

Universidad de Costa Rica
Facultad de Ingeniería
Escuela de Ingeniería de Biosistemas

Trabajo Final de Graduación para optar por el título de Licenciatura en
Ingeniería Agrícola y de Biosistemas

**Cinética del equilibrio higroscópico con sistema IoT e isoterma en
desorción en los granos de café miel (*Coffea arabica*) para tres
temperaturas de almacenamiento.**

Estudiante:

Stephanie Peraza Alpízar

Director:

Ing. Guillermo Vargas Elías, D. Sc.

Asesores:

Ing. Beatriz Mazón Villegas, Ph. D.

Ing. Matías Chaves Herrera, M. Sc.

Tesis de Graduación

10 de febrero de 2025

Trabajo Final de Graduación sometido a revisión por la Comisión de Trabajos Finales de Graduación de la Escuela de Ingeniería de Biosistemas de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de Costa Rica, como requisito para optar por el grado de Licenciatura en Ingeniería Agrícola y de Biosistemas.



Stephanie Peraza Alpizar
Postulante



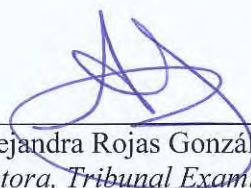
Ing. Guillermo Vargas Elías, D. Sc
Director, Comité Asesor



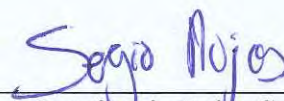
Ing. Beatriz Mazón Villegas, Dra.
Miembro, Comité Asesor



Ing. Matías Chaves Herrera, M.Sc.
Miembro, Comité Asesor



Ing. Alejandra Rojas González, Dra.
Directora, Tribunal Examinador



Ing. Sergio Rojas Calderón, M.Sc.
Miembro, Tribunal Examinador

Dedicatoria

A mis padres, Yamileth y Erick.

A mis hermanos Mauricio y Carolina.

Por la paciencia, el apoyo que me brindaron y por motivarme a no desistir.

Agradecimientos

A mi familia por los sacrificios que hicieron, por ser mi motor durante este proceso y por el apoyo incondicional que me brindaron siempre.

A Diego Bogantes por ayudarme a solucionar los inconvenientes que surgieron durante la toma de datos y por las charlas motivacionales que me permitieron culminar este trabajo.

A mi comité asesor, Beatriz y Matías, por la disposición y la colaboración que me brindaron, así como las observaciones y conocimiento que aportaron a este trabajo para enriquecerlo.

Al profesor Jesús Bejarano por asesorarme y brindarme soluciones ante los inconvenientes que se presentaron durante el ensayo con el prototipo.

Al centro de informática, Juan Solano y Rebeca Esquivel, por el préstamo del router inalámbrico.

A mis compañeros Camilo Chaves y Mariel Rodríguez por el apoyo, motivación en los momentos donde quise darme por vencida y por ser mi team de desveladas en los proyectos de la carrera.

A mis compañeros de laboratorio (Allison, Oscar, Roy, Esteban, Melanny y Stephanie) por él apoyó y motivación; y acompañarme a San Pablo de León Cortes por el café.

A Verónica Campos y Guillermo Solano por el acompañamiento, colaboración y préstamo de equipos del CIGRAS para realizar exitosamente la toma de los datos.

A Guillermo Vargas por motivarme a presentar un artículo en el congreso en Brasil, el cual me permitió vivir la experiencia académica más enriquecedora de mi etapa universitaria y por la guía que me brindó durante esta etapa.

Índice general

<i>Índice de Figuras</i>	<i>vi</i>
<i>Índice de Tablas</i>	<i>x</i>
1. INTRODUCCIÓN	1
2. OBJETIVOS	4
2.1. <i>Objetivo General</i>	4
2.2. <i>Objetivos Específicos</i>	4
3. MARCO TEÓRICO	5
3.1. <i>Antecedentes</i>	5
3.2. <i>Marco conceptual</i>	6
3.2.1. Generalidades del café	6
3.2.2. Variedades del café	7
3.2.3. Composición química del café	8
3.2.4. Fuerzas de atracción del agua en el café	9
3.2.5. Tipo de Beneficiado	10
3.2.6. Café miel	11
3.2.7. Contenido de humedad	11
3.2.8. La ley de Fick de la difusión	12
3.2.9. Cinética de equilibrio higroscópico	14
3.2.10. Equilibrio higroscópico	14
3.2.11. Determinación del equilibrio higroscópico	16
3.2.12. Métodos alternativos para la determinación de equilibrio	17
3.2.13. Microcontrolador	17
3.2.14. Esp32	18
3.2.15. Sensor Dht21	18
3.2.16. Actividad del agua	18
4. METODOLOGÍA	20
4.1. <i>Descripción General</i>	20
4.2. <i>Sitio de estudio y materia prima</i>	20
4.3. <i>Construcción del prototipo IoT</i>	20
4.4. <i>Cinética de equilibrio higroscópico</i>	21
4.4.1. Secado de café	21
4.4.2. Cinética de equilibrio de la humedad relativa y temperatura con el prototipo	22

4.5. Curva de equilibrio higroscópico.....	25
4.5.1. Medición de la actividad de agua.....	25
4.5.2. Contenido de humedad del café.....	25
4.5.3. Ajuste de las curvas de equilibrio higroscópico.....	26
4.6. Efecto de la temperatura en el equilibrio higroscópico.....	27
4.7. Análisis estadístico.....	27
5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	28
5.1. Construcción del prototipo IoT para el registro en línea del tiempo, la humedad relativa y la temperatura del aire de almacenamiento de café miel.....	28
5.2. Determinación de la cinética del equilibrio de la humedad relativa y la temperatura del aire en contacto con los granos de café miel con el prototipo IoT.....	36
5.2.1. Selección de los modelos de ajuste.....	36
5.2.2. Análisis adimensional de los datos.....	41
5.2.3. Efecto de la temperatura en la cinética de equilibrio higroscópico del aire.	44
5.2.4. Efecto de contenido de humedad del café en el equilibrio higroscópico del aire.	46
5.2.5. Efecto de la temperatura de almacenamiento y el contenido de humedad en el equilibrio térmico.....	58
5.2.6. Comparación entre los coeficientes cinéticos de las razones de la temperatura y la humedad relativa.....	66
5.2.7. Cinética de equilibrio higroscópico a 9,3 % b.h.....	68
5.3. Curva de equilibrio higroscópico del café con pergamino y mucílago.....	70
5.3.1. Selección de modelo de ajuste para la isoterma.....	70
5.3.2. Selección del modelo de los componentes del café miel.....	74
5.3.3. Modelo de Peleg en las isotermas de equilibrio de los componentes del café.	80
5.4. Efecto de la temperatura de almacenamiento en los granos de café miel.....	81
5.4.1. Efecto de la temperatura en el café en pergamino con mucílago.....	81
5.4.2. Efecto de la temperatura en los componentes del café miel.....	83
5.4.3. Curva de equilibrio higroscópico mediante prototipo y el medidor de actividad de agua.....	87
6. CONCLUSIONES.....	89
7. RECOMENDACIONES.....	90
8. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	91
APÉNDICES.....	98

Índice de Figuras

Figura 1: Estructura del fruto del café (Modificada de Borém 2022).....	7
Figura 2. Relación genética entre variedades de <i>Coffea arabica</i> L.(Enríquez Calderón y Duicela Guambi 2014)	8
Figura 3. Tipos de agua retenida en los granos de café (Modificado de Borém 2022).	10
Figura 4. Zonas de la isoterma de sorción de la humedad (Modificado de (deMan et al. 2018).	15
Figura 5. Tipos de isotermas de sorción descritas por Brunauer (Modificado de (Andrade, Lemus, y Pérez 2011).	16
Figura 6. Partes de un medidor AQUALAB 4TE (Modificado de Addium 2021).....	19
Figura 7. Diagrama de flujo para el monitoreo de la humedad relativa y temperatura del aire en contacto con los granos de café hasta su estabilización.....	22
Figura 8. Diagrama de flujo para el ajuste de la curva de equilibrio higroscópico.	25
Figura 9. Diseño del panel web para visualizar las condiciones de almacenamiento de los granos de café miel registradas por tres sensores DHT-21.....	32
Figura 10. Curvas de calibración de los sensores DHT-21 mediante tres soluciones salinas. 33	
Figura 11. Registro de datos de humedad relativa (a) y la temperatura (b) del aire en contacto con los granos de café miel almacenados en una cámara fría a 10 °C.....	35
Figura 12. Prototipo IoT para el registro de los datos de la humedad relativa y temperatura del aire en contacto con los granos de café miel.....	36
Figura 13. Ajuste de la cinética de equilibrio higroscópico del aire en contacto con los granos de café miel a 25 % b.h. almacenados a 35 °C.	37
Figura 14. Residuos obtenidos de cinco modelos para representar la humedad relativa del aire en contacto con café miel 25 % b.h. durante el almacenamiento a 35 °C.	38
Figura 15. Ajuste de la cinética de equilibrio higroscópico del aire en contacto con los granos de café miel a 35 % b.h. almacenados a 35 °C.	40
Figura 16. Cinética de equilibrio en la humedad relativa (a) y su derivada en café miel a 25 % b.h. almacenado a 35 °C.	41
Figura 17. Ajuste de la cinética de equilibrio higroscópico del aire en contacto con los granos de café miel a 35 % b.h. almacenados a 35 °C.	42
Figura 18. Análisis de los residuos de siete modelos para representar la razón de la humedad del aire en contacto con el café miel 35 % b. h. durante el almacenamiento a 35 °C.	43

Figura 19. Modelo propuesto para la cinética de equilibrio higroscópico del aire en contacto con los granos a cinco contenidos de humedad.	44
Figura 20. Efecto del contenido de humedad del café miel en la cinética de equilibrio higroscópico a 35 °C del lote 2.	47
Figura 21. Efecto de la temperatura de almacenamiento en el coeficiente cinético.	49
Figura 22. Relación entre el coeficiente cinético de la ecuación 8 para la rapidez de equilibrio de la humedad relativa en cinco niveles del contenido de humedad en el café miel.	51
Figura 23. Ajuste lineal de la inversa de la temperatura de almacenamiento y el logaritmo de la rapidez de equilibrio de la humedad relativa.	52
Figura 24. Efecto de la temperatura de almacenamiento y el contenido de humedad del café miel en el tiempo para la estabilización higroscópica del aire.	54
Figura 25. Etapas de la cinética de equilibrio higroscópico del café miel a 35 °C.	56
Figura 26. Efecto de la temperatura en la cinética de equilibrio higroscópico de los tres lotes de café miel almacenados a 10, 25 y 35 °C.	57
Figura 27. Modelos para el ajuste a la cinética de equilibrio térmico del aire en contacto con los granos de café miel a 20 % b.h. del lote 2 a 35 °C.	58
Figura 28. Análisis de los residuos de las ecuaciones 3, 7 y 8 en la cinética de equilibrio térmico del café miel 20 % b.h. durante el almacenamiento a 35 °C.	59
Figura 29. Cinética de la razón de la temperatura del aire en contacto con los granos hasta alcanzar el equilibrio térmico ajustados con la ecuación 8 para los contenidos de humedad en estudio a 35°C.	60
Figura 30. Modelos matemáticos de ajuste a la cinética de equilibrio de la temperatura del aire en contacto con los granos de café miel a 20 % b.h. almacenados a 10 °C.	61
Figura 31. Análisis de residuos de los modelos Page, Midilli, ec. 8, 13 y 14 de la cinética de equilibrio térmico del café miel 20 % b.h. durante el almacenamiento a 10 °C.	62
Figura 32. Cinética de la razón de la temperatura durante el enfriamiento ajustado con la ecuación de Page para los cinco contenidos de humedad.	63
Figura 33. Ajuste de la cinética de equilibrio higroscópico del aire en contacto con los granos de café miel a 9,3 % b.h. almacenados a 25 °C.	68
Figura 34. Análisis de residuos de los tres modelos para representar la razón de humedad del aire en contacto con el café miel a 9,3 % b.h durante el almacenamiento a 5 °C.	69
Figura 35. Curva de equilibrio higroscópico en desorción de los granos de café miel almacenados a 35 °C.	70

Figura 36. Análisis de residuos de los modelos para representar la curva de equilibrio higroscópico de café miel almacenado a 35 °C	71
Figura 37. Comparación entre el café con pergamino, sin mucílago (lavado) y con mucílago (miel).....	73
Figura 38. Comparación de modelos para representar la curva de equilibrio higroscópico del pergamino con mucílago almacenado a 35 °C.....	74
Figura 39. Análisis de los residuos de los modelos matemáticos del equilibrio higroscópico del pergamino con mucílago a 35 °C.....	75
Figura 40. Ajuste de la curva de equilibrio higroscópico del café miel molido almacenado a 35 °C.	76
Figura 41. Análisis de los residuos de los modelos matemáticos equilibrio higroscópico del café miel molido a 35 °C.	77
Figura 42. Ajuste de la curva de equilibrio higroscópico del café oro almacenado a 35 °C. ...	78
Figura 43. Análisis de los residuos de los modelos matemáticos de equilibrio higroscópico para el café oro miel a 35 °C.	79
Figura 44. Ajuste de Peleg de las curvas de equilibrio higroscópico del café miel y sus componentes almacenados a 35 °C.....	80
Figura 45. Efecto de la temperatura de almacenamiento en la isoterma en desorción de equilibrio higroscópico del café con pergamino y mucílago.	81
Figura 46. Diferencias entre la isoterma del café con pergamino y mucílago a 35 y 25 °C con respecto a la isoterma de 10 °C.....	82
Figura 47. Isotermas de equilibrio higroscópico en café con pergamino y mucílago molido.	83
Figura 48. Isotermas de equilibrio higroscópico en café oro miel molido.	84
Figura 49. Diferencias entre la isoterma del café oro miel a 10 y 25 °C con respecto a la isoterma a 35 °C.	85
Figura 50. Isotermas de equilibrio higroscópico en pergamino con mucílago molido.....	86
Figura 51. Isotermas de equilibrio higroscópico del prototipo y el medidor de actividad de agua a las tres temperaturas estudiadas.	87
Figura A.1. Diagrama de flujo por etapas principales de la metodología propuesta.....	99
Figura A.2. Diagrama del diseño experimento	100
Figura A.3. Diagrama del prototipo IoT para el monitoreo de la humedad relativa y temperatura de almacenamiento del café miel.	101
Figura A.4. Secadora de flujo transversal (Tomado de: Recio Loría 1999).....	102

Figura A.5. Equilibrio higroscópico del café miel del lote 1 a los cinco contenidos de humedad de estudio almacenados a 35°C.	104
Figura A. 6. Equilibrio higroscópico del café miel del lote 2 a los cinco contenidos de humedad de estudio almacenados a 35°C.	105
Figura A.7. Equilibrio higroscópico del café miel del lote 3 a los cinco contenidos de humedad de estudio almacenados a 35°C	106
Figura A.8. Equilibrio higroscópico del café miel del lote 1 a los cinco contenidos de humedad de estudio almacenados a 25°C.	107
Figura A. 9. Equilibrio higroscópico del café miel del lote 2 a los cinco contenidos de humedad de estudio almacenados a 25 °C.	108
Figura A.10. Equilibrio higroscópico del café miel del lote 3 a los cinco contenidos de humedad de estudio almacenados a 25 °C.	109
Figura A.11. Equilibrio higroscópico del café miel del lote 1 a los cinco contenidos de humedad de estudio almacenados a 10 °C.	110
Figura A.12. Equilibrio higroscópico del café miel del lote 2 a los cinco contenidos de humedad de estudio almacenados a 10 °C.	111
Figura A.13. Equilibrio higroscópico del café miel del lote 3 a los cinco contenidos de humedad de estudio almacenados a 10 °C.	112
Figura A.14. Equilibrio en la temperatura del aire en contacto con el café miel del lote 1 a los cinco contenidos de humedad de estudio almacenados a 35 °C.	113
Figura A.15. Equilibrio en la temperatura del aire en contacto con el café miel del lote 2 a los cinco contenidos de humedad de estudio almacenados a 35 °C.	114
Figura A.16. Equilibrio en la temperatura del aire en contacto con el café miel del lote 3 a los cinco contenidos de humedad de estudio almacenados a 35 °C.	115
Figura A.17. Equilibrio en la temperatura del aire en contacto con el café miel del lote 1 a los cinco contenidos de humedad de estudio almacenados a 10 °C.	116
Figura A.18. Equilibrio en la temperatura del aire en contacto con el café miel del lote 2 a los cinco contenidos de humedad de estudio almacenados a 10 °C.	117
Figura A.19. Equilibrio en la temperatura del aire en contacto con el café miel del lote 3 a los cinco contenidos de humedad de estudio almacenados a 10 °C.	118
Figura A.20. Código para determinación del tiempo de equilibrio higroscópico.	119
Figura A.21. Código para determinación del tiempo de equilibrio higroscópico (continuación).	120

Índice de Tablas

Tabla 1. Principales componentes de los granos de café verde (% del peso seco) ¹	9
Tabla 2. Modelos matemáticos para el ajuste de la cinética de secado del café miel.....	13
Tabla 3. Determinación de la actividad de agua de las sales saturadas utilizadas para la calibración de la humedad relativa de los sensores.	21
Tabla 4. Modelos matemáticos para el ajuste de la cinética de equilibrio en la humedad relativa y temperatura del aire en contacto con los granos de café miel.....	24
Tabla 5. Modelos seleccionados para el ajuste de las curvas de equilibrio higroscópico para el café miel y sus componentes sólidos.	26
Tabla 6. Características de los sensores de humedad relativa y temperatura analizados.	28
Tabla 7. Características técnicas de tres microcontroladores (Arduino Uno Wifi y Rasberry Pi Zero 2W).....	29
Tabla 8. Especificaciones técnicas del prototipo propuesto y el HOBO Mx2304.....	30
Tabla 9. Comparación de los beneficios de las plataformas (<i>Blynk, Thinger io y Arduino IoT cloud</i>).	31
Tabla 10. Parámetros estadísticos de las curvas de calibración de los sensores DHT-21.	34
Tabla 11. Parámetros estadísticos de los modelos de ajuste de la cinética de equilibrio higroscópico del café miel almacenado a 35 °C.	37
Tabla 12. Parámetros estadísticos de los modelos de ajuste de la cinética de equilibrio higroscópico del café miel almacenado a 35 °C.	40
Tabla 13. Parámetros estadísticos de los modelos de ajuste de la cinética de equilibrio higroscópico del café miel a 35 % b.h. almacenado a 35 °C.	42
Tabla 14. Parámetros estadísticos del modelo propuesto a los cinco contenidos de humedad de café miel almacenado a 35, 25 y 10 °C.....	46
Tabla 15. Coeficientes de la ecuación 7 y ecuación 8 para los cinco contenidos de humedad y temperaturas de almacenamiento de los tres lotes.	48
Tabla 16. Coeficientes de la ecuación 8 para los contenidos de humedad y las temperaturas de almacenamiento de cada lote.	50
Tabla 17. Cuadro resumen del tiempo de equilibrio higroscópico en el aire en función de la temperatura de almacenamiento y contenido de humedad en los granos determinado con el modelo 8.....	55

Tabla 18. Coeficientes y parámetros estadísticos de los modelos de ajuste de la cinética de equilibrio térmico del café miel a 20 % b.h. almacenado a 35 °C.	59
Tabla 19. Parámetros estadísticos de los modelos de ajuste de la cinética de equilibrio de la temperatura del aire en contacto con el café miel a 20 % b.h. almacenado a 10 °C.	62
Tabla 20. Tiempo requerido para alcanzar el equilibrio térmico.	64
Tabla 21. Coeficientes obtenidos de la ecuación 8 para el grano de café miel a cinco contenidos de humedad diferentes y a 35 °C de almacenamiento.	65
Tabla 22. Coeficientes obtenidos con la ecuación 8 para café miel a cinco contenidos de humedad y almacenado a 10 °C.	66
Tabla 23. Relación de los coeficientes de rapidez de la cinética de la temperatura y humedad relativa a 35 °C y 10 °C.	67
Tabla 24. Parámetros estadísticos de los modelos de ajuste de la cinética de equilibrio higroscópico del aire en contacto con el café miel almacenado a 35 °C.	69
Tabla 25. Parámetros estadísticos de los modelos de ajuste de curva de equilibrio higroscópico del café miel almacenado a 35 °C.	71
Tabla 26. Contenido de humedad y humedad relativa de equilibrio en tres lotes de café miel almacenados a 35 °C.	72
Tabla 27. Parámetros estadísticos de los modelos de ajuste de la curva de equilibrio del pergamino con mucílago almacenado a 35 °C.	75
Tabla 28. Parámetros estadísticos de los modelos de ajuste de la curva de equilibrio del café miel molido almacenado a 35 °C.	77
Tabla 29. Parámetros estadísticos de los modelos de ajuste de la curva de equilibrio del café oro miel almacenado a 35 °C.	79
Tabla A. 1. Equipos de laboratorio utilizados.	101
Tabla A. 2. Costos de los insumos requeridos para realizar el estudio.	101
Tabla A. 3. Datos de humedad relativa de los sensores DHT21 en las soluciones salinas de calibración.	103

1. INTRODUCCIÓN

El café es uno de los productos agrícolas más relevantes a nivel mundial, con un consumo que ha superado los 166,2 millones de sacos de 60 kg en los últimos cinco años (ICAFFE 2024). Se cultiva en aproximadamente 60 países de América del Sur, América Central, Asia y África (Geleta et al. 2012), y su producción y comercialización tienen un impacto significativo en las economías de estas regiones. En Centroamérica, por ejemplo, la producción de café representa cerca del 10 % de la producción global (Geleta et al. 2012), consolidándose como un pilar fundamental para las economías de varios países tropicales de Latinoamérica, donde es el principal producto agrícola de exportación (Rahn et al. 2018).

En Costa Rica, la caficultura es una actividad económica relevante pues de esta actividad dependen alrededor de 26 mil productores distribuidos en todo el territorio (ICAFFE 2023). También, es uno de los principales productos de exportación debido al reconocimiento nivel mundial por la calidad del café producido. En las últimas tres cosechas se han exportado más de 1417,19 sacos de café con un precio de venta superior a \$ 244,27 por saco (ICAFFE 2024).

Dada la relevancia del café en la economía de los países y el consumo de café, ha surgido una tendencia por los cafés de calidad, conocidos como café especial o de especialidad. Este tipo de café se diferencia del café convencional, pues en su proceso productivo (selección, producción de semilla, cosecha y beneficio), así como en la preparación de la bebida. Estas prácticas le confieren características diferenciadas al producto, lo que genera una mayor disposición del consumidor a pagar un precio superior" (Marulanda y Cuervo 2017)

Existe un protocolo elaborado por la Asociación de cafés especiales (SCA) cuyo objetivo es diferenciar un café especial del café comercial o convencional. El protocolo establece que a partir de 80 puntos se cataloga como un café especial. De la misma forma la Asociación de Cafés Especiales de América (SCAA) define como café especial aquellos con una puntuación de 80 o más en una escala de 100 y sin defectos (Folmer 2016). Donde "la puntuación del sabor de la taza contempla intensidad, calidad y complejidad de su sabor y el aroma combinados que se experimenta cuando el café es sorbido en la boca vigorosamente" (Zurita 2017). Esta categoría de café representa ~12% del consumo mundial (Ortega 2016).

Entre los cafés especiales, el café miel o despulpado tiene relevancia en el mercado de exportación. Este es el resultado del grano despulpado y secado al sol, lo que le otorga un atractivo particular para los consumidores, al brindar un sabor único y concentrado. Para los productores, representa una oportunidad económica, ya que en enero de 2025 el precio de venta del café arábica fue de \$325 por quintal (Intercontinental Exchange 2025). Sin embargo, según Gonzales et al. (2019) el café miel suele alcanzar un precio superior debido a su calidad y características sensoriales distintivas.

El café miel se caracteriza por presentar un alto contenido de humedad (CH) en comparación con el café lavado, ya que conserva una capa externa de mucílago. La falta del control de la humedad durante el secado al sol puede afectar las propiedades organolépticas del grano y favorece la proliferación de hongos y otros microorganismos, comprometiendo su calidad. Para evitar estos problemas, es esencial monitorear el proceso de secado y manejar adecuadamente las condiciones de almacenamiento.

El equilibrio higroscópico es fundamental para preservar la calidad del café, debido a que permite determinar el contenido de humedad óptimo para garantizar un secado eficiente y un almacenamiento seguro de los granos. (Bautista et al. 2020). Existe una correlación entre la humedad relativa del aire y el CH del grano que se ha comprobado en café lavado (R. Jiménez y Valverde 1999). En dicho estudio, el café lavado fue secado al sol, protegiendo los granos durante la noche. Además, recolectaron una muestra para registrar la humedad relativa de equilibrio (HR_e). Este último dato permitió conocer su relación con el contenido de humedad del grano. Este proceso podría ser un método indirecto para conocer el contenido de humedad del grano, lo que sugiere que podría utilizarse como una herramienta en la tecnificación del secado del café miel.

El equilibrio en la humedad relativa carece de estudios a nivel nacional, pues el último posee 24 años de antigüedad y fue desarrollado usando café lavado. Pese a que existen algunos estudios a nivel internacional su aplicación en Costa Rica puede estar limitada debido a las diferencias existentes entre las variedades de café. Además, no se han encontrado estudios específicos que aborden el comportamiento higroscópico del café miel, a pesar de que su procesamiento requiere un monitoreo preciso del secado y un manejo adecuado para evitar fermentaciones indeseadas, así como la proliferación de hongos u otros microorganismos. Todos estos antecedentes evidencian la necesidad de establecer la relación entre el equilibrio

higroscópico entre las humedades del café miel en desorción y el aire a diferentes temperaturas permitirá determinar las condiciones de secado y almacenamiento que garanticen la conservación segura de los granos.

En este contexto, la implementación de un sistema basado en Internet de las Cosas (IoT) representa una oportunidad innovadora para optimizar la evaluación del equilibrio higroscópico del café miel. La integración de sensores de temperatura y humedad conectados a una plataforma IoT permitiría registrar datos en tiempo real, facilitando el monitoreo continuo de las condiciones de secado y almacenamiento. Esta tecnología contribuiría a obtener información más precisa y accesible, reduciendo la dependencia de métodos tradicionales y mejorando la toma de decisiones para garantizar la conservación adecuada de los granos.

2. OBJETIVOS

2.1. Objetivo General

Establecer la relación de equilibrio higroscópico entre el contenido de humedad, la humedad relativa del aire y su actividad de agua en el café miel en desorción a tres temperaturas de almacenamiento.

2.2. Objetivos Específicos

1. Construir un prototipo basado en una solución de IoT para el registro en línea del tiempo, la humedad relativa y la temperatura del aire de almacenamiento de café miel.
2. Determinar la cinética del equilibrio de la humedad relativa y la temperatura del aire en contacto con los granos de café miel con el prototipo IoT para obtener la información en tiempo real de las condiciones de almacenamiento.
3. Ajustar una curva de equilibrio higroscópico entre el contenido de humedad y la actividad del agua mediante modelos matemáticos para predicción de la conservación del café miel.
4. Evaluar el efecto de la temperatura de almacenamiento en la curva de equilibrio higroscópico de los granos de café miel y sus componentes sólidos.

3. MARCO TEÓRICO

3.1. Antecedentes

Los autores Jimenez y Valverde (1999) establecieron relaciones de humedad de equilibrio higroscópico entre la humedad del entorno y la del café pergamino y oro lavado *coffea arabica* proveniente de CoopeVictoria R.L en Costa Rica. Para ello colocaron las muestras con humedades conocidas (método ISO No.1447) en recipientes herméticamente cerrados, en reposo y a temperatura constante (20 y 30 °C) hasta alcanzar el equilibrio higroscópico. Midieron la humedad relativa a partir de la temperatura de rocío utilizando un PROTIMETER DLC. Concluyeron que la relación de equilibrio para el café pergamino y oro con contenidos de humedad entre 10 y 42 % b.h. presenta un comportamiento sigmoideo y detectaron que las temperaturas estudiadas no mostraron tener efecto en los valores de contenido de humedad de equilibrio.

En Brasil Corrêa et al. (2010) evaluó el equilibrio higroscópico de los granos de café despulpado con y sin pergamino de la variedad *Coffea arabica L. cv. Catuai Amarelo*. Para ello evaluaron el contenido de humedad de equilibrio de los granos de café a cinco temperaturas (20, 35, 45 y 55 °C) y cinco valores de humedad del aire de secado (30, 40, 50, 60 y 80 %). La investigación sugiere que no existen diferencias en el comportamiento de las isothermas de equilibrio de desorción del café con pergamino y sin pergamino, es decir, el pergamino no interfiere en el contenido de humedad de equilibrio.

Dias et al. (2020) evaluaron y modelaron el equilibrio higroscópico, las curvas de calor isotérmico de los tejidos del pericarpio y el endospermo del café arábica a diferentes temperaturas (intervalo de 20 a 70 °C) y humedades relativas (de 10 al 90 %) hasta alcanzar la humedad relativa de equilibrio. Las muestras las colocaron en ambientes cuya temperatura se ajustó mediante la demanda bioquímica de oxígeno y el uso de un horno. Mientras que la humedad relativa la regularon mediante soluciones salinas saturadas con HR de equilibrio conocidas. Determinaron que, en todos los tejidos a una misma actividad de agua, el incremento en la temperatura provocó un menor contenido de humedad en equilibrio.

Los autores Ruszkowska, Dmowski, y Urbanowicz (2021) evaluaron las propiedades higroscópicas del café verde proveniente de diferentes países con base en las isothermas de

adsorción de vapor de agua y parámetros característicos de la microestructura superficial que determina las condiciones de transporte. Detectaron que las isotermas de adsorción presentaban forma sigmoideal al igual que Jimenez y Valverde (1999). También, encontraron diferencias en la actividad de agua entre los granos de diferente origen pese a presentar un contenido de humedad inicial similar.

3.2. Marco conceptual

3.2.1. Generalidades del café.

El café arábico se originó en las tierras altas de Etiopía y Sudán, África. En 1723 se introdujeron las primeras plantas de café en la isla Martinica de las que descienden los cafetos de las Antillas y Brasil (Academia de Geografía e Historia de Costa Rica 1979).

Existe controversia con respecto a la fecha de la primera siembra de café en Costa Rica, sin embargo, según un documento del Archivo Nacional de Costa Rica, en 1791 el gobernador José Vásquez y Téllez recibió dos libras de café proveniente aparentemente de Cuba. Aunque las autoridades españolas que residían en el país ya lo consumían, importándolo de Las Antillas. Siendo todas las siembras mencionadas de la especie *Coffea arabica*. (Á. Jiménez 2013).

El fruto del café es una baya compuesta de adentro hacia afuera por dos o tres semillas de café, las cuales se encuentran recubiertas por el perisperma conocido comúnmente como película plateada (Borém 2022) que se encuentra cubierta por el endocarpio, pergamino, el cual representa el 20 % del fruto (Guzmán Salazar, Roza Perdomo, y Mahecha Vega 2022; Anacafé 2005). El pergamino está cubierto por el mesocarpio o mucílago que representa entre el 22 y 31 % de la materia seca del fruto. La cantidad y porcentaje de mucílago disminuye con el aumento de la altitud (Borém 2022). El tejido más externo del fruto es el exocarpio (figura 1) que en sus primeras etapas es de color verde, pero al madurar se torna de color rojizo.

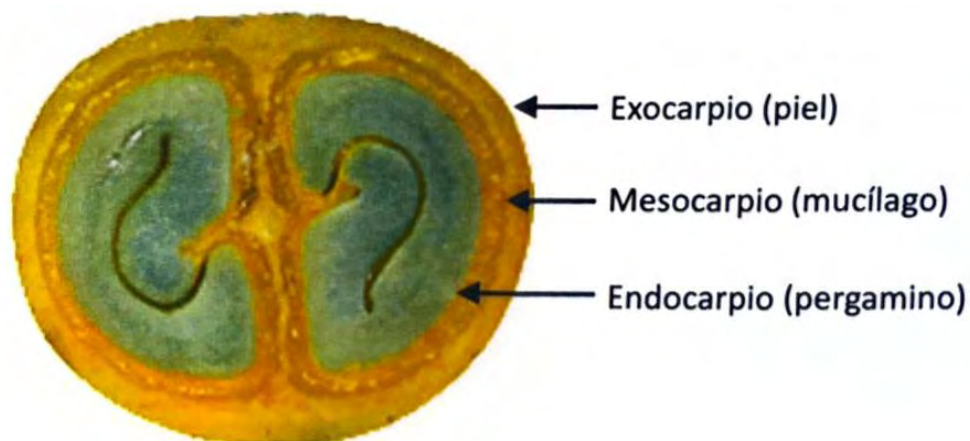


Figura 1: Estructura del fruto del café (Modificada de Borém 2022).

3.2.2. Variedades del café.

La planta de café pertenece al género *Coffea* de la familia *Rubiaceae* que tiene más de noventa especies diferentes (Şemen et al. 2017). No obstante, las especies de café cultivados comercialmente son Robusta (*Coffea canephora*) y Arábica (*Coffea Arábica*). En algunos países se cultiva café Liberica (*Coffea exelsa*), sin embargo, la demanda del mercado para esta variedad es limitada. Cada una de estas especies tiene numerosas variedades (Kuit, Jansen, y Thiet 2004).

En Costa Rica, las variedades más cultivadas son *typica*, *hibrido tico*, *villa Sarchi*, *caturra*, *catuai*, *mundo novo*, Venecia, Costa Rica 95 e Híbridos F1 (Á. Jiménez 2013). Sin embargo, las variedades que poseen mayor valor comercial en el país son: *Caturra*, *Catuai*, *Hibrido 51*, *Venecia* (Vignola et al. 2018). Las plantas que producen la variedad *Catuai* se caracterizan por ser de porte pequeño, originario de Brasil, resultado del cruce entre *Caturra* (mutación del borbón) y *Mundo Novo*, cruce de *bourbon* y *typica*, (ICAFFE 2011). Según el color de los frutos en su madurez, se identifican dos cultivares: *Catuai rojo* y *Catuai Amarillo* (INIAP 1993), provenientes del híbrido *Novo mundo-Catuai Rojo* y *Novo mundo-Catuai Amarillo*, respectivamente. La figura 2 ilustra la relación genética entre las variedades de café conocido popularmente como arábigo.

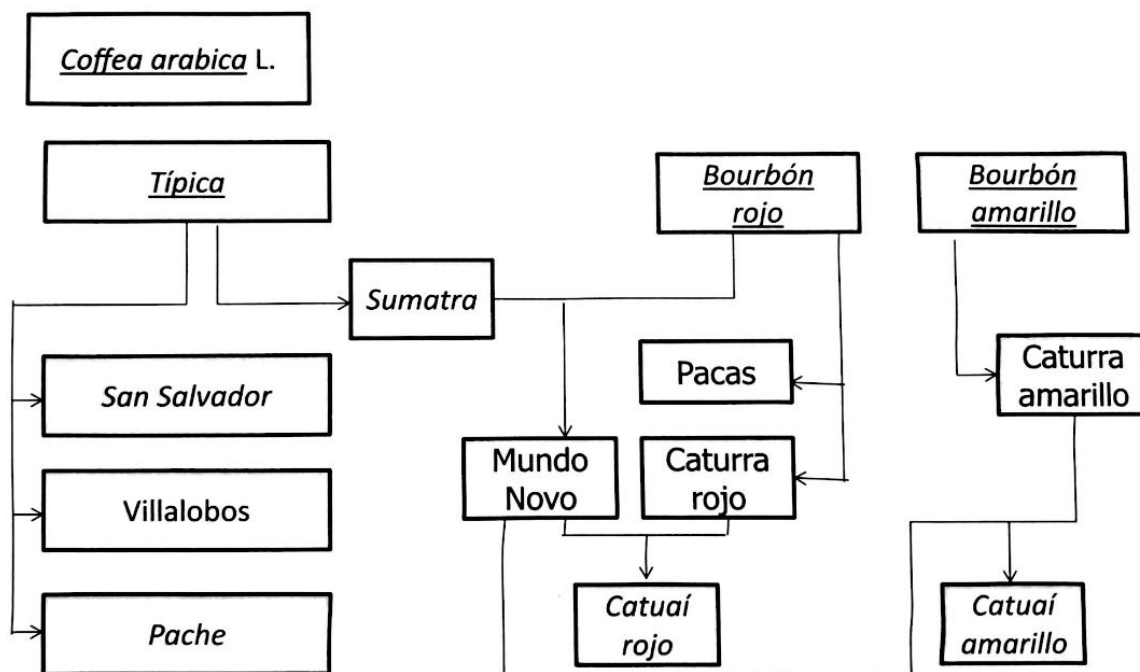


Figura 2. Relación genética entre variedades de *Coffea arabica* L. (Enríquez Calderón y Duicela Guambi 2014)

3.2.3. Composición química del café.

La composición química de los granos de café verde varía según la especie y su origen (Brezová, Šlebodová, y Staško 2009). Estos granos están compuestos por polisacáridos, monosacáridos, lípidos, esteroides, ácidos grasos, ácidos fenólicos, polifenoles, alcaloides, proteínas, aminoácidos libres, vitaminas y minerales (Köseoğlu Yılmaz, Hacibekiroğlu, y Kolak 2014). En la tabla 1 se presentan los principales componentes químicos de los granos de café verde de mayor interés comercial: *coffea arabica* (arábica) y *coffea canephora* (Robusta), expresados como un porcentaje del peso seco (Clarke y Vitzthum 2008). Donde, los granos robusta contienen una mayor cantidad de cafeína (1,6 – 2,4%) con respecto a los granos de café arábica (0,9 – 1,2).

Tabla 1. Principales componentes de los granos de café verde (% del peso seco)¹.

Componente	Arábica	Robusta
Polisacáridos	50,0 - 55,0	37,0 - 47,0
Oligosacáridos	6,0 - 8,0	5,0 - 7,0
Lípidos	12,0 - 18,0	9,0 - 13,0
Aminoácidos libres	2,0	2,0
Proteínas	11,0 - 13,0	11,0 - 13,0
Ácidos clorogénicos	5,5 - 8,0	7,0 - 10,0
Cafeína	0,9 - 1,2	1,6 - 2,4
Trigonelina	1,0 - 1,2	0,6 - 0,8
Ácidos grasos	1,5 - 2,0	1,5 - 2,0
Minerales	3,0 - 4,2	4,0 - 4,5

1. Tomado de: (Clarke y Vitzthum 2008).

3.2.4. Fuerzas de atracción del agua en el café.

El café contiene gran cantidad de agua en fase líquida cuando se cosecha, sin embargo, el agua pierde su movilidad durante el secado y solo el agua ligada permanece en los tejidos del grano. El agua presente en los granos de café se clasifica en cuatro tipos: agua de composición, agua adsorbida, agua de disolución y agua absorbida (Figura 3). El agua de composición es la que forma parte de la estructura del grano y se puede remover a través de reacciones de oxidación de las moléculas unidas al agua (Munguía, Cárdena, y Martínez 2013). El agua adsorbida está unida a grupos moleculares polares (hidroxilo, carboxilo, amino, éster y cetona) a través de enlaces de hidrógeno y fuerzas de van der Waals. El agua de disolución se refiere a la que retiene células disueltas en la semilla mediante enlaces ion-dipolo que permiten reacciones químicas y el desarrollo de hongos (Borém 2022). El agua absorbida es la que se encuentra en los capilares y espacios vacíos dentro de los poros del grano (J. E. Ospina 2001). Durante el secado, el agua de disolución y absorbida se remueven completamente, mientras el agua adsorbida se remueve parcialmente (Borém 2022).

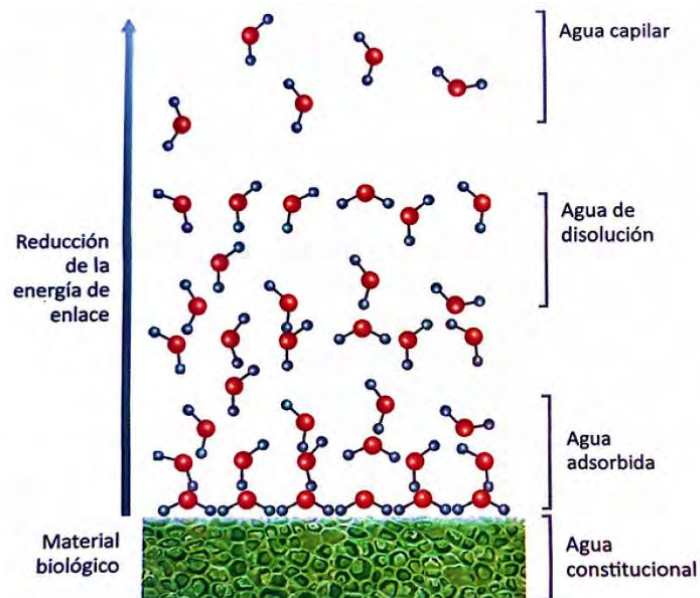


Figura 3. Tipos de agua retenida en los granos de café (Modificado de Borém 2022).

El agua que se encuentra en estado líquido puede formar enlaces de hidrógeno que le permiten la formación de grupos transitorios y especies monoméricas forman estructuras casi cristalinas que se rompen y reorganizan constantemente (Némethy y Scheraga 1962). Esta es capaz de desarrollar otros enlaces y fuerzas intermoleculares, como el efecto de ión-dipolo y las fuerzas de Van der Waals. El efecto ion-dipolo ocurre producto de la atracción ejercida por las moléculas de agua a los cationes o aniones. En contraste, las fuerzas de van der Waals son fuerzas relativamente débiles que se originan de la atracción ejercida por un núcleo con carga positiva sobre los electrones de las moléculas vecinas (Borém 2022).

3.2.5. Tipo de Beneficiado.

En el mercado, el café se procesa mediante tres métodos o sistemas de beneficiado: seco o natural, húmedo o lavado y semiseco o miel (Duran Gamboa 2024; Enríquez Calderón y Duicela Guambi 2014). El beneficiado seco es el más antiguo que consiste en secar al sol el fruto del café sin despulpar o en secadores mecánicos inmediatamente después de la cosecha hasta convertirlo café natural, el cual almacena temporalmente. Al momento de su venta, se pela y clasifica (Á. Jiménez 2013). Este beneficiado posee un mayor riesgo de exposición a la contaminación por ocratoxina A en el producto final ya que las condiciones son favorables para el desarrollo de estos hongos y para la síntesis de micotoxinas (Borém 2022). No obstante, si se realiza el proceso adecuado se producen granos con buen aroma.

El beneficio por vía húmeda consiste en despulpar el fruto maduro, removerle el mucílago por fermentación o por fricción. En la etapa de fermentación el grano sin pulpa reposa en tanques a temperatura ambiente y con presencia de microorganismos (hongos, levaduras y bacterias) que se alimentan de azúcares y degradan el mucílago (Enríquez Calderón y Duicela Guambi 2014). El tiempo de fermentación es de 12 a 36 horas, luego se lava para eliminar el mucílago (Illy y Viani 2005) y se seca el pergamino hasta alcanzar un contenido de humedad de 10 a 12 %. Posteriormente, se almacena hasta que su venta que es el momento en el que se remueve el pergamino y la película plateada (Á. Jiménez 2013).

El beneficio semihúmedo consiste en transformar la cereza madura del fruto a café pergamino seco con miel. Este proceso requiere que las cerezas maduras sean clasificadas mediante el boyado y despulpadas el mismo día de la cosecha. El café con mucílago se coloca en capas delgadas de 3 cm sobre tendales de cemento, secadores solares, zarandas o camas africanas. Los granos deben de estarse removiendo de 6 a 10 veces al día hasta alcanzar un contenido de humedad de 10 a 12 % b.h. Este tipo de café puede ser comercializado de esta manera o ser sometido al trillado en máquinas piladoras para remover el pergamino y la lámina plateada que recubren al grano, dando como resultado un café semi-lavado o café honey (Enríquez Calderón y Duicela Guambi 2014).

3.2.6. Café miel.

El café miel, semi-lavado o honey también conocido como café secado por vía semi-seca es el producto que se obtiene al despulpar el fruto y someterlas directamente al secado. El tipo de café miel que se desee producir depende de la cantidad de mucílago con el que se deja secar. La intensidad del sabor y color obtenido varía entre amarilla, roja y negra debido al grado de oxidación de los azúcares adheridos al grano producto de la exposición al sol (Arias Pastor 2021).

3.2.7. Contenido de humedad.

Se refiere a la cantidad de agua presente en el material y es un indicador del estado del agua dentro de un biomaterial. Según Jian y Jayas (2021) el contenido de humedad se determina en función de la masa de agua en el material y se expresa en términos de fracción o porcentaje decimal de la masa húmeda (ecuación 18) o seca (ecuación 19).

Según Mathlouthi (2001), para medir el contenido de humedad se pueden utilizar métodos directos o indirectos. Los métodos directos pueden basarse en técnicas de separación física como la destilación, secado o reacciones químicas en los que se producen gases como hidrógeno o acetileno y la masa del material se mide antes y después de que se elimine el agua. En contraste los métodos indirectos consisten en medir algún parámetro que cambie en función del contenido de humedad como la capacitancia eléctrica, la conductividad de la corriente continua y alterna, las microondas, entre otras.

La humedad es un factor clave de calidad, pues influye en la vida útil del grano de café. El contenido de humedad en el grano debe de medirse para garantizar su almacenamiento y transporte seguro. De modo que se reduzca el riesgo de aparición de moho o desarrollo de hongos en el almacenamiento. Los granos de café verde no deben estar muy secos ni muy húmedos, pues no conservarán su calidad (Caporaso et al. 2018). El café debe tener un contenido de humedad ideal entre el 10 % y el 12 % para ser poco susceptibles al ataque de microorganismos y garantizar su calidad (Puerta Quintero 2006).

3.2.8. La ley de Fick de la difusión.

La transferencia de masa y el calor son procesos similares debido a que ambos son formas de energía. La transferencia de calor ocurre si existe un diferencial de calor. De forma análoga la masa se transfiere en dirección del gradiente de concentración, es decir, desde las regiones más concentradas hacia las menos concentradas (Çengel 2011). Este proceso se denomina difusión molecular, descrito por Adolph Fick en 1855 mediante la siguiente expresión matemática:

$$J = -D \frac{\partial C}{\partial x}$$

Donde J corresponde al flujo másico de una especie química, $\frac{\partial C}{\partial x}$ corresponde al gradiente de concentración y D es el coeficiente de difusión. Esta ecuación se conoce como la primera Ley de Fick y se caracteriza por que el proceso de difusión llega a un estado donde el flujo de difusión (J) se mantiene constante en el tiempo, es decir, el sistema está en estado estable o estacionario. Si la concentración cambia en el tiempo, pero con una rapidez tan pequeña que se aproxima al estado estacionario se habla de un estado cuasi-estacionario. Mientras que si las partículas están uniformemente distribuidas, $\frac{\partial C}{\partial x}$ es 0, la distribución no cambia con el tiempo, es decir el sistema está en equilibrio (Latorre 1996).

La segunda ley de Fick, derivada de la primera ley, describe la difusión en estado no estacionario, es decir, cuando el flujo de difusión y el gradiente varían en función del tiempo (Callister y Rethwisch 2019).

$$\frac{\partial C}{\partial t} = -D \frac{\partial^2 C}{\partial x^2}$$

Las leyes de Fick han servido como base para elaborar varios modelos matemáticos de secado en capa fina, los que se dividen en tres tipos: teóricos, semi-teóricos y empíricos. Los modelos teóricos consideran la resistencia interna en la transferencia de masa (humedad) entre el producto y el aire como la segunda ley de Fick de difusión y el modelo de Arrhenius (Özdemir y Onur Devres 1999). Los modelos semi-teóricos simplifican la segunda ley de Fick o modificando modelos simplificados, sin embargo, solo se aplican bajo condiciones específicas de temperatura, humedad relativa, flujo de aire y contenido de humedad como el modelo de Page, Midilli, Lewis, Henderson-Pabis (Tabla 2), donde MR y t son la razón de humedad y el tiempo de secado (h), respectivamente. Mientras que a , b , c y n corresponden a los coeficientes de los modelos de capa delgada (Meisami-asl et al. 2009).

Tabla 2. Modelos matemáticos para el ajuste de la cinética de secado del café miel.

Nombre del modelo	Ecuación	Referencia
Newton	$MR = e^{(-kt)}$	Westerman, White, y Ross (1973).
Page	$MR = e^{(-kt^n)}$	Page (1949)
Midilli	$MR = ae^{(-kt^n)} + bt$	Midilli, Kucuk, y Yapar (2002)
Lewis	$MR = \exp(-k*x)$	Bruce (1985)
Henderson y Pabis	$MR = ae^{(-kt^n)}$	Degirmencioglu, Yagcioglu, y Cagatay (1999)

Los modelos empíricos establecen una relación entre el contenido de masa promedio y el tiempo de secado, sin considerar los mecanismos de transferencia de calor. Algunos ejemplos son Thompson y Wang-Sing (Özdemir y Onur Devres 1999). Estas ecuaciones fueron empleadas previamente por Murillo Jiménez (2020) para representar la difusión de CO₂ en el aire proveniente de los granos de café recién tostados.

3.2.9. *Cinética de equilibrio higroscópico.*

La cinética de equilibrio higroscópico indica la rapidez a la que un material absorbe o libera humedad hasta alcanzar el equilibrio con el ambiente que lo rodea. La velocidad de transferencia de humedad entre el material y el entorno varía en función del contenido de humedad, la temperatura, la humedad relativa del aire exterior y el tiempo (Barreiro y Sandoval 2020).

3.2.10. *Equilibrio higroscópico.*

El equilibrio higroscópico es el proceso en el cual cesa el intercambio de energía, mediante absorción entre dos sistemas. Uno de ellos está compuesto por la semilla y el agua que contiene en su interior y el otro corresponde al vapor de agua presente en la atmósfera. De modo que el contenido de humedad de la semilla alcanza un valor de equilibrio.

Al graficar el valor de equilibrio higroscópico y humedad relativa obtenidos a una misma temperatura, se obtiene la curva isoterma de equilibrio (Socorro 2010). Una curva de equilibrio higroscópico o isoterma de equilibrio es una presentación gráfica de la capacidad que tiene un material para absorber o liberar agua en función de la humedad relativa del ambiente en el que se encuentre. Además permite conocer los límites de deshidratación del producto e identificar los niveles de humedad a los que se podría deteriorar el grano (Borém 2022).

Los granos almacenados pueden absorber o ceder humedad del entorno dependiendo de su contenido de humedad inicial. Este proceso es descrito a través de isotermas que describen la relación entre la actividad de agua y el contenido de humedad de un alimento a una temperatura constante (Talens Oliag 2017). La actividad de agua es equivalente a la humedad relativa cuando el aire y el producto están en equilibrio. Las isotermas son únicas para cada producto e importantes para comprender la manera en la que varía la humedad durante el almacenamiento (Oliveira et al. 2011).

La isoterma no puede ser considerada totalmente de adsorción o desorción, por lo que se les conoce como isotermas de sorción. Las isotermas de sorción generalmente poseen forma sigmoidal y cada una se pueden dividir en tres zonas como se muestra en la figura 4 (deMan et al. 2018). En la zona A el agua se encuentra fuertemente ligada mediante las fuerzas de Van der Waals, por lo que no puede participar en reacciones, es decir, el agua es difícil de remover

y no está disponible para reacciones de crecimiento microbiano (Cangás Realpe 2004). Además, en esta región se forman principalmente capas mono moleculares, mientras, que en la zona B o zona intermedia, el agua se encuentra débilmente ligada en forma de capas dobles o múltiples (Mujumdar 2015). En la zona C hay un incremento en la curva que indica que hay un incremento en la condensación y la hinchazón capilar, es decir, el agua de los capilares es libre para que ocurran reacciones químicas, enzimáticas y para el crecimiento de microorganismos (Cangás Realpe 2004).

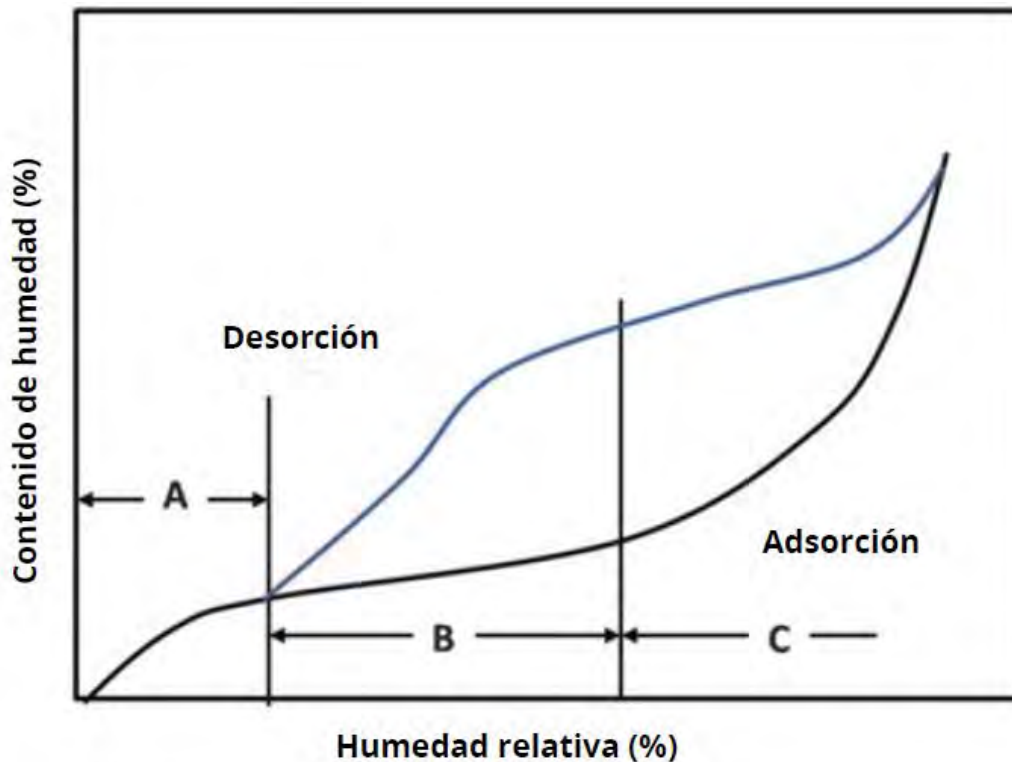


Figura 4. Zonas de la isoterma de sorción de la humedad (Modificado de (deMan et al. 2018).

Las isotermas de sorción fueron clasificadas por (Brunauer, Emmett, y Teller 1938) en cinco tipos generales como se ilustra en la figura 5. En el tipo I la isoterma es hiperbólica, alcanzando un valor asintótico producto de la absorción que está restringido a la monocapa. La isoterma tipo II, presenta forma sigmoide con tendencia asintótica cuando su actividad de agua se aproxima a 1 y es típica en materiales solubles (Osmayo Huacan 2023). Mientras que la isoterma III, se observa principalmente en productos con altas concentraciones de azúcares. Las isotermas II, III, IV y V corresponden a la adsorción en multicapas con la diferencia de que los tipos IV y V absorben hasta alcanzar un valor máximo finito (Valderrama 1998). No obstante, la investigación de Escobar et al. (2020) en el equilibrio higroscópico del café, afirma que es común en productos alimenticios no porosos o macro porosos.

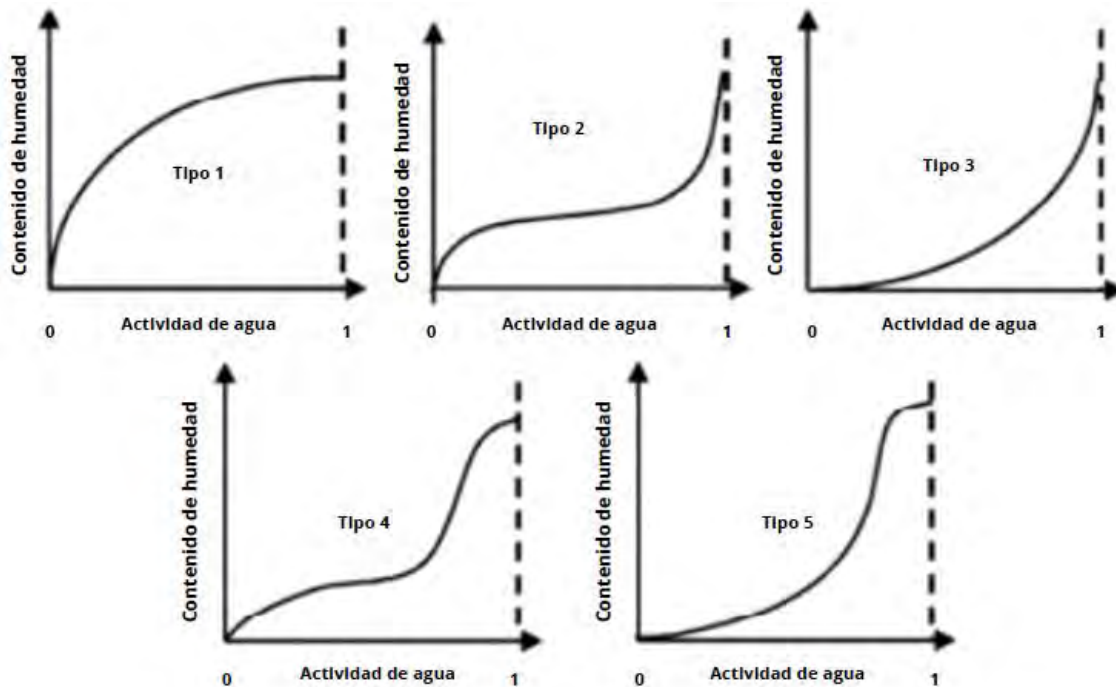


Figura 5. Tipos de isothermas de sorción descritas por Brunauer (Modificado de (Andrade, Lemus, y Pérez 2011)).

La isoterma de sorción tiene aplicación en el análisis y diseño de procesos como el secado, almacenado y empaçado de café. Esta permite determinar las condiciones óptimas de almacenamiento, predecir la vida útil y selección del material de empaque apropiado. Además, permite calcular el contenido de humedad final, así como las condiciones más adecuadas para la estabilidad de almacenamiento (Mayor et al., 2005).

3.2.11. Determinación del equilibrio higroscópico.

Se han utilizado dos métodos para determinar la humedad de equilibrio de los granos que son el estático y el dinámico (Brooker, Bakker-Arkema, y Hall 1992). El método estático consiste en exponer una muestra del grano al aire húmedo y en reposo. Este método requiere de varias semanas antes de que el producto alcance el equilibrio. Dado que a humedades relativas altas existe el riesgo del desarrollo de hongos en el producto, no se cuentan con datos de contenidos de humedad a humedades relativas superiores a 80 % (Brooker, Bakker-Arkema, y Hall 1992). Para implementar este método, se utilizan materiales higroscópicos generalmente sales que poseen la capacidad de ceder o absorber humedad del ambiente en el que se encuentre (Contento et al. 2009).

El método dinámico se caracteriza por hacer pasar el aire con humedad relativa y temperatura controladas a través de la muestra. La humedad relativa del aire se controla mediante mediciones de la temperatura de punto de rocío. Cuando la temperatura y la humedad relativa del aire se estabilizan se puede afirmar que se alcanza la humedad relativa de equilibrio (Brooker, Bakker-Arkema, y Hall 1992). Este método presenta la ventaja de que permite alcanzar el equilibrio higroscópico en un lapso inferior al requerido mediante el método estático (Contento et al. 2009).

Los autores Recio Loría (1999), Vargas Elías (1999) y Valverde (1993) han empleado el método semiestático para determinar la humedad relativa del aire en equilibrio con el producto. Este método se distingue por su rapidez en comparación con el método estático, el cual utiliza sales para alcanzar el equilibrio higroscópico y se ha implementado exitosamente en productos como la macadamia, maíz, frijol, café lavado, arroz y citropulpa de naranja, entre otros.

3.2.12. *Métodos alternativos para la determinación de equilibrio*

Además de los métodos tradicionales, la implementación de tecnologías como el Internet de las Cosas o IoT que consiste en una red de objetos físicos (dispositivos) que se conectan a internet y pueden interactuar con el entorno mediante la recopilación, intercambio y procesamiento de datos que les permite tomar decisiones y comunicarse con el mundo (Seuba 2019). El IoT permite la automatización y el monitoreo de procesos en tiempo real mediante la integración de datos para optimizar la eficiencia, la toma de decisiones y la gestión remota del sistema.

3.2.13. *Microcontrolador*

Un microcontrolador es un circuito integrado programable que incorpora elementos como la Unidad Central de Procesamiento (CPU) responsable de procesar las instrucciones del dispositivo, la memoria que almacena el programa que permite el funcionamiento del microcontrolador y las líneas de entrada y salida. Estas son responsables de comunicar el microcontrolador con el exterior, permitiendo conectar sensores para la lectura de datos y actuadores (Palacios, Remiro, y López 2014).

3.2.14. *Esp32*

El ESP32 es un chip de bajo costo compuesto por un microcontrolador de 32 bits con wi-fi y bluetooth integrados que permite crear aplicaciones de internet de las cosas que involucran desde sensores hasta tareas más demandantes como decodificadores de voz. Además, este tipo de placas posee una gran cantidad de GPIO (puertos de entrada y salida de propósito general) y una velocidad de datos de hasta 150 Mbps. La corriente de reposo del chip es inferior a 5 mA, lo que la hace adecuada para aplicaciones electrónicas portátiles y alimentadas por batería (Espressif Systems 2023).

3.2.15. *Sensor Dht21*

El sensor DHT21 AM2301 es un dispositivo pequeño con un consumo de corriente de 1 - 1,5 mA y amplios rangos de operación para temperaturas de -40 a 80 °C y un intervalo de humedad relativa entre 0 y 99,9 %. Además, poseen valores de precisión de la lectura de la temperatura y la humedad relativa de $\pm 0,5$ °C y ± 3 %, respectivamente (Aosong 2016)

3.2.16. *Actividad del agua*

La actividad de agua se define como la relación de las presiones de vapor del agua pura y de una solución (deMan et al. 2018). Esta es una propiedad de las soluciones acuosas y de los materiales que contienen agua. La actividad del agua se define como la disponibilidad en que se encuentre el agua contenida en los alimentos, dada en un intervalo entre 0 y 1. Donde 0 indica que el agua está más ligada al material y 1 menos ligada al material (Jian y Jayas 2021). Este concepto tiende a ser muy utilizado para determinar isotermas de desorción y absorción de agua, las cuales establecen la relación entre el contenido de humedad y la humedad relativa del aire a temperatura y presión constante.

Es relevante debido a que indica la disponibilidad de agua en un alimento para que ocurran reacciones químicas, bioquímicas como la oxidación de lípidos y reacciones enzimáticas como las relacionadas con el crecimiento microbiano (Samaniego-Esguerra, Boag, y Robertson 1991). Por esto, la actividad de agua es un parámetro usado como indicador para predecir la vida útil de un alimento. En general, una elevada A_w indica una mayor disponibilidad del agua en el material, lo que favorece el desarrollo de microorganismos y acelera las reacciones de deterioro (deMan et al. 2018).

Los granos con diferentes contenidos de humedad presentan diferentes actividades de agua y consecuentemente su propia isoterma. Conocer la cantidad de agua que absorbe o libera un alimento cuando se encuentra en equilibrio con una actividad de agua conocida permite determinar la vida útil de un producto, formular nuevos productos alimenticios, así como controlar procesos (Choque-Quispe et al. 2018).

La actividad de agua está influenciada por la composición química del producto y su temperatura. Para un mismo contenido de humedad, la presencia de compuestos no polares en las semillas provoca una actividad de agua alta en comparación de los compuestos polares. Además, un incremento en la temperatura reduce la estabilidad de los hidrógenos que a su vez ocasiona un incremento en la actividad de agua (Borém 2022) .

Para medir la actividad de agua se utiliza el equipo AQUALAB 4TE que utiliza la técnica del punto de rocío del espejo frío para medir la actividad del agua de una muestra. El sensor de punto de rocío incorporado en el equipo reduce la temperatura ocasionando la condensación del agua libre de la muestra sobre la superficie fría del espejo (Figura 6). El agua de la muestra se evapora y se equilibra con el espacio de la cámara sellada que contiene un espejo, donde se condensa el agua. El sensor óptico detecta condensación en el espejo y determina la temperatura a la que ocurrió el rocío, así como la temperatura de la muestra y la cámara que utiliza para calcular la actividad de agua (Addium 2021).

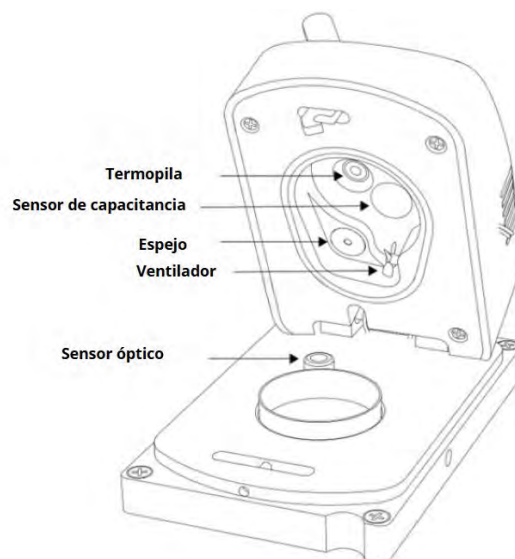


Figura 6. Partes de un medidor AQUALAB 4TE (Modificado de Addium 2021).

4. METODOLOGÍA

4.1. Descripción General

El equilibrio higroscópico en los granos de café miel y sus componentes implicó la construcción de un prototipo IoT, la determinación de la cinética de equilibrio higroscópico, la generación de las curvas de equilibrio higroscópico y el análisis del efecto de la temperatura (Figura A.1). La construcción del prototipo IoT contempló el muestreo y calibración de los sensores con sales saturadas para garantizar la confiabilidad en los datos de temperatura y humedad relativa que recopiló. El prototipo permitió determinar la cinética de equilibrio de los granos de café a cinco contenidos de humedad y tres temperaturas de almacenamiento. Se graficaron las curvas de equilibrio higroscópico de los componentes sólidos del grano pergamino a las diferentes temperaturas, contemplando ajustes mediante modelos matemáticos (Tabla 4).

4.2. Sitio de estudio y materia prima

El presente estudio se realizó en el Centro para Investigaciones en Granos y Semillas (CIGRAS) de la Facultad de Ciencias Agroalimentarias de la Universidad de Costa Rica, ubicado en Montes de Oca.

La materia prima con la que se trabajó corresponde a café miel recién despulpado de la variedad *Catuai* rojo de la cosecha 2023-2024, facilitado por el micro beneficio Café Los Cuarteles, ubicado en San Pablo de León Cortes, coordenadas geográficas 9°56'23.249"N 84°2'54.608"W.

4.3. Construcción del prototipo IoT.

Se desarrolló un prototipo basado en una solución IoT para registrar en tiempo real la temperatura y la humedad relativa del aire en contacto con los granos de café miel durante el almacenamiento. Para ello, se compararon las características técnicas de tres microcontroladores y sensores capacitivos de humedad relativa y temperatura considerando su capacidad de medición, precisión y costos.

Se evaluaron las ventajas y desventajas del uso de plataformas en línea para el almacenamiento y visualización de datos en comparación con el uso de servidores propios. Además, se

analizaron tres plataformas disponibles y se seleccionó aquella que presentó un menor costo y una mayor facilidad de uso.

El prototipo fue compuesto por un microcontrolador y tres sensores de humedad y temperatura (Tabla A.1). Estos se configuraron previamente para registrar en tiempo real la variación de la temperatura y la humedad relativa, con almacenamiento en la plataforma seleccionada (*dashboard*). Las especificaciones del prototipo se compararon con las de un equipo de referencia comercial (HOBO MX2304). Adicionalmente, se desglosan los costos de los seis prototipos utilizados para llevar a cabo la investigación (Tabla A.2).

Asimismo, los sensores fueron calibrados en un desecador a 25 °C (Tabla A.1) con soluciones salinas saturadas KNO₃, NaCl, CaCl₂. La humedad relativa que se alcanza según la solución salina se especifica en la Tabla 3. La solución de sales saturadas fue corroborada mediante la determinación de la actividad del agua de estas.

Tabla 3. Determinación de la actividad de agua de las sales saturadas utilizadas para la calibración de la humedad relativa de los sensores.

Sal saturada	Humedad relativa (%)	Actividad de agua
NaCl	76,2	0,7616 ± 0,0009
KNO ₃	93,2	0,9324 ± 0,0012
CaCl ₂	29,39	0,2939 ± 0,0029

4.4. Cinética de equilibrio higroscópico

4.4.1. Secado de café

Previo al secado, se seleccionaron los contenidos de humedad de 35, 25, 20, 15, 10 % b.h. en muestras de 450 g. Para ello los granos de café recién cosechados se colocaron en dos bandejas perforadas (Tabla A.1) previamente pesadas. Posteriormente, las bandejas se colocaron en una secadora de flujo transversal de aire (Figura A.4). El secado se realizó a una velocidad de 0,141 m³/s. Cada 60 min se registró la hora y la masa de las bandejas para determinar el contenido de humedad del café mediante la ecuación 1.

$$X_f = 100 - \frac{M_i}{M_f}(100 - X_i) \quad (1)$$

X_f y X_i se refiere al contenido de humedad final e inicial de los granos, respectivamente. Mientras que M_i se refiere a la masa inicial y M_f a la masa final de los granos.

4.4.2. Cinética de equilibrio de la humedad relativa y temperatura con el prototipo.

Las muestras secas se subdividieron en nueve recipientes de vidrio de 550 ml que contienen un sensor DHT21. Los recipientes se sellaron herméticamente y se colocaron en cámaras de almacenamiento a 10, 25 y 35 °C, lo que permitió medir las condiciones del aire como la temperatura y humedad relativa hasta alcanzar el equilibrio como se ilustra en la figura 7.

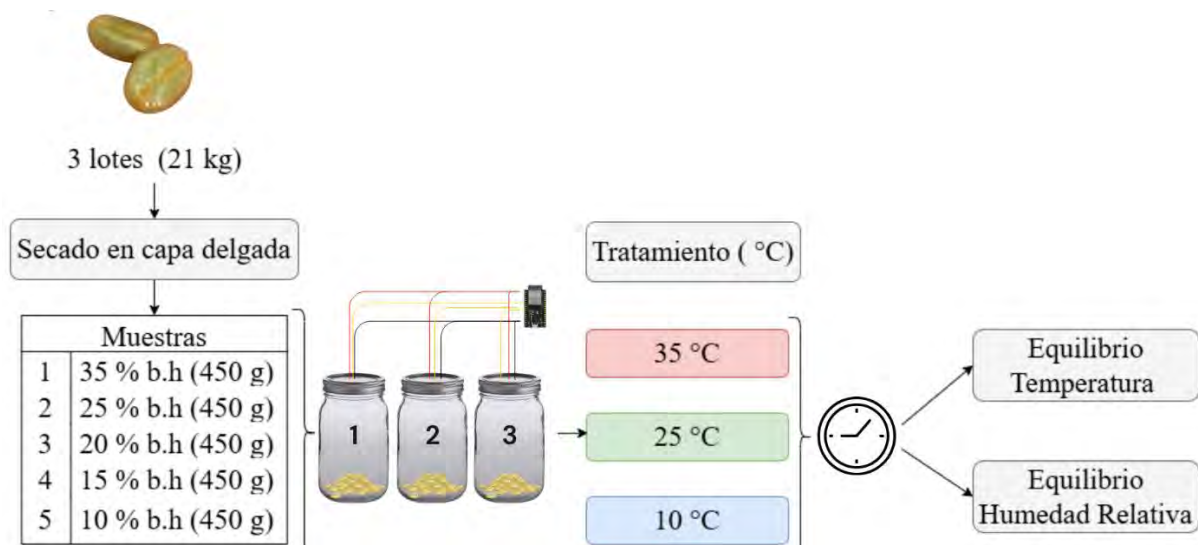


Figura 7. Diagrama de flujo para el monitoreo de la humedad relativa y temperatura del aire en contacto con los granos de café hasta su estabilización.

Los datos de humedad relativa y temperatura del aire en contacto con los granos de café miel se analizaron de manera adimensional, mediante la siguiente ecuación 2.

$$RY = \frac{Y - Y_e}{Y_e - Y_i} \quad (2)$$

Donde:

Y , Propiedad instantánea del aire como humedad relativa (%) o temperatura (°C).

Y_e , Humedad relativa (%) o temperatura del aire en el equilibrio ($^{\circ}\text{C}$).

Y_i , Humedad relativa (%) o temperatura del aire inicial ($^{\circ}\text{C}$).

RY , Razón de humedad relativa o temperatura del aire (decimal).

Se empleó un programa en Python que procesó los archivos en formato ".xlsx", ajustó los datos y determinó la derivada para cada contenido de humedad del grano de café miel en las tres temperaturas de almacenamiento evaluadas. A partir de la variación de la humedad relativa en función del tiempo, el programa calculó los valores de humedad de equilibrio y, con estos, la razón de humedad relativa según la ecuación 2. La obtención de la razón de la humedad relativa permitió la comparación entre los datos de las humedades relativas. La razón como es adimensional, el cálculo algebraico cancela los diferenciales de las lecturas de humedad iniciales entre las repeticiones.

Para describir la cinética de equilibrio de la humedad relativa y la temperatura del aire en contacto con los granos de café miel, se utilizaron modelos matemáticos previamente aplicados en estudios de transferencia de masa, siguiendo un enfoque similar al de Murillo Jiménez (2020). Dado que las ecuaciones de secado presentan una tendencia exponencialmente decreciente, fue necesario modificar su sentido para representar el fenómeno de absorción, el cual sigue una tendencia exponencialmente creciente. Como resultado, se invirtieron y ajustaron las ecuaciones para obtener modelos adecuados a la naturaleza del proceso, los cuales se presentan en la Tabla 4.

Tabla 4. Modelos matemáticos para el ajuste de la cinética de equilibrio en la humedad relativa y temperatura del aire en contacto con los granos de café miel.

Modelos	Ecuación	Ec.
Modelos crecientes		
Exponencial creciente, 3 parámetros	$RY = H_i + a*(1-\exp(-b*x))$	3
Exponencial creciente, 5 parámetros	$RY = H_i + a*(1-\exp(-b*x)) + c*(1-\exp(-d*x))$	4
Hiperbola, 3 parámetros	$RY = H_i + a*x/(b + x)$	5
Racional	$RY = (1+a*x)/(b + c*x)$	6
Modelo propuesto	$RY = c*(1-(a*\exp(-k*x^n)))$	7
Page modificada	$RY = c*(1-\exp(-k*x^n))$	8
Exponencial creciente, 4 parámetros	$RY = a*(1-\exp(-b*x)) + c*(1-\exp(-d*x))$	9
Modelo decreciente		
Exponencial decreciente, 3 parámetros	$RY = H_i + a*\exp(-b*x)$	10
Exponencial decreciente, 5 parámetros	$RY = H_i + a*\exp(-b*x) + c*\exp(-d*x)$	11
Exponencial decreciente, 4 parámetros	$RY = a*\exp(-b*x) + c*\exp(-d*x)$	12
Polinomial inversa tercer orden	$RY = H_i + (a/x) + (b/x^2) + (c/x^3)$	13
Exponencial creciente, 2 parámetros	$RY = a*\exp(-b*x)$	14
Lewis	$RY = \exp(-k*x)$	15
Henderson y Pabis	$RY = a*\exp(-k*t)$	16

Los coeficientes de las ecuaciones que dependieron de la temperatura de almacenamiento se analizaron con la ecuación de Arrhenius (17).

$$k = k_0 \exp\left(\frac{-Ea}{RT}\right) \quad (17)$$

Donde k es la constante de rapidez de equilibrio la cual depende de la temperatura, k_0 es un factor pre-exponencial, Ea es la energía de activación (kJ/mol), R la constante de los gases ideales y T corresponde a la temperatura en Kelvin (Wang y Lim 2014).

Para analizar la cinética de equilibrio térmico del café miel almacenado a 10 y 35 °C, se graficaron los datos de las razones de temperatura y se ajustaron, seleccionando los modelos que presentaran un coeficiente de determinación mayor a 95 % y valores de p inferiores a 0,0001.

4.5. Curva de equilibrio higroscópico

4.5.1. Medición de la actividad de agua.

Se prepararon submuestras del café en pergamino con mucílago, en adelante denominado café miel y sus componentes sólidos (pergamino y café oro miel). De los 150 g de muestras de café miel almacenados en cámaras, se tomaron 90 g, se despergaminaron y se separó el café oro miel del pergamino mediante un clasificador por densidad por medio del flujo de aire *hart-carter* (Tabla A.1). El pergamino, el café oro miel y 30 g de café miel se molieron de forma individual mediante un molino de aspas Holstein Housewares (Tabla A.1) y se determinó la actividad de agua (A_w) en el medidor AQUALAB 4TE (Tabla A.1), como se observa en la figura 8.

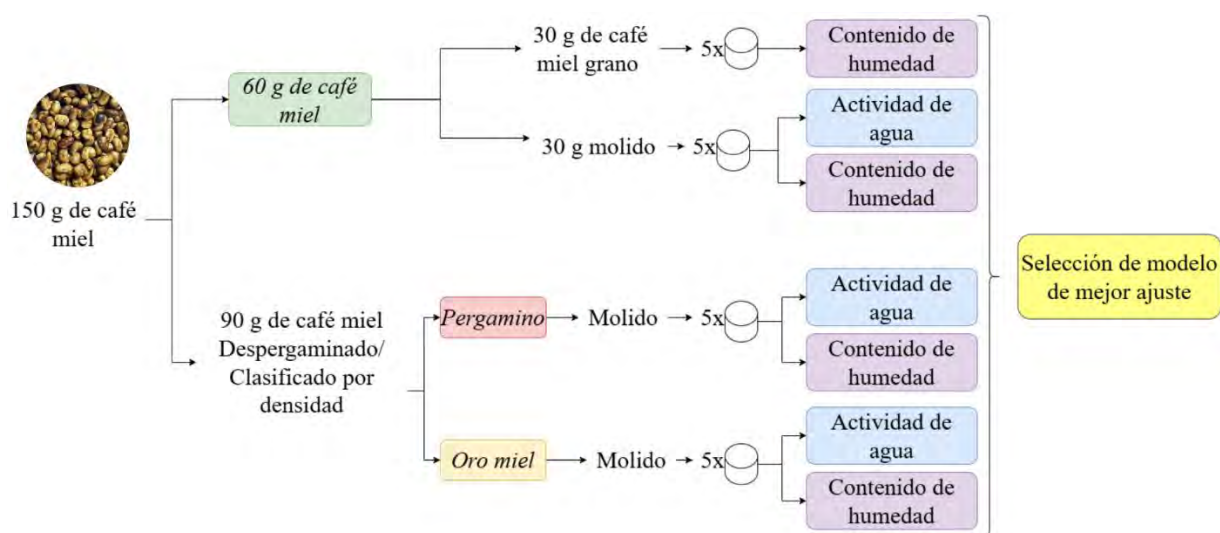


Figura 8. Diagrama de flujo para el ajuste de la curva de equilibrio higroscópico.

4.5.2. Contenido de humedad del café.

La determinación del contenido de humedad del café consistió en tomar una muestra de 25 g del café miel entero y molido, así como del pergamino y oro miel, distribuirlos en cinco recipientes de aluminio y colocarlos en el horno de convección forzada Imperial IV (Tabla A.1) a 105 °C durante 24 horas como especifica el Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento (2009). Esto con el fin de determinar el contenido de humedad del café siguiendo las ecuaciones 18 y 19. Estas determinan los contenidos de humedad en base seca X_s y base húmeda X_h . Mientras que M_a corresponde a la masa de agua en el material y M_s a la masa seca del material (Jian y Jayas 2021).

$$X_s = \frac{M_a}{M_s} \quad (18)$$

$$X_h = \frac{M_a}{M_s + M_a} \quad (19)$$

4.5.3. Ajuste de las curvas de equilibrio higroscópico.

Los datos de contenido de humedad en equilibrio y actividad de agua obtenidos para cada componente sólido del café miel, se graficaron mediante el programa Sigmaplot 15 y se ajustaron los datos mediante los modelos matemáticos que se presentan en la Tabla 5. Donde, X_e , A_w y X_i corresponden a la humedad en el equilibrio, la actividad de agua y el contenido humedad al inicio, respectivamente. Mientras que A , B , C , D y k corresponden a constantes características de los modelos y T a la temperatura (°C). La selección de los modelos se basó en el criterio del coeficiente de determinación fuera superior al 98 %, asegurando un ajuste preciso a los datos experimentales.

Tabla 5. Modelos seleccionados para el ajuste de las curvas de equilibrio higroscópico para el café miel y sus componentes sólidos.

Nombre del modelo	Ecuación	Referencia
BET	$x_e = \frac{x_i * C * A_w}{(1 - A_w)(1 + (C - 1)A_w)}$	Talens Oliag (2017)
GAB	$x_e = \frac{x_i * C * k * A_w}{(1 - k * A_w)(1 + (C - 1) * k * A_w)}$	Baptestini et al. (2020)
Modificada de Henderson	$x_e = \frac{1}{100} \left(\frac{-\ln(1 - A_w)}{A(T + B)} \right)^{\frac{1}{C}}$	Díaz-Martín, Sanglier-Contreras, y Guardiola-Mouhaffel (2015)
Peleg	$x_e = A(A_w)^B + C(A_w)^D$	Peleg (1993)
Halsey	$x_e = \left(-\frac{A}{\ln A_w} \right)^{\frac{1}{B}}$	Zhang et al. (2022)

4.6. Efecto de la temperatura en el equilibrio higroscópico.

Se compararon las isotermas de equilibrio higroscópico obtenidas a partir del modelo con mejor ajuste para cada una de las tres temperaturas de almacenamiento mediante el análisis de las bandas de confianza. Esto permitió evaluar el impacto de la temperatura en el café miel entero, molido y en sus componentes sólidos (café oro miel y pergamino).

4.7. Análisis estadístico

Los coeficientes de los modelos matemáticos de secado, cinética y equilibrio higroscópico se determinaron por medio de un ajuste por regresión no lineal en el programa Sigmaplot versión 15. La selección del mejor modelo se realizó de acuerdo con los criterios estadísticos: menor número de coeficientes, mayor coeficiente de determinación ajustado (R^2_{adj}), menor error estándar de estimación (EEE) y aleatoriedad de los residuos.

5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

5.1. Construcción del prototipo IoT para el registro en línea del tiempo, la humedad relativa y la temperatura del aire de almacenamiento de café miel.

Se desarrolló un prototipo basado en una solución IoT para registrar en tiempo real las condiciones de humedad relativa y temperatura del aire en contacto con los granos de café miel durante el almacenamiento. Los componentes electrónicos fueron seleccionados según la disponibilidad del mercado nacional, la capacidad de medición y una incertidumbre similar a otros registradores (HOBO), además de presentar un bajo costo. En la tabla 6 se detallan los criterios de los sensores evaluados.

Tabla 6. Características de los sensores de humedad relativa y temperatura analizados.

Parámetro	DHT11	DHT22	DHT21	BME280
Alimentación (Vdc ¹)	3 a 5	3,3 a 6	3,5 a 5,5	1,71 a 3,6
Señal de Salida	Digital	Digital	Digital	Digital
Rango de operación temperatura (°C)	De 0 a 50	-40 a 80	-40 a 80	-40 a 85
Precisión temperatura (°C)	± 2	< ± 0,5	< ± 0,5	1
Resolución Temperatura (°C)	0,1	0,1	0,1	0,01
Rango de operación de humedad relativa (%)	20 a 90	0 a 100	0 a 100	0 a 100
Precisión humedad relativa (%)	± 4	L± 2	± 3	± 3
Resolución humedad relativa (%)	1	0,1	0,1	0,008
Tiempo de respuesta (s)	1	2	2	1
Protección para aplicaciones en exteriores	No	No	Si	No
Dimensiones (mm)	12 x 15,5 x 5,5	14 x 18 x 5,5	60 x 28 x 12	2,5 x 2,5 x 0,93
Costo (USD)	5,95	8,95	9,95	16,95
Referencia	(“DHT11 Humidity & Temperature Sensor” 2015)	(Liu 2010)	(Aosong 2016)	(Bosch Sensortec 2015)

¹Vdc1 voltaje de corriente directa.

Las especificaciones observadas en la tabla 6 indican que el sensor DHT21 presentó una precisión aceptable a un bajo costo. Además, la presencia de una cápsula plástica protege el circuito interno de la exposición a la condensación del agua. De esta manera, se reduce el riesgo de daño y pérdida de datos durante su registro. Sin embargo, los sensores no pueden enviar los datos por lo que se requiere contar con un microcontrolador. Para la selección del microcontrolador se compararon datos técnicos relevantes de tres fabricantes diferentes que incorporan la tecnología de transferencia de datos (tabla 7).

Tabla 7. Características técnicas de tres microcontroladores (Arduino Uno Wifi y Raspberry Pi Zero 2W).

Parámetro	Arduino UNO Wifi Rev2	Esp32 Wroom	Raspberry Pi Zero 2W
Procesador	ATmega4809	Tensilica Xtensa X36	Broadcom BCM2710A1
Núcleos	1	2	1
Memoria	EEPROM 256 Bytes	No	Micro SD
SRAM ¹	6 KB	512 MB	512MB
Alimentación (Vdc)	5	3-3,6 Vdc	5Vdc
Velocidad del Reloj (MHz)	16	40	1000
Pines E/S digitales	14	16	17
Bluetooth	v4.2 BR/EDR ² BLE ³	v4.2 BR/EDR ² BLE ³	V4.2 BLE ³
Wifi	802,11 b/g/n 2,4 GHz	802,11 b/g/n 2,4 ~2,5 GHz	802,11 b/g/n 2,4 GHz
Temperatura de trabajo (°C)	-40 a 85	-40 a 85	-20 a 70
Precio (USD)	55,40	9,99	45,90

¹ SRAM (Static Random Access Memory): Es una memoria de almacenamiento de datos temporales mientras la alimentación este encendida.

² Basic Rate/Enhanced Data Rate: implementada en aplicaciones que requieren una mayor tasa de transferencia de datos.

³ BLE (Bluetooth low energy): comunicación inalámbrica diseñada para consumir muy poca energía implementada en dispositivos que operan con baterías pequeñas como sensores y dispositivos IoT.

El análisis de la tabla 7 indica que los tres microcontroladores presentaron módulos de comunicación inalámbrica *Bluetooth* y *wifi* muy similares (“ARDUINO UNO WiFi REV2” 2021; Espressif Systems 2023; Raspberry 2021). Asimismo, todos pueden trabajar en el rango de temperatura requerido y presentaron una cantidad de pines de entrada y salida digital superior al necesario para el estudio. No obstante, el Esp32 presenta una mayor cantidad de núcleos. De modo que se puede utilizar uno de los núcleos para el muestreo de datos y el otro para la transferencia de estos (Ikiss 2020). Además, el Esp32-wroom-32 posee la mejor relación

entre el costo y la calidad. De esta manera, se adquirieron seis microcontroladores esp32 por un monto inferior al que se adquiere un único microcontrolador Arduino Uno Wifi, o Rasberry Pi Zero 2W. Por consiguiente, se seleccionó el microcontrolador esp32-wroom-32.

En el mercado existen dispositivos para el registro de datos de temperatura y humedad relativa como los registradores marca Hobo, que envían estas variables de forma inalámbrica mediante *Bluetooth Low Energy* con alcance de 30,5 m a dispositivos móviles (Onset Computer Corporation 2022). Estos registradores requieren la instalación de la aplicación móvil HOBO mobile disponible para sistemas operativos de Android e IOS. No obstante, la precisión en la toma de datos de temperatura y humedad relativa varían según el modelo que se considere, así como los rangos de operación y precios. En la tabla 8 se comparan los aspectos técnicos más relevantes entre el registrador disponible (HOBO MX2304) y el prototipo propuesto.

Tabla 8. Especificaciones técnicas del prototipo propuesto y el HOBO Mx2304.

Especificaciones	Prototipo propuesto	HOBO MX2304
Temperatura (°C)		
Rango de operación	-40 a 80	-40 a 70
Precisión	± 0,5	± 0,25
Humedad Relativa (%)		
Rango de operación	0 a 99,9	0 a 100
Precisión	± 3	± 2,5 entre 10 y 90%. ± < 10% y > 90%
Registro de datos		
Estándar de datos inalámbricos	WIFI Bluetooth baja energía (BLE)	Bluetooth de baja energía (BLE)
Alimentación	USB 5 V/1 A Batería de litio de 3,7 V	Batería 2/3 AA de litio de 3,6 V
Duración batería	Recargable	2 años
Costo dispositivo (USD)	24,9	155,0 - 170,0

Los sensores DHT21 se soldaron al microcontrolador ESP32, el cual se encarga de recibir y transmitir los datos a una nube para su almacenamiento y posterior análisis. Se optó por utilizar una plataforma ya existente debido a que estas ofrecen herramientas integradas, como widgets

y módulos de código predefinidos, que simplifican la implementación y gestión del proyecto. Esto permite avanzar sin requerir conocimientos especializados en diseño y programación de páginas web, así como en el mantenimiento y la gestión de servidores.

Esta decisión responde a la necesidad de cumplir con los plazos establecidos para la elaboración del Trabajo Final de Graduación, evitando los costos asociados a la adquisición y mantenimiento de servidores y dominios, minimizando a su vez los riesgos de vulnerabilidad inherentes a la gestión de servidores propios. Por otro lado, las plataformas disponibles garantizan compatibilidad con microcontroladores y dispositivos basados en Arduino, lo que facilita su integración y permite una amplia variedad de dispositivos. Se evaluaron tres plataformas que cumplieran con estos criterios: *Blynk*, *Thingier.io* y *Arduino IoT Cloud*, cuyos detalles se presentan en la Tabla 9.

Tabla 9. Comparación de los beneficios de las plataformas (*Blynk*, *Thingier.io* y *Arduino IoT cloud*).

Características	Blynk	Thingier.io	Arduino IoT cloud
Costo mensual	\$99	€ 49	\$ 5.99
Cantidad de dispositivos	50, 200 o 500	100	25
Plantillas de dispositivos	50	No especifica	No especifica
Almacenamiento de datos histórico	6 meses	No especifica	90 días
Desbordadas	Pro Widgets	No especifica	Ilimitados
Aplicación móvil	Android/IOS	Android/IOS	Android/IOS
MQTT (Message Queuing Telemetry Transport)	Si	Si	Si
Exportación de datos a CSV o JSON	Si	Si	Si
Referencia	(Blynk Inc 2024)	(Thingier.io 2024)	(Arduino 2024)

Se seleccionó la plataforma *Arduino IoT cloud* debido a su bajo costo y facilidad de interacción con el usuario. Esta plataforma permite acceder a los datos recopilados por el prototipo desde cualquier ubicación y dispositivo con conexión a internet. En ella se programó el código fuente necesario para que el microcontrolador realice la lectura de los datos cada cinco minutos. Además, se diseñó un panel web que permite visualizar de manera gráfica la temperatura, la

humedad relativa registrada por cada sensor y el tiempo de medición, así como su histórico de manera gráfica, como se observa en la figura 9.



Figura 9. Diseño del panel web para visualizar las condiciones de almacenamiento de los granos de café miel registradas por tres sensores DHT-21.

Los sensores presentaron unas diferencias con respecto al valor esperado en un rango de -6,9 a 11,2 % para una humedad relativa de 93 %, mientras que para las humedades relativas de 76,2 y 29,4 % se obtuvieron diferencias de -8,64 a 5,22 % y -3,91 a 3,09 %, respectivamente. A partir de los tres valores de humedades relativas de equilibrio se elaboraron las curvas de calibración correspondientes a cada sensor como se observa en la figura 10.

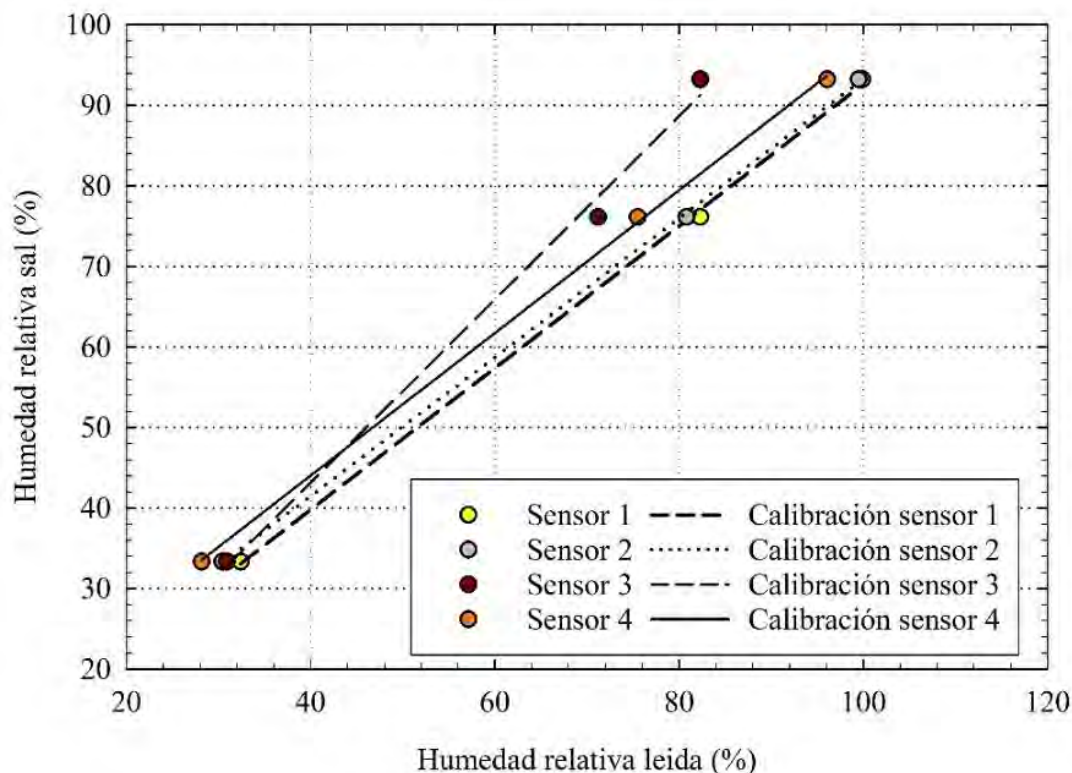


Figura 10. Curvas de calibración de los sensores DHT-21 mediante tres soluciones salinas.

Como se ilustra en la figura 10, las curvas de calibración de los sensores se ajustan a modelos lineales. Las desviaciones estándar de mayor magnitud con respecto al modelo lineal se observan principalmente en valores de humedad relativa alta (superiores a 93 %), mientras que las humedades relativas bajas (< 79 %) registran valores cercanos al esperado, es decir, la precisión de los sensores es mayor en valores bajos de humedad relativa. Esto indica que los sensores fueron calibrados para estos puntos y las desviaciones estándar pueden ser útiles para ajustar los datos en experimentos posteriores.

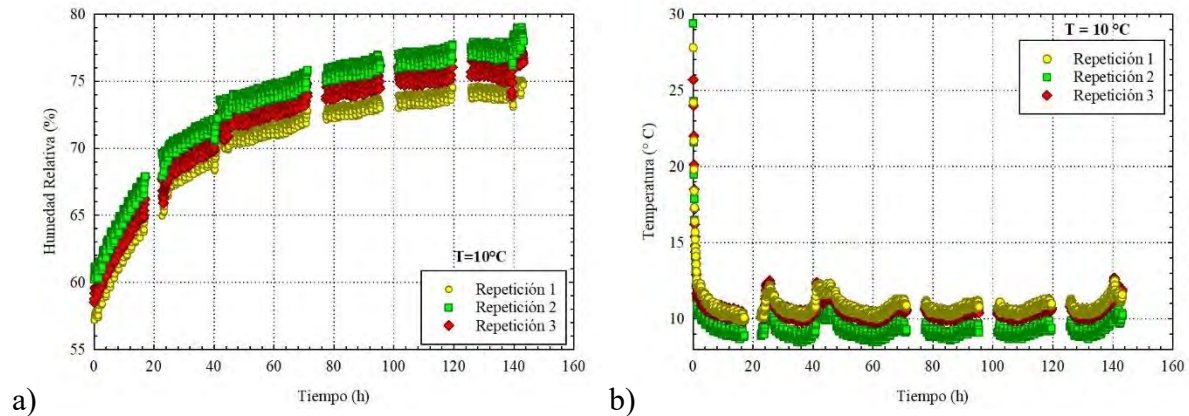
La tabla 10 presenta el valor de los parámetros obtenidos para las curvas de calibración de los 18 sensores utilizados para la registrar la humedad relativa del aire en contacto con los granos de café miel. Las curvas de calibración obtenidas se ajustan adecuadamente a una ecuación lineal con valores de coeficiente de determinación superiores a 99 % y errores estándar de la estimación inferiores a 4 %. Esto permitió incorporar las ecuaciones obtenidas para el ajuste de la humedad relativa registrada por cada sensor. Este ajuste efectuado a modo de calibración de los sensores garantiza que las lecturas de temperatura y humedad relativa realizadas por los sensores son fiables.

Tabla 10. Parámetros estadísticos de las curvas de calibración de los sensores DHT-21.

Sensor DHT-21	m (adim)	b (%)	R² (dec.)	R²adj	ESS (%)
1	0,8776	6,2653	0,9996	0,9992	1,2575
2	0,8717	6,4166	0,9999	0,9998	0,4493
3	0,9159	4,3829	1,0000	1,0000	0,0373
4	0,8811	4,5475	0,9993	0,9986	1,1528
5	0,8744	5,9347	0,9995	0,9999	0,9852
6	0,8677	6,0877	0,9996	0,9993	0,8202
7	0,8556	8,0305	0,9999	0,9998	0,4609
8	0,9185	2,8561	0,9991	0,9983	1,2756
9	0,9335	4,4430	0,9995	0,9990	0,9658
10	0,8634	6,9382	0,9998	0,9995	0,6888
11	0,8707	7,2950	1,0000	1,0000	0,0145
12	1,1380	-2,3700	0,9946	0,9891	3,2182
13	0,9268	5,4794	0,9920	0,9841	3,8948
14	1,1403	-2,7032	0,9966	0,9932	2,5489
15	0,8755	4,1341	0,9961	0,9921	2,7364
16	0,8856	8,6090	0,9996	0,9992	0,8574
17	0,8872	6,6266	0,9994	0,9988	1,0800
18	0,8694	10,4610	1,0000	1,0000	0,0342

*adim: adimensionales. ESS: error estándar de estimación. R²: Coeficiente de determinación. (**) Los p-valores en la determinación de los coeficientes fue inferior a 0,0001.*

El prototipo permitió la captura, la visualización y el registro en línea de los valores de temperatura y humedad relativa del aire en contacto con los granos de café miel almacenados en una cámara fría a 10 °C por 140 horas como se presenta en la figura 11. Además, el prototipo tiene la versatilidad de poder utilizarse en otros granos como en el almacenamiento de los granos de café recién tostados (Pérez, 2024) y los granos secos de cacao (Peraza Alpízar et al. 2023).



a) b) Figura 11. Registro de datos de humedad relativa (a) y la temperatura (b) del aire en contacto con los granos de café miel almacenados en una cámara fría a 10 °C.

En la figura 11 se muestran intervalos de tiempo donde no se registran datos de humedad relativa y temperatura que sugiere fallos en la conectividad entre el microcontrolador ESP32 y el enrutador inalámbrico. Dado que la comunicación dependía de una red Wi-Fi, es posible que se hayan presentado fluctuaciones en la intensidad de la señal, congestión en la red o reinicios momentáneos del sistema, lo que afectó la continuidad del registro. Sin embargo, la tendencia general de la curva se mantiene, lo que sugiere que las interrupciones no comprometen la validez del análisis de la variación de la humedad relativa y temperatura del aire en función del tiempo.

Durante la operación del prototipo se encontraron restricciones por el acceso de internet dentro del campus universitario, ya que la Universidad de Costa Rica cuenta con protocolos de ciberseguridad estrictos; por esta razón se utilizó un ruteador inalámbrico (router D-link N300 3G). No obstante, se recomienda trabajar con otras alternativas como los microcontroladores LILYGO® TTGO T-PCIE A7670 4G con modem para celular. Estos permiten obtener el internet por medio de una tarjeta telefónica (SIM card) y tienen la ventaja que usan una banda 4G que está disponible para cualquier operador en el país.



Figura 12. Prototipo IoT para el registro de los datos de la humedad relativa y temperatura del aire en contacto con los granos de café miel.

El prototipo desarrollado permitió graficar la cinética de la temperatura y humedad relativa del aire en contacto con el café en tiempo real; es decir, fue efectivo para el registro, la transmisión y accesibilidad de las condiciones de almacenamiento de los granos. También, representa un instrumento con potencial para la trazabilidad de los productos agrícolas, tanto en el almacenamiento como en el transporte.

5.2. Determinación de la cinética del equilibrio de la humedad relativa y la temperatura del aire en contacto con los granos de café miel con el prototipo IoT

5.2.1. Selección de los modelos de ajuste.

La cinética de la humedad relativa de tres muestras de café miel a 25 % b.h. fueron registradas durante 64 horas hasta obtener un valor constante. Durante este periodo de tiempo se recolectó 82,3 % de los datos. Se observó que la humedad relativa del aire aumentó exponencialmente hasta que se estabilizó en un valor máximo de 82,5 %, es decir, el grano transfiere humedad al aire ~40 %, como se observa en la figura 13.

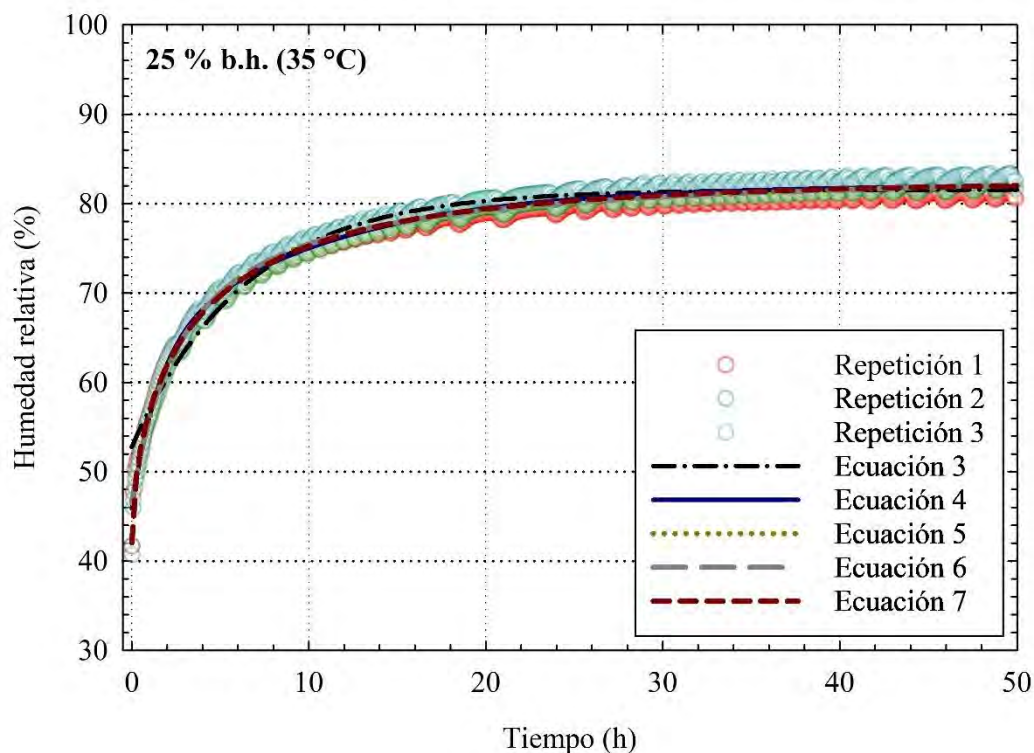


Figura 13. Ajuste de la cinética de equilibrio higroscópico del aire en contacto con los granos de café miel a 25 % b.h. almacenados a 35 °C.

Los ajustes de cinco modelos (Tabla 3) describen adecuadamente la variación de la humedad relativa del aire en contacto con los granos de café miel con un coeficiente de determinación (R^2) superior al 0,92. También se realizó una preselección de los modelos, se descartaron siete modelos por obtener un coeficiente de determinación inferior al 92 %. Los coeficientes de los cinco modelos matemáticos como se muestran en la tabla 11.

Tabla 11. Parámetros estadísticos de los modelos de ajuste de la cinética de equilibrio higroscópico del café miel almacenado a 35 °C.

Ec.	H_i (%)	a (%)	b (h^{-1})	c (%)	d (h^{-1})	f (%)	H_e (%)	n (adim)	R^2_{adj} (dec.)	EEE (%)
Ec. 3	52,7622	28,8233	0,8549	-	-	-	-	-	0,9607	1,1728
Ec. 4	45,8688	17,3124	0,6728	18,9294	0,0987	-	-	-	0,9812	0,8119
Ec. 5	46,5116	-	37,7127	-	-	3,0114	-	-	0,9804	0,8279
Ec. 6	-	-	0,6013	-	0,0071	0,0215	-	-	0,9804	0,8279
Ec. 7	-	0,4907	0,4526	-	-	-	82,5311	0,5800	0,9824	0,7854

Ec: Ecuación. adim: adimensionales. EEE: error estándar de estimación. R^2 : Coeficiente de determinación.

Se muestra que las cinco ecuaciones presentan coeficientes de determinación elevados, con valores superiores a 96 % y errores estándares de estimación (EEE) inferiores al 1,2 %, así como valores de $p < 0,0001$. Esto evidencia que son ajustes apropiados para representar la cinética de equilibrio en la humedad relativa del aire en contacto con los granos de café miel a 35 °C. En la figura 14 se muestra la distribución de los residuos correspondientes a las diferencias entre los valores observados y los estimados por los modelos. Donde los residuos de la ecuación 3 presentan mayores magnitudes y una distribución con una tendencia similar a la de un polinomio de grado 4.

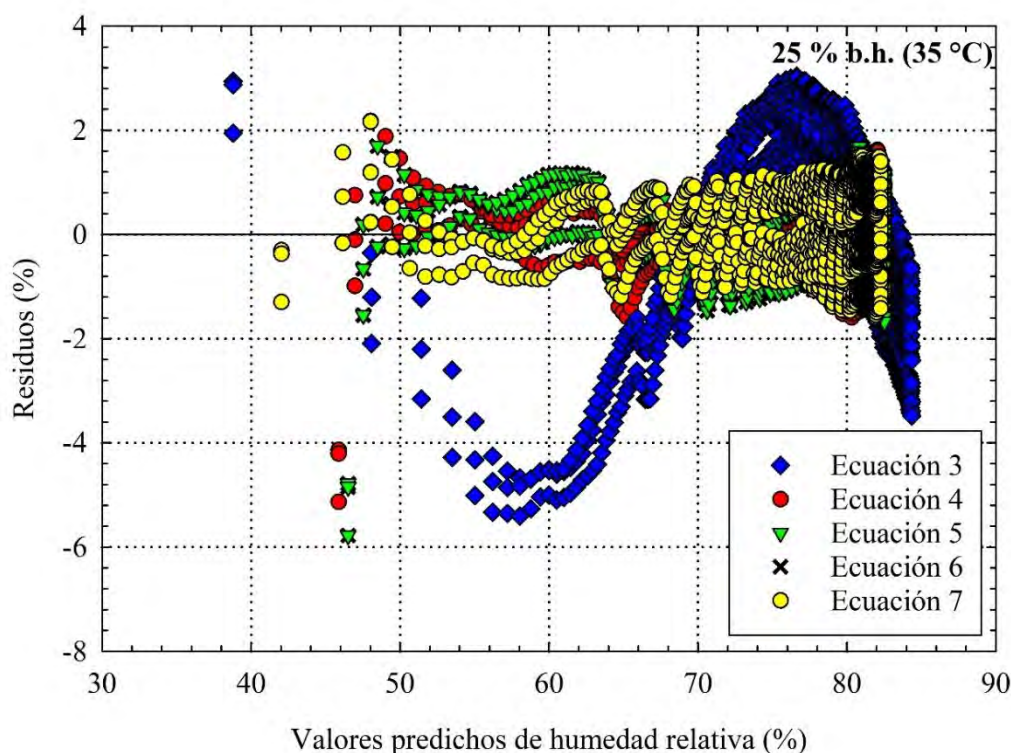


Figura 14. Residuos obtenidos de cinco modelos para representar la humedad relativa del aire en contacto con café miel 25 % b.h. durante el almacenamiento a 35 °C.

Se observa una distribución aleatoria de los residuos, con valores positivos y negativos. La mayor densidad de residuos se ubica entre -6 y 4 %, lo cual reafirma que los cinco modelos se ajustan apropiadamente. Las máximas magnitudes en los residuos se ubican en un intervalo de 38 y 50 % correspondiente a los primeros valores de humedad relativa registrados cuando se coloca el sensor con la muestra. Los residuos que presentaron las mínimas magnitudes se obtuvieron con la ecuación 7. Estos presentaron una tendencia aleatoria; por esta razón la ecuación 7 se seleccionó como el modelo que presentó el mejor ajuste.

El parámetro H_i hace referencia a la humedad relativa inicial del aire en contacto con los granos de café miel. Los coeficientes a corresponden al cambio de humedad relativa, mientras que los coeficientes k a la rapidez de equilibrio higroscópico que indica la tasa a la cual el aire absorbe humedad. Un elevado valor de k indica una rápida absorción de humedad, mientras que un valor bajo indica una absorción más lenta. Los otros coeficientes corresponden al ajuste estadístico y no se asocia un significado físico.

La transferencia de humedad observada de los granos al aire se debe a la diferencia de concentración de vapor de agua, donde la presión de vapor es mayor en los granos con respecto al aire y por lo tanto se inicia un proceso de estabilización. Esta tendencia se describe con la primera y segunda Ley de Fick, que establece que la tasa de transferencia de masa es proporcional al gradiente de concentración, es decir, que viaja de altas a bajas concentraciones hasta llevar el sistema a su estado de equilibrio (Jian y Jayas 2021).

La cinética de la humedad relativa de tres muestras de café pergamino con mucílago a 35 % b.h. fueron registrados durante 51 horas. Las muestras transfirieron humedad al aire. Este comportamiento se observa en la figura 15 que presenta una tendencia creciente hasta alcanzar un máximo de 90 %. En la misma figura se representa el 78,4 % de los datos dado que el resto de los datos alcanza un valor constante cercano a 90%.

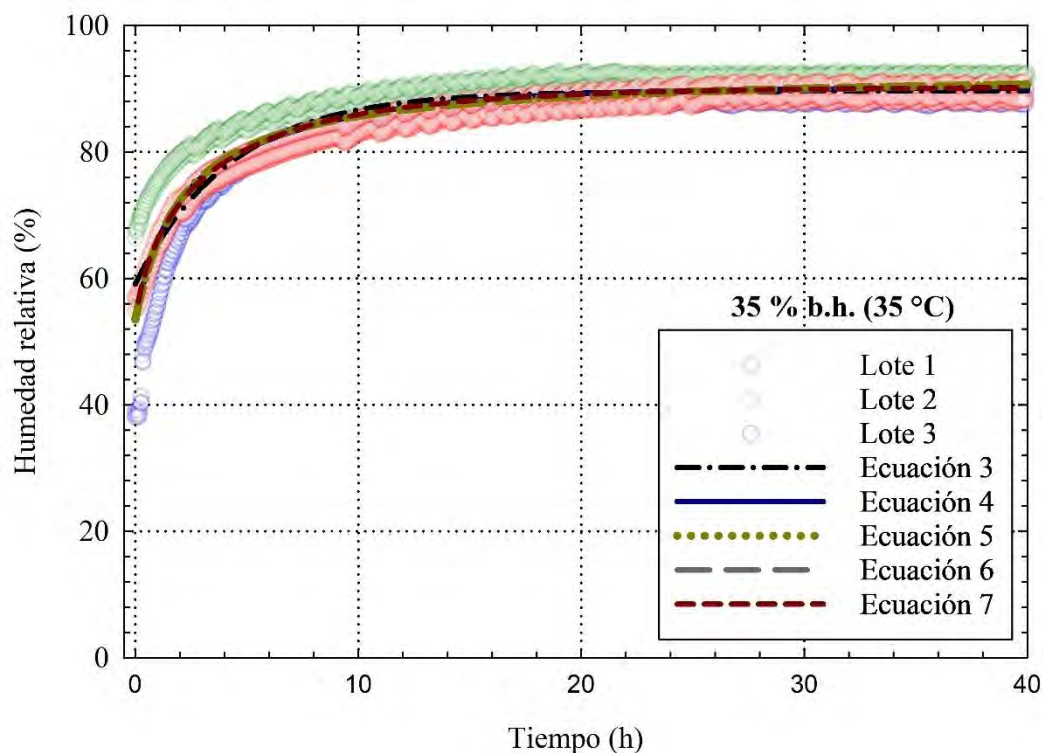


Figura 15. Ajuste de la cinética de equilibrio higroscópico del aire en contacto con los granos de café miel a 35 % b.h. almacenados a 35 °C.

Las cinco curvas de mejor ajuste de la figura 15 son en apariencia similares y pueden representar la estabilización de la humedad relativa del aire en las condiciones estudiadas. No obstante, se muestran diferencias en los contenidos de humedad inicial entre los lotes, lo que afectó el coeficiente de determinación con un valor cercano a 0,83 y el error estándar de estimación con un valor de 3,0 %, como se observa en la tabla 12.

Tabla 12. Parámetros estadísticos de los modelos de ajuste de la cinética de equilibrio higroscópico del café miel almacenado a 35 °C.

Ec.	H_i (%)	a (%)	b (h^{-1})	c (%)	d (h^{-1})	F (%)	H_e (%)	n (adim)	R^2_{adj} (dec.)	EEE (%)
Ec. 3	59,1248	30,5406	0,2328	-	-	-	-	-	0,8233	2,9409
Ec. 4	53,7610	15,8478	0,8700	20,5540	0,1547	-	-	-	0,8353	2,8407
Ec. 5	53,4888	-	39,2094	-	-	2,1684	-	-	0,8329	2,8598
Ec. 6	-	-	0,7992	-	0,0086	0,0187	-	-	0,8329	2,8598
Ec. 7	-	0,424	0,458	-	-	-	90,351	0,675	0,8340	2,8480

Ec: Ecuación. adim: adimensionales. EEE: error estándar de estimación. R^2 : Coeficiente de determinación.

El error estándar de estimación depende de la naturaleza de los datos. El ajuste tuvo como resultado un valor del error estándar de estimación cercano entre todos los modelos desarrollados, sin embargo; presentó un valor cercano a 2,87 %, este es menor que la incertidumbre del sensor de humedad relativa (3 %). Los cinco modelos pueden estimar apropiadamente los valores de humedad relativa del aire en contacto con las muestras de café pergamino con mucílago, en adelante denominado café miel.

5.2.2. Análisis adimensional de los datos.

El programa usado evalúa el tiempo en que la derivada es equivalente a 0,10 considerando la incertidumbre de los sensores y devuelve los valores de tiempo en los que se cumple esta condición, así como sus gráficos. De manera que se puede conocer con certeza la hora exacta a la que se alcanza la humedad relativa de equilibrio como se muestra en la figura 16.

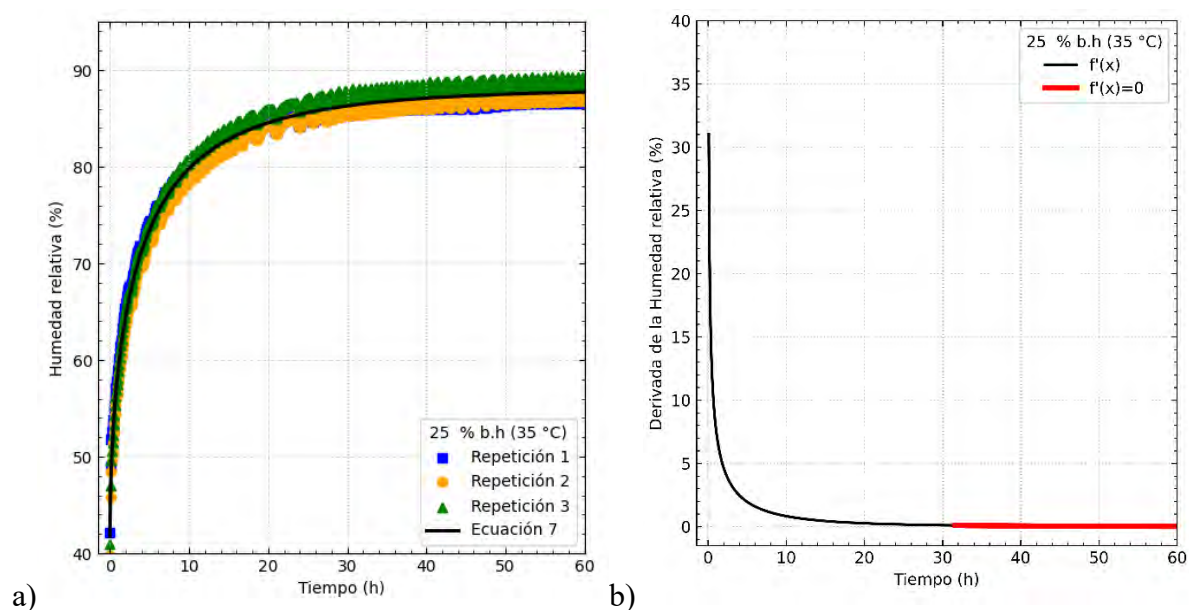


Figura 16. Cinética de equilibrio en la humedad relativa (a) y su derivada en café miel a 25 % b.h. almacenado a 35 °C.

En la figura 17 se muestran las razones de humedad correspondientes a 40 horas. Este resultado corresponde a nueve muestras procedentes de tres lotes de la cosecha de café 2023-2024 con un contenido de humedad del 35% b.h. y almacenados a 35 °C. Se observa una tendencia creciente hasta alcanzar un máximo que se aproxima a la unidad cuando se va alcanzando el equilibrio, similar a lo registrado para los contenidos de humedad de 35 % b.h., tal como se ilustra en la figura 17.

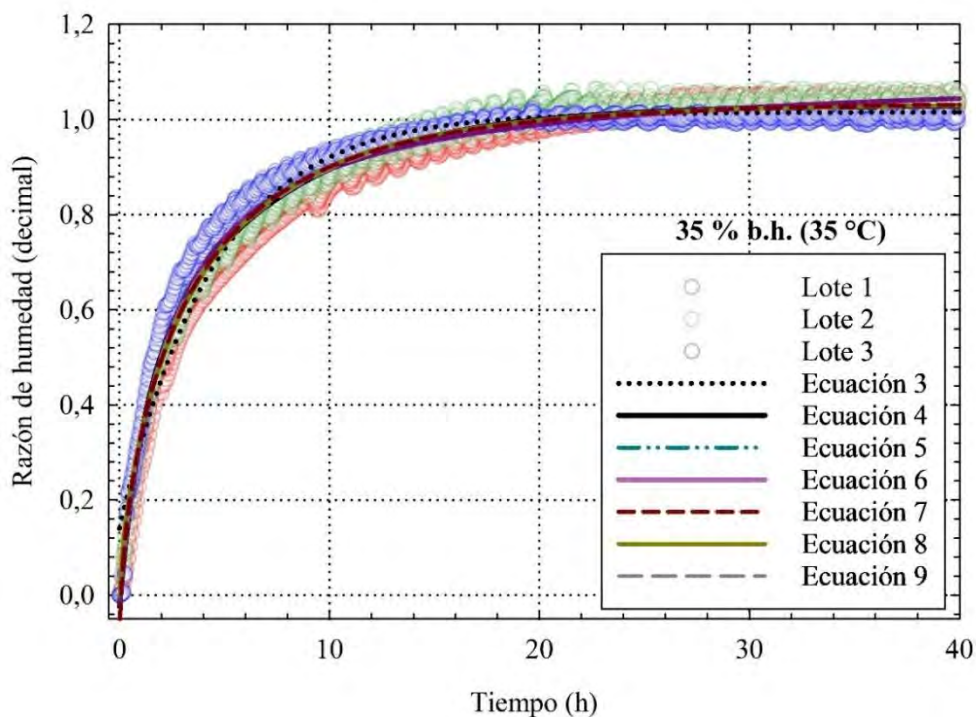


Figura 17. Ajuste de la cinética de equilibrio higroscópico del aire en contacto con los granos de café miel a 35 % b.h. almacenados a 35 °C.

La figura 17 muestra siete regresiones lineales. Estas se aproximan al fenómeno observado por su cercanía con los datos de los tres lotes de café miel. Asimismo, muestra la misma tendencia que la obtenida en los granos de café miel a 25 % b.h., es decir, creciente hasta que alcanza su estabilización y por consiguiente coinciden en los mismos modelos matemáticos de ajuste como se muestra en la tabla 13.

Tabla 13. Parámetros estadísticos de los modelos de ajuste de la cinética de equilibrio higroscópico del café miel a 35 % b.h. almacenado a 35 °C.

Modelo	y0 (dec.)	a (dec.)	b (h ⁻¹)	c (dec.)	d (h ⁻¹)	n (dec.)	R ² adj (dec.)	EEE (dec.)
Ec. 3	0,1406	0,8748	0,2225	-	-	-	0,9665	0,0344
Ec. 4	-0,0242	0,4449	0,9157	0,6093	0,1511	-	0,9810	0,0259
Ec. 5	-0,0197	1,1252	2,2969	-	-	-	0,9784	0,0276
Ec. 6	-	-24,3786	-	-50,6520	-22,0523	-	0,9784	0,0276
Ec. 7	1,0371	1,0650	0,4478	-	-	0,6693	0,9798	0,0267
Ec. 8	1,0333	-	0,3918	-	-	0,7211	0,9791	0,0272
Ec. 9	-	0,4333	0,8344	0,5972	0,1489	-	0,9809	0,0260

Ec.: Ecuación. adim: adimensionales. EEE: error estándar de estimación. R²: Coeficiente de determinación. (**) Los p-valores en la determinación de los coeficientes fue inferior a 0,0001.

Las ecuaciones 4, 7, 8 y 9 representan apropiadamente los valores observados debido al cumplimiento de los criterios estadísticos adecuados. No obstante, se selecciona la ecuación 8 para representar la cinética de equilibrio higroscópico en el aire a partir de la humedad relativa, debido a que es el modelo con menos variables, presenta un coeficiente de determinación de 97,9 % y un error estándar de estimación de 0,0272 ($<0,0001$). En la figura 18 se muestran los residuos de los siete modelos.

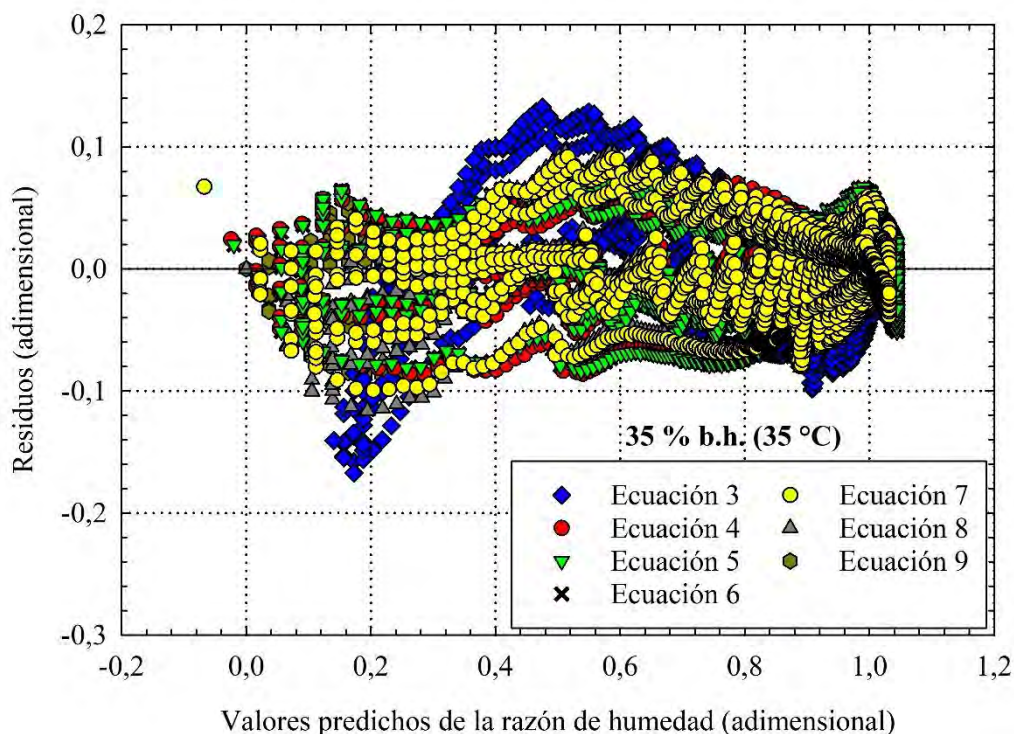


Figura 18. Análisis de los residuos de siete modelos para representar la razón de la humedad del aire en contacto con el café miel 35 % b. h. durante el almacenamiento a 35 °C.

En todos los ajustes se presentó una distribución aleatoria de los residuos, la cual disminuye a medida que se aproxima a la humedad relativa de equilibrio como se ilustra en la figura 18. Sin embargo, la magnitud de los residuos del modelo propuesto (ecuación 7) se mantiene en un intervalo de $\pm 0,12$, lo cual reafirma que es el modelo más apropiado para representar este fenómeno.

Además, los gráficos incluidos en los apéndices A.4 a A.9 muestran las cinéticas obtenidas para cada lote a 25 y 10 °C, confirmando que los modelos inicialmente seleccionados para 35 °C aplicables para todas las temperaturas evaluadas con coeficientes de determinación (R^2) superiores al 0,92.

5.2.3. Efecto de la temperatura en la cinética de equilibrio higroscópico del aire.

El efecto de la temperatura de almacenamiento de los granos de café a los cinco contenidos de humedad estudiados se observa en la figura 19, donde a mayor temperatura de almacenamiento se requiere menos tiempo para que el aire se estabilice. Se determinó que el tiempo promedio fue de 30, 60 y 80 horas para las temperaturas de 35, 25 y 10 °C, respectivamente. La alta temperatura de almacenamiento promovió que las moléculas tuvieran mayor energía cinética en consecuencia, una mayor libertad de movimiento lo que propició una mayor difusión efectiva entre el aire y el grano (J. F. A. Ospina y Castro 2009).

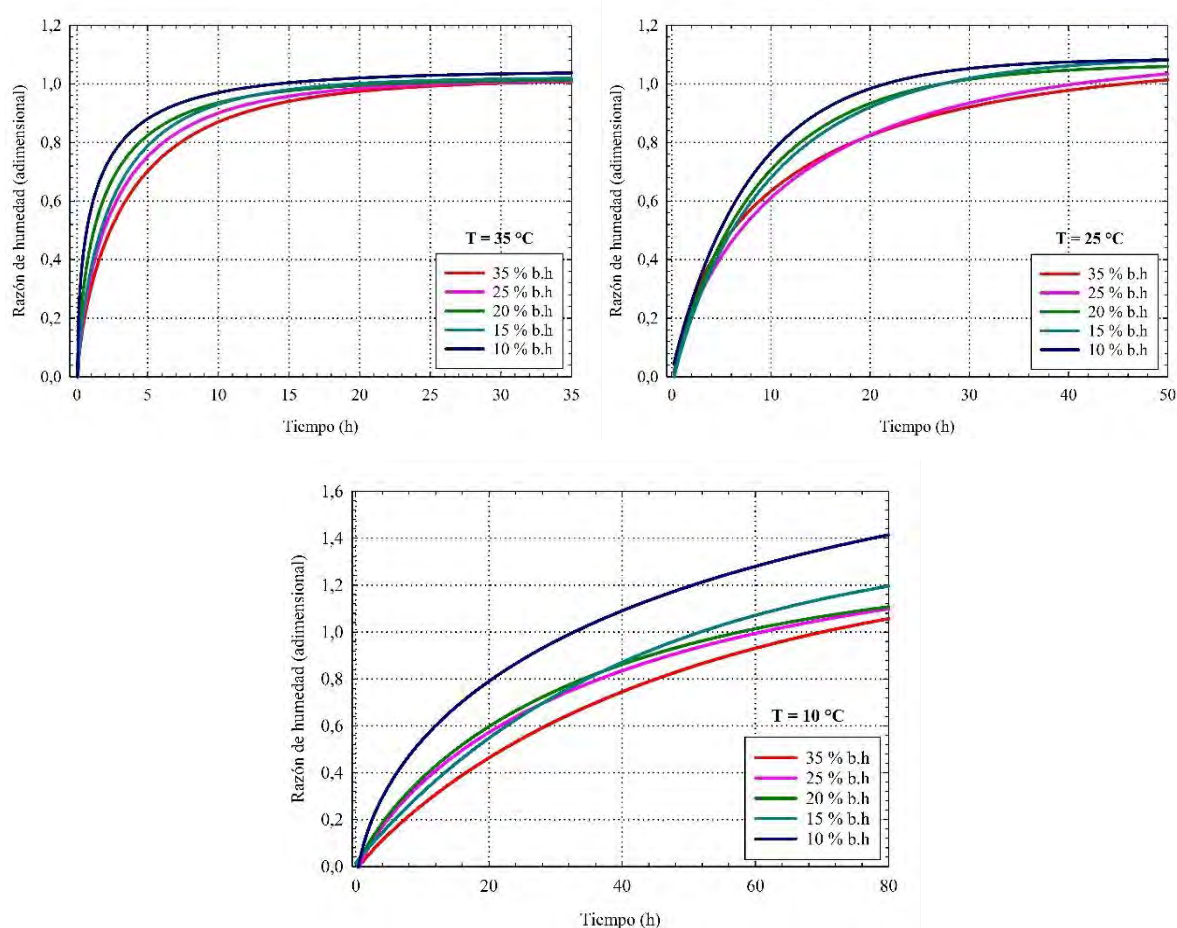


Figura 19. Modelo propuesto para la cinética de equilibrio higroscópico del aire en contacto con los granos a cinco contenidos de humedad.

Considerando los resultados del presente estudio con un enfoque con base a las muestras con la misma masa, a medida que se reduce el contenido de humedad de los granos de café miel, la curva crece de manera acelerada y alcanza en menos horas una razón de humedad máxima de 1. Esta tendencia se observó en las tres temperaturas de almacenamiento estudiadas. Donde las

curvas de 10 % b.h., representadas en color azul, alcanzan en menos tiempo una razón de humedad de 1 en comparación con las curvas a 35 % b.h, representadas en color rojo. Es decir, la curva de estabilización fue más rápida con los granos más secos en las tres temperaturas, como se ilustra en la figura 19.

Las curvas tienen una pendiente más inclinada a medida que el contenido de humedad se reduce. Según deMan et al. (2018) se debe a que los productos con bajo contenido de humedad siempre tienen una isoterma de sorción pronunciadas. Esto sugiere que es más afín al vapor de agua y que posee una mayor tasa de adsorción lo que favorece un equilibrio de la humedad más acelerado.

En cuanto al almacenamiento en cámara fría (10 °C) se observa que se requieren alrededor de 80 horas para garantizar que los granos de café miel alcanzan el equilibrio. Esta diferencia de 20 horas con respecto al almacenamiento a 25 °C se debe a que a baja temperatura, las moléculas presentan menor energía cinética (Gálvez, Aravena, y Mondaca 2006), por tanto, se reduce la rapidez de difusión (Çengel 2011).

La cámara fría presentó ciclos de refrigeración con una duración de 67 minutos que ocasionaban una oscilación en la temperatura de 0,70 °C y un cambio de la humedad relativa de 1,30 %. La variación de la humedad relativa se encuentra dentro del rango de incertidumbre de los sensores, por tanto, se puede afirmar que esta variación en la temperatura no tiene efecto en la humedad relativa de equilibrio.

Tabla 14. Parámetros estadísticos del modelo propuesto a los cinco contenidos de humedad de café miel almacenado a 35, 25 y 10 °C.

Temperatura (°C)	CH (%b.h)	R ² adj (dec.)			EEE (dec.)		
		Lote 1	Lote 2	Lote 3	Lote 1	Lote 2	Lote 3
35	35	0,9929	0,9906	0,9939	0,0163	0,0181	0,0131
	25	0,9945	0,9931	0,9715	0,0120	0,0140	0,0299
	20	0,9942	0,9818	0,9738	0,0131	0,0224	0,0304
	15	0,9877	0,9933	0,9959	0,0300	0,0142	0,0111
	10	0,9571	0,9891	--	0,0445	0,0156	--
25	35	0,9922	0,9920	0,9896	0,0215	0,0218	0,0254
	25	0,9856	0,9756	0,9954	0,0327	0,0383	0,0168
	20	0,9838	0,9844	0,9971	0,0357	0,0346	0,0123
	15	0,9929	0,9935	0,9859	0,0227	0,0218	0,0317
	10	0,9442	0,9955	--	0,0741	0,0167	--
10	35	0,9840	0,9920	0,9920	0,0226	0,0311	0,0298
	25	0,9870	0,9710	0,9890	0,0319	0,0348	0,0385
	20	0,9770	0,9720	0,9820	0,0585	0,0472	0,0438
	15	0,9760	0,9630	0,9780	0,0541	0,0471	0,0638
	10	0,9530	0,9600	--	0,0289	0,0704	--

CH: Contenido de humedad. *adj*: adimensionales. EEE: error estándar de estimación. R²: Coeficiente de determinación. --: muestra del lote 3 alcanzó un contenido de humedad inferior a 10 % b.h. (**) Los p-valores en la determinación de los coeficientes fue inferior a 0,0001.

El rango óptimo de humedad para almacenamiento seguro corresponde entre 10 y 12 %, por encima de este rango el café se expone a daños por la presencia de hongos, que deterioran su sabor y su calidad. Por debajo del contenido de humedad de 10 % tiene lugar la cristalización del grano de café y su desnaturalización (Abreu et al. 2014; Caporaso et al. 2018). Esto puede repercutir negativamente en las propiedades sensoriales del café como el aroma, el sabor y la acidez.

5.2.4. Efecto de contenido de humedad del café en el equilibrio higroscópico del aire.

El efecto del contenido de humedad del grano de café miel en la cinética de equilibrio higroscópico del aire se ilustra en la figura 20. Se observó que el modelo propuesto describe adecuadamente la cinética de equilibrio del aire en contacto con el café miel para los cinco contenidos de humedad en los granos, pues se representa una buena correlación visual entre los datos experimentales y las curvas del modelo propuesto.

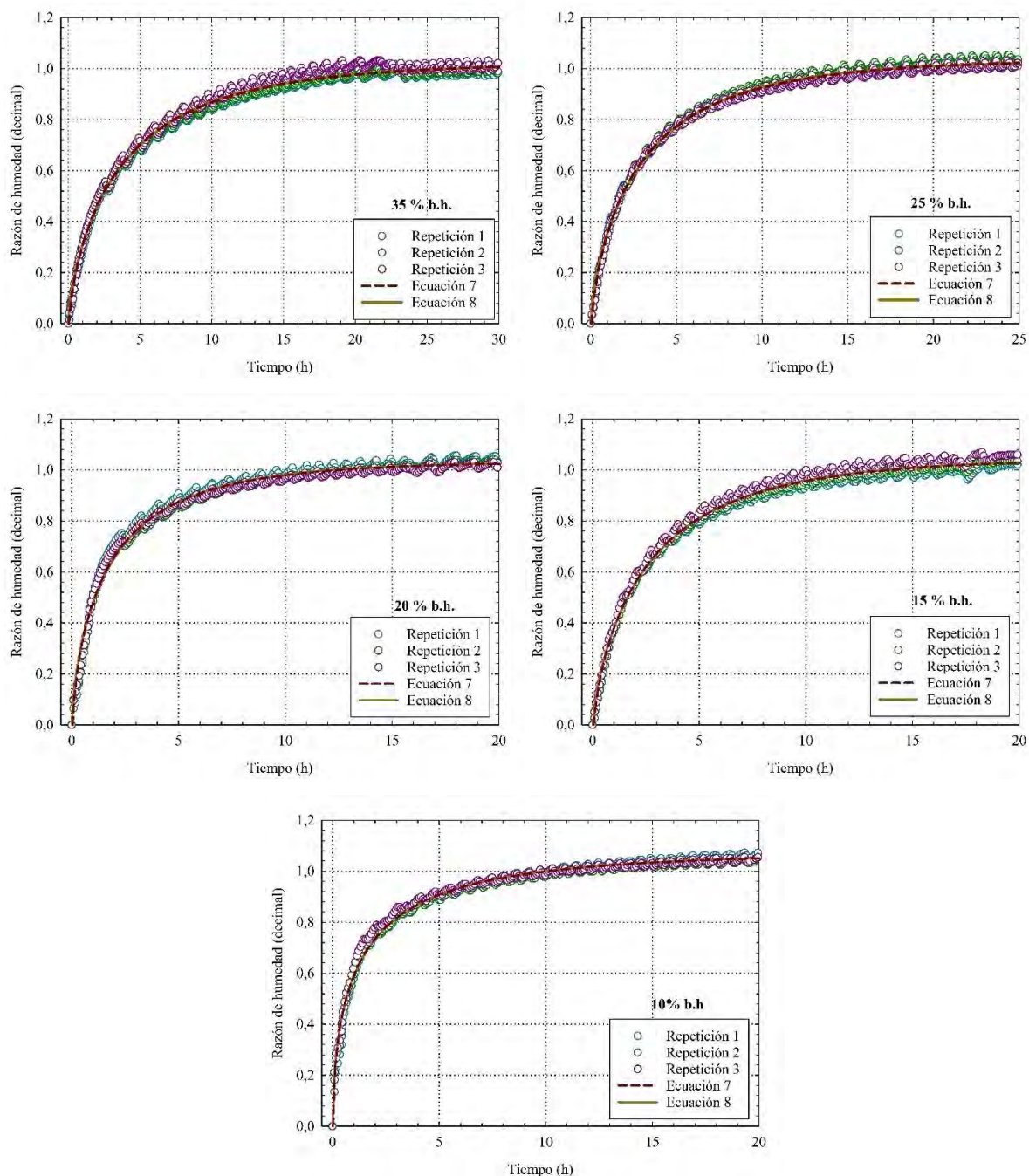


Figura 20. Efecto del contenido de humedad del café miel en la cinética de equilibrio higroscópico a 35 °C del lote 2.

La consistencia entre las repeticiones experimentales refleja que los resultados son reproducibles y la eficacia del modelo para predecir la cinética de equilibrio higroscópico. Se observa un aumento inicial en la razón de humedad durante las primeras horas, estabilizándose después de 15 horas. Los granos de café miel almacenados a 10 °C muestran que la constante de rapidez de equilibrio es inversamente proporcional al contenido de humedad. Por lo tanto, al disminuir el contenido, la constante aumenta, alcanzándose el equilibrio en menor tiempo, como indica la tabla 15.

Tabla 15. Coeficientes de la ecuación 7 y ecuación 8 para los cinco contenidos de humedad y temperaturas de almacenamiento de los tres lotes.

T (°C)	CH (% b.h.)	k (h ⁻¹)		n (adim)		c (dec.)		a (dec.)	CV (%)
		Ecuación 7	Ecuación 8	Ecuación 7	Ecuación 8	Ecuación 7	Ecuación 8	Ecuación 7	
35	35	0,407 ± 0,006	0,362 ± 0,002	0,690 ± 0,007	0,738 ± 0,004	1,024 ± 0,001	1,020 ± 0,002	1,054 ± 0,006	1,99
	25	0,424 ± 0,009	0,375 ± 0,004	0,662 ± 0,010	0,710 ± 0,006	1,031 ± 0,002	1,026 ± 0,002	1,057 ± 0,010	
	20	0,463 ± 0,009	0,435 ± 0,003	0,641 ± 0,009	0,665 ± 0,005	1,044 ± 0,002	1,042 ± 0,002	1,030 ± 0,009	
	15	0,303 ± 0,009	0,290 ± 0,003	0,726 ± 0,013	0,743 ± 0,007	1,104 ± 0,003	1,101 ± 0,003	1,016 ± 0,010	
	10*	0,584 ± 0,016	0,528 ± 0,005	0,437 ± 0,011	0,472 ± 0,007	1,150 ± 0,006	1,140 ± 0,005	1,066 ± 0,018	
25	35	0,125 ± 0,003	0,108 ± 0,001	0,778 ± 0,009	0,822 ± 0,005	1,095 ± 0,003	1,086 ± 0,003	1,032 ± 0,006	3,27
	25	0,138 ± 0,002	0,118 ± 8,99E-4	0,783 ± 0,007	0,838 ± 0,004	1,110 ± 0,003	1,095 ± 0,002	1,036 ± 0,004	
	20	0,095 ± 0,003	0,114 ± 0,002	0,985 ± 0,011	0,925 ± 0,006	1,061 ± 0,002	1,065 ± 0,002	0,962 ± 0,006	
	15	0,120 ± 0,002	0,114 ± 7,80E-4	0,920 ± 0,006	0,939 ± 0,004	1,085 ± 0,002	1,082 ± 0,002	1,011 ± 0,003	
	10*	0,103 ± 0,004	0,114 ± 0,002	0,998 ± 0,016	0,952 ± 0,009	1,069 ± 0,003	1,072 ± 0,003	0,978 ± 0,008	
10	35	0,033 ± 6,01E-4	0,034 ± 2,68E-4	0,916 ± 0,005	0,907 ± 0,003	1,203 ± 0,003	1,206 ± 0,002	0,996 ± 0,002	1,06
	25	0,048 ± 9,08E-4	0,043 ± 3,96E-4	0,906 ± 0,005	0,932 ± 0,003	1,187 ± 0,002	1,182 ± 0,001	1,017 ± 0,003	
	20	0,038 ± 8,52E-4	0,035 ± 3,85E-4	0,944 ± 0,006	0,965 ± 0,004	1,277 ± 0,002	1,273 ± 0,002	1,012 ± 0,003	
	15	0,031 ± 8,69E-4	0,030 ± 3,79E-4	0,949 ± 0,008	0,963 ± 0,005	1,391 ± 0,006	1,385 ± 0,005	1,006 ± 0,003	
	10*	0,036 ± 0,002	0,030 ± 8,44E-4	0,893 ± 0,020	0,951 ± 0,012	1,705 ± 0,022	1,664 ± 0,015	1,024 ± 0,007	

* promedio de dos lotes (n = 6). CV: coeficiente de variación.

El coeficiente cinético (k) asociado a la rapidez de equilibrio de la humedad relativa disminuyó directamente proporcional a la disminución de la temperatura de almacenamiento como se observa en la figura 21. Por ejemplo, al analizar los datos obtenidos en la ecuación 8, se tiene que al almacenar muestras a 35 °C se tienen valores de k entre 0,29 y 0,53 h⁻¹, mientras que a 25 °C es el rango se encuentra entre 0,10 y 0,12 h⁻¹ y a 10 °C se obtuvo un ámbito entre 0,030 y 0,035 h⁻¹. Es decir, a 10 °C se obtienen valores de k entre 3,6 veces más pequeños que a 25 °C y 12 veces más pequeños que a 35 °C.

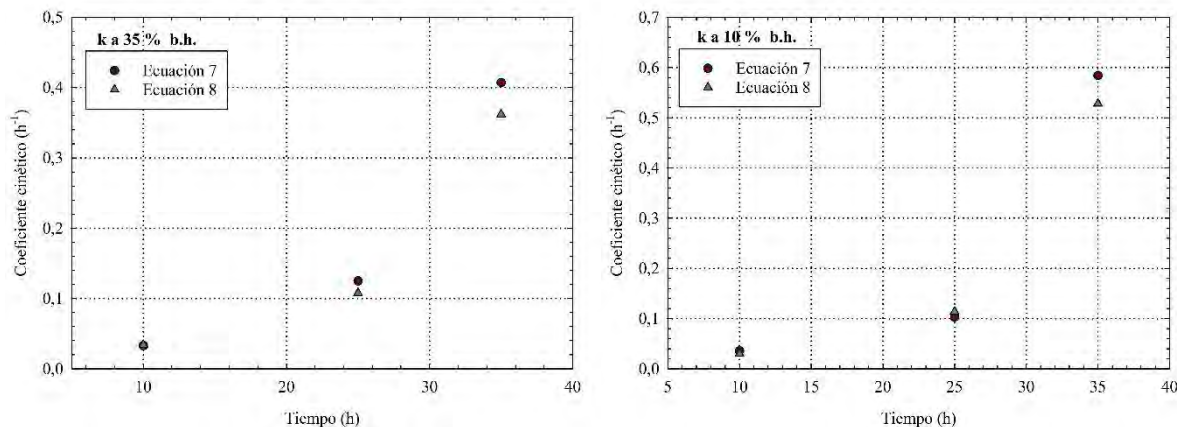


Figura 21. Efecto de la temperatura de almacenamiento en el coeficiente cinético.

En general el factor adimensional n presenta una tendencia a incrementar a medida que disminuye la temperatura de almacenamiento. En la ecuación 8, los valores a 35 °C se encuentran en un intervalo entre 0,47 y 0,74, mientras que a 10 °C se obtienen valores entre 0,90 y 0,97. En contraste, el parámetro c no evidencia ninguna tendencia clara con respecto a la temperatura, pues se mantiene relativamente constante entre 1,02 y 1,66 y entre 1,02 y 1,7 para los modelos 7 y 8, respectivamente. Estos resultados sugieren que este parámetro no es sensible a las condiciones de almacenamiento.

El parámetro a correspondiente a la ecuación 7, no evidencia una relación clara entre la temperatura de almacenamiento o el contenido de humedad. Sin embargo, considerando que el valor de este coeficiente se aproxima a la unidad, por consiguiente, se puede realizar una simplificación de la ecuación 7, obteniendo así la ecuación 8. Esta última ecuación resulta ser suficiente para modelar el fenómeno estudiado. Por otro lado, se elaboró un análisis de manera individual para conocer la correlación de estas variables en los coeficientes de la ecuación 8 sobre cada lote como se ilustra en la tabla 16.

Tabla 16. Coeficientes de la ecuación 8 para los contenidos de humedad y las temperaturas de almacenamiento de cada lote.

T (°C)	CH (% b.h.)	Lote 1			Lote 2			Lote 3		
		c (dec.)	k (h ⁻¹)	n (adim)	c (dec.)	k (h ⁻¹)	n (adim)	c (dec.)	k (h ⁻¹)	n (adim)
35	35	1,017	0,329	0,710	1,039	0,361	0,741	1,012	0,393	0,764
	25	1,049	0,252	0,748	1,025	0,426	0,717	1,014	0,449	0,731
	20	1,049	0,476	0,601	1,026	0,602	0,602	1,044	0,260	0,849
	15	1,219	0,175	0,799	1,045	0,453	0,730	1,054	0,259	0,839
	10	1,256	0,329	0,521	1,049	0,795	0,516	-	-	-
25	35	1,110	0,088	0,898	1,058	0,151	0,782	1,094	0,086	0,825
	25	1,143	0,098	0,852	1,080	0,129	0,803	1,075	0,127	0,866
	20	1,065	0,059	1,064	1,059	0,120	0,965	1,066	0,164	0,859
	15	1,110	0,118	0,889	1,078	0,110	0,953	1,067	0,112	0,975
	10	1,055	0,079	1,026	1,088	0,148	0,924	-	-	-
10	35	1,271	0,036	0,872	1,170	0,024	1,003	1,181	0,044	0,855
	25	1,168	0,048	0,931	1,183	0,040	0,941	1,168	0,040	0,945
	20	1,210	0,022	1,108	1,305	0,043	0,904	1,256	0,039	0,950
	15	1,471	0,043	0,837	1,380	0,027	0,977	1,333	0,021	1,087
	10	1,694	0,009	1,694	1,705	0,069	0,724	-	-	-

La magnitud del coeficiente cinético k disminuye con la reducción de la temperatura en los tres lotes. Esto sugiere que a temperaturas inferiores la velocidad de difusión es menor, lo que a su vez es consistente con la capacidad de evaporación del agua a temperaturas bajas.

No se observó una correlación clara entre el factor n y la temperatura. Es decir, este parámetro no se ve afectado por las condiciones de almacenamiento donde la masa de los granos, el volumen del recipiente y el área de contacto se mantuvo constante.

Se observó que el coeficiente c tiende a aumentar a medida que la temperatura disminuye de manera consistente para todos los lotes como se ilustra en la tabla 16. Esta relación entre la temperatura y la transferencia de masa es consecuente con los hallazgos de Murillo Jiménez (2020) en la liberación de CO₂ en café tostado.

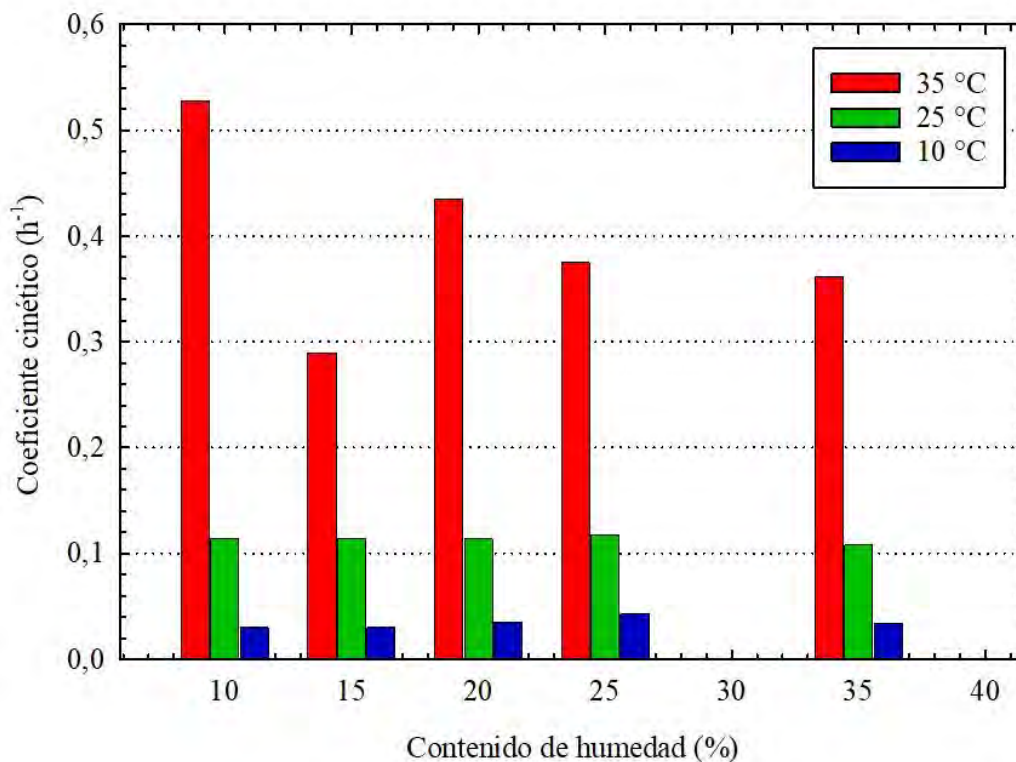


Figura 22. Relación entre el coeficiente cinético de la ecuación 8 para la rapidez de equilibrio de la humedad relativa en cinco niveles del contenido de humedad en el café miel.

La figura 22 presenta para un mismo contenido de humedad, la rapidez para alcanzar la humedad relativa de equilibrio aumenta cuando aumenta la temperatura de almacenamiento. Esto se debe a que, a temperaturas más altas, las moléculas de agua poseen una mayor energía cinética, lo que propicia los procesos de difusión de la humedad (Çengel 2011). Además, el incremento en la energía cinética de traslación de las moléculas aumenta la velocidad de vaporización y consecuentemente la presión de vapor (Hougen, Watson, y Ragatz 2021). Los resultados de este estudio muestran que un incremento de la temperatura provoca una mayor diferencia entre la presión de vapor de la superficie del grano y la presión de vapor del aire, lo que propicia una mayor tasa de evaporación y consecuentemente una mayor rapidez de equilibrio higroscópico. Esta tendencia es consistente para el café miel a los diferentes contenidos de humedad evaluados.

Por otra parte, el contenido de humedad del grano parece influir en la rapidez de equilibrio de la humedad relativa, sin embargo, la rapidez de equilibrio higroscópico depende en mayor medida de la temperatura de almacenamiento. A partir de los datos obtenidos se podría afirmar

que el efecto de la temperatura es relevante en el equilibrio de la humedad relativa como se presenta en la figura 23.

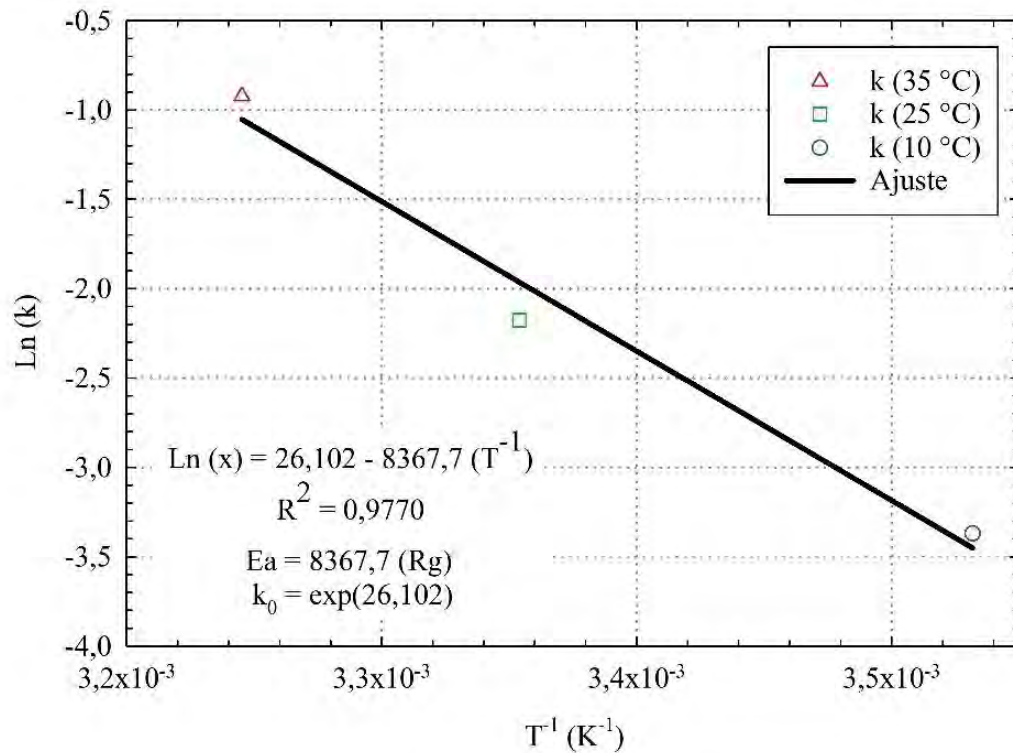


Figura 23. Ajuste lineal de la inversa de la temperatura de almacenamiento y el logaritmo de la rapidez de equilibrio de la humedad relativa.

Como se muestra en la figura 23, la rapidez de equilibrio de la humedad relativa obtenidos de manera experimental a 10, 25 y 35 °C se ajustan a una línea recta con un coeficiente de determinación R^2 de 0,9770, que indica que es un ajuste adecuado similar al obtenido por Vargas-Elías et al. (2016). en café tostado. El producto de la pendiente del ajuste lineal y la constante universal de los gases permite determinar la energía de activación de 69569,06 J/mol que es la energía mínima para que inicie la estabilización en la humedad relativa del aire en contacto con el café miel. Este valor se encuentra dentro del rango de energías de activación para productos agrícolas, en un rango de 12,7 a 110 kJ mol⁻¹, reportadas por Zogzas, Maroulis, y Marinos-Kouris (1996). Se ilustra la manera en la que la temperatura de almacenamiento afecta la rapidez de equilibrio higroscópico para los granos de café miel, donde a mayor temperatura se alcanza más rápidamente el equilibrio, debido a un incremento en la energía cinética del sistema.

La ecuación 20 describe el coeficiente cinético del equilibrio higroscópico en el aire donde se aproxima la rapidez como una función de la temperatura de almacenamiento utilizando el modelo 8 para el café miel.

$$k = 2,17e^{11} * \exp \left(\frac{69569,06}{8,314(T + 273,15)} \right) \quad 20$$

En el caso de los granos de café miel almacenados en un recipiente de vidrio, la tasa de difusión efectiva desde los granos hacia el aire del recipiente es proporcional al gradiente de humedad entre el agua contenida en los granos y el agua presente en el aire. Este comportamiento es consecuente con lo señalado por Çengel (2011), quien establece que la difusión de una especie en un medio gaseoso depende del gradiente de concentración.

Cuando se estabiliza la humedad se espera que el grano, se pueda considerar un material isotrópico. Según Hibbeler (2006) los materiales isotrópicos se caracterizan por tener las mismas propiedades en todas las direcciones. Entonces la humedad y la concentración de vapor en el grano es uniforme en todas las direcciones y en su interior. Esto implica que la tasa de difusión y distribución de la humedad es homogénea, tanto en términos de dirección como distribución.

En granos de café miel con alto contenido de humedad, la presión de vapor interna es mayor que la del aire en el recipiente, debido a la mayor cantidad de agua disponible para evaporarse. Inicialmente los granos pierden vapor de agua de manera acelerada provocando una disminución en su presión de vapor. Por el contrario el aire gana humedad (presión de vapor aumenta) y su capacidad para absorber vapor de agua será menor, por tanto, el proceso se ralentizará hasta que la presión de vapor de los granos se equilibra con la presión de vapor del aire (Brooker, Bakker-Arkema, y Hall 1992). En contraste, los granos con menor contenido de humedad tienen una presión de vapor más cercana a la del aire circundante, lo cual favorece que alcancen el equilibrio en un tiempo menor.

En la figura 24 se ilustra el efecto del contenido de humedad, temperatura de almacenamiento en los granos café miel y el tiempo en estabilizarse el aire circundante con los granos.

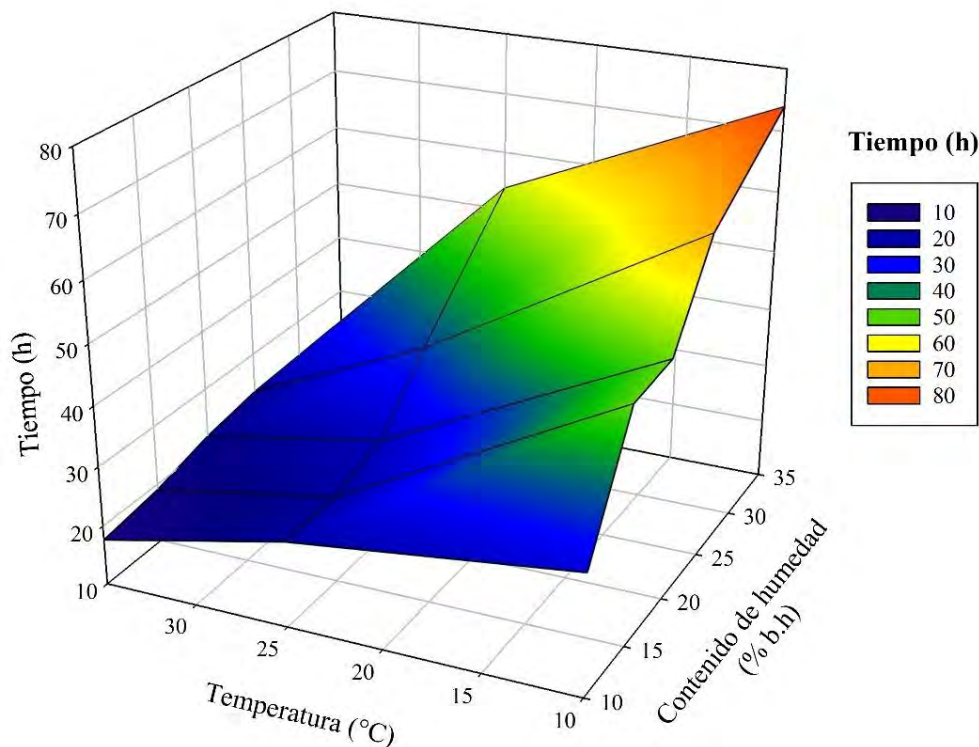


Figura 24. Efecto de la temperatura de almacenamiento y el contenido de humedad del café miel en el tiempo para la estabilización higroscópica del aire.

Para un contenido de humedad del grano dado, a medida que la temperatura de almacenamiento disminuye, el tiempo requerido para alcanzar el equilibrio aumenta. Entonces, para un contenido de humedad del 10 % b.h. almacenado a 35 °C, el tiempo de equilibrio es de 10 horas. Sin embargo, al disminuir la temperatura a 10 °C, el tiempo se extiende a 30 h. Se observa que a medida que el contenido de humedad del grano disminuye, el tiempo también lo hace, lo cual sucede a las tres temperaturas evaluadas. Por ejemplo, las muestras almacenadas a 25 °C cuando se comparan los contenidos de humedad de 10 y 35 % b.h. el tiempo aumenta de 10 a 50 h, respectivamente.

Por otra parte, los granos con contenidos de humedad elevados que se encuentran almacenados a baja temperatura requieren más horas para alcanzar el equilibrio higroscópico, lo cual se representa con colores amarillos, naranjas y rojos. En contraste, los bajos contenidos de humedad del grano almacenados a elevadas temperaturas requieren menos horas, lo cual se representa en azul. Los tiempos de equilibrio higroscópico obtenidos por lote se presentan en la tabla 17.

Tabla 17. Cuadro resumen del tiempo de equilibrio higroscópico en el aire en función de la temperatura de almacenamiento y contenido de humedad en los granos determinado con el modelo 8.

Lote	Contenido de humedad (%b.h)	Tiempo (h)		
		35 °C	25 °C	10 °C
1	35	30,25	46,33	71,21
	25	29,42	41,42	69,24
	20	25,09	30,53	51,60
	15	21,00	25,96	48,25
	10	18,98	27,86	32,52
2	35	21,65	44,57	75,57
	25	21,58	39,79	58,77
	20	19,25	25,84	49,17
	15	17,33	25,33	50,75
	10	14,50	20,33	32,42
3	35	21,17	60,24	74,58
	25	19,33	31,33	58,09
	20	18,25	24,60	53,30
	15	17,83	22,66	51,31

No se presenta el 10 % b.h. del lote 3 debido a que se secó por debajo de este contenido de humedad.

En la figura 25 se ilustra la cinética de equilibrio higroscópico del café miel en desorción, cada etapa se representa con un color diferente. La etapa I o estado transitorio, representada en color rosa, corresponde al tiempo transcurrido desde que se colocan las muestras en el recipiente hasta alcanzar el punto de inflexión de la humedad relativa. En esta etapa se presenta una disminución rápida de la humedad relativa, debido a que el pergamino, que es la capa externa del grano, está más seco en comparación con el grano oro. Al estar expuesto al aire en el recipiente, el pergamino absorbe la humedad del entorno, mientras que la humedad interna del grano migra en el sentido del gradiente de concentración.

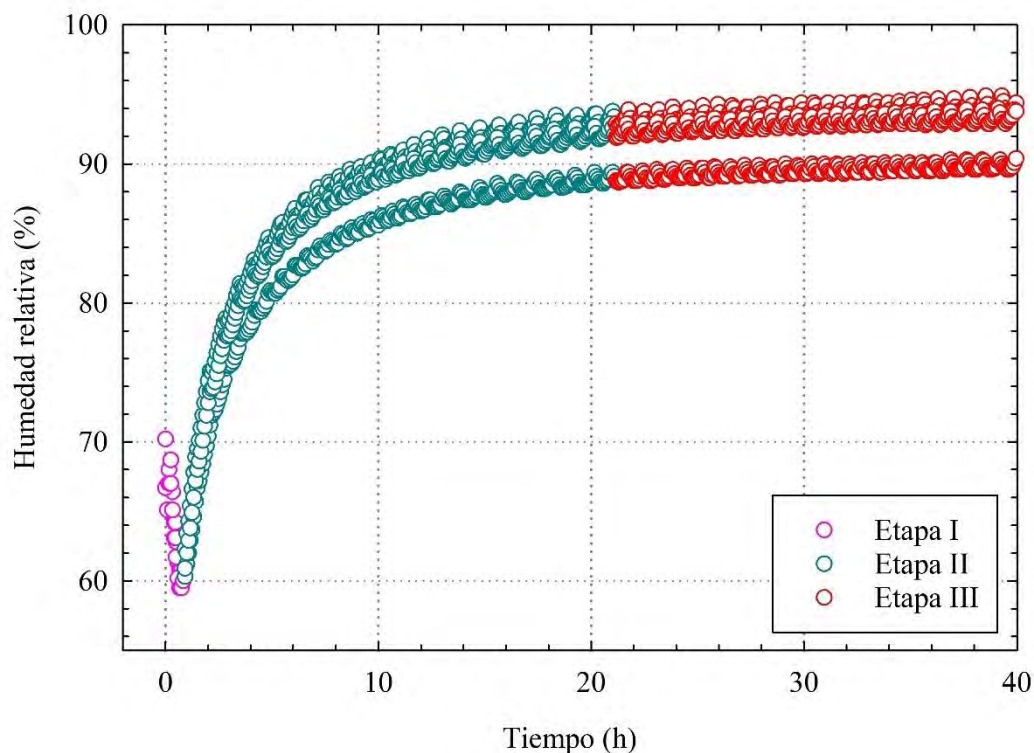


Figura 25. Etapas de la cinética de equilibrio higroscópico del café miel a 35 °C.

La etapa II o estado estacionario, representada en color celeste, muestra una tendencia exponencial creciente desde que finaliza la etapa I hasta que se alcanza el equilibrio con la humedad relativa del aire. El tiempo requerido para que la muestra se estabilice se denomina tiempo efectivo, cuyos valores se presentan en la tabla 17.

Para determinar el tiempo total de equilibrio, se debe sumar el tiempo de la fase transitoria (etapa I) y los tiempos de equilibrio de las muestras almacenadas a diferentes temperaturas durante la fase estacionaria (Etapa II). En el caso de las muestras a 35 °C, es necesario añadir 0,75 horas; para las muestras a 25 °C, 1,07 horas; y para las muestras a 10 °C, 1,83 horas. Cabe destacar que la fase transitoria no fue considerada en el análisis debido a la dificultad para seleccionar los modelos adecuados para representar este proceso.

En la Figura 26 se observa el efecto de la razón de humedad versus el tiempo (h) para los tres lotes de café miel almacenados a 35, 25 y 10 °C. Las curvas para cada temperatura indican cómo varía la relación de humedad en función del tiempo hasta alcanzar el equilibrio.

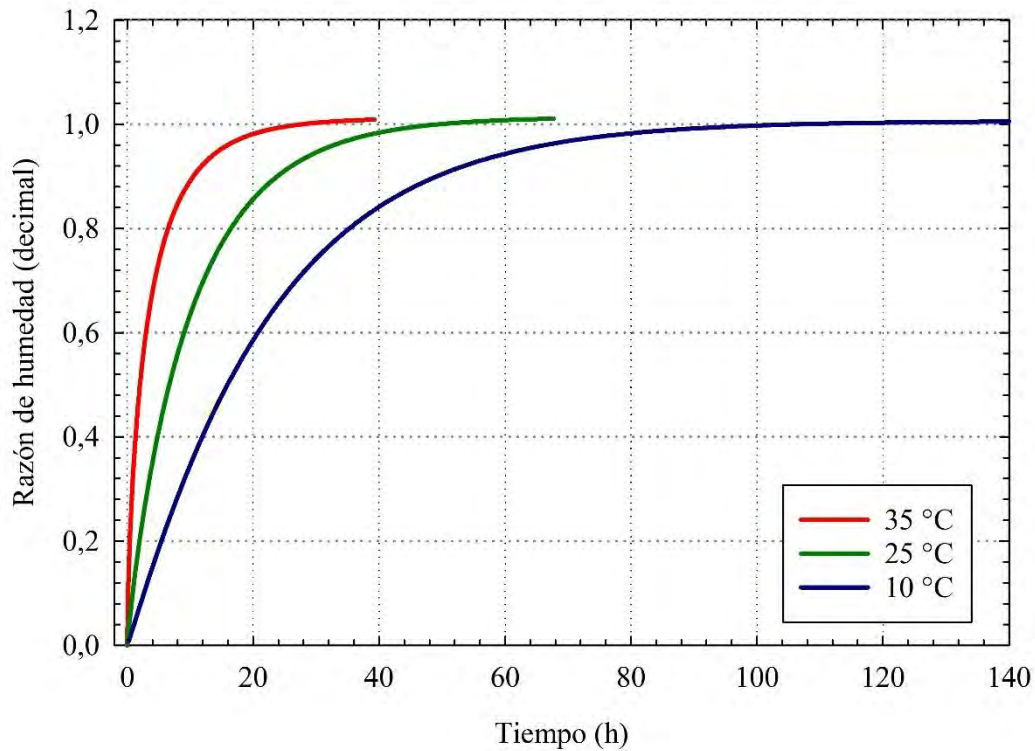


Figura 26. Efecto de la temperatura en la cinética de equilibrio higroscópico de los tres lotes de café miel almacenados a 10, 25 y 35 °C.

La tendencia sugiere que, a menor temperatura, mayor tiempo para alcanzar el equilibrio. Las muestras de café almacenadas a 10 °C, representada por la curva azul requiere 100 horas para estabilizarse. Mientras que se requieren 30 y 50 horas para las temperaturas de almacenamiento de 35, 25 °C, respectivamente. La estabilización de las muestras de café miel fue descrita a través de la cinética de equilibrio de la humedad relativa que se basa en la de transferencia de masa de los granos al aire.

5.2.5. Efecto de la temperatura de almacenamiento y el contenido de humedad en el equilibrio térmico.

Se registraron un total de 14 400 datos de temperatura del aire a lo largo de 40 horas de experimentación. Sin embargo, estos datos fueron filtrados y reducidos a 3 600, lo que representa el 25 % del total registrado, asegurando una adecuada representatividad de las muestras de café miel con un contenido de humedad del 20 % b.h. almacenadas a 35 °C. Estos datos se ilustran en la figura 27. Los datos de temperatura se transformaron en razones de temperatura considerando las oscilaciones del horno, las cuales fueron de 0,73 °C, un valor superior a la incertidumbre del equipo.

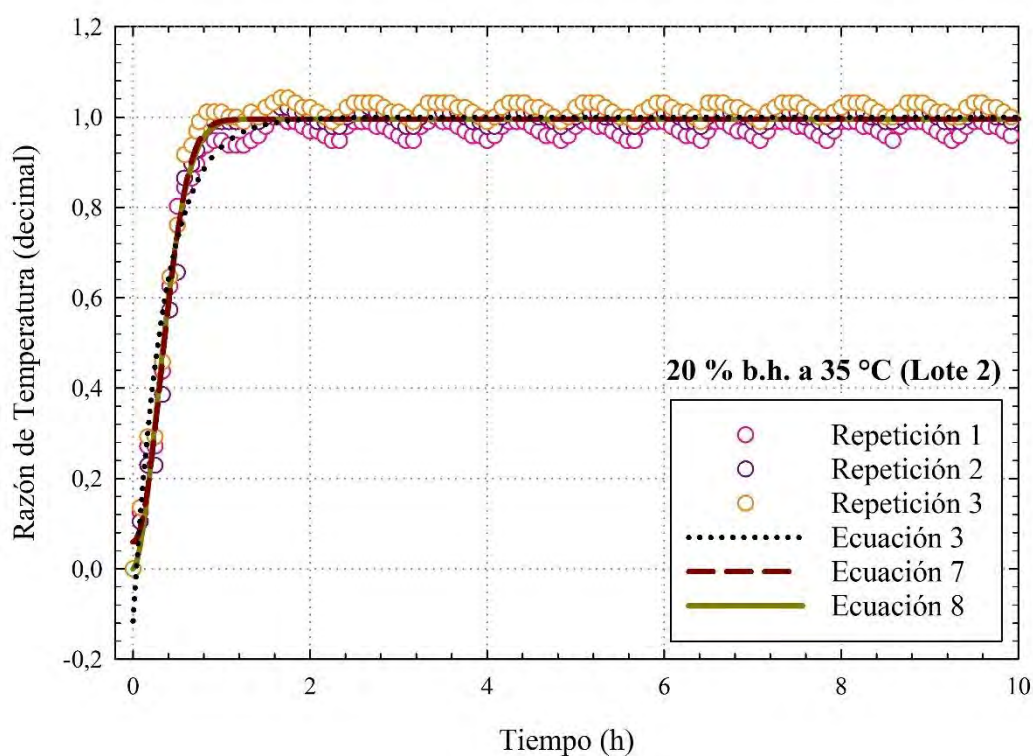


Figura 27. Modelos para el ajuste a la cinética de equilibrio térmico del aire en contacto con los granos de café miel a 20 % b.h. del lote 2 a 35 °C.

Los coeficientes de la regresión no lineal obtenidos para las tres ecuaciones poseen valores de coeficientes de determinación (R^2) superiores al 96 % y errores estándar de estimación inferiores (EEE) a 0,0240. Estos resultados indican que los tres modelos son apropiados para representar la cinética del equilibrio en la temperatura de 35 °C como se presentan en la tabla 18. Se evaluó la idoneidad de los modelos a partir del análisis de los residuos para describir la cinética de equilibrio térmico a 35 °C como se presenta en la figura 28.

Tabla 18. Coeficientes y parámetros estadísticos de los modelos de ajuste de la cinética de equilibrio térmico del café miel a 20 % b.h. almacenado a 35 °C.

Modelo	y0 (%)	c (%)	a (%)	k (h ⁻¹)	n (adim)	R ² (dec.)	R ² adj (dec.)	EEE (dec.)
Ecuación 3	-0,115	-	1,115	2,839	-	0,937	0,937	0,041
Ecuación 7	-	0,995	0,941	5,408	2,058	0,967	0,966	0,030
Ecuación 8	-	-	-	4,790	1,809	0,965	0,965	0,031

adim: adimensionales. *EEE*: error estándar de estimación. *R²*: Coeficiente de determinación. (**) Los *p*-valores en la determinación de los coeficientes fue inferior a 0,0001.

La densidad de los residuos se ubica entre -0,25 y 0,15 y todos los modelos evidencian una cercanía a cero en los datos predichos más cercanos a 1, lo cual indica que las ecuaciones ajustan mejor hacia la etapa final del proceso. Siendo esto una tendencia esperada ya que esa etapa es cuando se alcanza el equilibrio, por tanto, la magnitud de los residuos es menor.

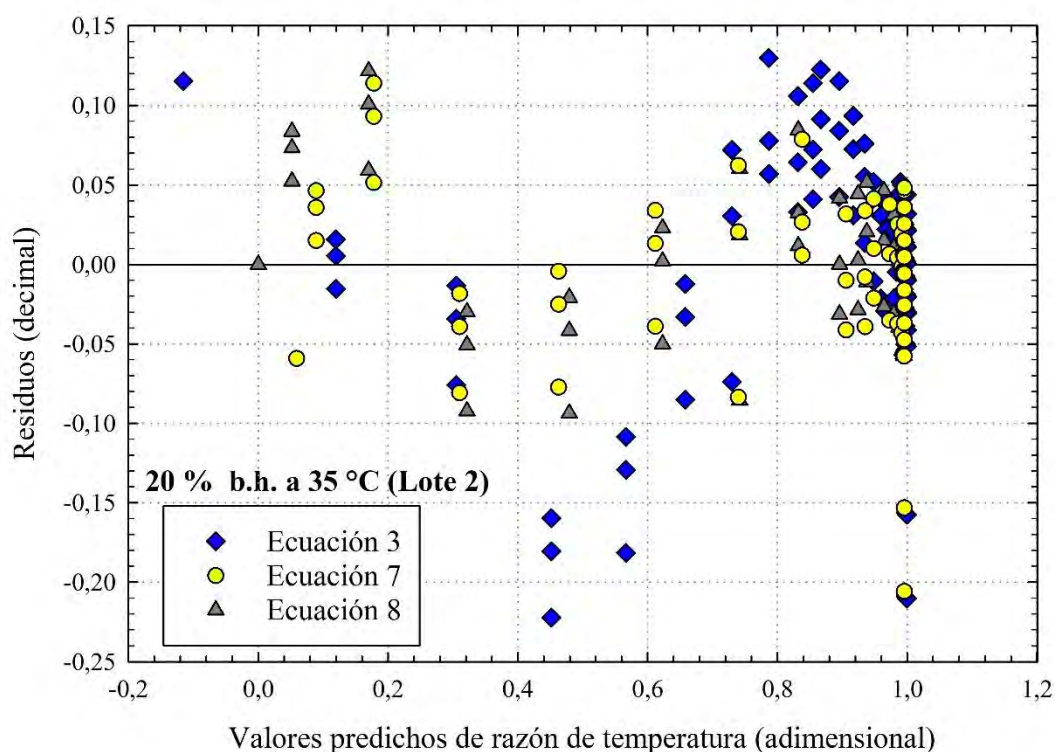


Figura 28. Análisis de los residuos de las ecuaciones 3, 7 y 8 en la cinética de equilibrio térmico del café miel 20 % b.h. durante el almacenamiento a 35 °C.

Las ecuaciones 7 y 8 presentan una distribución más uniforme y cercana a cero, por esta razón representan los ajustes más adecuados para describir el equilibrio térmico de los granos de café miel almacenados a 35 °C, sin embargo, se selecciona la ecuación 8 debido a que es un modelo

con menos parámetros. Se ajustó la ecuación 8 a la cinética de equilibrio térmico para cada contenido de humedad (figura 29), con el fin de observar el efecto en la rapidez para alcanzar el equilibrio térmico.

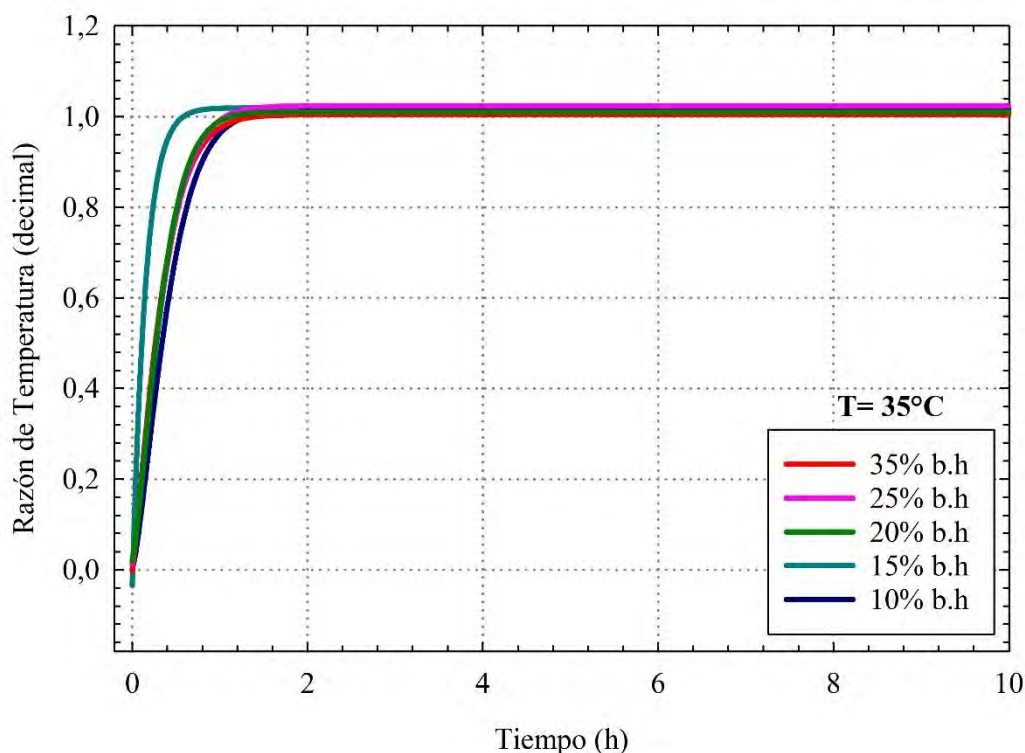


Figura 29. Cinética de la razón de la temperatura del aire en contacto con los granos hasta alcanzar el equilibrio térmico ajustados con la ecuación 8 para los contenidos de humedad en estudio a 35°C.

En la figura 29 se observa una tendencia similar entre las cinéticas de equilibrio a los contenidos de humedad evaluados. Durante, la primera hora aumentan rápidamente su razón de humedad hasta alcanzar valores cercanos a 1, lo cual indica que alcanzó el equilibrio térmico. Asimismo, el equilibrio en la temperatura del aire se alcanzó en menos de 2 h independientemente del contenido de humedad del grano.

Las muestras de café almacenadas a 10 °C presentaron un enfriamiento del sistema que provocó una tendencia exponencialmente decreciente en la razón de la temperatura. La cámara de almacenamiento presentó ciclos de refrigeración que ocasionaron variaciones de 0,70 °C en la temperatura. Para determinar el tiempo de equilibrio, se utilizó como criterio que la derivada fuera inferior a 0,015, valor que corresponde a la humedad relativa dentro del rango de incertidumbre de los sensores, obteniendo así los cinco modelos que se ilustran en la figura 30.

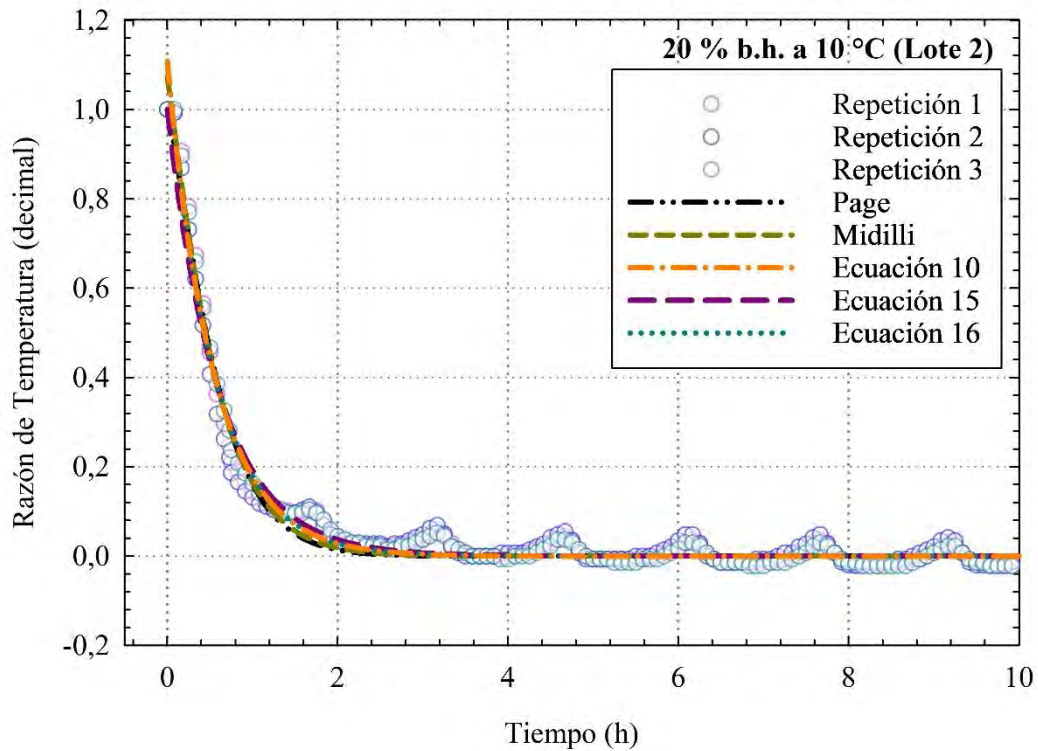


Figura 30. Modelos matemáticos de ajuste a la cinética de equilibrio de la temperatura del aire en contacto con los granos de café miel a 20 % b.h. almacenados a 10 °C.

Los cinco modelos matemáticos evidencian una buena aproximación de los datos experimentales. Inicialmente, se muestra una rápida disminución de la razón de la temperatura producto del proceso de enfriamiento del sistema, el cual se estabiliza gradualmente. Las curvas se estabilizan en 4 horas, lo que sugiere que este corresponde al tiempo que el sistema alcanza el equilibrio en la temperatura del aire en contacto con el café. Los modelos matemáticos presentan coeficientes de determinación (R^2) superiores a 96 % y errores estándar de estimación inferiores a 0,0245, lo cual indica que los cinco modelos son apropiados para representar la cinética de equilibrio térmico. Estos resultados se presentan en la tabla 19.

Tabla 19. Parámetros estadísticos de los modelos de ajuste de la cinética de equilibrio de la temperatura del aire en contacto con el café miel a 20 % b.h. almacenado a 10 °C.

Modelo	y0 (%)	a (%)	k (h ⁻¹)	n (adim)	R ² (dec.)	R ² adj (dec.)	EEE (dec.)
Page	-	-	1,824	1,231	0,971	0,971	0,025
Midilli	-	1,073	1,871	1,121	0,973	0,973	0,025
Ecuación 10	-7,371E-4	1,107	1,821	-	0,972	0,972	0,025
Ecuación 15	-	-	1,653	-	0,966	0,966	0,027
Ecuación 16	-	-	1,825	1,107	0,972	0,972	0,025

adim: adimensionales. EEE: error estándar de estimación. R²: Coeficiente de determinación. (**) Los p-valores en la determinación de los coeficientes fue inferior a 0,0001.

Se evalúan las diferencias entre los valores que se observan experimentalmente y los que se estiman con los cinco modelos para evaluar su idoneidad. Todos los modelos presentaron una distribución de los residuos dispersa y sinusoidal (Figura 31), con una mayor magnitud de los residuos cuando los datos predichos resultaron superiores a 0,4 debido a que estos corresponden a las muestras de café miel que se colocan en los recipientes en el tiempo previo al ingreso a la cámara fría.

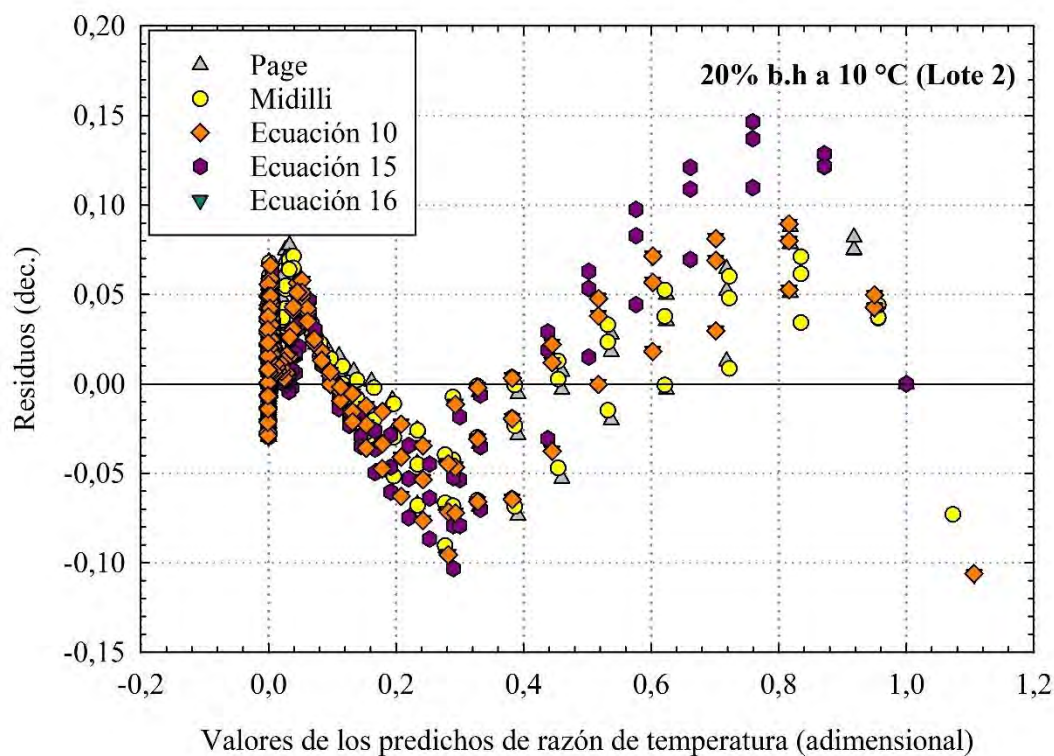


Figura 31. Análisis de residuos de los modelos Page, Midilli, ec. 8, 13 y 14 de la cinética de equilibrio térmico del café miel 20 % b.h. durante el almacenamiento a 10 °C.

Los cinco modelos presentan una variación de $\pm 0,15$ en la magnitud de los residuos. El modelo de Midilli y Page es el que presenta una distribución cercana a 0 por lo tanto, este modelo es adecuado para describir el enfriamiento del aire en contacto con la superficie de los granos, sin embargo, el modelo de Page es más sencillo, por lo tanto, este corresponde al modelo seleccionado. El enfriamiento del aire en contacto con la superficie de los granos fue independiente del contenido de humedad del café, como se muestra en la figura 32.

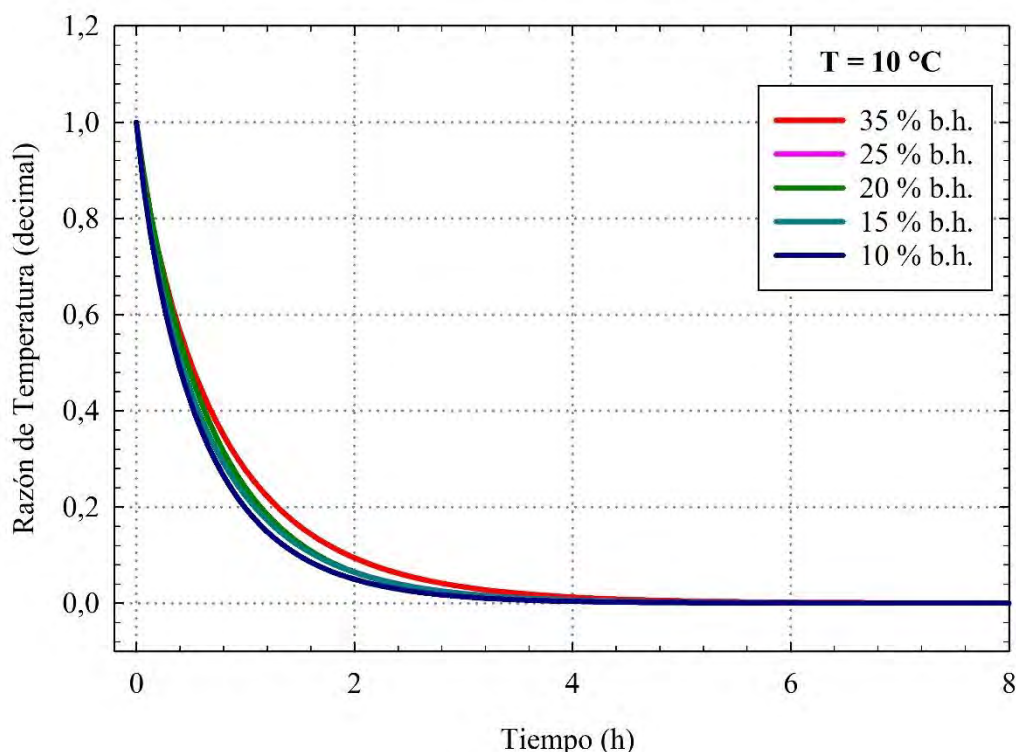


Figura 32. Cinética de la razón de la temperatura durante el enfriamiento ajustado con la ecuación de Page para los cinco contenidos de humedad.

Como se muestra en la figura 32, se presenta un descenso acelerado en la rapidez de la razón de temperatura versus el tiempo (h) para los cinco contenidos de humedad. Después de 4 h la gráfica se acerca asintóticamente a cero. Este resultado indica que el sistema alcanzó el equilibrio.

En la tabla 20 se muestran los tiempos de equilibrio térmico del grano de café miel a cinco contenidos de humedad y dos temperaturas de almacenamiento de las muestras de los tres lotes evaluados. Se observan diferencias significativas entre los lotes, principalmente en los tiempos de equilibrio a 10 y 20 % b.h. almacenados a 10 °C. Estos son superiores a los tiempos obtenidos en los otros lotes.

Tabla 20. Tiempo requerido para alcanzar el equilibrio térmico.

T (°C)	CH (%b.h)	Lote 1	Lote 2	Lote 3	Promedio General (n=9)	Modelado Python (n=9)	Error (%)
10	35	3,85 ± 0,10	9,08 ± 0,60	5,50 ± 0,42	6,15 ± 2,34	6,71 ± 0,001	8,35
	25	6,14 ± 0,24	6,08 ± 0,55	6,69 ± 0,70	6,31 ± 0,55	6,08 ± 0,001	3,78
	20	4,59 ± 0,63	3,92 ± 0,30	10,39 ± 0,38	6,30 ± 3,11	5,92 ± 0,001	6,42
	15	6,56 ± 1,83	4,78 ± 0,19	6,78 ± 0,40	6,04 ± 1,34	6,00 ± 0,001	0,67
	10	5,16 ± 0,14	7,33 ± 0,51	4,47 ± 0,88	5,66 ± 1,39	4,67 ± 0,001	21,20
35	35	2,14 ± 0,05	1,69 ± 0,13	2,17 ± 0,14	2,00 ± 0,25	1,58 ± 0,01	26,58
	25	2,39 ± 0,05	1,97 ± 0,13	2,38 ± 0,00	2,25 ± 0,22	1,58 ± 0,01	42,41
	20	2,17 ± 0,00	2,72 ± 0,13	2,42 ± 0,36	2,06 ± 0,41	1,42 ± 0,01	45,07
	15	1,19 ± 0,32	2,08 ± 0,09	2,30 ± 0,21	1,86 ± 0,55	1,67 ± 0,01	11,38
	10	1,81 ± 0,33	1,31 ± 0,10	2,50 ± 0,65	2,08 ± 0,49	1,75 ± 0,01	18,86

El promedio general obtenido presenta datos de desviación estándar cercanos a los obtenidos individualmente para cada lote. Sin embargo, estos datos no son consistentes, si no que varían para cada contenido de humedad. En contraste los valores obtenidos mediante el modelado en Python presentan datos significativamente más precisos, pues su error estándar de estimación corresponde a $\pm 0,001$. Esto se debe a que el modelado de Python toma las nueve repeticiones por cada contenido de humedad y realiza un ajuste de esos datos, mientras que el modelo general considera los valores promedio de los lotes y realiza un ajuste de estos. Cabe destacar que no se presentan los datos del almacenamiento a 25 °C debido a que el sistema se encontraba en equilibrio térmico con las condiciones de almacenamiento.

En la tabla 21 se observa que entre 35 % y 15 % b.h., la rapidez de equilibrio k aumenta cuando el contenido de humedad disminuye. Esta tendencia no es lineal y varía entre los lotes. Este resultado podría ser producto de la naturaleza del café miel, su composición química. Mientras que los valores del coeficiente c tienden a variar con respecto al cambio en el contenido de humedad sin obtenerse una tendencia definida en los tres lotes. Esto puede deberse a otras variables o propiedades del café miel.

Tabla 21. Coeficientes obtenidos de la ecuación 8 para el grano de café miel a cinco contenidos de humedad diferentes y a 35 °C de almacenamiento.

Lote	Contenido de humedad (%b.h)	k (h⁻¹)	n (adim)	c (°C)	R² adj	EEE (dec.)
1	35	2,882	1,581	1,025	0,959	0,037
	25	3,378	1,284	1,045	0,932	0,043
	20	3,378	1,284	1,045	0,932	0,043
	15	9,841	1,285	1,048	0,821	0,070
	10	3,466	1,181	0,991	0,897	0,050
2	35	4,697	1,287	0,989	0,984	0,017
	25	3,482	1,642	1,031	0,980	0,025
	20	4,790	1,809	0,996	0,965	0,031
	15	6,489	1,042	1,002	0,953	0,031
	10	2,410	2,096	1,013	0,980	0,029
3	35	4,363	1,100	1,000	0,956	0,028
	25	4,022	1,054	0,995	0,968	0,024
	20	4,127	1,093	0,992	0,971	0,022
	15	6,042	0,912	1,008	0,940	0,032
	10	4,273	1,327	1,037	0,881	0,055

En la Tabla 22 se presentan los coeficientes obtenidos al ajustar la ecuación 8 para café miel almacenado a 10 °C, considerando los cinco contenidos de humedad (% b.h.) de los tres lotes diferentes.

Tabla 22. Coeficientes obtenidos con la ecuación 8 para café miel a cinco contenidos de humedad y almacenado a 10 °C.

Lote	Contenido de humedad (% b.h.)	$k(h^{-1})$	n (adim)	R^2 adj	EEE (dec.)
1	35	1,223	1,393	0,985	0,021
	25	1,223	1,393	0,985	0,021
	20	1,666	0,861	0,906	0,044
	15	1,323	0,854	0,954	0,032
	10	1,323	0,854	0,954	0,032
2	35	1,146	0,645	0,945	0,037
	25	1,483	0,815	0,974	0,022
	20	1,824	1,231	0,971	0,025
	15	2,048	0,945	0,911	0,040
	10	1,554	0,833	0,941	0,035
3	35	1,613	0,850	0,904	0,048
	25	1,421	0,897	0,972	0,025
	20	1,050	0,787	0,941	0,041
	15	1,317	0,875	0,907	0,048
	9,3	1,035	1,831	0,914	0,064

La rapidez de equilibrio de la temperatura en el aire en contacto con los granos de café parece ser sensible al contenido de humedad, pues aumenta a medida que disminuye el contenido de humedad. En contraste, el factor “ n ” no evidencia una correlación clara con el contenido de humedad.

5.2.6. Comparación entre los coeficientes cinéticos de las razones de la temperatura y la humedad relativa.

En la tabla 23 se presentan los datos correspondientes a la relación entre el coeficiente de la cinética de la razón de temperatura (K_t), el coeficiente de la cinética de la razón de la humedad relativa (K_{HR}) correspondientes a las muestras de los tres lotes almacenados a 10 y 35 °C a diferentes contenidos de humedad.

Tabla 23. Relación de los coeficientes de rapidez de la cinética de la temperatura y humedad relativa a 35 °C y 10 °C.

Lote	CH (%)	35 °C			10 °C		
		K_T	K_{HR}	K_T/K_{HR}	K_T	K_{HR}	K_T/K_{HR}
1	35	2,882	0,329	8,76	1,223	0,036	34,03
	25	3,378	0,252	13,40	1,223	0,048	25,52
	20	3,378	0,476	7,10	1,666	0,022	77,05
	15	9,841	0,175	56,23	1,323	0,043	32,65
	10	3,466	0,329	10,53	1,323	-	-
2	35	4,697	0,361	13,01	1,146	0,024	47,71
	25	3,482	0,426	8,17	1,483	0,040	38,45
	20	4,790	0,602	7,96	1,824	0,043	43,51
	15	6,489	0,453	14,32	2,048	0,027	76,70
	10	2,410	0,795	3,03	1,554	0,069	23,55
3	35	4,363	0,393	11,10	1,613	0,044	37,61
	25	4,022	0,449	8,96	1,421	0,040	37,60
	20	4,127	0,260	15,87	1,050	0,039	31,13
	15	6,042	0,259	23,33	1,317	0,021	64,33
	10	4,273	-	-	1,035	-	-
Promedio		4,53	0,40	14,41	1,46	0,04	40,89
Desviación estándar		1,90	0,16	12,96	0,29	0,01	17,75

La comparación entre los coeficientes cinéticos indica que el proceso de transferencia térmica ocurre 14 veces más rápido que el proceso de transferencia de masa a 35 °C y 41 veces más rápido a 10 °C. Esto se debe a que la rapidez de equilibrio térmico (K_T) en el enfriamiento es tres veces menor en contraste con el calentamiento, mientras que el coeficiente de equilibrio higroscópico (K_{HR}) a 10 °C es 10 veces inferior al obtenido a 35 °C. Esta gran diferencia en K_{HR} a 10 °C provoca que la relación K_T/K_{HR} sea mayor en comparación con la observada a 35 °C.

5.2.7. Cinética de equilibrio higroscópico a 9,3 % b.h.

Los granos de café miel con contenidos de humedad bajos 9,3 % b.h. presentaron un comportamiento similar al de un material desecante. La humedad relativa del aire disminuyó exponencialmente. Para su ajuste, se realizó una preselección de las ecuaciones que presentaron coeficientes de determinación superiores a 92 %. En la figura 33 se presentan las curvas de ajuste de la cinética de equilibrio higroscópico en café miel a 9,3 % b.h con los modelos.

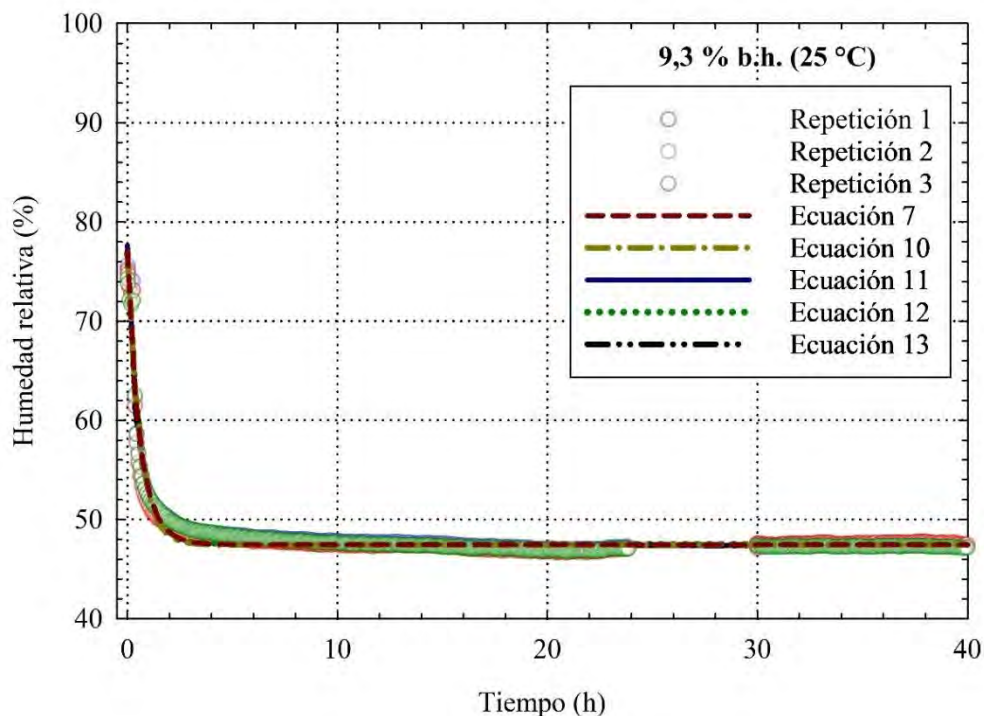


Figura 33. Ajuste de la cinética de equilibrio higroscópico del aire en contacto con los granos de café miel a 9,3 % b.h. almacenados a 25 °C.

Se observa una tendencia decreciente en la cinética de equilibrio higroscópico del aire en contacto con el café con mucílago a un contenido de humedad de 9,3 % b.h. Esto se debe a que los granos poseen una menor concentración de agua que el aire del entorno, en consecuencia, el agua presente en el aire se acumula en la superficie del mucílago y después en el pergamino. Posteriormente, la humedad del aire por difusión penetra la superficie del grano hasta que se estabiliza el sistema (Rodríguez y Hernández-Ruíz 2020).

En la tabla 24 se presentan los parámetros estadísticos de los modelos matemáticos obtenidos a partir del mejor ajuste de la cinética de equilibrio higroscópico del aire a altos contenidos de humedad. Las cinco ecuaciones presentan coeficientes de determinación superiores a 93 % y

errores estándares de desviación inferiores al 0,6 %, así como valores de $p < 0,0001$. Estos ajustes son apropiados para aproximar la cinética de equilibrio higroscópico del aire en contacto con los granos de café miel con contenidos de humedad bajos durante su almacenamiento.

Tabla 24. Parámetros estadísticos de los modelos de ajuste de la cinética de equilibrio higroscópico del aire en contacto con el café miel almacenado a 35 °C.

Modelo	y0 (%)	a (%)	b (h ⁻¹)	c (%)	d (h ⁻¹)	n (adim)	R ² adj (dec.)	EEE (%)
Ec. 7	47,4403	-0,6252	1,6868	-	-	0,9114	0,9341	0,5433
Ec. 10	47,4494	29,1740	1,7382	-	-	-	0,9337	0,5452
Ec. 11	47,3518	27,3247	2,2548	2,9517	0,2371	-	0,9523	0,4622
Ec. 12	-	29,1413	1,7708	47,5827	5,7548E-5	-	0,9349	0,5403
Ec. 13	47,1711	6,2069	-0,3772	0,0034	-	-	0,9458	0,4486

adim: adimensionales. EEE: error estándar de estimación. R²: Coeficiente de determinación. (**) Los p-valores en la determinación de los coeficientes fue inferior a 0,0001.

La Figura 34 muestra los resultados del análisis de los residuos. Este análisis se realizó para evaluar la idoneidad de estos modelos para describir el comportamiento de la cinética de equilibrio higroscópico del café miel a 9,3 % b.h. El resultado de este análisis muestra una distribución aleatoria de los residuos.

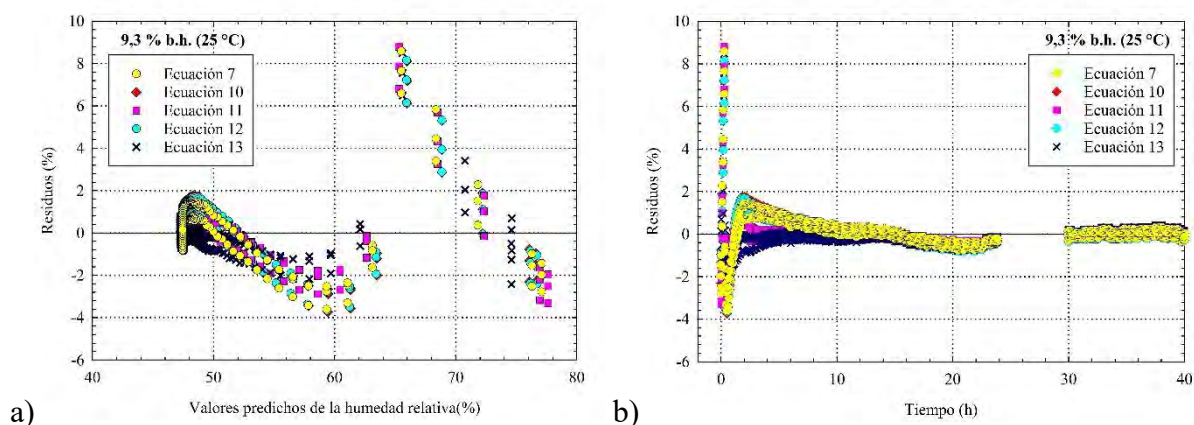


Figura 34. Análisis de residuos con respecto a valores predichos (a) y tiempo (b) de los modelos para representar la razón de humedad del aire en contacto con el café miel a 9,3 % b.h durante el almacenamiento a 25 °C.

En la figura 34 se observa una mayor aleatoriedad de los residuos en las primeras 2 horas del proceso (Figura 34b), correspondiente a los intervalos de humedad relativa (entre 64 y 80 %)

que está asociado con la absorción inicial de agua por parte de los granos al ingresar a los recipientes y cámaras de almacenamiento (Figura 34a). Después de 2 horas se observa que la mayor densidad de los residuos se encuentra entre -4 y 2 %, lo cual sugiere que las ecuaciones evaluadas presentan un ajuste adecuado a los datos experimentales. Dado que la ecuación 10 presenta una menor aleatoriedad de residuos en comparación con otras ecuaciones y valores de R^2 superior a las otras ecuaciones, es el mejor modelo para representar la tendencia descrita de cinética de equilibrio a contenidos de humedad inferiores a 10 % b.h.

5.3. Curva de equilibrio higroscópico del café con pergamino y mucílago

5.3.1. Selección de modelo de ajuste para la isoterma.

En la figura 35 se muestra la curva de equilibrio higroscópico de tres lotes de café con pergamino y mucílago almacenado a 35 °C. A humedades relativas entre 40 y 60 % el contenido de humedad del café miel corresponde a 8 y 12 % b.h. No obstante, a medida que la humedad relativa es superior al 70 % se muestra un incremento pronunciado en el contenido de humedad de equilibrio del grano. Esta tendencia es típica en alimentos con un alto contenido de azúcar, los cuales tienen la propiedad de absorber grandes cantidades de agua a altas humedades relativas (Samaniego-Esquerro, Boag, y Robertson 1991).

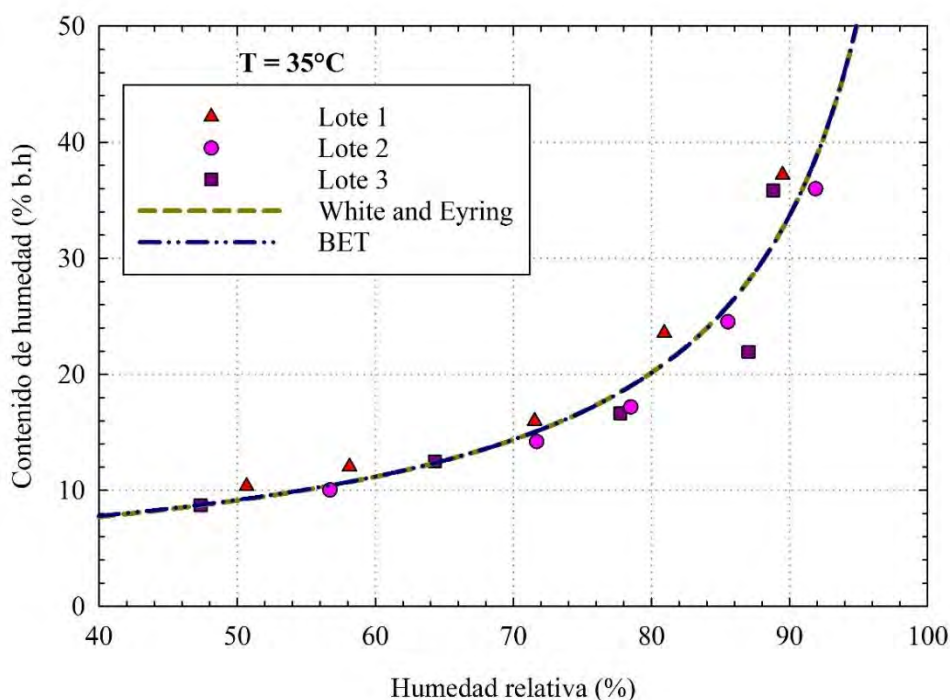


Figura 35. Curva de equilibrio higroscópico en desorción de los granos de café miel almacenados a 35 °C.

Los modelos de Brunauer, Emmett y Telle (BET) y White-Eyring ajustaron adecuadamente los datos experimentales como se ilustra en la figura 35. Además, presentan coeficientes de determinación superiores a 92 % y errores estándares de desviación inferiores al 0,6 %, así como valores de p inferiores a 0,0001. Esto sugiere que son ajustes apropiados para representar las curvas de equilibrio higroscópico del grano oro en desorción durante el almacenamiento a 35 °C, como se presenta en la tabla 25.

Tabla 25. Parámetros estadísticos de los modelos de ajuste de curva de equilibrio higroscópico del café miel almacenado a 35 °C.

Modelo	a (%)	b (dec)	c (%)	R ² (dec.)	R ² adj (dec)	EEE (%)
White and Eyring	-0,002	0,209	-	0,920	0,914	2,876
BET	-4,745	-	0,990	0,920	0,914	2,874

adim: adimensionales. *EEE:* error estándar de estimación. *R²:* Coeficiente de determinación. (*) Los p -valores en la determinación de los coeficientes fue superior a 0,0001.

Los dos modelos presentaron una distribución aleatoria con residuos positivos y negativos con un intervalo de magnitud similar entre -8 y 6 % como se ilustra en la figura 36. Dado que ambas ecuaciones se ubican a una misma distancia con respecto al cero y el mismo d coeficiente de determinación, ambos modelos representan apropiadamente este fenómeno.

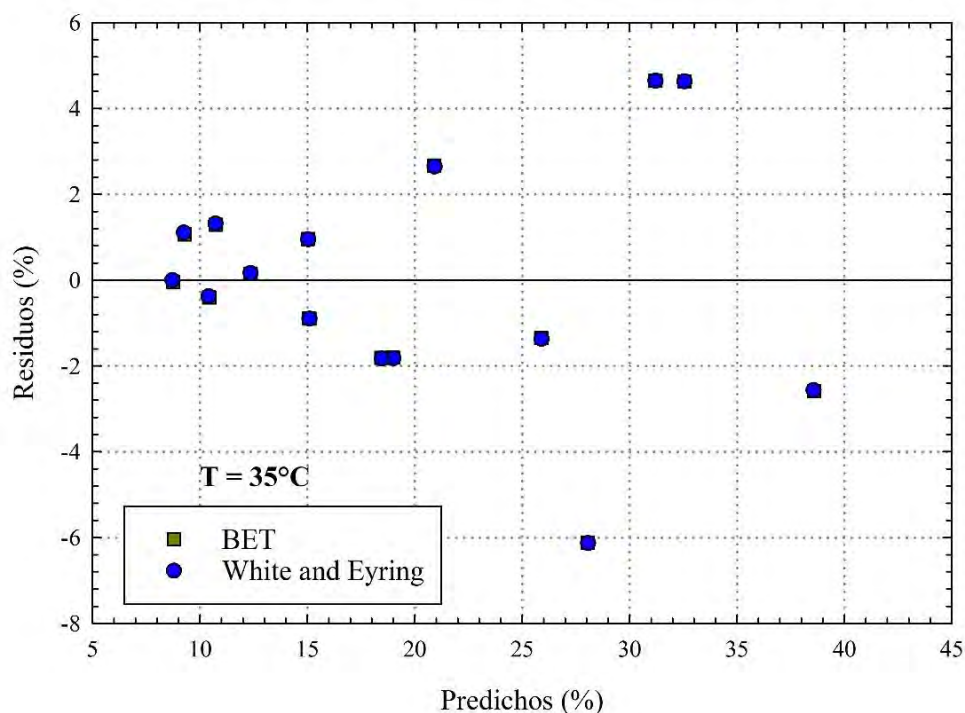


Figura 36. Análisis de residuos de los modelos para representar la curva de equilibrio higroscópico de café miel almacenado a 35 °C

La tabla 26 presenta los valores medios de humedad relativa de equilibrio obtenidos para los granos de café en pergamino con mucílago a 35 °C y contenidos de humedad entre 8,7 y 37,2 %. Se muestra que a una misma temperatura a medida que disminuye la humedad relativa del aire, hay una disminución del contenido de humedad del equilibrio. Este mismo fenómeno fue constatado por Valverde Chavarría (1993) al estudiar el equilibrio higroscópico en café oro y pergamino lavado por el método semi estático. Asimismo, se observa una mayor variabilidad en la desviación estándar de los datos de humedad relativa del aire con respecto al contenido de humedad en los granos.

Tabla 26. Contenido de humedad y humedad relativa de equilibrio en tres lotes de café miel almacenados a 35 °C.

Lote	Contenido de humedad (% b.h.)	Humedad relativa (%)
1	37,193 ± 0,867	89,49 ± 1,42
	23,564 ± 0,218	80,92 ± 0,78
	15,983 ± 0,135	71,54 ± 0,78
	12,034 ± 0,102	58,13 ± 0,67
	10,353 ± 0,103	50,67 ± 0,27
2	35,995 ± 0,334	91,88 ± 0,84
	24,533 ± 0,229	85,53 ± 1,09
	17,179 ± 0,109	78,51 ± 0,57
	14,198 ± 0,065	71,69 ± 0,74
	10,024 ± 0,097	56,71 ± 0,28
3	35,855 ± 0,251	88,82 ± 1,18
	22,937 ± 0,188	87,02 ± 1,34
	16,637 ± 0,081	77,74 ± 1,99
	12,514 ± 0,121	64,31 ± 0,80
	8,710 ± 0,077	47,35 ± 1,39

Basado en los datos ilustrados en la figura 37, se puede observar que a 65 % humedad relativa del aire el contenido de humedad corresponde a un 11,5 % b.h. para garantizar una conservación adecuada para los tres lotes de café con pergamino y mucílago. También, se muestran las isotermas de desorción del café con pergamino y sin mucílago conocido como lavado (R. Jiménez y Valverde 1999) y con mucílago reconocido como miel, los cuales se

obtienen mediante dos procesos de beneficiado diferentes: húmedo y semiseco, respectivamente (Á. Jiménez 2013).

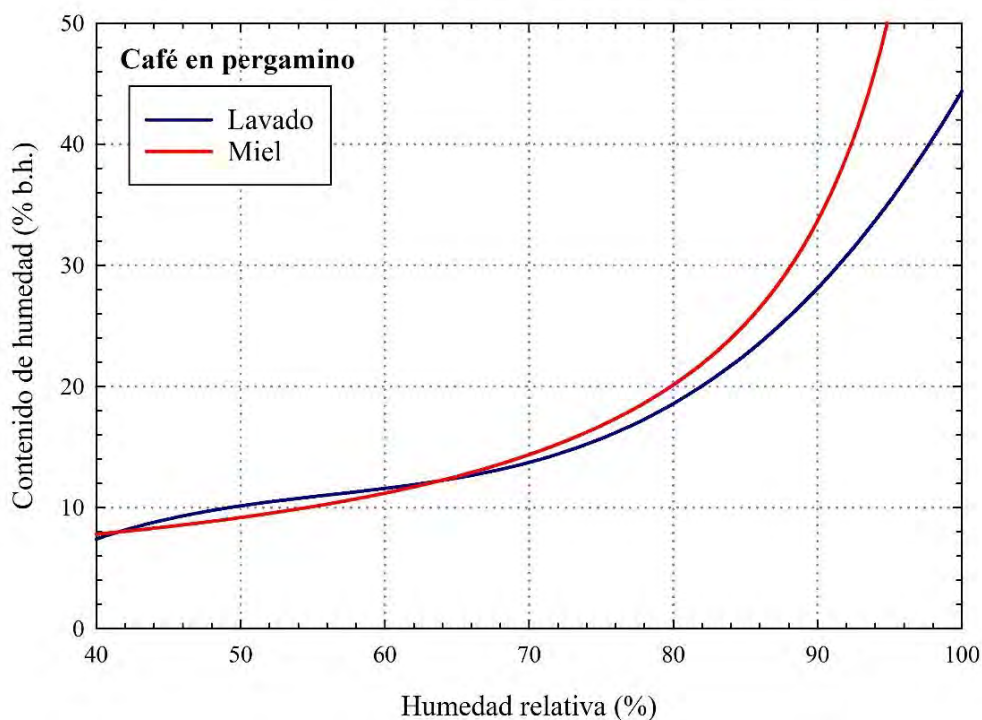


Figura 37. Comparación entre el café con pergamino, sin mucílago (lavado) y con mucílago (miel).

Se observa que el café lavado presenta una tendencia sigmoideal característica de una isoterma tipo II, mientras que el café en pergamino presenta una curva pronunciada hacia valores de humedad relativa elevados, es decir, una isoterma tipo III, la cual es típica de productos con altas concentraciones de azúcar (Osmayo Huacan 2023).

Las humedades relativas inferiores a 70 % en ambas curvas muestran una tendencia similar con incrementos mínimos en el contenido de humedad, lo que sugiere que la mayoría del agua está ligada a la estructura interna del grano. Sin embargo, a humedades relativas altas ambos tipos de café presentan un crecimiento acelerado en el contenido de humedad, siendo más pronunciado el del café miel en comparación con el café lavado (R. Jiménez y Valverde 1999). Esto sugiere que el mucílago del café miel podría retener más humedad, que es consecuente con los hallazgos de Afonso (2001) que señala que en el caso del café la presencia de cáscara y el pergamino contribuyen a un incremento en la humedad de equilibrio.

5.3.2. Selección del modelo de los componentes del café miel.

La Figura 38 presenta las isotermas de adsorción obtenidas para el café pergamino miel a 35°C. Se observa una clara relación no lineal entre la actividad de agua y el contenido de humedad, caracterizada por una curva de tipo III (Brunauer, Emmett, y Teller 1938).

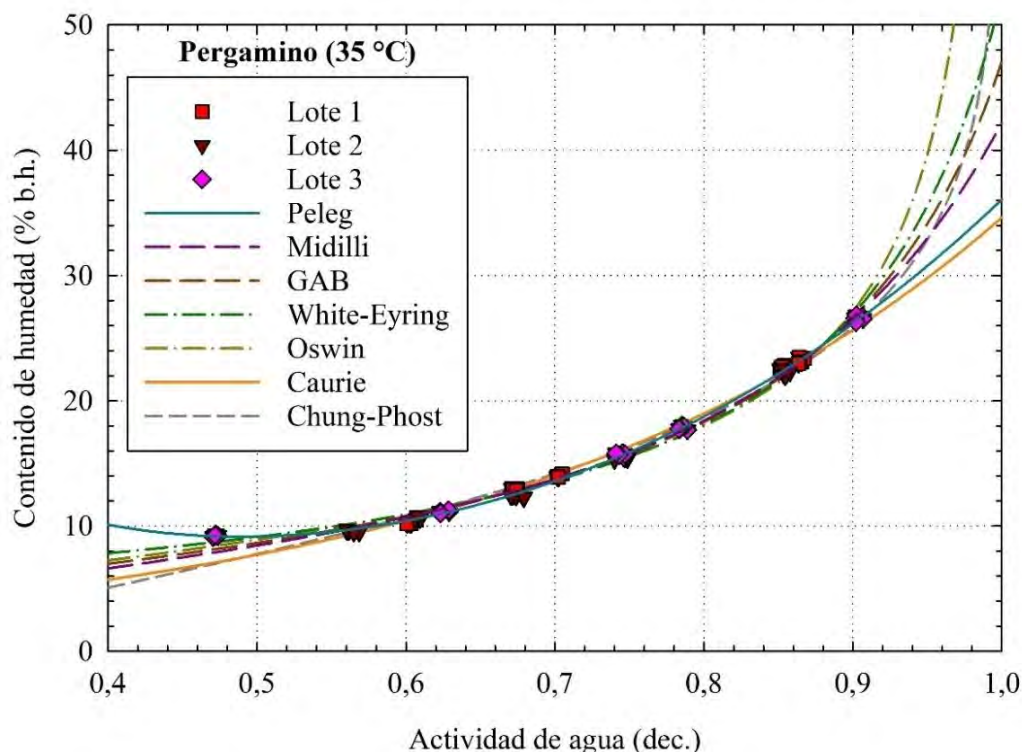


Figura 38. Comparación de modelos para representar la curva de equilibrio higroscópico del pergamino con mucílago almacenado a 35 °C.

Los parámetros estadísticos de los modelos matemáticos de mejor ajuste a la curva de equilibrio higroscópico en el contenido de humedad del pergamino se muestran en la tabla 27. Donde las siete ecuaciones poseen coeficiente de determinación superior a 98 % y valores de error estándar de estimación inferiores al 0,8, así como valores de p inferiores a 0,0001. Esto sugiere que son ajustes apropiados para representar el equilibrio higroscópico del pergamino con mucílago durante el almacenamiento a 35 °C.

Tabla 27. Parámetros estadísticos de los modelos de ajuste de la curva de equilibrio del pergamino con mucílago almacenado a 35 °C.

Modelo	a (%)	b (%)	c (° C)	n (adim)	m (adim)	R ² (dec.)	R ² adj	EEE (%)
Peleg	34,239	1,838	-	3,387	-1,681*	0,998	0,998	0,262
Midilli	12,347	-3,396	-	2,055	-	0,993	0,992	0,483
GAB	5,761	-	2073,93*	0,8880	-	0,993	0,992	0,481
White-Eyring	0,200	-0,181	-	-	-	0,991	0,991	0,521
Oswin	8,907	-	-	0,507	-	0,988	0,987	0,618
Caurie	0,541	3,004	-	-	-	0,984	0,984	0,691
Chung-Phost	4,234	-9,635	-	-	-	0,982	0,982	0,740

adim: adimensionales. EEE: error estándar de estimación. R²: Coeficiente de determinación. (*) Los p-valores en la determinación de los coeficientes es superior a 0,0001.

La diferencia entre los datos de contenido de humedad observados y estimados por estos modelos permiten evaluar su idoneidad para describir este fenómeno. En la figura 39, se presenta una distribución aleatoria de los residuos similar para los seis modelos analizados.

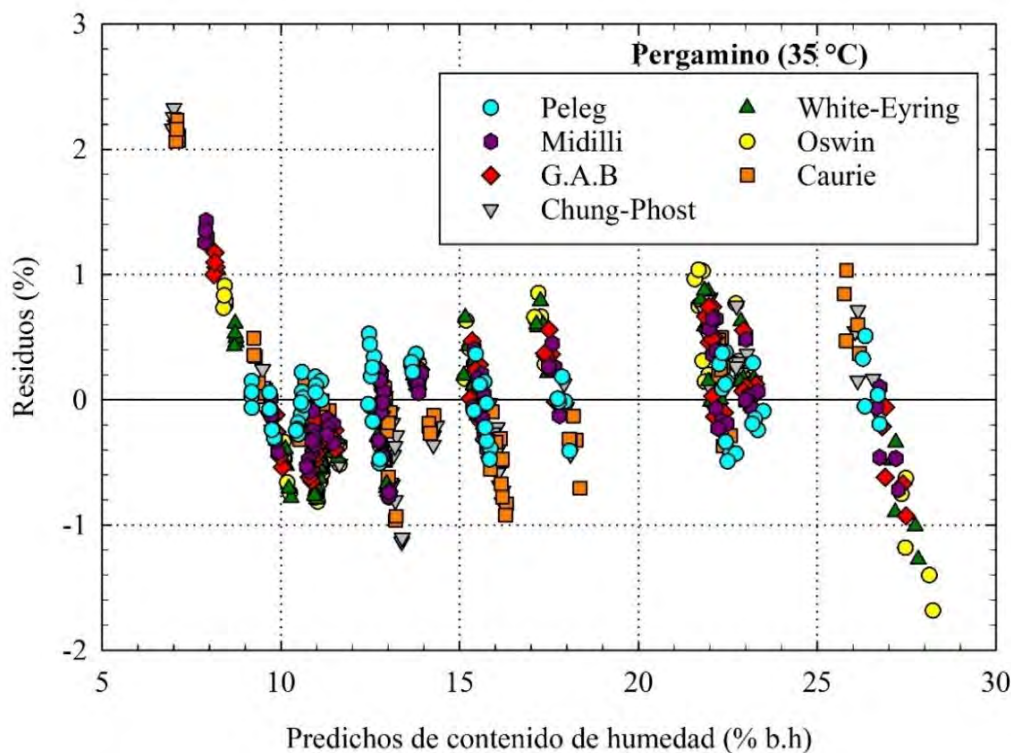


Figura 39. Análisis de los residuos de los modelos matemáticos del equilibrio higroscópico del pergamino con mucílago a 35 °C.

En la figura 39, se observa que los residuos se ubican entre -2 y 3 %, lo cual sugiere que los modelos se ajustan apropiadamente como indican los coeficientes de determinación y los errores estándar de estimación. Sin embargo, el modelo de Peleg presenta una mayor densidad de puntos que se mantiene entre $\pm 1,5\%$, por consiguiente, describe mejor este fenómeno en el pergamino del café; además fue seleccionada en otra investigación aplicada al café soluble (Noguera Córdoba y Rivero Barrios 2021).

En todos los casos se observa que los modelos se ajustan adecuadamente a los valores determinados, como se ilustra en la figura 40.

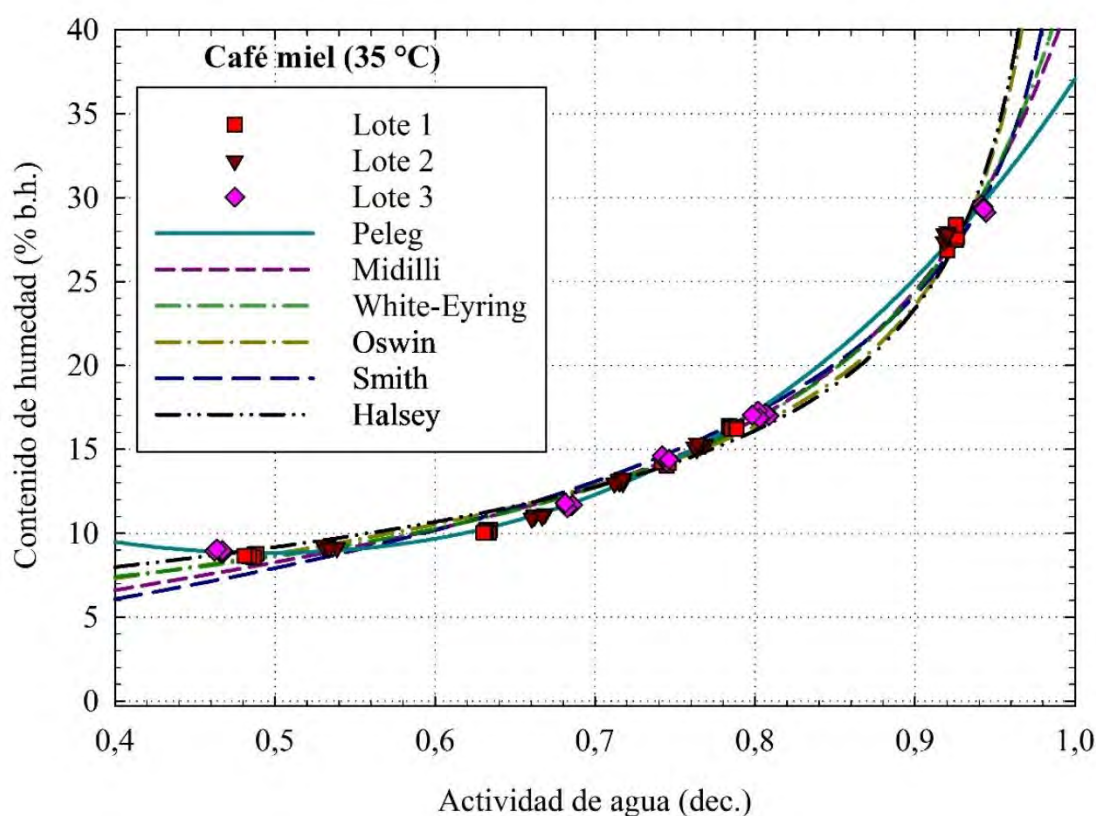


Figura 40. Ajuste de la curva de equilibrio higroscópico del café miel molido almacenado a 35 °C.

Se ilustra una isoterma tipo II para productos agrícolas Santos et al. (2020). Los parámetros estadísticos obtenidos para cada modelo matemático de equilibrio higroscópico de la humedad del grano se presentan en la tabla 28.

Tabla 28. Parámetros estadísticos de los modelos de ajuste de la curva de equilibrio del café miel molido almacenado a 35°C.

Modelo	A (%)	b (%)	n (adim)	m (adim)	R ² (dec.)	R ² adj	EEE (%)
Peleg	33,258	3,804	-0,924*	4,366	0,998	0,998	0,310
White-Eyring	0,210	-0,188	-	-	0,993	0,993	0,568
Midilli	13,257	-3,383	2,772	-	0,991	0,991	0,646
Oswin	8,771	-	0,450	-	0,987	0,986	0,799
Smith	-10,107	0,914*	-	-	0,985	0,985	0,847
Halsey	59,865	-	2,012	-	0,984	0,984	0,879

adim: adimensionales. ESS: error estándar de estimación. R²: Coeficiente de determinación.

Las ecuaciones de Peleg, White-Eyring y Midilli presentan coeficientes de determinación superiores a 99 % y valores de error estándar de estimación inferiores al 0,7 %, así como valores de p inferiores a 0,0001. Por lo tanto, los tres modelos son ajustes apropiados para representar el fenómeno higroscópico del café miel molido en desorción durante el almacenamiento a 35 °C. Se evaluó la idoneidad de estas ecuaciones para describir este fenómeno mediante un análisis de residuos, donde se muestra una distribución aleatoria de los residuos similar para los tres modelos analizados como se presenta en la figura 41.

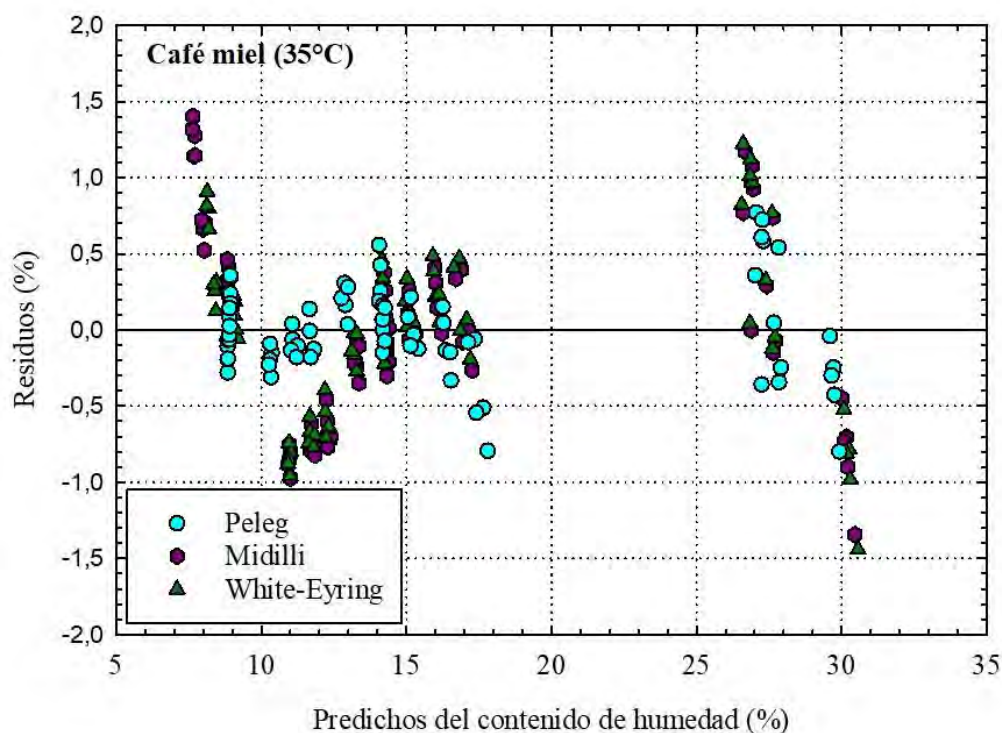


Figura 41. Análisis de los residuos de los modelos matemáticos equilibrio higroscópico del café miel molido a 35 °C.

Las tres ecuaciones presentan residuos aleatorios positivos y negativos, con una mayor densidad de residuos en un intervalo de $\pm 1,5$. Dado que los residuos del modelo de Peleg se ubican en un rango inferior a $\pm 1 \%$ y presentan parámetros estadísticos apropiados, por tanto, se seleccionó como el mejor ajuste. Este modelo también fue seleccionado como mejor ajuste por Santos et al. (2020) para granos de café arábica y en cereza de café despulpado por Henao, Queiroz, y Haj-Isa 2009.

En cuanto al café oro miel a $35 \text{ }^\circ\text{C}$ se obtiene una isoterma de tipo III en la figura 42, en esta se observan diferencias significativamente en el contenido de humedad de equilibrio en la actividad de agua (A_w) superiores a 0,79. Esto es consecuente con los resultados obtenidos por Valverde Chavarría (1993) en café oro lavado. Por lo tanto, se podría afirmar que los modelos seleccionados son adecuados para representar el equilibrio en el café oro.

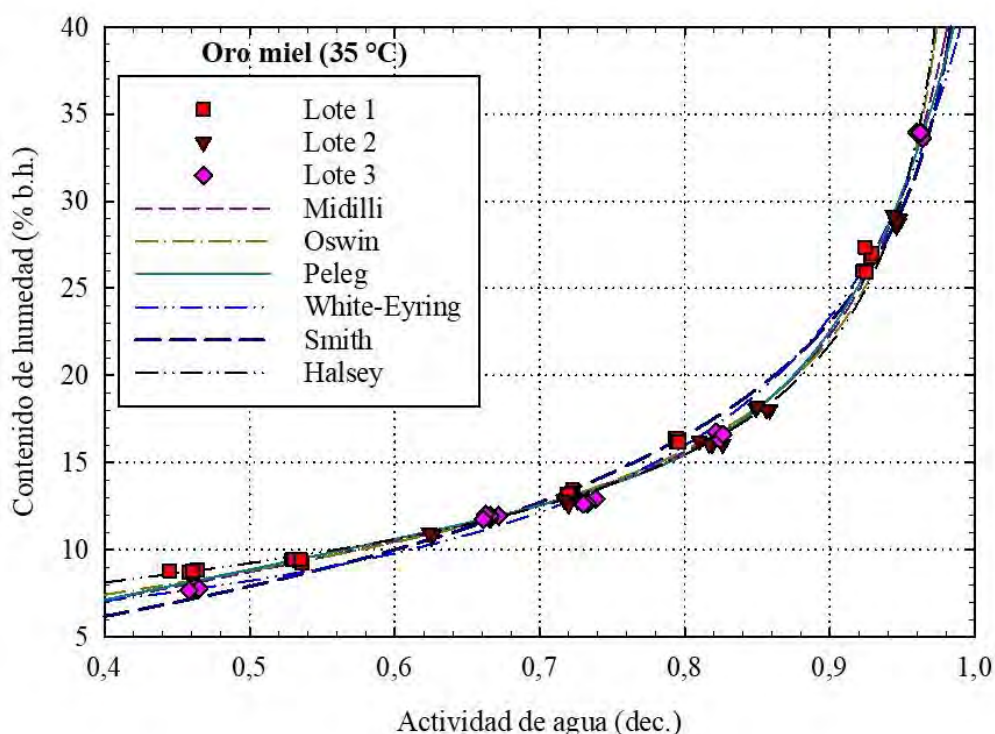


Figura 42. Ajuste de la curva de equilibrio higroscópico del café oro almacenado a $35 \text{ }^\circ\text{C}$.

En la tabla 29 se presentan los parámetros estadísticos de los modelos matemáticos de mejor ajuste de la isoterma de equilibrio higroscópico del café oro miel a $35 \text{ }^\circ\text{C}$. Donde se muestra que los nueve modelos presentan coeficientes de determinación superiores al 98 % y errores estándar de estimación inferiores al 1 %.

Tabla 29. Parámetros estadísticos de los modelos de ajuste de la curva de equilibrio del café oro miel almacenado a 35 °C.

Modelo	a (%)	b (%)	N (adim)	M (adim)	R ² (dec.)	R ² adj	EEE (%)
Midilli	15,118	-3,523	4,627	-	0,995	0,994	0,565
Oswin	8,787	-	0,419	-	0,994	0,994	0,600
Peleg	27,624	17,426	-0,977	13,265	0,994	0,994	0,573
Halsey	90,432	-	2,193	-	0,992	0,992	0,676
White-Eyring	0,221	-0,198	-	-	0,989	0,989	0,778
Smith	-9,420	1,360	-	-	0,982	0,982	1,004

adim: adimensionales. *EEE:* error estándar de estimación. *R²:* Coeficiente de determinación. (*) Los *p*-valores en la determinación de los coeficientes es inferior a 0,0001.

Los modelos de Midilli, Oswin, Peleg y Halsey presentan coeficientes de determinación superiores a 99 % y errores estándares de desviación inferiores al 0,6 %, así como valores de *p* inferiores a 0,0001. Esto sugiere que son ajustes apropiados para representar las curvas de equilibrio higroscópico del grano oro en desorción durante el almacenamiento a 35 °C. Para determinar el modelo más idóneo, se realiza un análisis de residuos como el que se presenta en la figura 43.

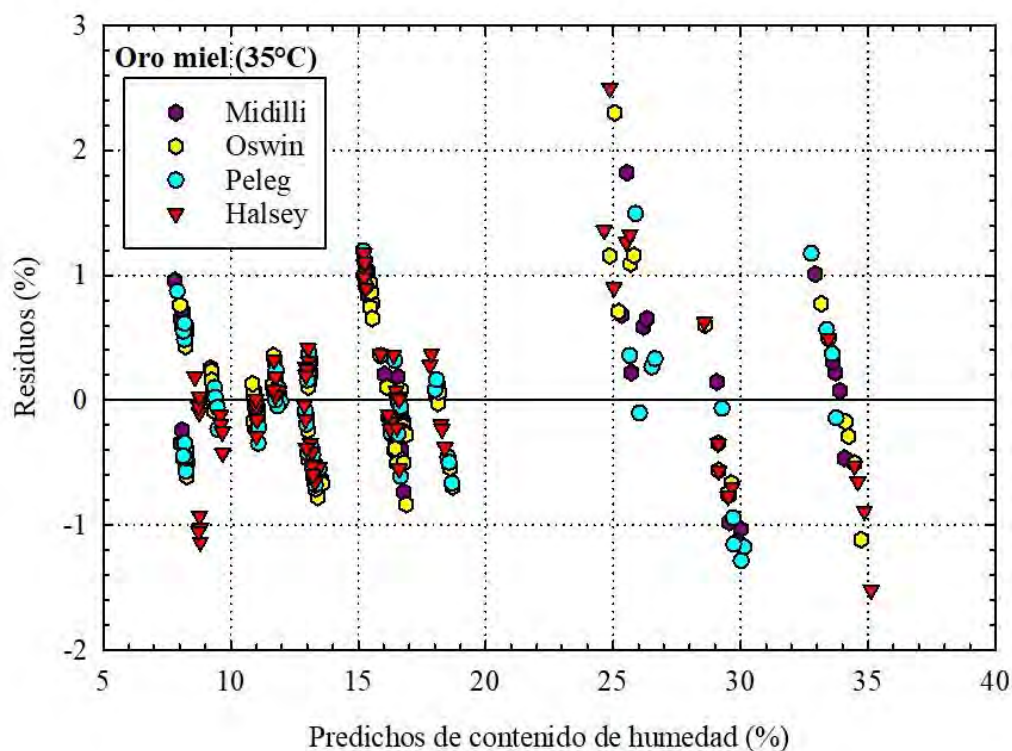


Figura 43. Análisis de los residuos de los modelos matemáticos de equilibrio higroscópico para el café oro miel a 35 °C.

Las ecuaciones de Midilli, Oswin, Peleg y Halsey presentan una distribución aleatoria de los residuos que se encuentran en un intervalo entre -2 y 3 %. Esto sugiere que los cuatro modelos presentan un ajuste adecuado. No obstante, el modelo de Peleg presenta aleatoriedad de los residuos y un menor error estándar de estimación que las otras ecuaciones, por tanto, es el mejor modelo para representar la tendencia descrita por la isoterma de equilibrio higroscópico en oro a 35 °C.

5.3.3. Modelo de Peleg en las isotermas de equilibrio de los componentes del café.

La figura 44 presenta las isotermas en desorción del café en pergamino con mucílago, así como sus componentes en café oro miel y pergamino con mucílago con el modelo de Peleg para los tres lotes en estudio.

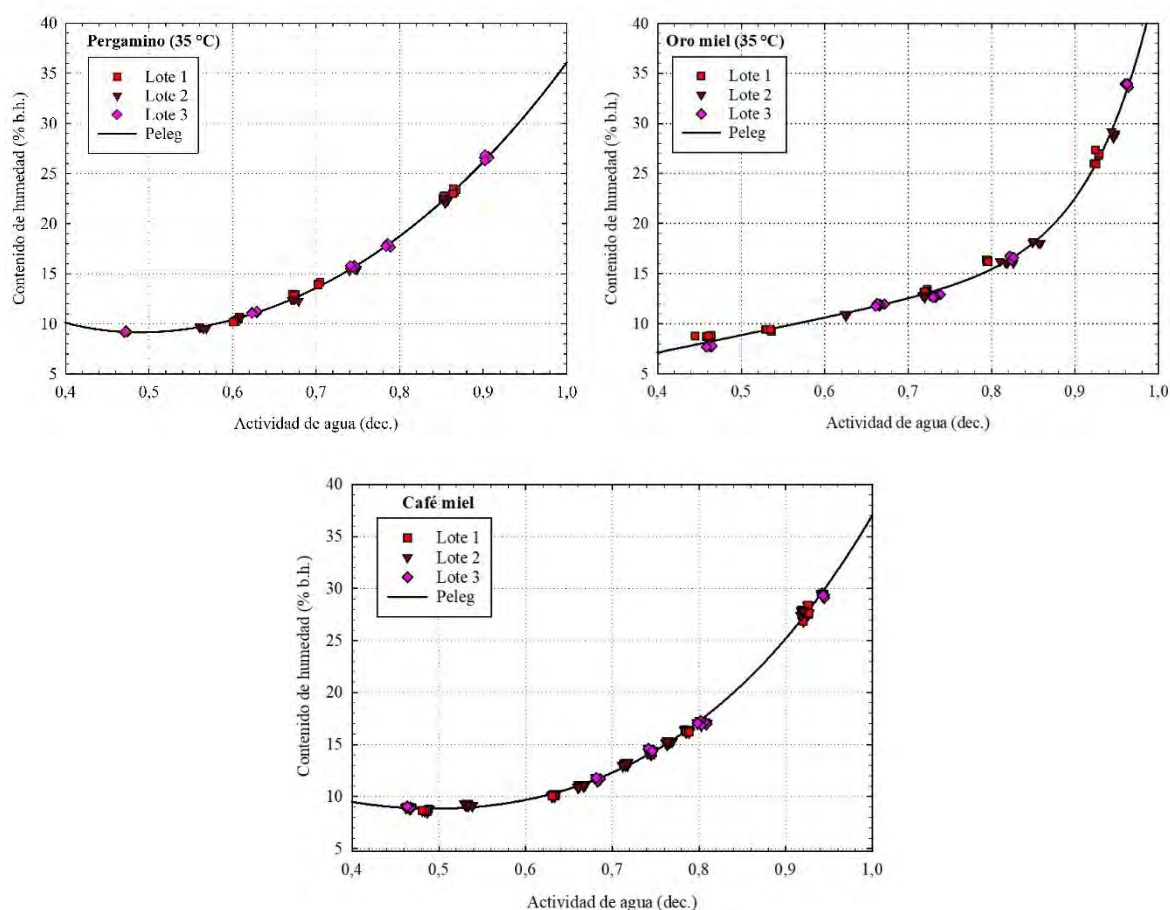


Figura 44. Ajuste de Peleg de las curvas de equilibrio higroscópico del café miel y sus componentes almacenados a 35 °C.

Las isotermas son clasificadas como de tipo III, se observa que el pergamino presenta variación inferior al 0,5 % en el contenido de agua a actividades de agua inferiores a 0,6, mientras que en el café oro miel presenta una variación de 1 %, lo que puede estar relacionado con las

diferencias en la composición química de los constituyentes del café con pergamino y mucílago.

5.4. Efecto de la temperatura de almacenamiento en los granos de café miel.

5.4.1. Efecto de la temperatura en el café en pergamino con mucílago

En la figura 45 se presentan las isoterma tipo III para el equilibrio de la humedad en el café con pergamino y mucílago determinadas a 35, 25 y 10 °C.

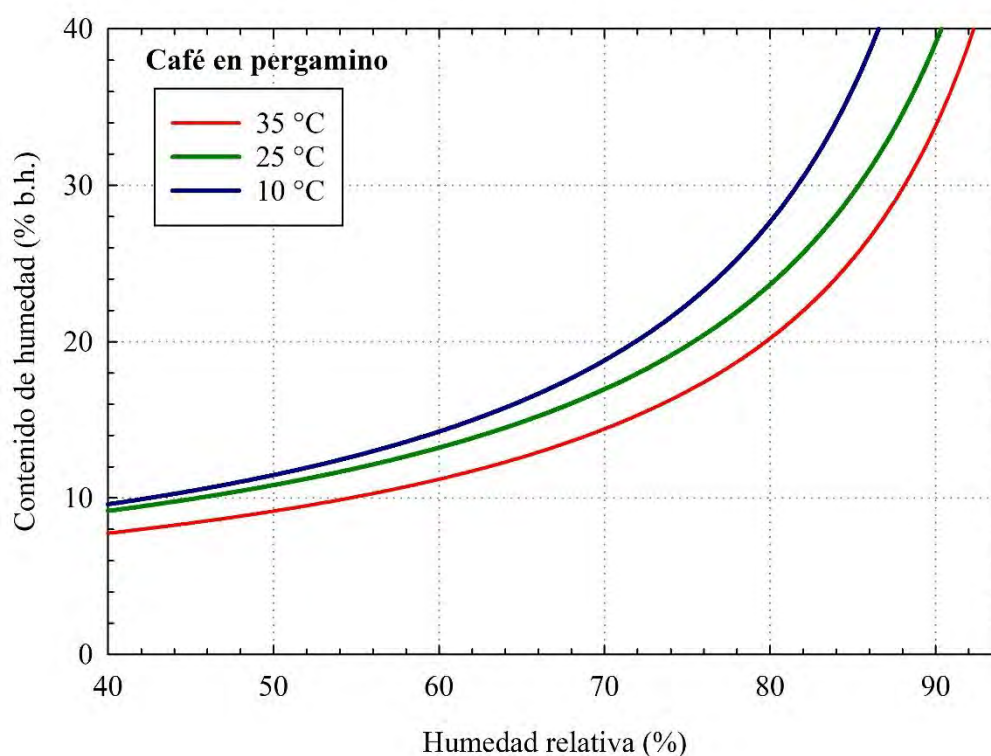


Figura 45. Efecto de la temperatura de almacenamiento en la isoterma en desorción de equilibrio higroscópico del café con pergamino y mucílago.

En general, se observa que a medida que incrementa la temperatura de almacenamiento la isoterma se desplaza hacia la parte inferior de la derecha de la figura 45, es decir, a la misma humedad relativa, cuando aumenta la temperatura, disminuye el contenido de humedad de equilibrio. Esto es consecuente con los hallazgos obtenidos por Treamnuk, Pengprakhon, y Treamnuk (2024) para el arroz de grano largo y Moreira et al. (2010) para la harina de trigo.

No se observan diferencias significativas en las humedades relativas obtenidas entre las isotermas de 25 y 35 °C ya que los valores de humedad relativa varían en un rango inferior a 3 % correspondiente a la precisión de los sensores. Esto es consecuente con los resultados obtenidos por Valverde Chavarría (1993) para café pergamino lavado a 20 y 30 °C. No obstante, existen diferencias entre la isoterma de 10 °C y la de 25 °C; y la isoterma de 10 °C y 35 °C como se muestra en la figura 46.

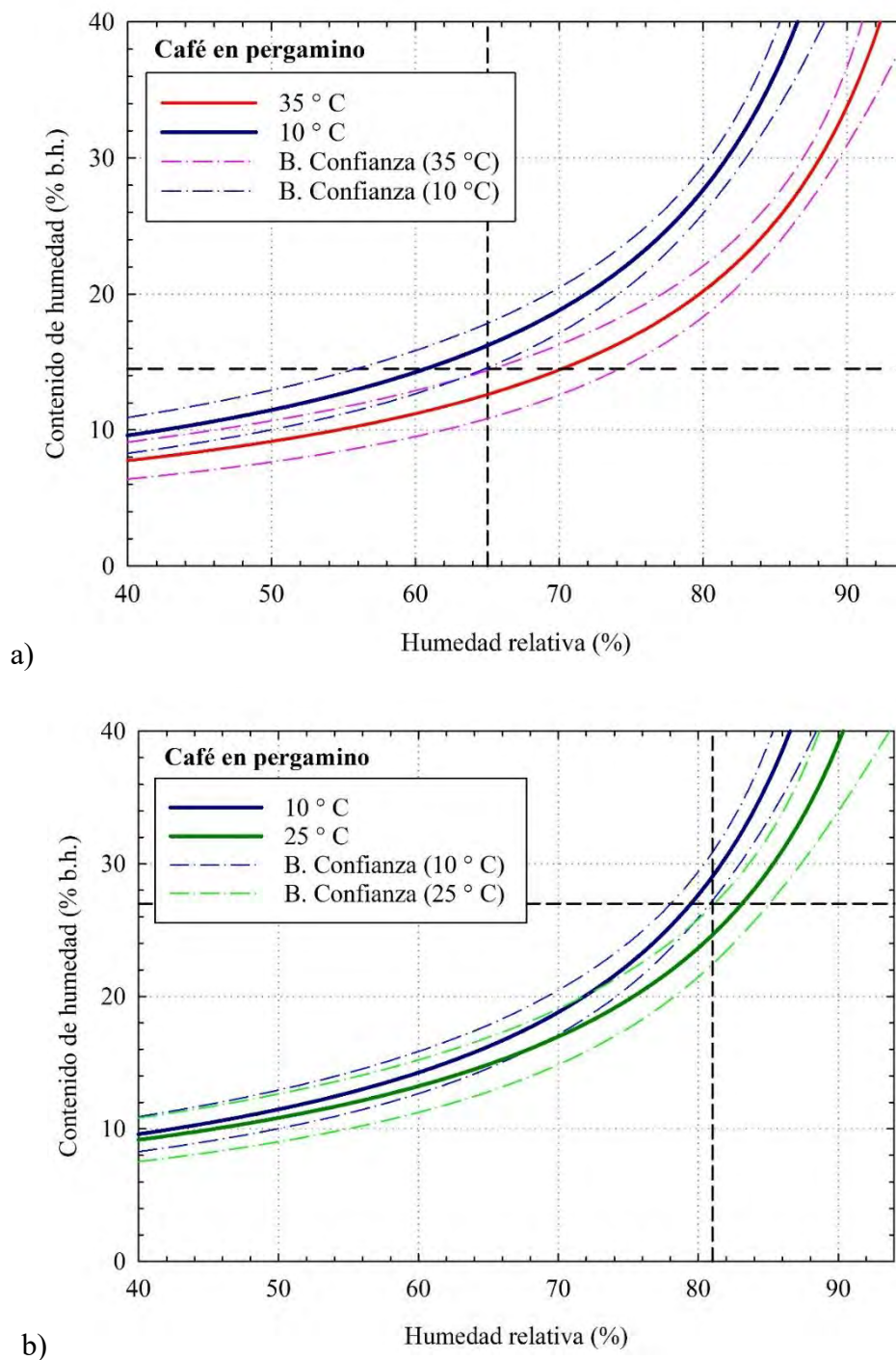


Figura 46. Diferencias entre la isoterma del café con pergamino y mucílago a 35 y 25 °C con respecto a la isoterma de 10 °C.

En la figura 46a, se muestra que por encima de 65 % de humedad relativa se presentan contenidos de humedad de 16,19 % b.h. y 12,64 % b.h. a 10 y 35 °C, respectivamente. Esto coincide con una zona que no se recomienda el almacenamiento del grano, debido a que se desarrollan microorganismos como levaduras osmófilas y hongos xerófilos (Puerta Quintero 2006). Por debajo de 65 % se garantiza la conservación de la calidad de los granos y no hay efecto de la temperatura en las isoterms.

En la figura 46b, se observa que por encima de una humedad relativa de 81 % las isoterms de 10 y 25 °C presentan una diferencia en los contenidos de humedad de 5 % y tiene lugar la alteración microbiológica producto de la aparición de levaduras y bacterias (deMan et al. 2018). Una diferencia entre las temperaturas de almacenamiento superior al 15 °C garantiza que se observen diferencias entre las isoterms de almacenamiento.

5.4.2. Efecto de la temperatura en los componentes del café miel

Las tres curvas se clasifican en isoterma de tipo II, característico de los productos agrícolas, es decir, si disminuye el contenido de humedad también disminuye la actividad de agua. Siendo más pronunciada hacia valores de actividad de agua superiores a 0,8, como se ilustra en la figura 47.

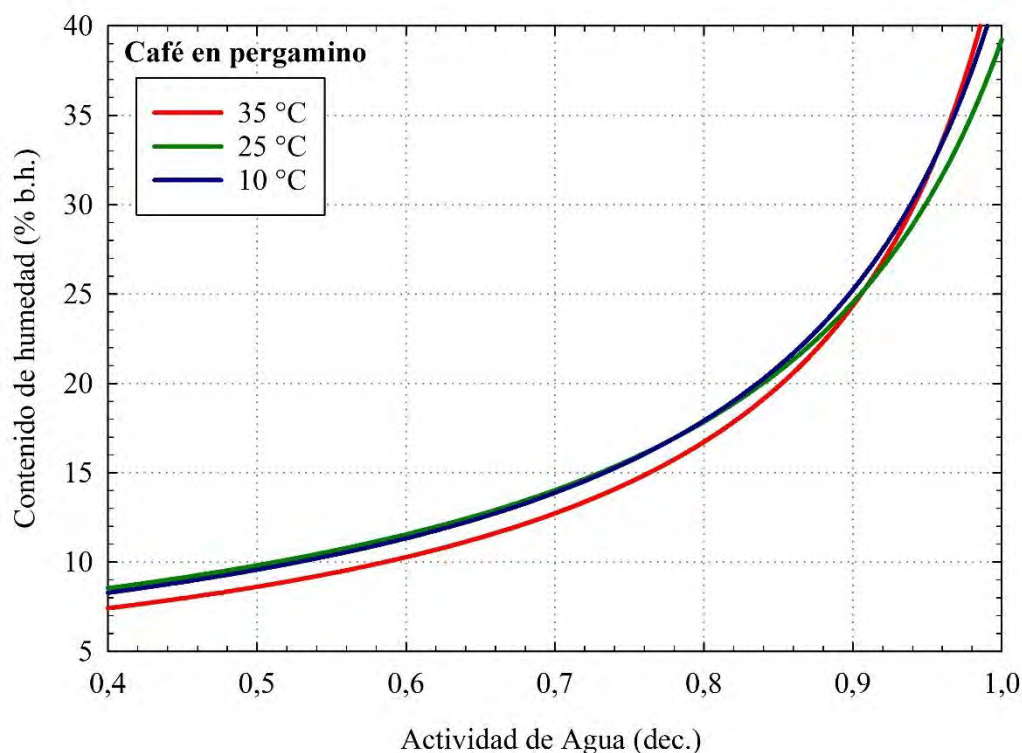


Figura 47. Isoterms de equilibrio higroscópico en café con pergamino y mucílago molido.

No se observan diferencias en las isotermas de equilibrio higroscópico para el café con pergamino y mucílago molido a 10, 25 y 35 °C, indicando que no hay efecto de la temperatura. Esto puede deberse a que la estructura física y el método de análisis empleado, ya que la actividad de agua se determina mediante el punto de rocío en un espejo frío expuesto al vapor de agua de la muestra (Addium 2021). En contraste, la humedad relativa se mide con un sensor capacitivo, lo que podría haber influido en los resultados obtenidos. Esto coincide con lo indicado por Brooker, Bakker-Arkema y Hall (1992), quienes destacan la influencia de las técnicas de medición en la determinación de la humedad relativa y el contenido de humedad.

La figura 48 se muestran las isotermas de equilibrio higroscópico para café oro miel molido almacenado a 10, 25 y 35 °C.

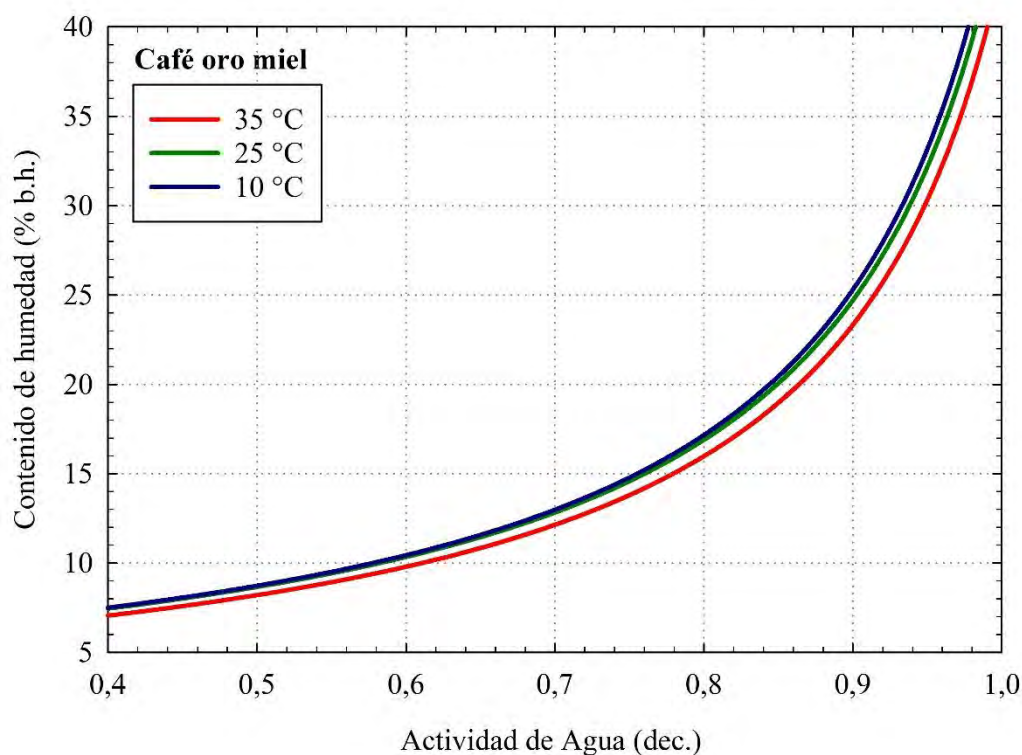
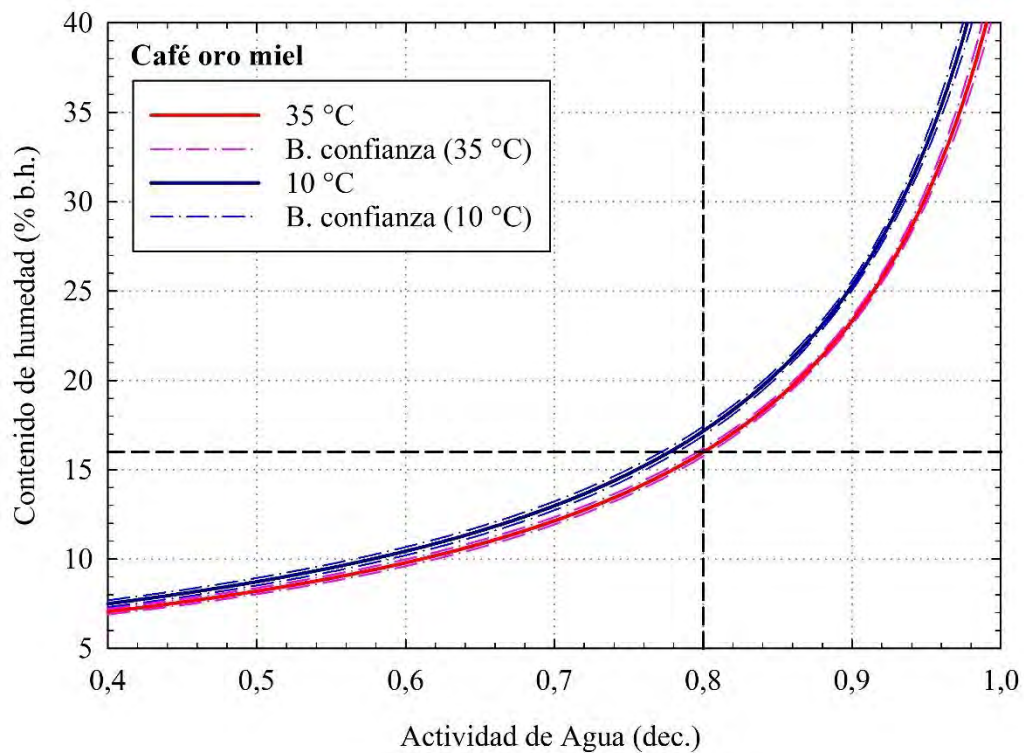


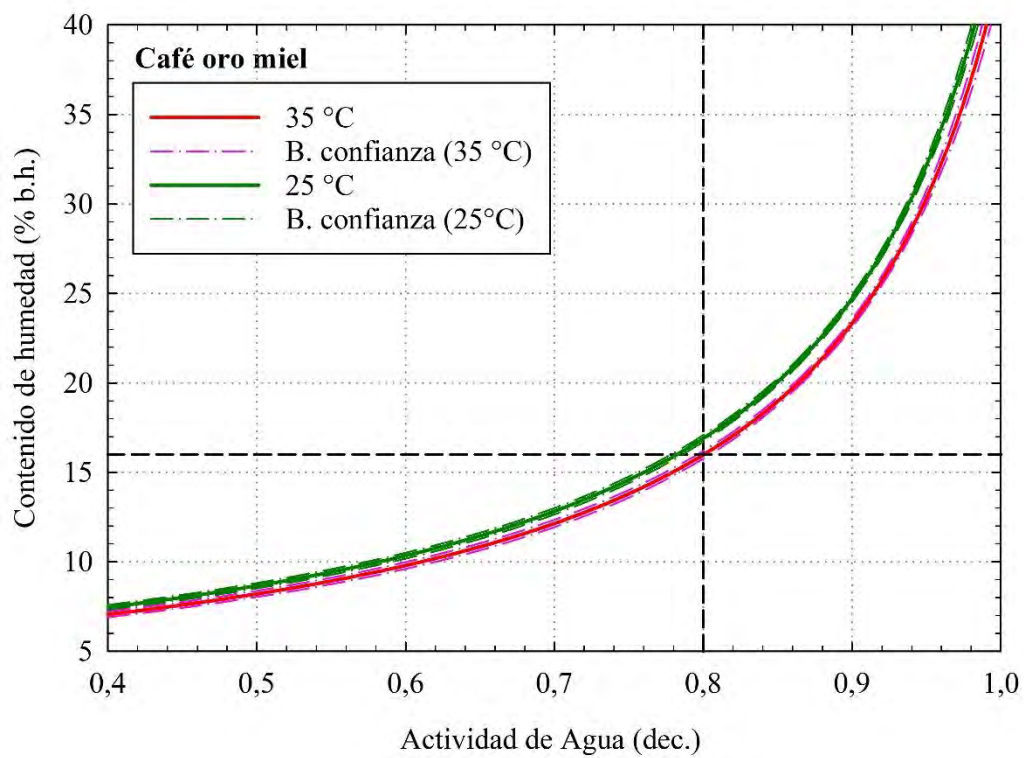
Figura 48. Isotermas de equilibrio higroscópico en café oro miel molido.

Se ilustra el efecto de la temperatura en las isotermas de equilibrio, es decir para un mismo valor de actividad de agua, cuanto mayor es la temperatura, menor es el contenido de humedad de equilibrio. Este comportamiento coincide con los hallazgos reportados por Labuza, Kaanane, y Chen (1985). A partir de los parámetros de ajuste estimados, se identifican los

puntos críticos donde el efecto de la temperatura en las isotermas es claramente observable, como se muestra en la figura 49.



a)



b)

Figura 49. Diferencias entre la isoterma del café oro miel a 10 y 25 °C con respecto a la isoterma a 35 °C.

Los resultados de la Figura 49a indican que para una actividad de agua (a_w) de 0,80 el grano oro almacenado a 10 y 35°C alcanza un contenido de humedad de 17,2 y 16,0 %, respectivamente. Por debajo de este umbral, las isothermas son similares, sin influencia significativa de la temperatura. En contraste, las isothermas a 25 y 35 °C exhiben una diferencia en los contenidos de humedad de 1,2 %, lo cual sugiere que bajo estas condiciones existen variaciones en las isothermas de equilibrio higroscópico (Figura 49b). Estos parámetros son críticos para la calidad del café, ya que a una actividad de agua en 0,76 y un contenido de humedad de 14,2 % se favorece el desarrollo del hongo *Aspergillus ochraceus*, mientras que *Penicillium verrucosum* puede desarrollarse a 0,81 y un contenido de humedad de 15,5 % (Moss 1996).

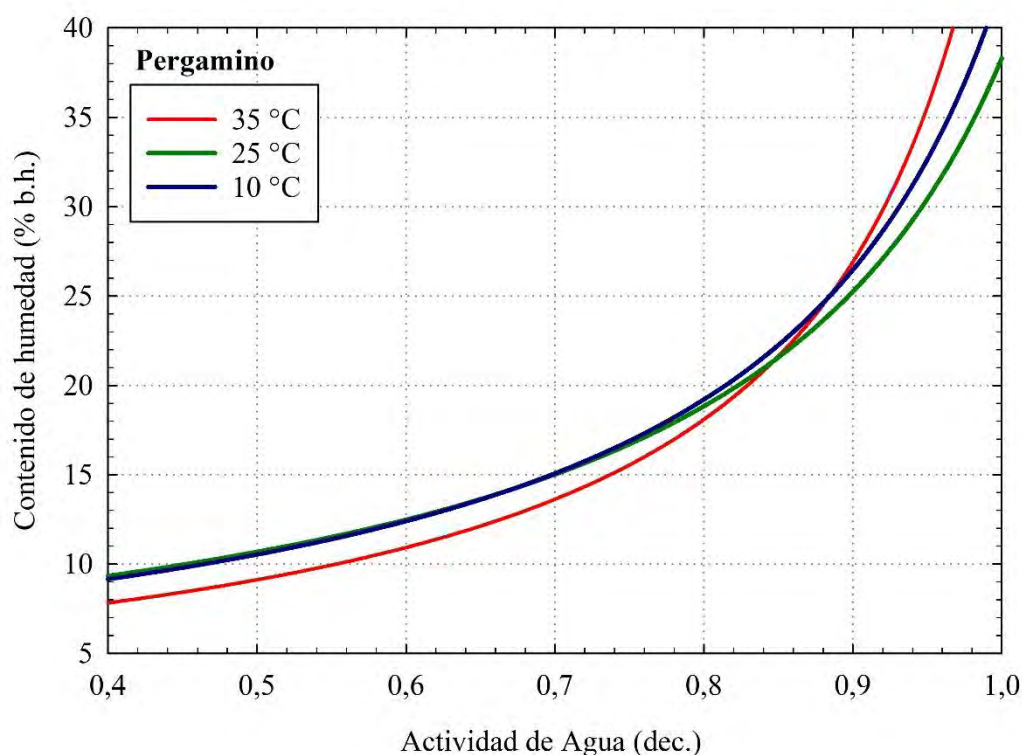


Figura 50. Isothermas de equilibrio higroscópico en pergamino con mucílago molido.

Como se muestra en la figura 50, las isothermas de equilibrio higroscópico del pergamino con mucílago a un contenido de humedad inferior al 20,4 % b.h. ilustran que el contenido de humedad incrementa en función de la temperatura a una actividad de agua dada (Estrada-Bahena et al. 2022). Sin embargo, por encima de este valor, la tendencia se invierte, es decir, la isoterma de 35 °C presenta un mayor contenido de humedad que las isothermas a 25 y 10 °C.

Dado que la tendencia no es uniforme en todo el rango de contenido de humedad, no se encuentra un efecto significativo de la temperatura de almacenamiento en las isotermas.

5.4.3. Curva de equilibrio higroscópico mediante prototipo y el medidor de actividad de agua.

En la figura 51 se muestran las isotermas de equilibrio higroscópico del café a tres temperaturas de diferentes (35, 25 y 10 °C), obtenidas con el prototipo IoT y un medidor de actividad de agua AQUALAB 4TE, permitiendo comparar la precisión del prototipo.

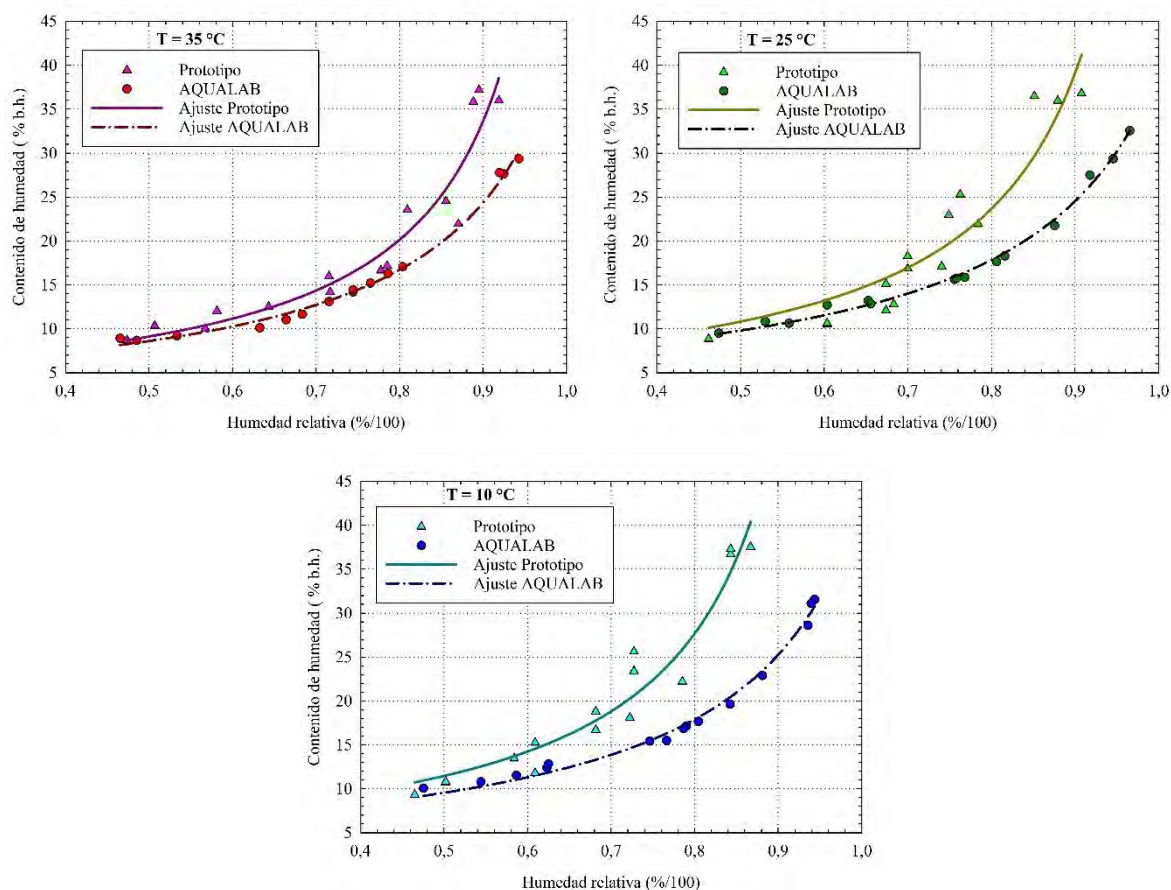


Figura 51. Isotermas de equilibrio higroscópico del prototipo y el medidor de actividad de agua a las tres temperaturas estudiadas.

En la figura 51 se observa que en los tres casos (35, 25 y 10 °C), para humedades relativas inferiores a 70 %, el prototipo muestra resultados consistentes con los de AQUALAB 4TE. No obstante, a humedades relativas superiores a 80 %, el prototipo sobreestima el contenido de humedad, lo que podría repercutir negativamente en situaciones críticas relacionadas con la estabilidad microbiológica del producto. Asimismo, la isoterma obtenida por el prototipo presenta una mayor tendencia exponencial que la del AQUALAB 4TE. Esta discrepancia

podría atribuirse al efecto de la fricción generada durante el proceso de molienda de las muestras, lo que provocaría un aumento de la temperatura y, consecuentemente, una pérdida de humedad antes de la medición de A_w . Además, la mayor pendiente de la isoterma obtenida con el prototipo sugiere una mayor sensibilidad a cambios en la humedad relativa, especialmente en condiciones de alta humedad.

El prototipo presenta una precisión de 0,03 (Aosong 2016), mientras que el AQUALAB 4TE posee una precisión de 0,003 (Addium 2021), es decir, es 10 veces inferior al medidor de A_w . No obstante, es un método no destructivo que aproxima adecuadamente las humedades relativas menores a 70 y 86 veces más económico que el AQUALAB 4TE, por tanto, el prototipo representa una solución accesible para el monitoreo de la etapa final del secado y el almacenamiento del café para preservar su calidad. De esta manera los productores pueden reducir los costos operativos y la pérdida de masa de producto comerciable, que ocasiona pérdidas económicas para el productor.

6. CONCLUSIONES

1. Se construyó un prototipo IoT permitió el registro, la transmisión y la accesibilidad en línea de los datos de humedad relativa y temperatura del aire en contacto con el café con mucílago de manera eficaz, rápida y confiable.
2. La cinética de equilibrio en la humedad relativa del aire en contacto con los granos de café miel evidencio una tendencia exponencial creciente, la cual se obtuvo mediante la modificación de los modelos matemáticos de secado en capa delgada.
3. El modelo de Peleg describió adecuadamente la curva de equilibrio higroscópico entre el contenido de humedad y la actividad del agua para todos los componentes del café miel, con un coeficiente de determinación ajustado superior al 99 % y errores estándares de estimación inferiores al 0,6.
4. Se observó que existe un efecto de la temperatura de almacenamiento estudiada en la relación de equilibrio higroscópico del café miel en pergamino con mucílago y el café oro miel molido.
5. Se determinó que la cinética de la humedad relativa del aire depende de la temperatura de almacenamiento del café con mucílago, con tiempos de estabilización de 30, 60 y 80 h para las temperaturas de 35, 25 y 10 °C, respectivamente.
6. La razón del coeficiente cinético (k) entre los procesos fue comparado y se determinó que el cambio en la temperatura ocurre más rápido que la absorción de humedad del aire, entre 14 y 41 veces a 35 y 10 °C, respectivamente.
7. El almacenamiento seguro del café en pergamino con mucílago debe tener una humedad relativa inferior al 65 %, que se alcanzó en contenidos de humedad de 16,2 y 12,6 % b.h. a 10 y 35 °C, respectivamente.

7. RECOMENDACIONES

1. Trabajar con otras alternativas como los microcontroladores LILYGO® TTGO T-PCIE A7670 4G con modem para celular permiten obtener el internet por medio de una tarjeta telefónica (SIM card) y tienen la ventaja que usan una banda 4G que está disponible para todos los operadores en Costa Rica.
2. Reposar las muestras de café miel al menos 33 h para garantizar la homogeneidad en las muestras para posteriores análisis de la calidad física como la determinación del contenido de humedad y la actividad de agua.
3. Se recomienda colocar las muestras en una solución con una humedad relativa de 30 % como el cloruro de calcio (CaCl_2) para que la cinética de la humedad relativa inicie en un mismo valor.
4. Usar un mecanismo como un ventilador que remueva el aire que está en contacto con la superficie de los granos para acelerar el tiempo de estabilización de la humedad relativa del aire.
5. Estudiar el efecto de la cantidad de mucílago o azúcares presentes en el grano en la cinética e isothermas de equilibrio higroscópico.
6. Desarrollar la curva de equilibrio higroscópico para las variedades de café de interés comercial y de alto valor económico como el café geisha.
7. Realizar la calibración incorporando una sal con una humedad relativa cercana al 85 %, ya que a humedades relativas superiores a 93 %, la precisión de los sensores disminuye.

8. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Abreu, Luciana Aparecida de Souza, Adriano Delly Veiga, Édila Vilela de Resende Von Pinho, Fiorita Faria Monteiro, y Sttela Dellyzette Veiga Franco da Rosa. 2014. “Behavior of Coffee Seeds to Desiccation Tolerance and Storage”. *Journal of Seed Science* 36 (diciembre):399–406. <https://doi.org/10.1590/2317-1545v36n41008>.
- Academia de Geografía e Historia de Costa Rica. 1979. *Historia del origen y fecha de siembra primeros cafetos en el país*. Oficina del Café,.
- Addium. 2021. “Manual AQUALAB 4TE”. <https://aqualab.com/en/aqualab-downloads/manuals>.
- Afonso, Paulo Cesar. 2001. “Aspectos físicos, fisiológicos e de qualidade do café em função da secagem e do armazenamento”. Universidade Federal de Viçosa. <http://www.locus.ufv.br/handle/123456789/9417>.
- Anacafé. 2005. *Manual de beneficiado húmedo del café*. Guatemala: Anacafé,.
- Aosong. 2016. “Temperature and humidity module AM2301 Product Manual.pdf”. Google Docs. 2016. <https://naylorlampmechatronics.com/sensores-temperatura-y-humedad/354-sensor-de-temperatura-y-humedad-relativa-dht21-am2301.html>.
- Arduino. 2024. “Arduino Cloud Plans and Benefits”. 2024. <https://cloud.arduino.cc/plans/>.
- “ARDUINO UNO WiFi REV2”. 2021. Arduino Official Store. 2021. <https://store.arduino.cc/products/arduino-uno-wifi-rev2>.
- Arias Pastor, Antonio Abel. 2021. “Estudio comparativo de la calidad físico organoléptico de café miel (*Coffea arábica* L.) de variedad Catimor y Caturra”. Perú: Universidad Señor de Sipán. <http://repositorio.uss.edu.pe/handle/20.500.12802/7713>.
- Baptestini, Fernanda, Paulo Correa, Afonso Ramos, Mateus Junqueira, y Iasmine Zaidan. 2020. “GAB model and the thermodynamic properties of moisture sorption in soursop fruit powder”. *REVISTA CIÊNCIA AGRONÔMICA* 51 (febrero). <https://doi.org/10.5935/1806-6690.20200006>.
- Barreiro, José A., y Aleida J. Sandoval. 2020. “Kinetics of moisture adsorption during simulated storage of whole dry cocoa beans at various relative humidities”. *Journal of Food Engineering* 273 (mayo):109869. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2019.109869>.
- Bautista, Adriana Antonio Antonio, Mario Ernesto Vázquez Badillo, Manuel Humberto Reyes Valdés, Celestino Flores López, Esmeralda Judith Cruz Gutiérrez, y Dino Ulises González Uribe. 2020. “Equilibrio higroscópico en semillas forestales de zonas áridas y su efecto en la calidad fisiológica”. *POLIBOTÁNICA*, núm. 50, 67–81.
- Blynk Inc. 2024. “Pricing | Blynk - IoT platform for businesses”. 2024. <https://blynk.io/pricing>.
- Borém, Flávio Meira. 2022. *Manual de tecnología postcosecha del café : una completa guía para el procesamiento, secado y almacenamiento del café /*. Primera edición. Gin Press,.
- Bosch Sensortec. 2015. “Combined Humidity and Pressure Sensor”. 2015.
- Brezová, Vlasta, Anna Šlebodová, y Andrej Staško. 2009. “Coffee as a source of antioxidants: An EPR study”. *Food Chemistry* 114 (3): 859–68. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2008.10.025>.
- Brooker, Donald B., F. W. Bakker-Arkema, y Carl W. Hall. 1992. *Drying and Storage Of Grains and Oilseeds*. Springer Science & Business Media.
- Brunauer, Stephen, P. H. Emmett, y Edward Teller. 1938. “Adsorption of Gases in Multimolecular Layers”. *Journal of the American Chemical Society* 60 (2): 309–19. <https://doi.org/10.1021/ja01269a023>.

- Callister, William D., y David G. Rethwisch. 2019. *Ciencia e ingeniería de materiales*. Reverte.
- Cangás Realpe, Adriana. 2004. “Isotermas de sorción de humedad de grano reventado de amaranto y sus dos productos”. Ecuador: Universidad Técnica del Norte. <http://repositorio.iniap.gob.ec/handle/41000/64>.
- Caporaso, Nicola, Martin B. Whitworth, Stephen Grebby, y Ian D. Fisk. 2018. “Rapid prediction of single green coffee bean moisture and lipid content by hyperspectral imaging”. *Journal of Food Engineering* 227 (junio):18–29. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2018.01.009>.
- Çengel, Yunus A. 2011. *Transferencia de calor y masa*. Cuarta. McGraw-Hill Interamericana de España S.L.
- Choque-Quispe, David, Carlos A. Ligarda-Samanez, Betsy S. Ramos-Pacheco, Fredy Taipardo, Diego E. Peralta-Guevara, y Aydeé M. Solano Reynoso. 2018. “Evaluación de las isotermas de sorción de granos y harina de kiwicha (*Amaranthus caudatus*)”. *Revista ION* 31 (2): 67–81.
- Clarke, Ronald, y O. G. Vitzthum. 2008. *Coffee: Recent Developments*. John Wiley & Sons.
- Contento, Ricardo, Diana Abril, Edgar Vargas, Daniela Varela, Luz Arango, Blanca Useche, y Fredy Garzón. 2009. *Manual de prácticas de Ingeniería de Alimentos*. Editorial Tadeo Lozano.
- Corrêa, P. C., G. H. H. Oliveira, P. L. Rodrigues, S. C. Campos, y F. M. Botelho. 2010. “Hygroscopic Equilibrium and Physical Properties Evaluation Affected by Parchment Presence of Coffee Grain”. *Spanish Journal of Agricultural Research* 8 (3): 694–702. <https://doi.org/10.5424/sjar/2010083-1267>.
- Degirmencioglu, Adnan, Kadir Yagcioglu, y Feyza Cagatay. 1999. *Drying Characteristics of Laurel Leaves Under Different Drying Conditions*.
- deMan, John M., John W. Finley, W. Jeffrey Hurst, y Chang Yong Lee. 2018. *Principles of Food Chemistry*. 4a ed. Springer International Publishing.
- “DHT11 Humidity & Temperature Sensor”. 2015. 2015.
- Dias, Camila De A., Ednilton T. De Andrade, Isabella A. Lemos, Flávio M. Borém, y Ezequiel A. Barros. 2020. “Sorption Isotherms and Isotheric Heat of Pericarp and Endosperm Tissues of Arabica Coffee Fruit.” *Engenharia Agrícola* 40 (1): 78–89. <https://doi.org/10.1590/1809-4430-eng.agric.v40n1p78-89/2020>.
- Díaz-Martín, Ricardo, Gastón Sanglier-Contreras, y Adib Guardiola-Mouhaffel. 2015. “Aplicación del método de los mínimos cuadrados para la obtención de los parámetros de los modelos de Henderson y Chung-Pfost” 26:139–45.
- Duran Gamboa, Oscar Eduardo. 2024. “Análisis de la expansión volumétrica del café (*Coffea arabica*) durante el proceso de torrefacción en granos con diferente tratamiento térmico, variedad y tipo de beneficiado”. Costa Rica: Universidad de Costa Rica.
- Enríquez Calderón, Gustavo Adolfo, y Luis Alberto Duicela Guambi. 2014. *Guía técnica para la producción y poscosecha del café arábigo* /. 1. edición. Costa Rica: COFENAC,.
- Escobar, Gentil Andrés Collazos, Nelson Gutierrez Guzman, Henry Alexander Vaquiro Herrera, y Claudia Milena Amoroch Cruz. 2020. “Moisture Dynamic Sorption Isotherms and Thermodynamic Properties of Parchment Specialty Coffee (*Coffea Arabica* L.)” 15 (septiembre):e151684–e151684. <https://doi.org/10.25186/.v15i.1684>.
- Espressif Systems. 2023. “Esp32-Wroom-32_datashet_en.Pdf”. 2023. <https://www.espressif.com/en/support/download/documents>.
- Estrada-Bahena, Erick Baruch, Ricardo Salazar, Mónica Ramírez, Ma. Elena Moreno-Godínez, Javier Jiménez-Hernández, Yanet Romero-Ramírez, Manasés González-Cortázar, y Patricia Alvarez-Fitz. 2022. “Influence of Water Activity on Physical Properties, Fungal Growth, and Ochratoxin A Production in Dry Cherries and Green-Coffee

- Beans”. *Journal of Food Processing and Preservation* 46 (2): e16226. <https://doi.org/10.1111/jfpp.16226>.
- Folmer, Britta. 2016. *The Craft and Science of Coffee*. Elsevier Science. Academic Press.
- Gálvez, Antonio Vega, Elena Lara Aravena, y Roberto Lemus Mondaca. 2006. “Isotermas de adsorción en harina de maíz (*Zea mays* L.)”. *Food Science and Technology* 26 (diciembre):821–27. <https://doi.org/10.1590/S0101-20612006000400017>.
- Geleta, Mulatu, Isabel Herrera, Arnulfo Monzón, y Tomas Bryngelsson. 2012. “Genetic Diversity of Arabica Coffee (*Coffea Arabica* L.) in Nicaragua as Estimated by Simple Sequence Repeat Markers”. *TheScientificWorldJournal* 2012:939820. <https://doi.org/10.1100/2012/939820>.
- Gonzales, José, Rony Gonzalez, Fernando Gutiérrez, y Jimmy Martín. 2019. “Desarrollo de la oferta de cafés de especialidad (Honey) con alta valoración en taza para tostadores de Estados Unidos: Plan de Negocios para la empresa Peruvian Harvest Agronegocios SAC en joint venture con la CACFEVAM Ltda en el valle del Alto Mayo (Región San Martín).pdf”. Perú: Universidad ESAN. <https://repositorio.esan.edu.pe/server/api/core/bitstreams/d4d44304-9073-4ea9-babf-154836ffd428/content>.
- Guzmán Salazar, Mateo, Sergio Enrique Rozo Perdomo, y Nicolás Guillermo Mahecha Vega. 2022. “Determinación de las variables óptimas para la producción de bioetanol a partir de mucílago de café con el propósito de reducir el vertimiento de los desechos provenientes del pretratamiento del café en las fuentes hídricas del municipio de Pitalito”. Working Paper. Ingeniería Química. <https://repository.universidadean.edu.co/handle/10882/12386>.
- Henao, José D., Marlene R. de Queiroz, y Niurka M. A. Haj-Isa. 2009. “Umidade de equilíbrio de café cereja descascado baseadas em métodos estático e dinâmico”. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental* 13 (agosto):470–76. <https://doi.org/10.1590/S1415-43662009000400015>.
- Hougen, Olaf, Kenneth M. Watson, y Roland A. Ragatz. 2021. *Principios de los procesos químicos. Balances de materia y energía*. Reverte.
- ICAPE. 2011. “Guía Técnica para el Cultivo del Café”. ICAPE. <https://www.icafe.cr/wp-content/uploads/cicafe/documentos/GUIA-TECNICA-V10.pdf>.
- . 2023. “Producción de café de la cosecha 22-23 supera en un 14.14% a la producción de la cosecha anterior.” el 12 de abril de 2023. <https://www.icafe.cr/cosecha22-23/>.
- . 2024. “Informe Actividad Cafetalera.pdf”. noviembre de 2024. https://www.icafe.cr/wp-content/uploads/informacion_mercado/informes_actividad/actual/Informe%20Actividad%20Cafetalera.pdf.
- Ikiss, Jamal. 2020. “Sistema-de-adquisicion-de-datos-con-ESP32_Jamal-Ikiss.pdf”. Barcelona: Universitat Politècnica de Catalunya. https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2117/344400/Sistema-de-adquisicion-de-datos-con-ESP32_Jamal-Ikiss.pdf.
- Illy, Andrea, y Rinantonio Viani. 2005. *Espresso Coffee: The Science of Quality*. Academic Press.
- INIAP. 1993. *Manual Del Cultivo Del Cafe*. Ecuador: INIAP Archivo Historico.
- Intercontinental Exchange. 2025. “Coffee C Futures Pricing”. ICE. 2025. <https://www.ice.com/products/15/coffee-c-futures/data?marketId=6996425&span=1>.
- Jian, Fuji, y Digvir S. Jayas. 2021. *Grains: Engineering Fundamentals of Drying and Storage*. Boca Raton: CRC Press. <https://doi.org/10.1201/9781003186199>.
- Jiménez, Álvaro. 2013. *El café en Costa Rica. Gran modelador del costarricense Jiménez C. Álvaro. 2013. Editorial Universidad de Costa Rica. San José, Costa Rica. 692 p. 1a ed.*

- Costa Rica: UCR. http://www.scielo.sa.cr/scielo.php?script=sci_abstract&pid=S0377-94242013000200012&lng=en&nrm=iso&tlng=es.
- Jiménez, Ronald, y Rigoberto Valverde. 1999. “Relaciones de humedad de equilibrio para café (*Coffea arabica*) de primera calidad en Costa Rica”. *Revista Tecnología En Marcha* 13 (2): 61–69.
- Köseoğlu Yılmaz, Pelin, Işıl Hacibekiroğlu, y Ufuk Kolak. 2014. “Effect of roasting on antioxidant and anticholinesterase capacities of coffee.” *Journal of Food & Nutrition Research* 53 (3): 232–39.
- Kuit, Michiel, Don M Jansen, y Nguyen Van Thiet. 2004. *Manual for Arabica Cultivation*.
- Labuza, T. P., A. Kaanane, y J. Y. Chen. 1985. “Effect of Temperature on the Moisture Sorption Isotherms and Water Activity Shift of Two Dehydrated Foods”. *Journal of Food Science* 50 (2): 385–92. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2621.1985.tb13409.x>.
- Latorre, Ramón. 1996. *Biofísica y fisiología celular*. España: Universidad de Sevilla.
- Liu, Thomas. 2010. “Capacitive-Type Humidity and Temperature Module/Sensor”. 2010. <https://www.sparkfun.com/datasheets/Sensors/Temperature/DHT22.pdf>.
- Marulanda, Alejandro Ospina, y Luis Ricardo Arguello Cuervo. 2017. “La industria de los cafés de especialidad. Relación entre certificaciones de calidad o especialidad, y los ingresos de los caficultores en Colombia. 1989 - 2015.”
- Mathlouthi, Mohamed. 2001. “Water content, water activity, water structure and the stability of foodstuffs”. *Food Control, Water Determination in Food - a Challenge for the Analysts*, 12 (7): 409–17. [https://doi.org/10.1016/S0956-7135\(01\)00032-9](https://doi.org/10.1016/S0956-7135(01)00032-9).
- Meisami-asl, Elham, Shahin Rafiee, Alireza Keyhani, y Ahmad Tabatabaefar. 2009. “Mathematical Modeling of Kinetics of Thin-Layer Drying of Apple (Var. Golab)”. *Agricultural Engineering International: CIGR Journal*, septiembre. <https://cigrjournal.org/index.php/Ejournal/article/view/1185>.
- Midilli, A., H. Kucuk, y Z. Yapar. 2002. “A New Model for Single-Layer Drying”. *Drying Technology* 20 (7): 1503–13. <https://doi.org/10.1081/DRT-120005864>.
- Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. 2009. *Regras Para Análise De Sementes*. 1a ed. Brasília: Mapa.
- Moreira, R., F. Chenlo, M. D. Torres, y D. M. Prieto. 2010. “Water adsorption and desorption isotherms of chestnut and wheat flours”. *Industrial Crops and Products* 32 (3): 252–57. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2010.04.021>.
- Moss, M. O. 1996. “Mode of Formation of Ochratoxin A”. *Food Additives and Contaminants* 13 Suppl:5–9.
- Mujumdar, Arun S. 2015. *Handbook of Industrial Drying*. 4a ed. CRC Press.
- Munguía, Salvador Mena, Francisco Ceballos Cárdena, y Mario Ramírez Martínez. 2013. *Almacenamiento y conservación de granos*. 1a ed. Mexico: Editorial Universidad de Guadalajara.
- Murillo Jiménez, Daniel. 2020. “Cinética de la desgasificación del café tostado”. Costa Rica: Universidad de Costa Rica.
- Némethy, George, y Harold A. Scheraga. 1962. “The Structure of Water and Hydrophobic Bonding in Proteins. III. The Thermodynamic Properties of Hydrophobic Bonds in Proteins.” *The Journal of Physical Chemistry* 66 (10): 1773–89. <https://doi.org/10.1021/j100816a004>.
- Noguera Córdoba, Diego Fernando, y Diana Marsela Rivero Barrios. 2021. “Isotermas dinámicas de sorción de humedad y propiedades termodinámicas de café soluble”. *Ingeniería y Región*, núm. 25, 32–45.
- Oliveira, Gabriel, Paulo Correa, Emílio Santos, Pedro Casanova, y Mayra Diniz. 2011. “Evaluation of thermodynamic properties using GAB model to describe the desorption

- process of cocoa beans”. *International Journal of Food Science & Technology* 46 (julio):2077–84. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2621.2011.02719.x>.
- Onset Computer Corporation. 2022. “HOBO® MX2300 Series Data Logger Manual”. 2022. <https://www.onsetcomp.com/sites/default/files/2023-01/20923-O%20MX2300%20Manual.pdf>.
- Ortega, Alexis Rubiel Adarme. 2016. “Identificación de elementos estructurales para un modelo de negocios de cafés especiales en nariño, huila y cauca.”
- Osmayo Huacan, Brislyn Marolay. 2023. “Propiedades termodinámicas e isothermas de sorción de agua de granos de quinua (*Chenopodium quinoa*).” Universidad Nacional de Moquegua. <https://repositorio.unam.edu.pe/handle/UNAM/502>.
- Ospina, John Fernando Agudelo, y Ricardo Arturo Franco Castro. 2009. “Aplicación de la ley de fick y el modelo de peleg para estudiar la absorción de agua en el frijol cargamanto ombligo amarillo (*phaseolus vulgaris* l.) y la arveja seca (*pisan sativa*) durante la rehidratación”. *Publicaciones e Investigación* 3 (agosto):15–28. <https://doi.org/10.22490/25394088.565>.
- Ospina, Julio Ernesto. 2001. *Características físico mecánicas y análisis de calidad de granos*. Colombia: Univ. Nacional de Colombia.
- Özdemir, Murat, y Y Onur Devres. 1999. “The thin layer drying characteristics of hazelnuts during roasting”. *Journal of Food Engineering* 42 (4): 225–33. [https://doi.org/10.1016/S0260-8774\(99\)00126-0](https://doi.org/10.1016/S0260-8774(99)00126-0).
- Page, Glen E. 1949. “Factors Influencing the Maximum Rates of Air Drying Shelled Corn in Thin Layers.” M.S. <https://www.proquest.com/docview/301817819/abstract/C78EAC965B354B9BPQ/1>.
- Palacios, Enrique, Fernando Remiro, y Lucas López. 2014. *Microcontrolador PIC16F84. Desarrollo de proyectos. 3ª edición*. Vol. 3. España: Grupo Editorial RA-MA.
- Peleg, Micha. 1993. “Assessment of a Semi-Empirical Four Parameter General Model for Sigmoid Moisture Sorption Isotherms”. *Journal of Food Process Engineering* 16 (1): 21–37. <https://doi.org/10.1111/j.1745-4530.1993.tb00160.x>.
- Peraza Alpízar, Stephanie, Guillermo Asdrúbal Vargas Elías, Bryan J. Badilla Mena, Oscar Durán Gamboa, Roy A. Gamboa Fuentes, y Matías Adrián Chaves Herrera. 2024. “Sistema de adquisición de datos con aplicación IOT para el equilibrio del aire en contacto con granos de cacao”. *Sociedade Brasileira de Engenharia Agrícola (SBEA), LII Congresso Brasileiro de Engenharia Agrícola - CONBEA 2023 18 a 21 de outubro de 2023 – Ribeirão Preto - SP, Brasil*, enero. <https://kerwa.ucr.ac.cr/handle/10669/90778>.
- Puerta Quintero, Gloria Inés. 2006. “La humedad controlada del grano preserva la calidad del café”. <https://biblioteca.cenicafe.org/bitstream/10778/418/1/avt0352.pdf>.
- Rahn, Eric, Philippe Vaast, Peter Läderach, Piet van Asten, Laurence Jassogne, y Jaboury Ghazoul. 2018. “Exploring Adaptation Strategies of Coffee Production to Climate Change Using a Process-Based Model”. *Ecological Modelling* 371 (marzo):76–89. <https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2018.01.009>.
- Raspberry. 2021. “raspberrypi-zero-2-w-product-brief.pdf”. 2021. https://datasheets.raspberrypi.com/rpizero2/raspberrypi-zero-2-w-product-brief.pdf?_gl=1*18djyyl*_ga*MzUxMTA0OTUxLjE3MTAyNjgzNTQ.*_ga_22FD70LWDS*MTcxMDI2ODM1NC4xLjEuMTcxMDI2ODY4Ny4wLjAuMA..
- Recio Loría, Mario. 1999. “Aireación bajo condiciones ambientales de alta humedad relativa y baja temperatura para la conservación de maíz amarillo almacenado”. Costa Rica: Universidad de Costa Rica. <https://repositorio.sibdi.ucr.ac.cr/handle/123456789/580>.
- Rodriguez, David, y Jesús Hernández-Ruíz. 2020. *Study of moisture diffusion with concentration-dependent coefficient: Analytical and numerical approaches*.

- Ruszkowska, M., Przemysław Dmowski, y Krzysztof Urbanowicz. 2021. “Hygroscopic Properties of Green Coffee Transported by Sea”. *TransNav, International Journal on Marine Navigation and Safety od Sea Transportation* 15 (3): 641–47. <https://doi.org/10.12716/1001.15.03.19>.
- Samaniego-Esguerra, Christine M., Ian F. Boag, y Gordon L. Robertson. 1991. “Comparison of regression methods for fitting the GAB model to the moisture isotherms of some dried fruit and vegetables”. *Journal of Food Engineering* 13 (2): 115–33. [https://doi.org/10.1016/0260-8774\(91\)90014-J](https://doi.org/10.1016/0260-8774(91)90014-J).
- Santos, Samuel Gonçalves Ferreira dos, Daniel Pereira da Silva, Jefferson Kran Sarti, Vinícius Gonçalves Almeida, y Renato Souza Rodovalho. 2020. “Adsorption Isotherms and Isothermic Heat in Coffea Arabica Beans”. *Pesquisa Agropecuária Tropical* 50. <https://www.redalyc.org/journal/2530/253068033006/html/>.
- Şemen, Sevcan, Selda Mercan, Murat Yayla, y Münevver Açıkkol. 2017. “Elemental composition of green coffee and its contribution to dietary intake”. *Food Chemistry* 215 (enero):92–100. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2016.07.176>.
- Seuba, Manel López i. 2019. *Internet de las Cosas*. España: Ra-Ma Editorial.
- Socorro, A. 2010. “vol.27-No.2B.pdf” 27:257–62.
- Talens Oliag, Pau. 2017. “Determinación de la isoterma de sorción de agua un alimento”, junio. <https://riunet.upv.es/handle/10251/83506>.
- Thingier.io. 2024. “Thingier.io | Open Source IoT Platform”. Thingier.io. 2024. <https://thingier.io/pricing/>.
- Treamnuk, Tawarat, Tinakorn Pengprakhon, y Krawee Treamnuk. 2024. “Effect of temperature on moisture sorption isotherm characteristics of Thai jasmine paddy (Khao Dawk Mali 105)”. *LWT* 210 (octubre):116871. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2024.116871>.
- Valderrama, Jose. 1998. *Informacion Tecnologica*. Vol. 9. Centro de Informacion Tecnologica.
- Valverde, Rigoberto. 1993. “Desarrollo de las curvas de humedad de equilibrio para café pergamino y café oro (Coffea arabica) de primera calidad de C.R”. Licenciatura, Costa Rica: Universidad de Costa Rica.
- Vargas Elías, Guillermo. 1999. “Análisis poscosecha y procesamiento de la nuez en concha de macadamia (Macadamia integrifolia) en región tropical húmeda de Costa Rica”. Costa Rica: Universidad de Costa Rica.
- Vargas-Elías, Guillermo A., Paulo C. Corrêa, Natália R. De Souza, Fernanda M. Baptestini, y Evandro De C. Melo. 2016. “Kinetics of Mass Loss of Arabica Coffee during Roasting Process”. *Engenharia Agrícola* 36 (abril):300–308. <https://doi.org/10.1590/1809-4430-Eng.Agric.v36n2p300-308/2016>.
- Vignola, Raffaele, William Walter, Karina Poveda, y Armando Vargas. 2018. “Prácticas efectivas para la reducción de impactos por eventos climáticos en el cultivo de café en costa rica”. <https://www.mag.go.cr/bibliotecavirtual/F01-8206.pdf>.
- Wang, Xiuju, y Loong-Tak Lim. 2014. “A Kinetics and Modeling Study of Coffee Roasting Under Isothermal Conditions”. *Food and Bioprocess Technology* 7 (3): 621–32. <https://doi.org/10.1007/s11947-013-1159-8>.
- Westerman, P, G White, y I Ross. 1973. “Relative Humidity Effect on the High-Temperature Drying of Shelled Corn”, 1136–39.
- Zhang, Zhen-shan, Xiao-dan Li, Hui-jie Jia, y Yu-lan Liu. 2022. “Moisture sorption isotherms and thermodynamic properties of tiger nuts: An oil-rich tuber”. *LWT* 167 (septiembre):113866. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2022.113866>.
- Zogzas, N.P., Z.B. Maroulis, y D. Marinos-Kouris. 1996. “Moisture Diffusivity Data Compilation in Foodstuffs”. *Drying Technology* 14 (10): 2225–53. <https://doi.org/10.1080/07373939608917205>.

Zurita, Dimar. 2017. "FIAI - Dimar Zurita Vasquez.pdf". Perú: Universidad Nacional de San Martín. <https://repositorio.unsm.edu.pe/bitstream/11458/2773/1/FIAI%20-%20Dimar%20Zurita%20Vasquez.pdf>.

APÉNDICES

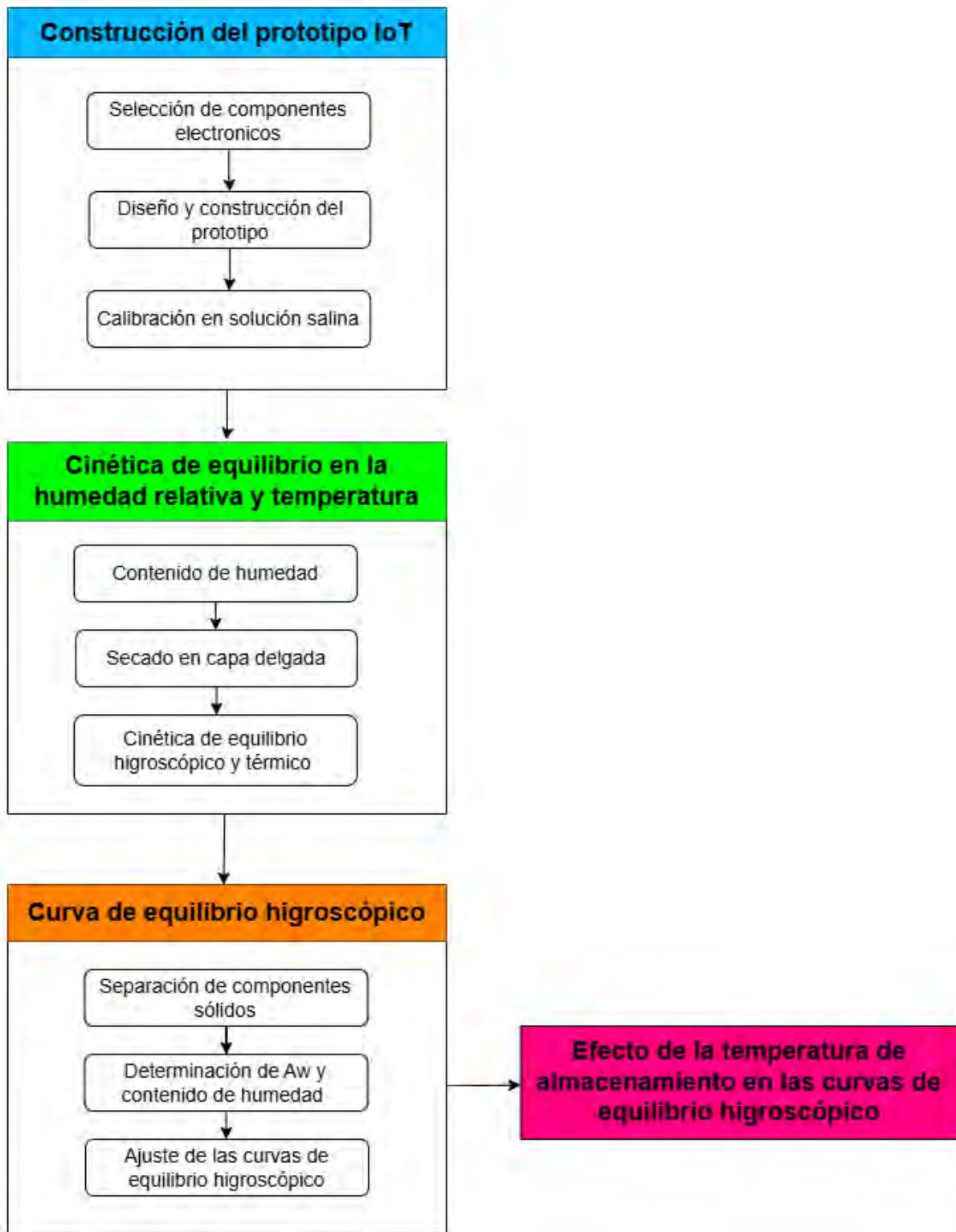


Figura A.1. Diagrama de flujo por etapas principales de la metodología propuesta.

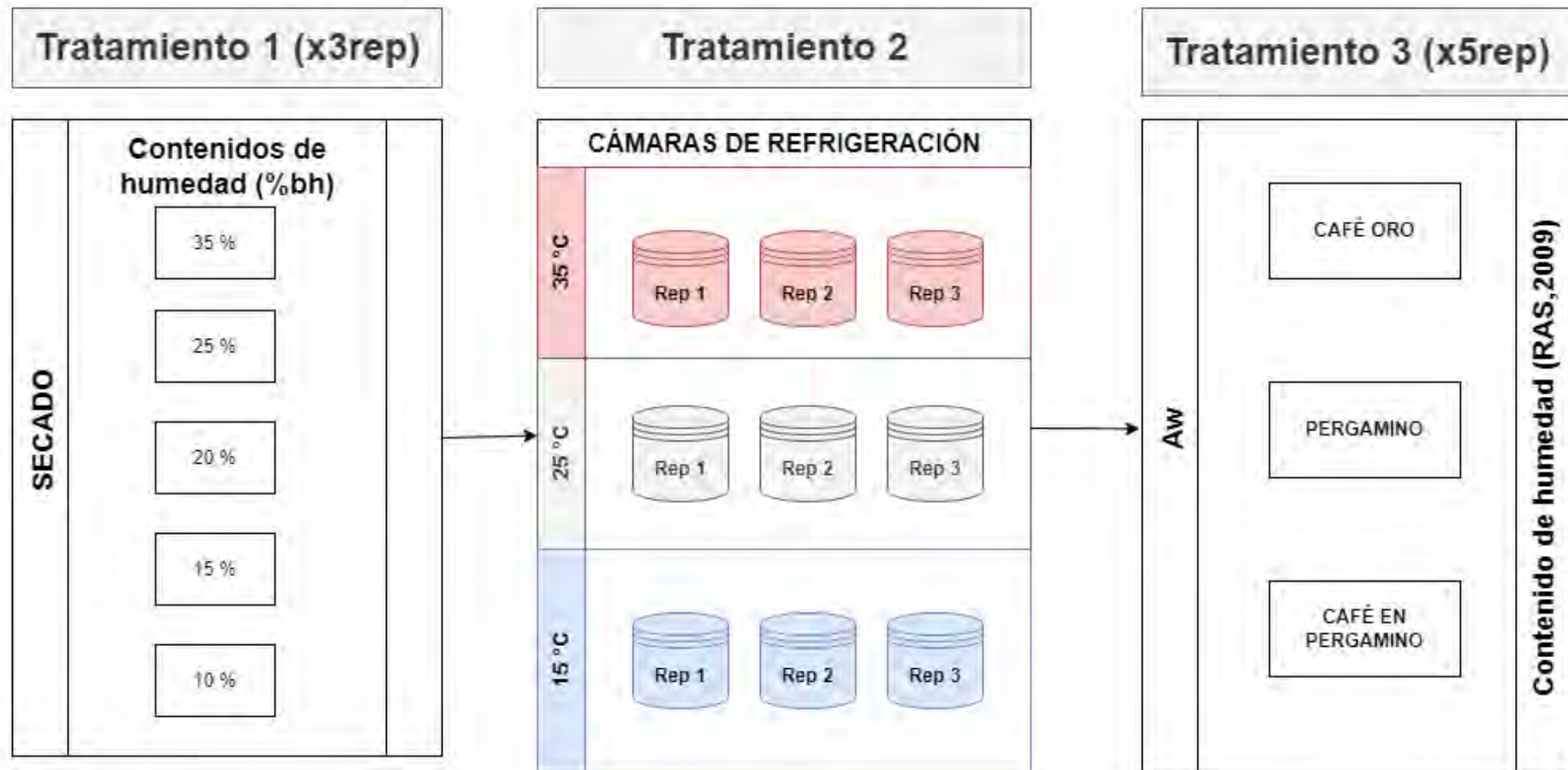


Figura A.2. Diagrama del diseño experimento

Tabla A. 1. Equipos de laboratorio utilizados.

Equipo	Función
Prototipo IoT (microcontrolador ESP32-WROOM-32 y sensor DHT-21 AM2310)	Registro de condiciones de almacenamiento del café
Desecador	Calibración de sensores
Horno de convección forzada	Secado y determinación del contenido de humedad de las muestras.
Bandejas	Bandejas para control de pérdida de humedad en silos
Clasificador por densidad Hart-Carter.	Separar los componentes del grano en pergamino (oro y pergamino)
Molido Holstein Housewares	Muele las muestras de café pergamino y sus componentes
AQUALAB 4TE	Actividad de agua

Tabla A. 2. Costos de los insumos requeridos para realizar el estudio.

Descripción	Unidad	Costo Unidad	Cantidad	Total
Costos Directos				
Materiales y Equipo				
Microcontrolador ESP32 con Wifi y Bluetooth	Un	9,156.45	6	₡ 54,938.68
Sensor de humedad y temperatura DHT21	Un	6,094.09	18	₡ 109,693.61
Caja a prueba de humedad IP66	Un	4,593.53	6	₡ 27,561.21
Protoboard soldable PCB 5x7cm	Un	459.35	6	₡ 2,756.12
Cafe despulpado	Cajuela	₡ 8,000.00	3	₡ 24,000.00
Total Materiales				₡ 218,949.61



Figura A.3. Diagrama del prototipo IoT para el monitoreo de la humedad relativa y temperatura de almacenamiento del café miel.

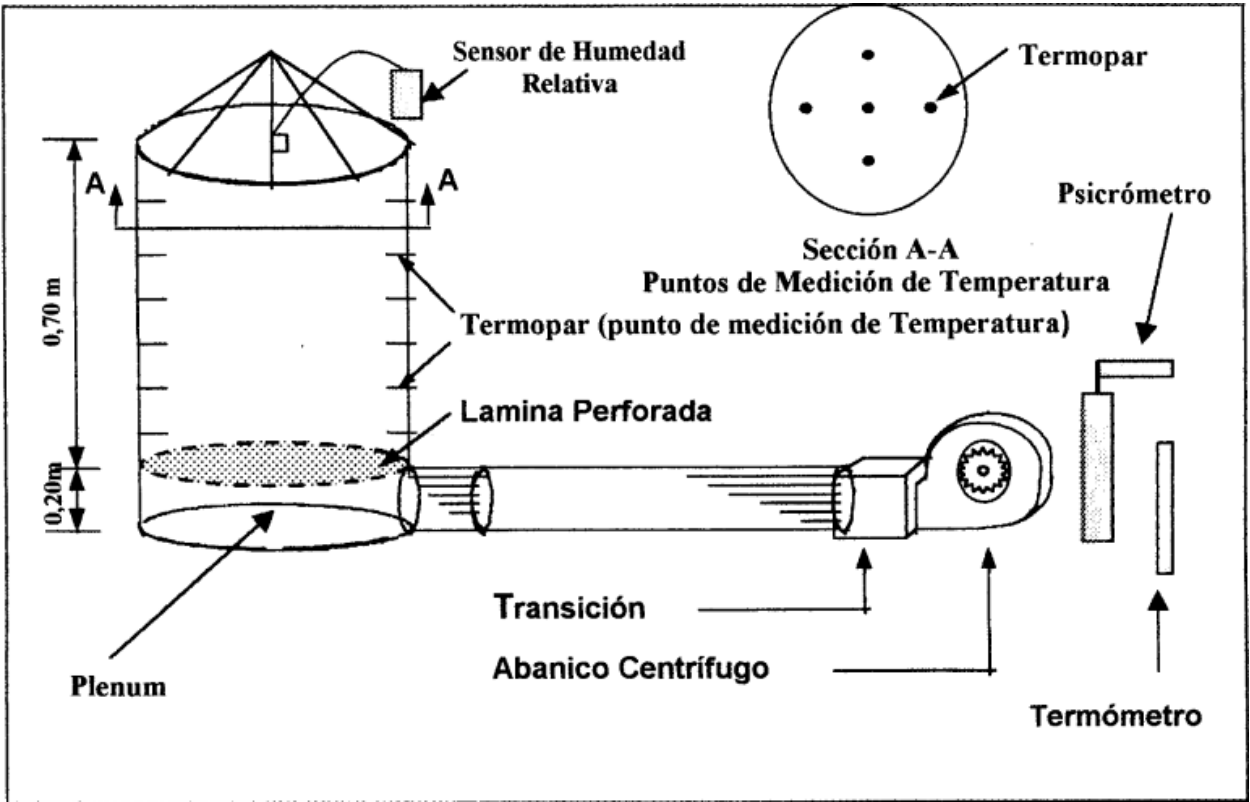


Figura A.4. Secadora de flujo transversal (Tomado de: Recio Loría 1999)

Tabla A. 3. Datos de humedad relativa de los sensores DHT21 en las soluciones salinas de calibración

#	Sensor	#	HR_leída (KNO3)	#	HR_real (KNO3)	#	Variación	#	HR_leída (NaCl)	#	HR_real (NaCl)	#	Variación	#	HR_leída (CaCl2)	#	HR_real (CaCl2)	#	Variación
1			99,9		93,38		-6,52		78,5		76,02		-2,48		31,20		29,39		-1,81
2			99,9		92,92		-6,98		79,6		76,12		-3,48		31,00		29,39		-1,61
3			97,0		93,49		-3,51		78,4		76,06		-2,34		31,60		29,39		-2,21
4			99,9		93,38		-6,52		82,3		76,02		-6,28		32,40		29,39		-3,01
5			99,2		92,92		-6,28		81,2		76,12		-5,08		31,10		29,39		-1,71
6			99,9		93,49		-6,41		81,5		76,06		-5,44		31,20		29,39		-1,81
7			99,9		93,38		-6,52		79,2		76,02		-3,18		29,70		29,39		-0,31
8			97,6		92,92		-4,68		80,9		76,12		-4,78		32,90		29,39		-3,51
9			95,7		93,49		-2,21		76		76,06		0,06		31,20		29,39		-1,81
10			99,5		93,38		-6,12		80,8		76,02		-4,78		30,40		29,39		-1,01
11			98,7		92,92		-5,78		79,1		76,12		-2,98		29,90		29,39		-0,51
13			92,1		93,38		1,28		79,5		76,02		-3,48		29,40		29,39		-0,01
14			82,8		92,92		10,12		70,9		76,12		5,22		31,20		29,39		-1,81
15			99,9		93,49		-6,41		84,7		76,06		-8,64		32,80		29,39		-3,41
16			96,1		93,38		-2,72		75,5		76,02		0,52		28,15		29,39		1,24
17			98,3		92,92		-5,38		77,4		76,12		-1,28		30,40		29,39		-1,01
18			95,2		93,49		-1,71		75,6		76,06		0,46		26,30		29,39		3,09
					Min		-6,98				Min		-8,64				Min		-3,51
					Max		10,12				Max		5,22				Max		3,09
					DESV. STANDARD		4,27				DESV. STANDARD		2,65				DESV. STANDARD		1,31

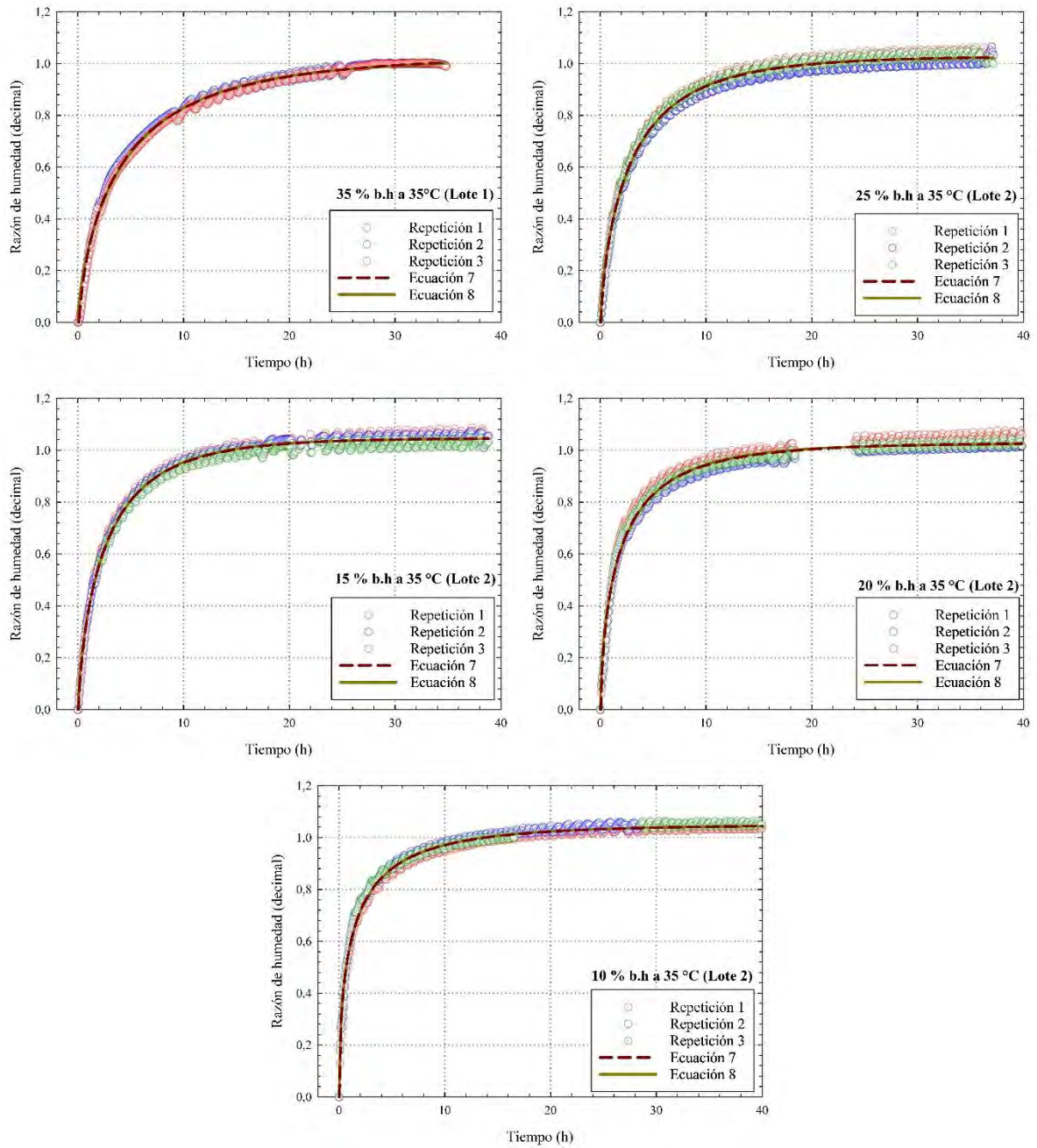


Figura A.5. Equilibrio higroscópico del café miel del lote 1 a los cinco contenidos de humedad de estudio almacenados a 35°C.

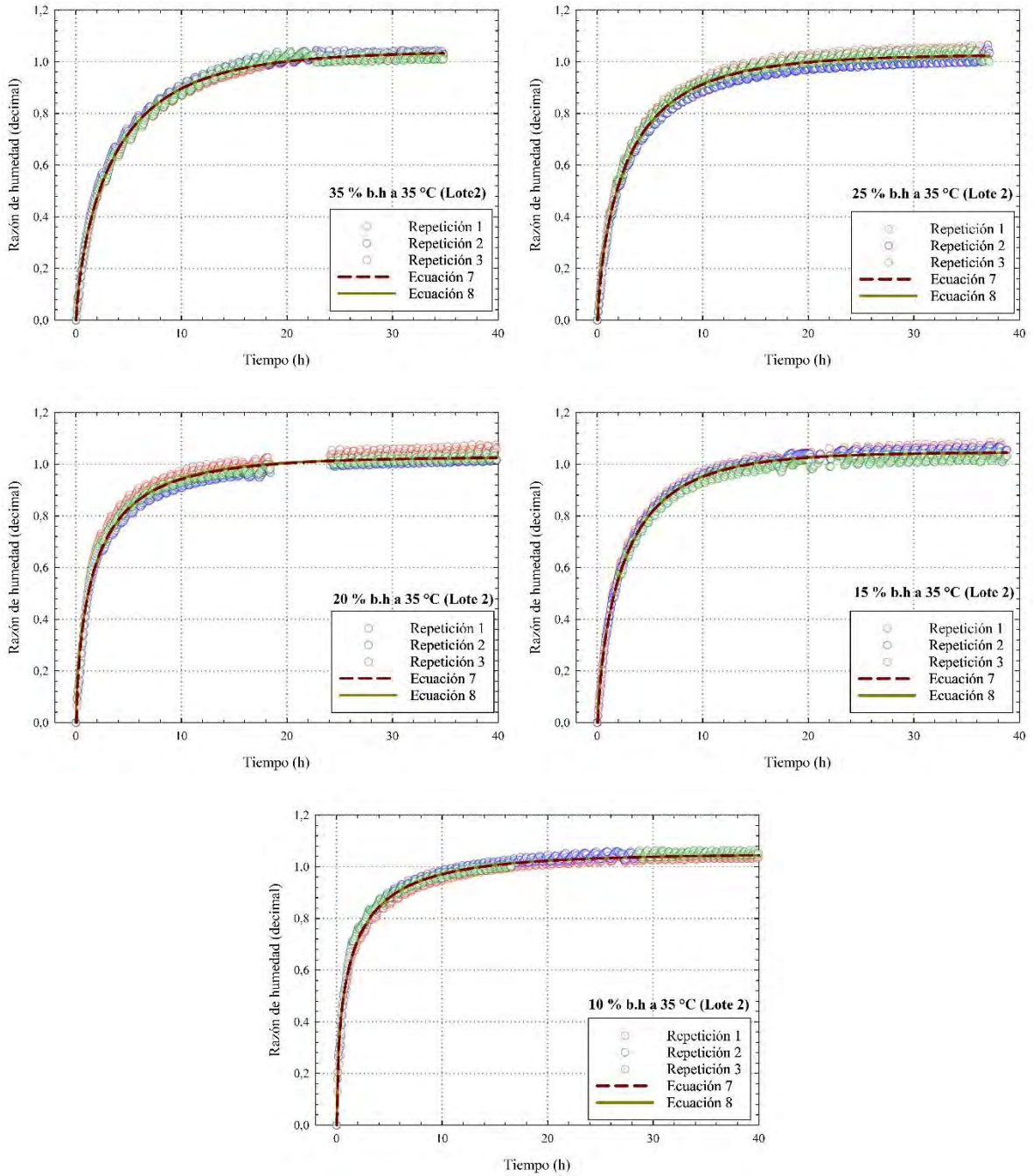


Figura A. 6. Equilibrio higroscópico del café miel del lote 2 a los cinco contenidos de humedad de estudio almacenados a 35°C.

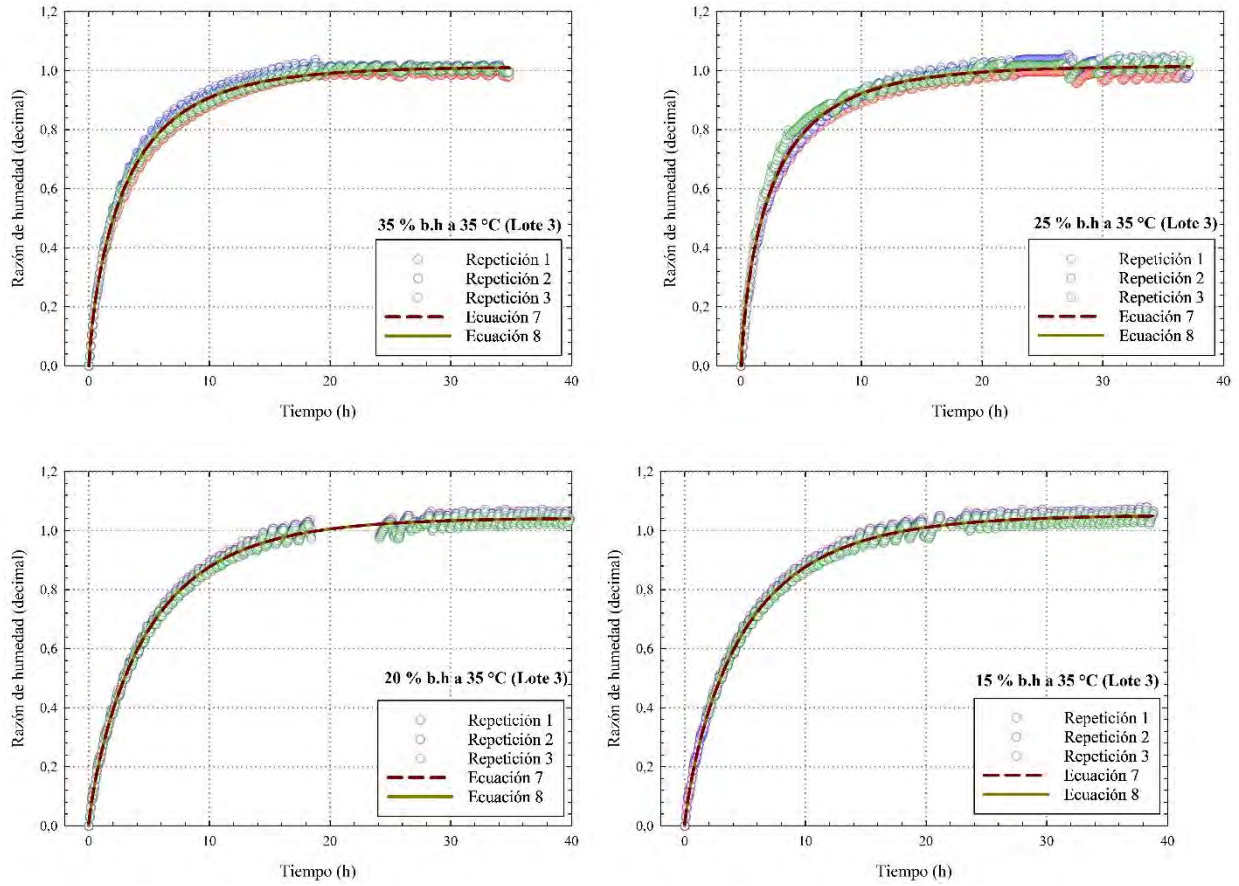


Figura A.7. Equilibrio higroscópico del café miel del lote 3 a los cinco contenidos de humedad de estudio almacenados a 35°C

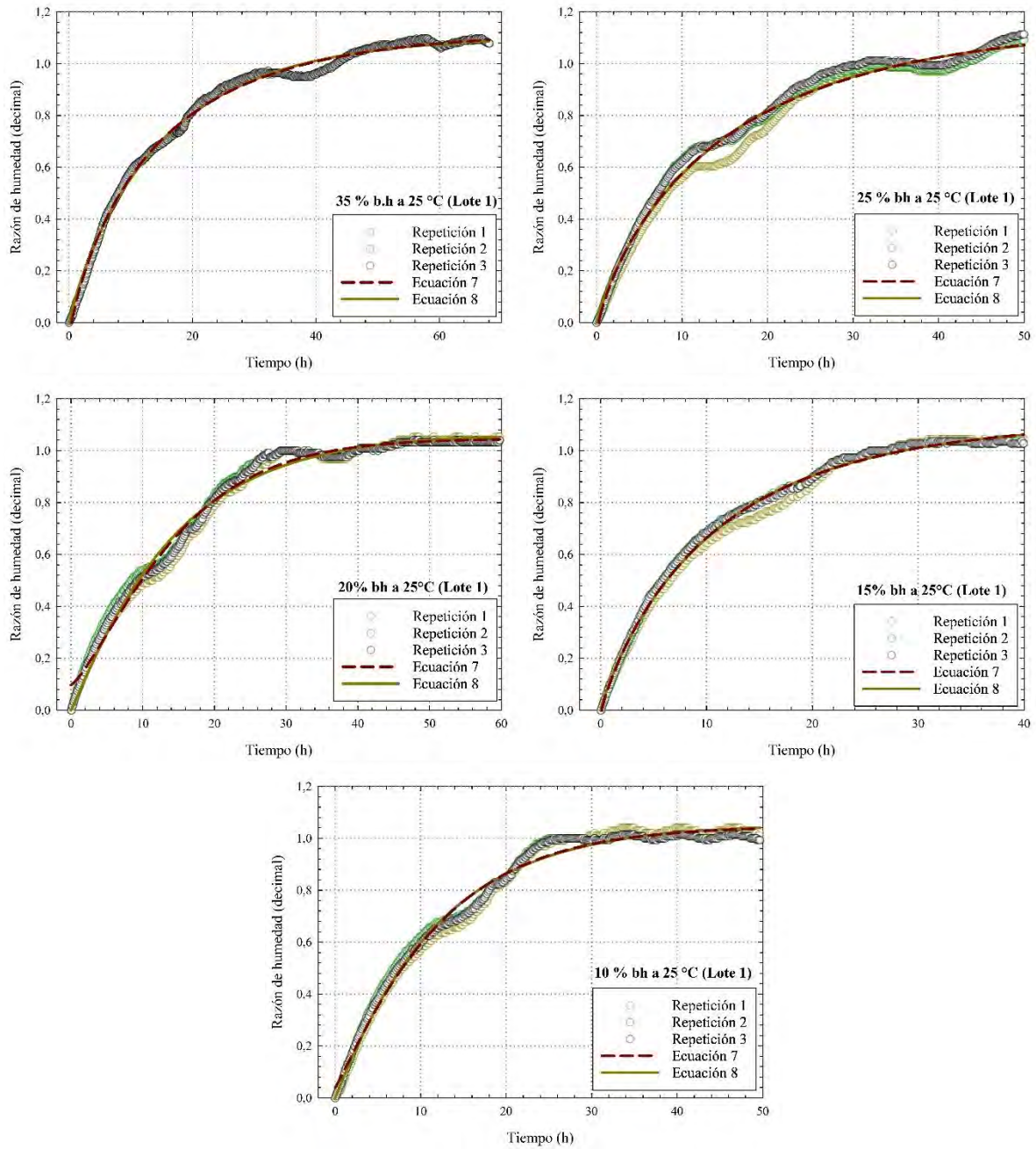


Figura A.8. Equilibrio higroscópico del café miel del lote 1 a los cinco contenidos de humedad de estudio almacenados a 25°C.

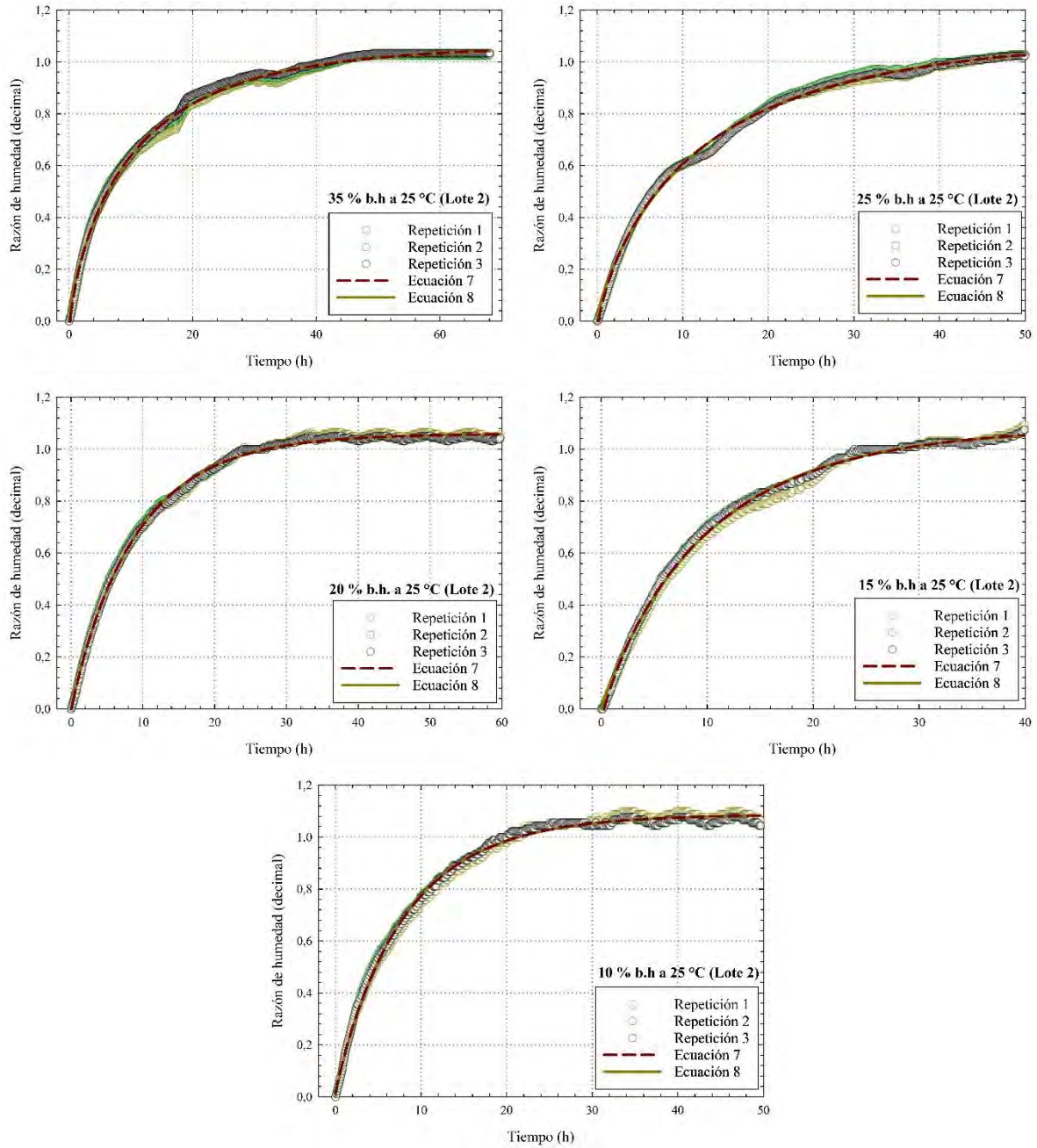


Figura A. 9. Equilibrio higroscópico del café miel del lote 2 a los cinco contenidos de humedad de estudio almacenados a 25 °C.

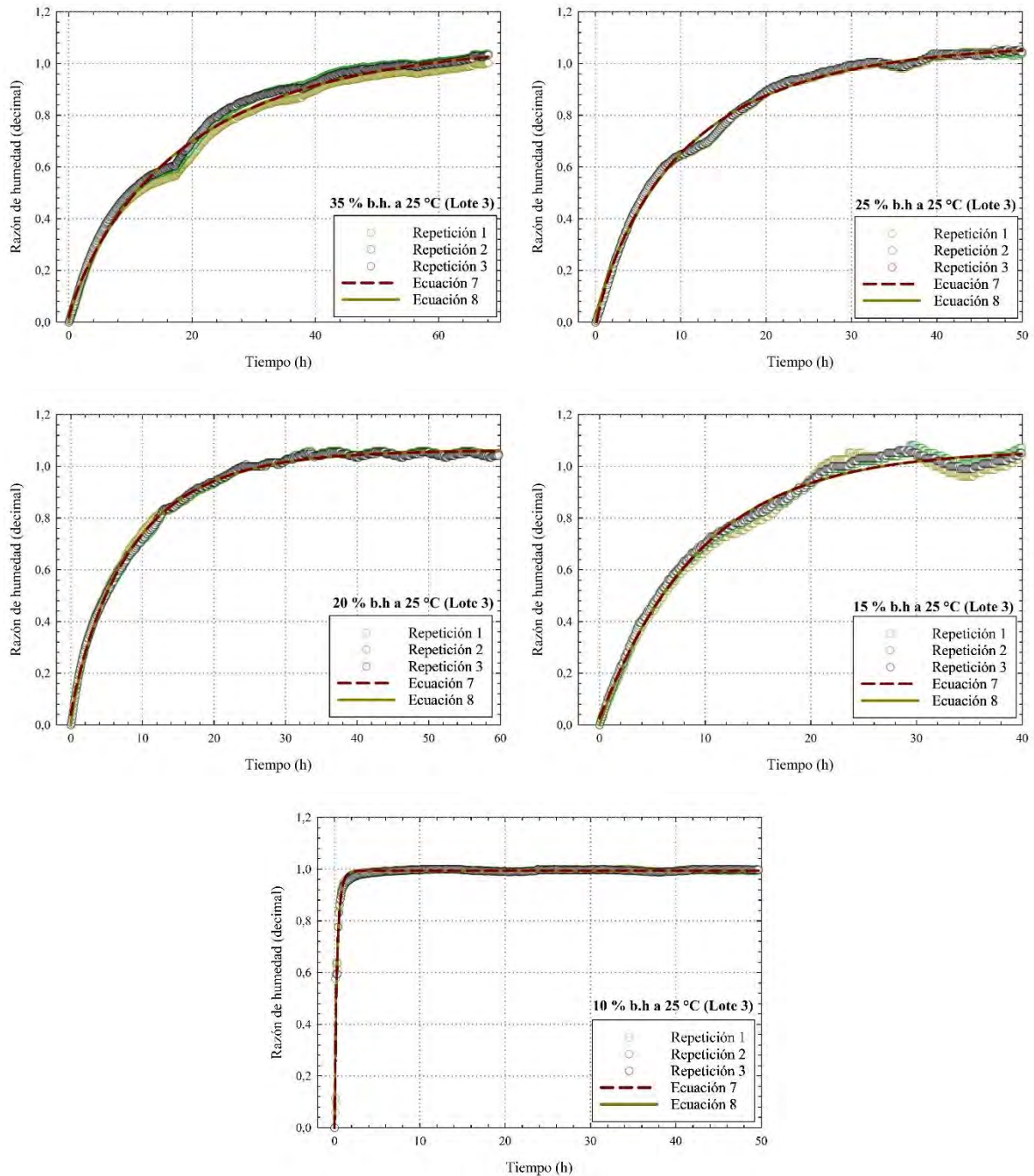


Figura A.10. Equilibrio higroscópico del café miel del lote 3 a los cinco contenidos de humedad de estudio almacenados a 25 °C.

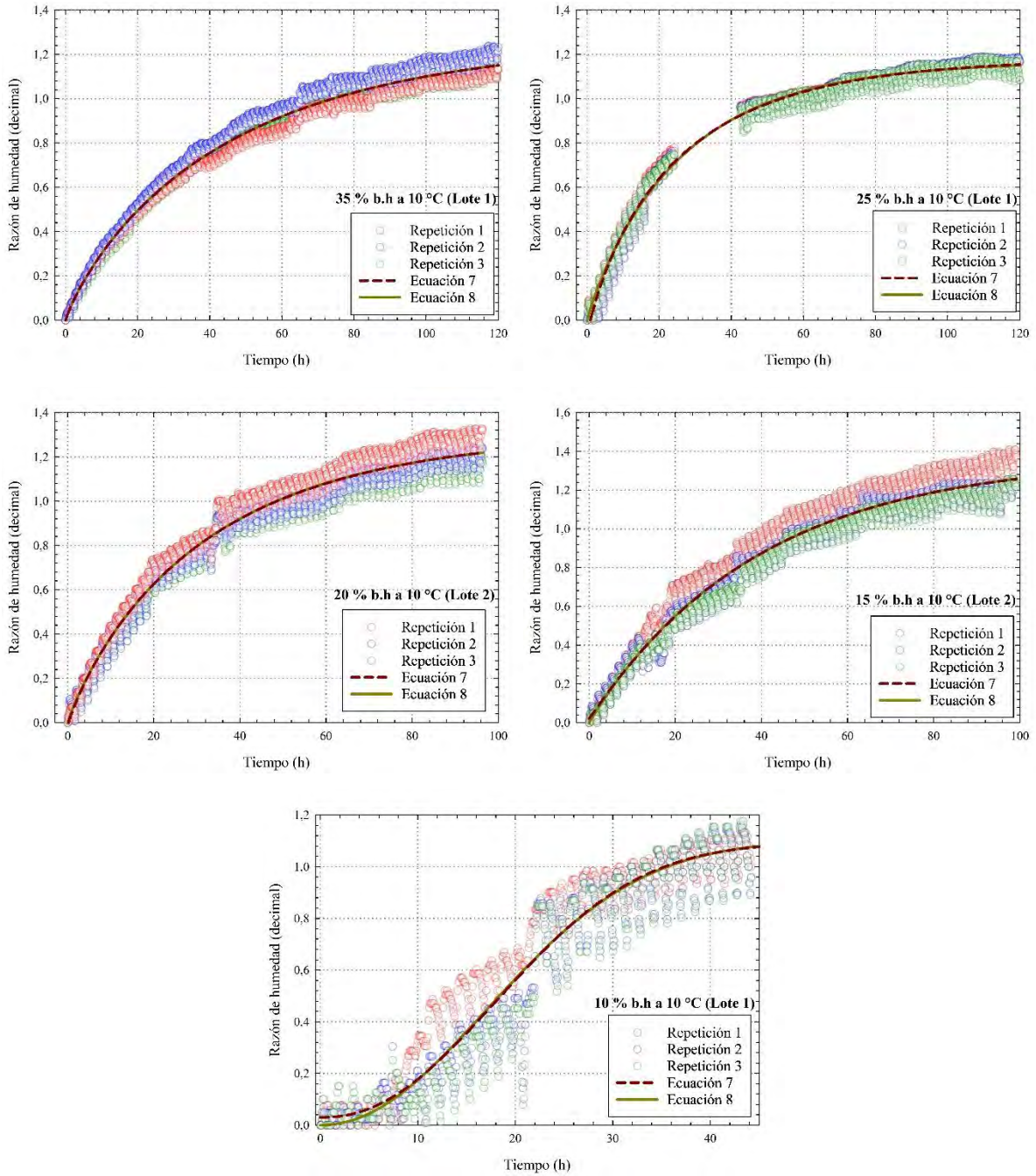


Figura A.11. Equilibrio higroscópico del café miel del lote 1 a los cinco contenidos de humedad de estudio almacenados a 10 °C.

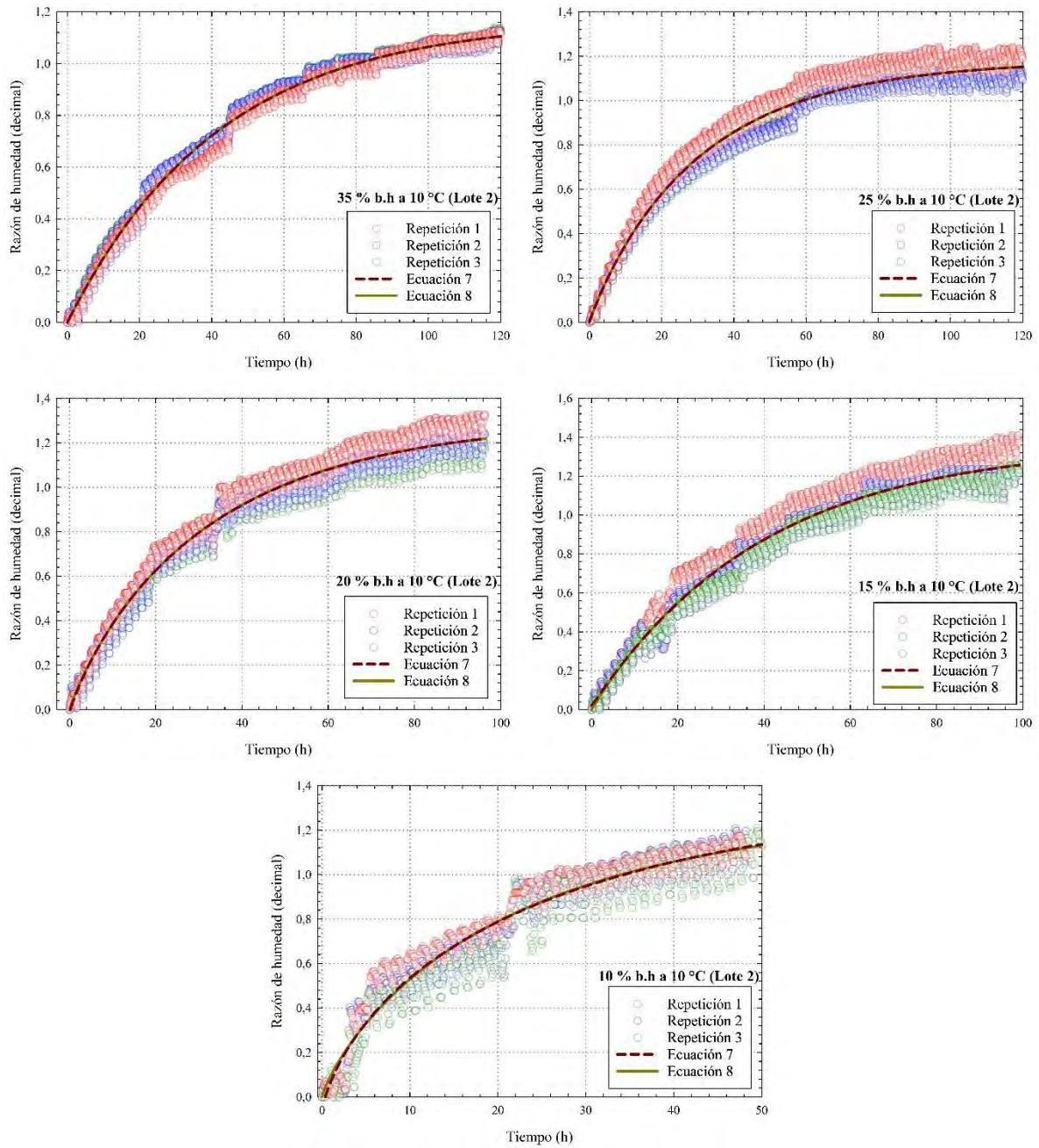


Figura A.12. Equilibrio higroscópico del café miel del lote 2 a los cinco contenidos de humedad de estudio almacenados a 10 °C.

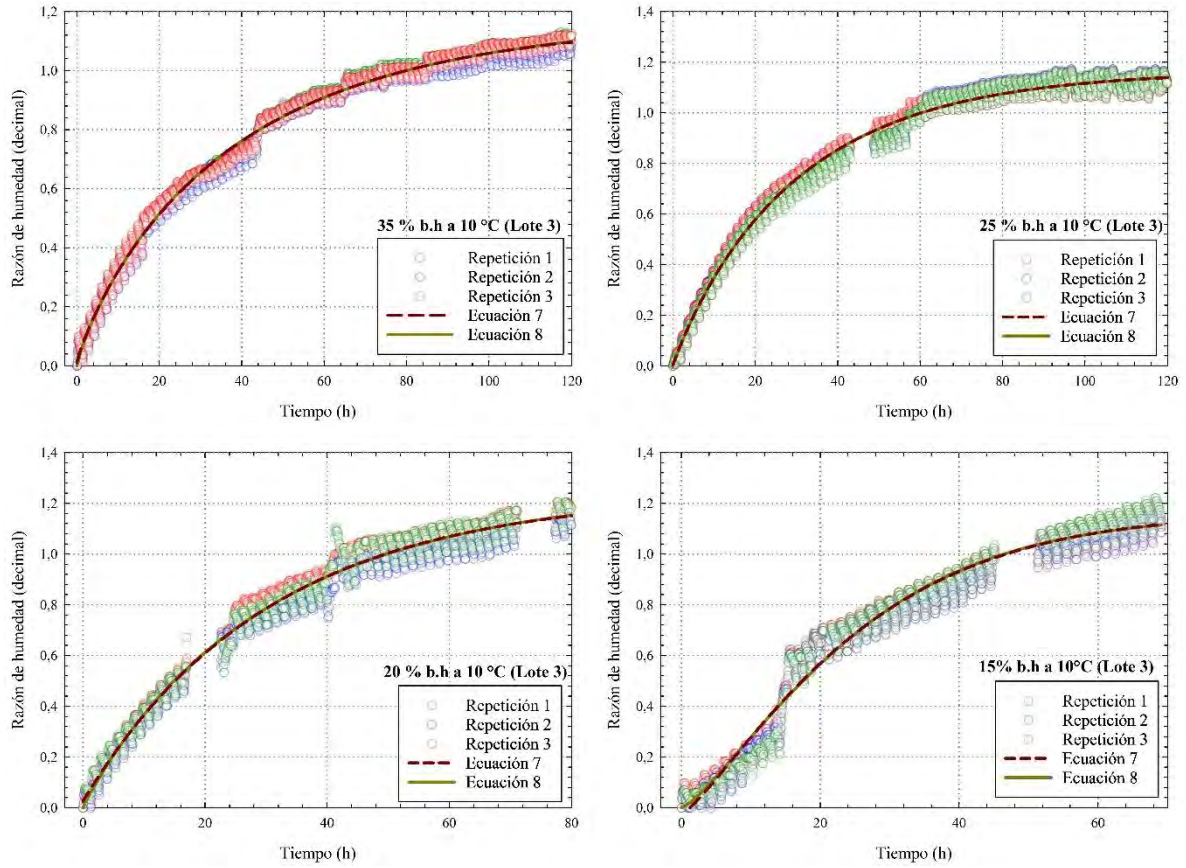


Figura A.13. Equilibrio higroscópico del café miel del lote 3 a los cinco contenidos de humedad de estudio almacenados a 10 °C.

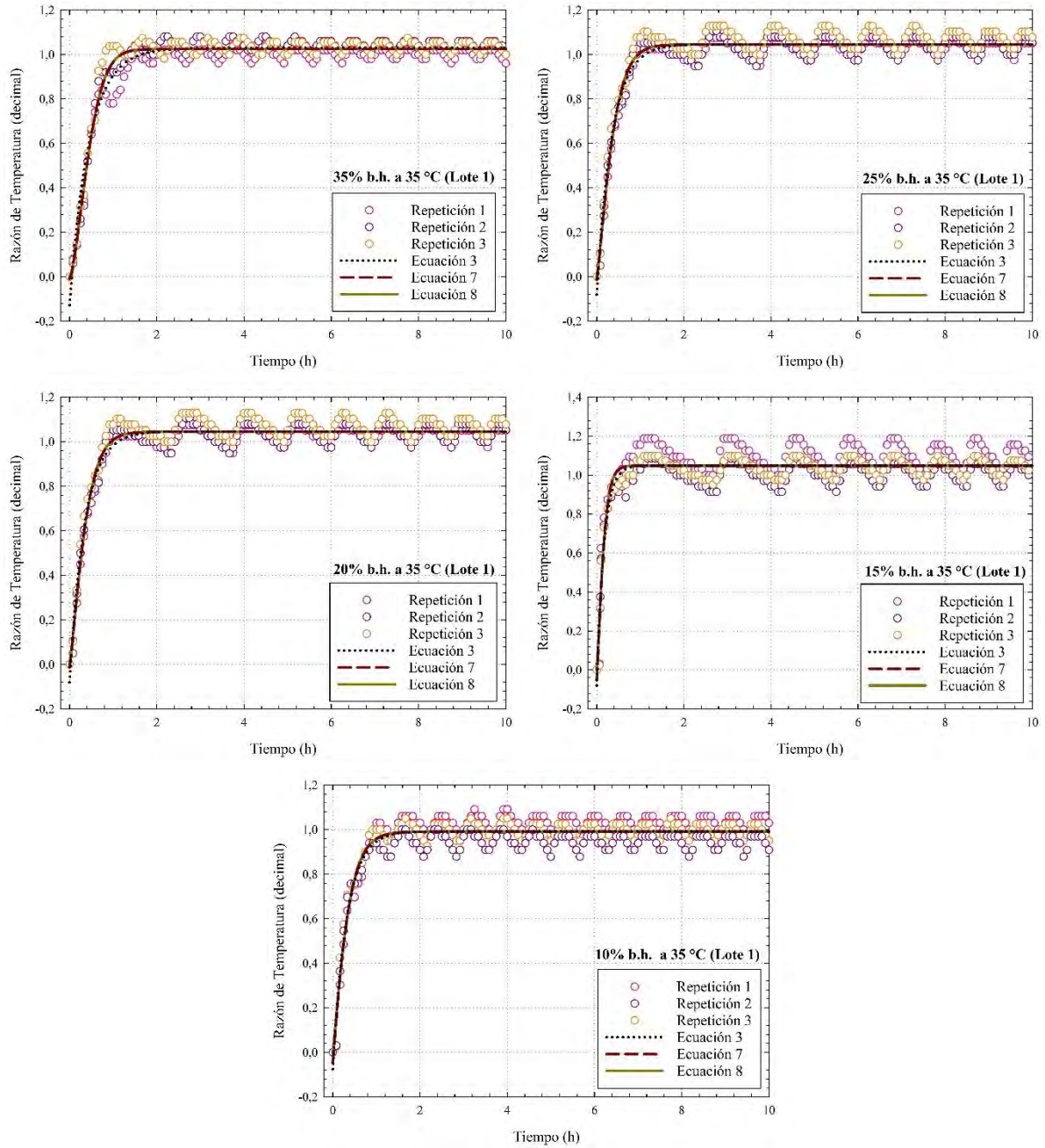


Figura A. 14. Equilibrio en la temperatura del aire en contacto con el café miel del lote 1 a los cinco contenidos de humedad de estudio almacenados a 35 °C.

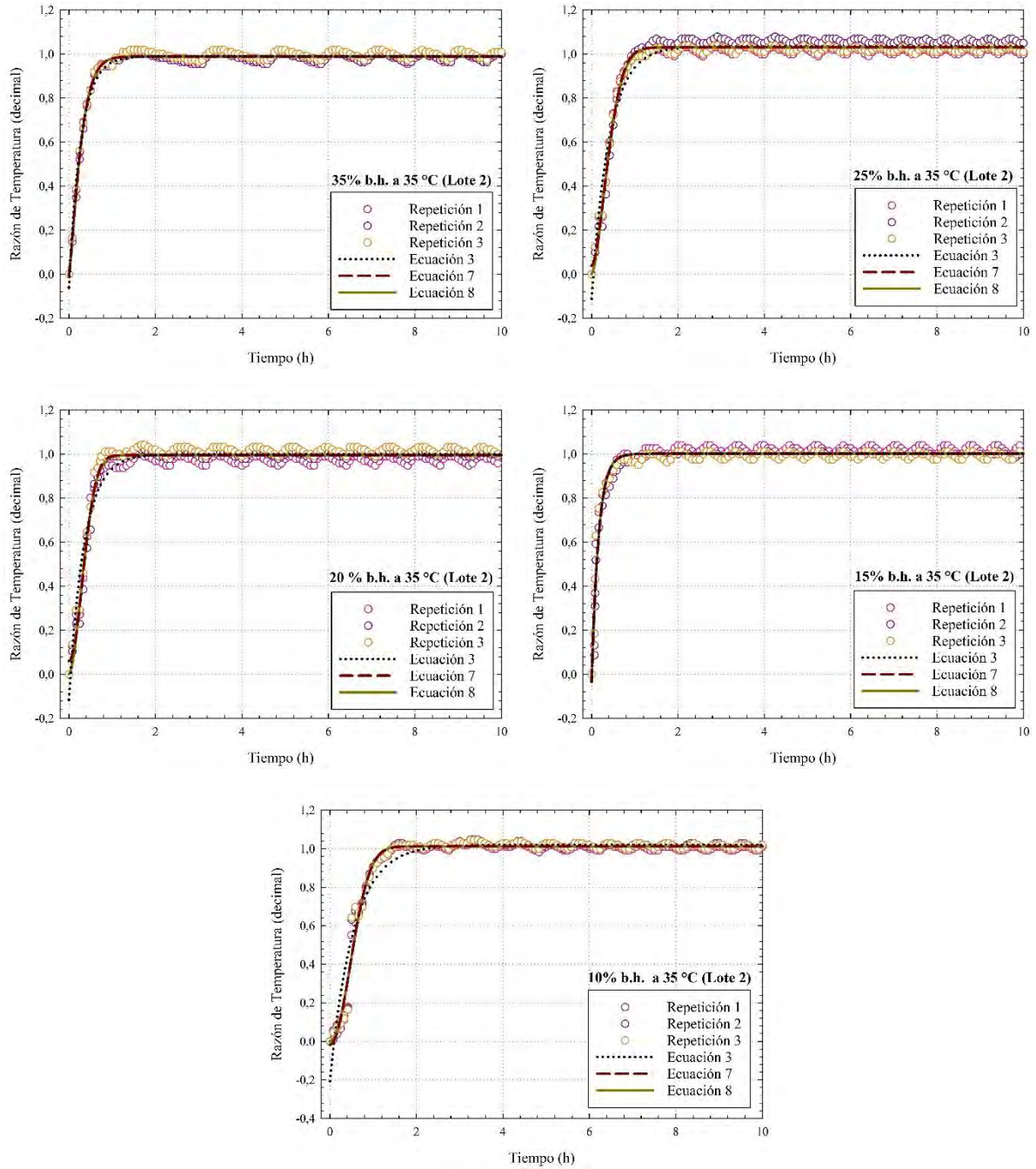


Figura A.15. Equilibrio en la temperatura del aire en contacto con el café miel del lote 2 a los cinco contenidos de humedad de estudio almacenados a 35 °C.

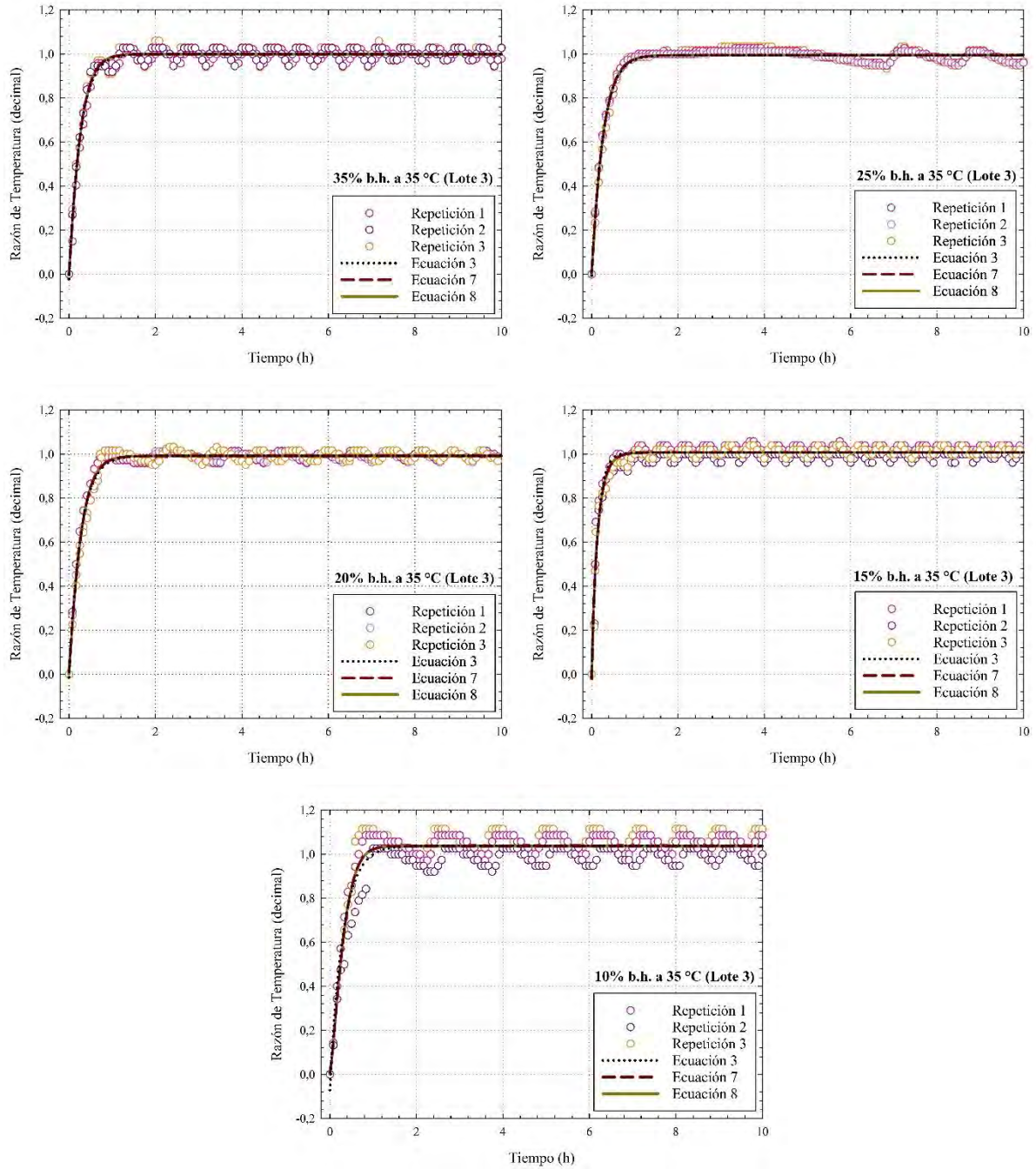


Figura A.16. Equilibrio en la temperatura del aire en contacto con el café miel del lote 3 a los cinco contenidos de humedad de estudio almacenados a 35 °C.

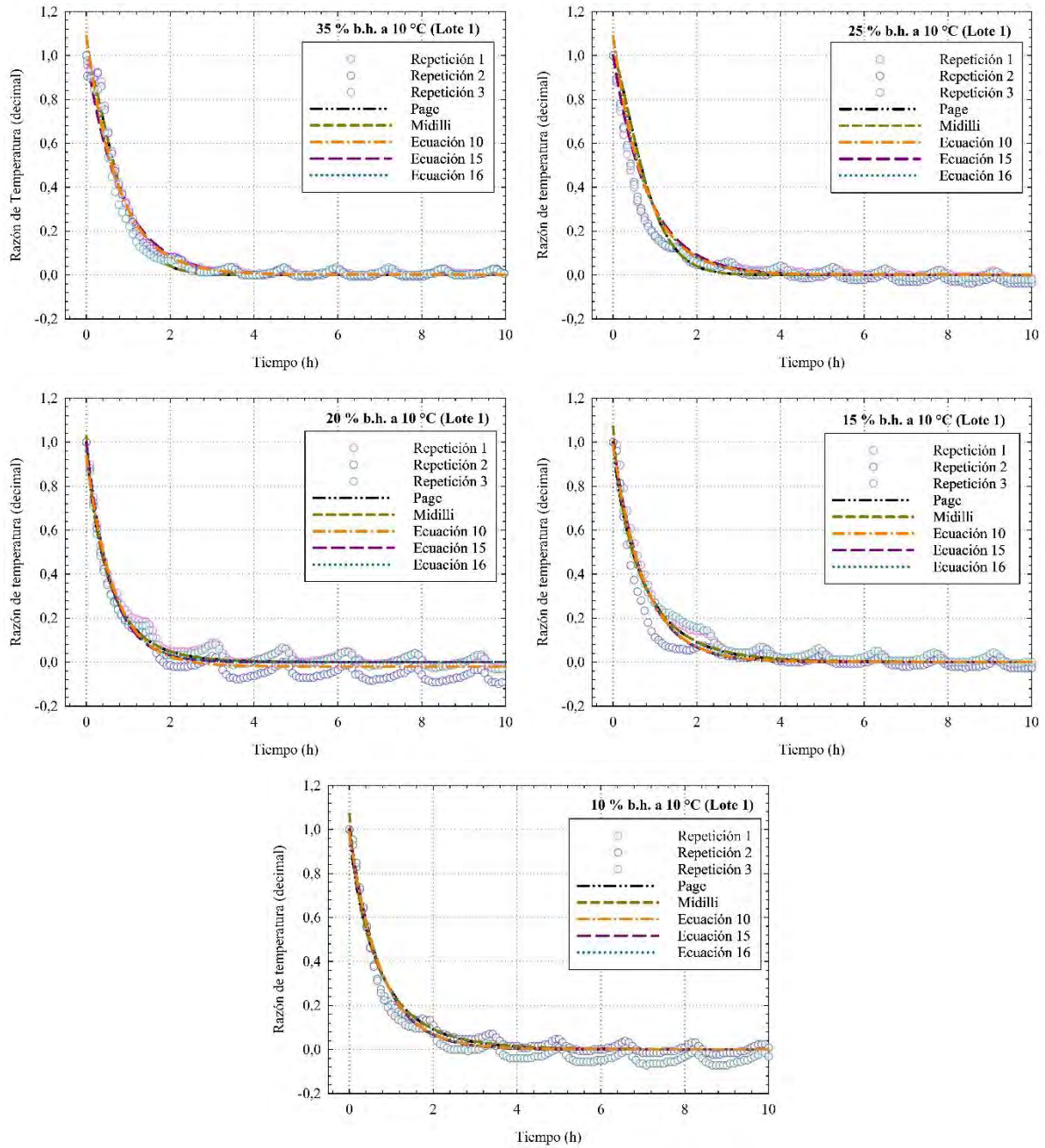


Figura A. 17. Equilibrio en la temperatura del aire en contacto con el café miel del lote 1 a los cinco contenidos de humedad de estudio almacenados a 10 °C.

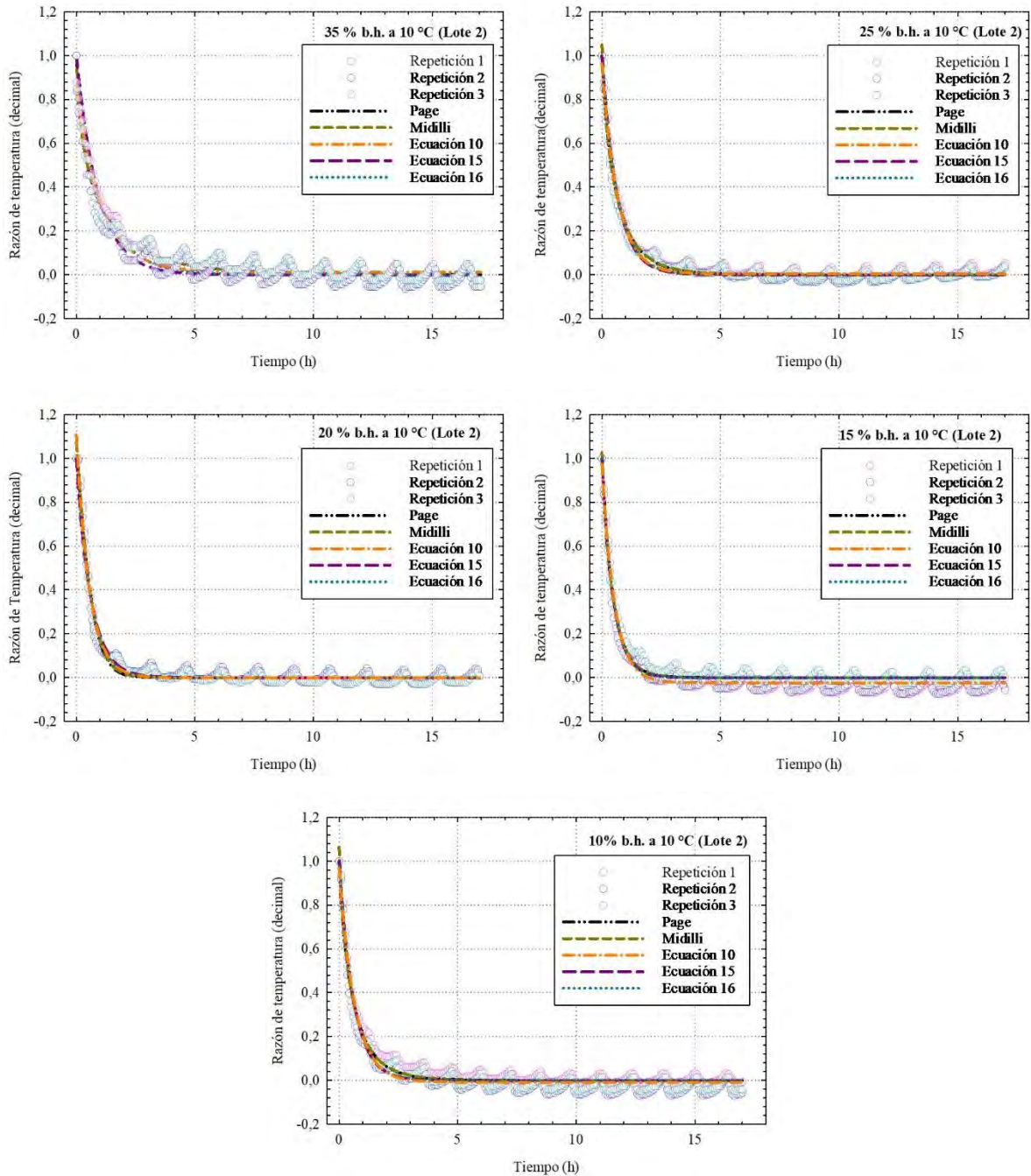


Figura A. 18. Equilibrio en la temperatura del aire en contacto con el café miel del lote 2 a los cinco contenidos de humedad de estudio almacenados a 10 °C.

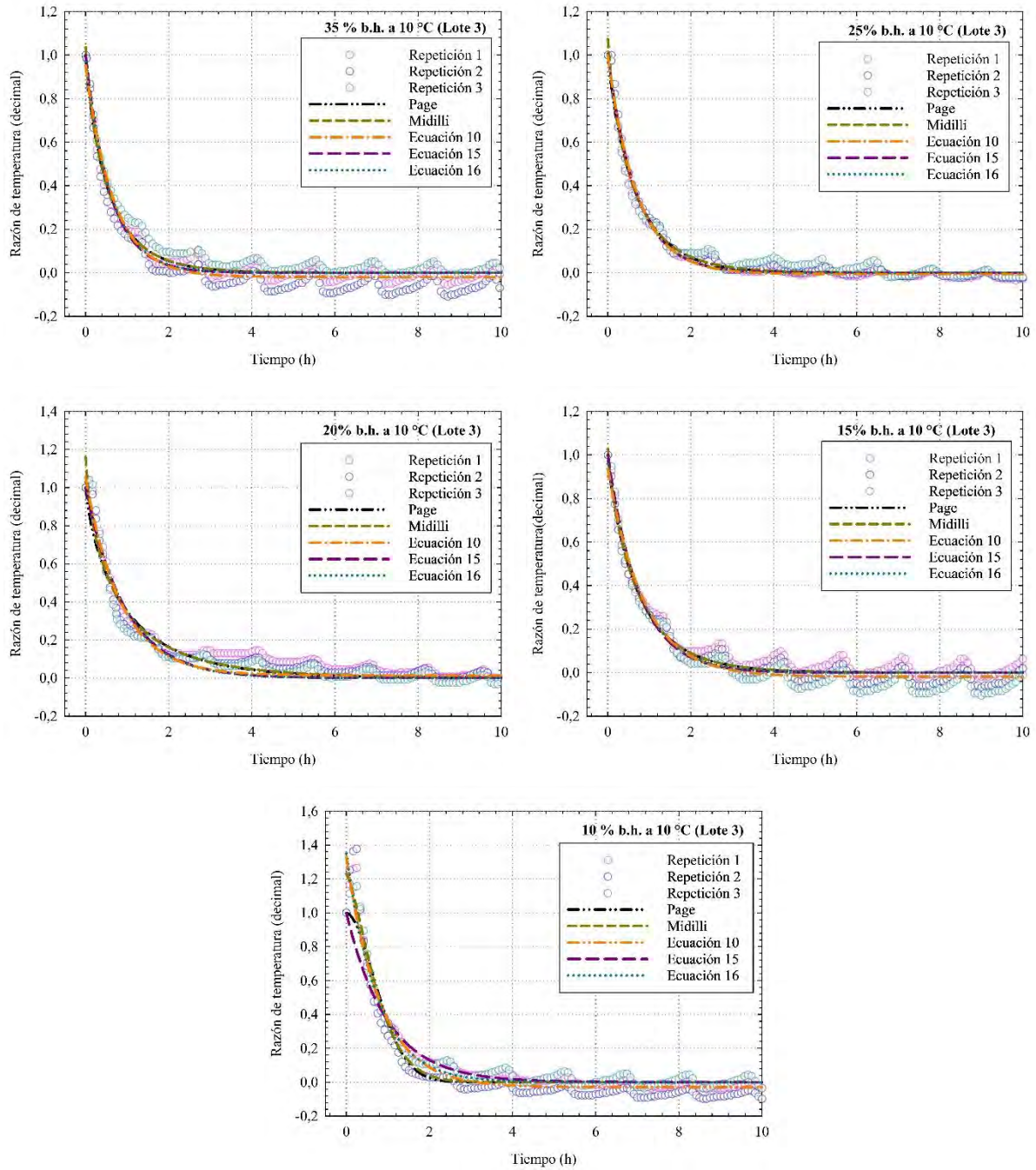


Figura A.19. Equilibrio en la temperatura del aire en contacto con el café miel del lote 3 a los cinco contenidos de humedad de estudio almacenados a 10 °C.

```

1 #Librerías requeridas
2 import numpy as np
3 import matplotlib.pyplot as plt
4 from scipy.optimize import curve_fit
5 import sympy as sp
6 import pandas as pd
7 import sys
8
9 # Define la función de ajuste
10 def f(x, c, a, k, n):
11     return c * (1 - (a * np.exp(-k * x**n))) #Ecuación 5 (Nota: modificar para cada función)
12
13 # Ajusta la curva a los datos observados
14 def ajustar_curva(x, y):
15     parametros_iniciales = (1, 1, 1, 1) # Estimación inicial de los parámetros
16     parametros_optimos, covarianza = curve_fit(f, x, y, p0=parametros_iniciales, maxfev=5000000)
17     #Definición de los parámetros estadísticos
18     pred = f(x, *parametros_optimos) #Predicción o estimación de datos
19     ss_res = np.sum((y - pred) ** 2) #Calcula la variabilidad del valor predicho por el modelo con respecto al valor real.
20     ss_tot = np.sum((y - np.mean(y)) ** 2) #Calcula la variabilidad total del modelo con respecto a la media
21     r_cuadrado = 1 - (ss_res / ss_tot) #coeficiente de determinación
22     n = len(y) #Cant. datos estimados
23     k = len(parametros_optimos) #Cant. de parámetros del modelo.
24     see = np.sqrt(ss_res / (n - k)) # Error estándar de estimación
25     r2_ajustado = 1 - ((1 - r_cuadrado) * (n - 1) / (n - k - 1)) #coeficiente de determinación ajustado
26     return parametros_optimos, r_cuadrado, see, r2_ajustado
27
28 #Función para determinar donde se alcanza el equilibrio
29 def obtener_derivada_cero(x, y1, y2, y3, print_ceros = False):
30     primer_cero = -1
31     x_total = np.concatenate((x, x, x)) # Repeticiones de MR o temp que se tengan
32     y_total = np.concatenate((y1, y2, y3)) #Tiempo de las mediciones
33     print("Len x:", len(x_total), "Len de y_total:", len(y_total))
34
35     #Ajusta la curva a los datos observados
36     parametros_optimos, r_cuadrado, see, r2_ajustado = ajustar_curva(x_total, y_total)
37
38     x_sym = sp.Symbol('x')
39     #Define la función simbólica con los parámetros ajustados
40     c, a, k, n = parametros_optimos
41     f_sym = c * (1 - (a * sp.exp(-k * x_sym**n)))
42
43     print("Parámetros óptimos:")
44     print("c =", c)
45     print("a =", a)
46     print("k =", k)
47     print("n =", n)
48
49     print("El coeficiente de determinación es:")
50     print(r_cuadrado)
51     print("El coeficiente de determinación ajustado es:")
52     print(r2_ajustado)
53     print("El error estándar de estimación es:")
54     print(see)
55
56     f_derivada = sp.diff(f_sym, x_sym) #Deriva la función
57     print("La ecuación de la derivada es:")
58     print(f_derivada)
59
60     # Convierte la función f y su derivada a funciones numpy para graficarlas
61     f_evaluada = sp.lambdify(x_sym, f_sym, 'numpy')
62     f_derivada_evaluada = sp.lambdify(x_sym, f_derivada, 'numpy')
63
64     # Evalúa la función y su derivada en el tiempo
65     f_valores = f_evaluada(x)
66     f_derivada_valores = f_derivada_evaluada(x)
67
68     # Encuentra los índices donde la derivada es aproximadamente cero
69     indices_cero = np.where(np.abs(f_derivada_valores) < 0.1)[0] #Este valor se determina según la precisión del equipo
70     if len(indices_cero):
71         primer_cero = x[indices_cero[0]]

```

Figura A.20. Código para determinación del tiempo de equilibrio higroscópico.

```

72     print("Primer cero es:", primer_cero)
73     # Muestra los puntos donde la derivada es aproximadamente cero
74     print("Puntos donde la derivada es aproximadamente cero:")
75     for indice in indices_cero[:10]: # Toma solo los primeros 10 elementos
76         print(indice, "x =", x[indice])
77
78
79     # Grafica la derivada
80     indices_cero_graficar = indices_cero[0:10]
81
82
83     # Grafico de la función f y su derivada
84     plt.figure(figsize=(12, 6))
85     # Ubicación de la primera grafica (Función ajustada)
86     plt.subplot(1,2, 1)
87     plt.scatter(x, y1, marker='s', color='blue', label="Repetición 1") #Gráfica datos de la repetición 1
88     plt.scatter(x, y2, marker='o', color='orange', label="Repetición 2") #Gráfica datos de la repetición 2
89     plt.scatter(x, y3, marker='^', color='green', label="Repetición 3") #Gráfica datos de la repetición 3
90     plt.plot(x, f_valores, linewidth=2.2, label="Ecuación 5", color='black') #Grafico de la función estimada por el modelo (Ec.5)
91
92     #Formato de la grafica ajustada
93     plt.legend(title = "25 b.h (35 °C)",loc='lower right')
94     plt.xlabel('Tiempo (h)')
95     plt.ylabel("Humedad relativa (%)")
96     plt.grid(linestyle="dotted")
97     plt.ylim(40,95)
98     plt.xlim(-1.5,60)
99     plt.minorticks on() #activa los minor ticks
100    plt.tick_params(which='both', direction='in', top=True, right=True) #muestra los minor ticks hacia dentro
101
102    #Ubicación de la segunda grafica (Derivada ajustada)
103    plt.subplot(1,2, 2)
104    plt.plot(x, f_derivada_valores, linewidth=1.7, label="f'(x)", color='black') #Gráfica la derivada ajustada
105    plt.plot(x[indices_cero], f_derivada_valores[indices_cero], linewidth = 3.5, color='red', label="f'(x)=0") #Señala los puntos donde
106    #Formato de la grafica derivada

```

Figura A.21. Código para determinación del tiempo de equilibrio higroscópico (continuación).