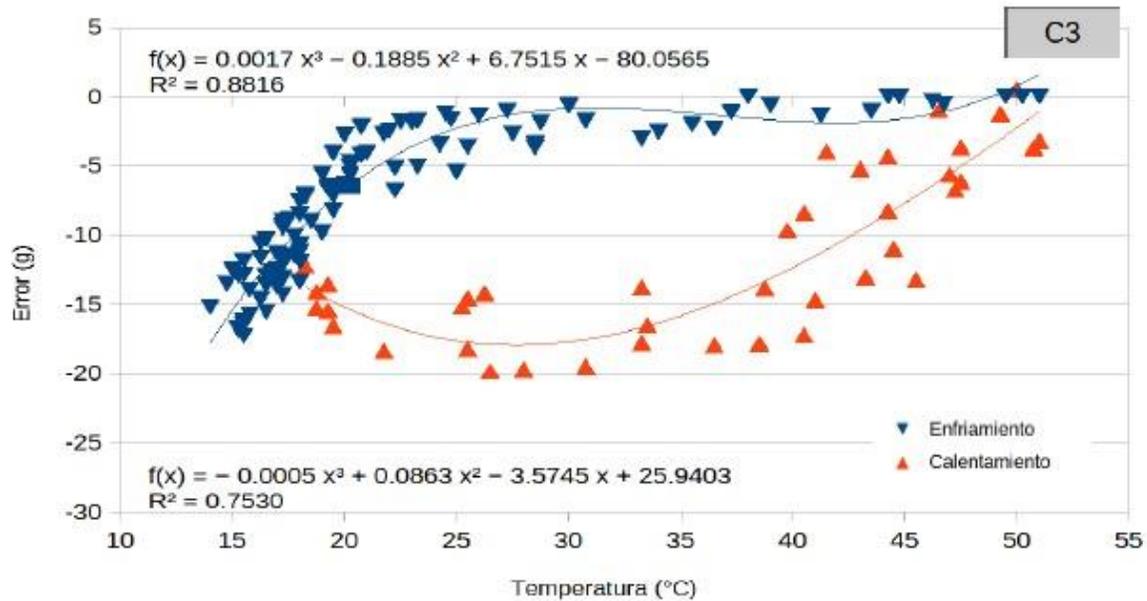


Figura 8. Curva de temperatura-error y modelos de compensación de error, celda de carga (C3).

Es necesario verificar que la metodología propuesta permita compensar el error en tiempo real. Esto debería ser posible siempre que los instrumentos para pesar operen bajo el mismo régimen de temperatura en el que los modelos de compensación fueron desarrollados. En este sentido, es importante resaltar el tiempo de observación fue de seis días consecutivos, en los que el rango de variación térmica, y la hora de ocurrencia de temperaturas máxima y mínima de cada día son relativamente constantes. Por lo que, se requiere de series de tiempo de una longitud anual para realizar observaciones del efecto de la oscilación térmica a lo largo del año y prever su compensación.

4. CONCLUSIONES

Las series de tiempo de temperatura y error mostraron una relación directa, lo que permitió aplicar modelos para compensar el error que registró cada sensor en gabinete (post levantamiento de datos). Los modelos permitieron reducir los errores promedio de 9.79 g, 8,40 g y 11.91 g a 1.39 g, 0.4 g y 1.13 g, respectivamente para cada celda de carga. Sin embargo, la compensación del error observado se hizo post levantamiento y resulta insuficiente para aplicaciones que requieren de un instrumento para pesar cuyo funcionamiento sea automático y continuo.

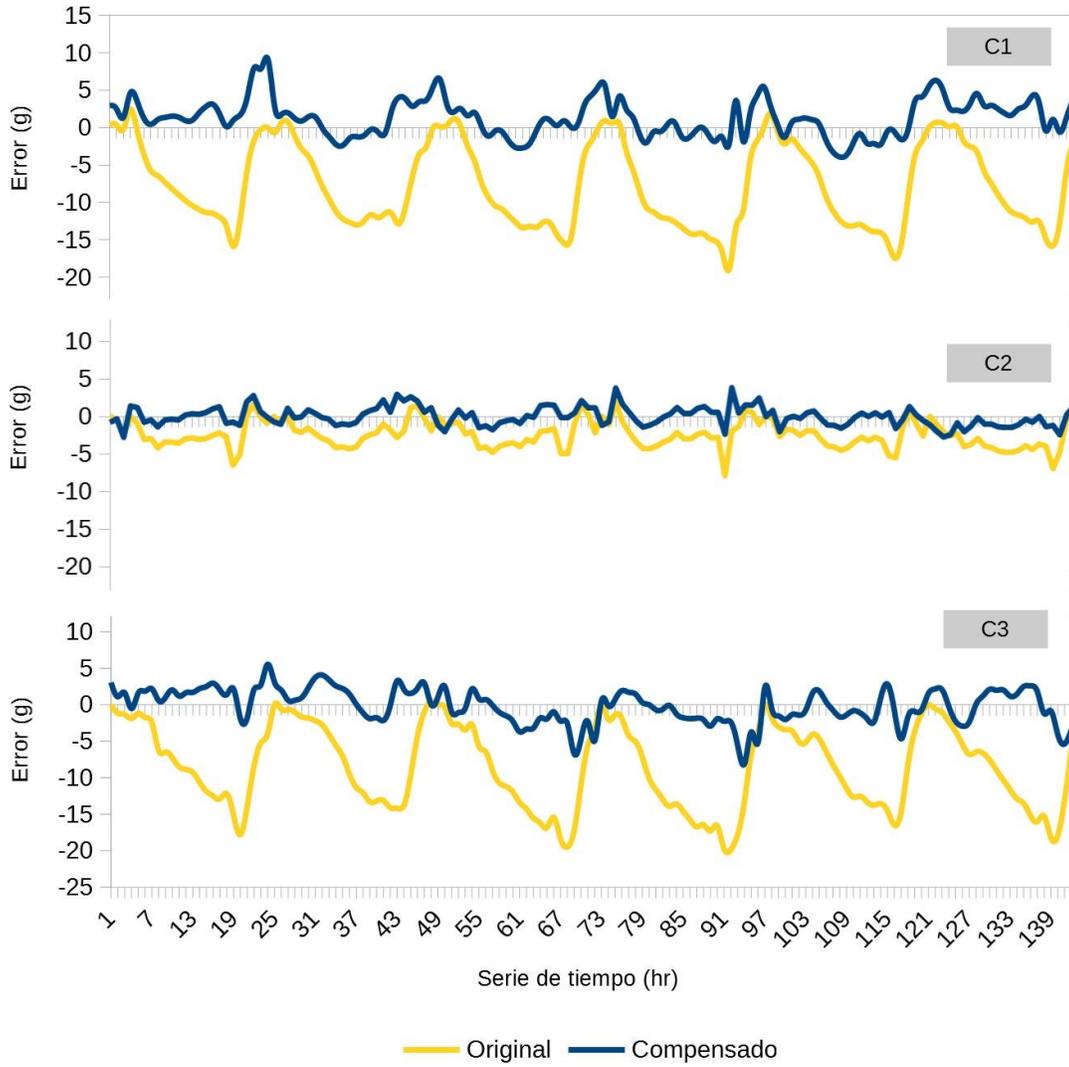


Figura 9. Series de tiempo del error registrado originales (amarillo) y datos compensados por los modelos generados (azul).

5. REFERENCIAS

Dong Y., & Hansen H. (2023). Development and design of an affordable field scale weighing lysimeter using a microcontroller system. *Smart Agricultural Technology*, 4, 1–8. <https://doi.org/10.1016/j.atech.2022.100147>

Ivshin Y., & Pence T. (1994). A constitutive model for hysteretic phase transition behavior. *Int. J. Engng Sci.* Vol. 32, No 4, pp. 681 – 704, 1994. Elsevier Science.

Kollhovd O. (2022) Library for the HX711 24-bit ADC for weight scales. V1.2.12. https://github.com/olkal/HX711_ADC

McCauley, D., & Nackley, L. (2022). Development of mini-lysimeter system for use in irrigation automation of container-grown crops. *HardwareX*, 11(1), 1–18. <https://doi.org/10.1016/j.ohx.2022.e00298>

McCauley, D., Levin, A., & Nackley, L. (2021). Reviewing Mini-lysimeter Controlled Irrigation in Container Crop Systems. *HortTechnology*, 31(6), 634–641. <https://doi.org/10.21273/HORTTECH04826-21>

PROY-NOM-010-SCFI-2017. Instrumentos de medición – Instrumentos para pesar de funcionamiento no automático – Requisitos técnicos y metrológicos, métodos de prueba y de verificación.

https://dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5533602&fecha=01/08/2018#gsc.tab=0.



Esta obra está bajo una licencia de Creative Commons Reconocimiento-NoComercial-CompartirIgual 2.5 México.